

内容简介

《环境空气质量监测预警系统理论与实践》是一部系统阐述现代环境空气质量监测与预警体系构建、运行及应用的学术专著，由长期从事生态环境监测一线工作的高级工程师李红涛撰写。本书立足于我国生态文明建设与大气污染防治攻坚战的时代背景，紧密围绕国家对环境空气质量精细化管理、科学化决策和公众健康保障的迫切需求，全面整合了环境监测技术、数据处理方法、预测预警模型、网络规划策略及系统集成理念，旨在为环境管理部门、科研机构、高校师生以及相关从业人员提供一套兼具理论深度与实践指导价值的专业参考。

全书共分六章，内容结构严谨、逻辑清晰。第一章从宏观视角出发，界定环境空气质量监测预警系统的定义、特征、发展历程及其在环境治理体系中的战略地位；第二章深入剖析各类监测技术原理，涵盖固定站点自动监测、遥感反演、移动与便携式设备等多元手段，并强调数据质量控制的核心作用；第三章聚焦监测网络的科学布设，系统论述点位选择原则、区域与城市尺度网络设计方法及动态优化机制；第四章重点讲解监测数据的采集、传输、清洗、分析与污染物来源解析技术，突出时空分布规律挖掘与趋势研判能力；第五章是本书的技术核心，详细介绍了统计模型、数值模拟及机器学习等多类预警方法的原理、适用场景与验证评估流程；第六章虽未完整呈现，但从整体架构可推知其将涉及系统集成、业务化运行、应急响应联动及未来智能化发展方向。

本书最大特色在于“理论—技术—应用”三位一体的融合路径。作者不仅梳理了国际先进经验与中国本土实践的演进脉络，更结合自身在武汉市江汉区生态环境监测站多年主持大气污染防治项目的实战经验，将抽象理论具象化为可操作的技术路线与管理策略。书中大量引用最新国家标准、技术规范及典型案例，体现出鲜明的时代性、实用性和前瞻性。对于推动我国环境空气质量监测从“被动响应”向“主动预警”转型，提升重污染天气应对能力，保障公众健康与生态安全，具有重要的学术价值与现实意义。

本书的收官章节由萨如拉和陈官省两位作者共同完成，将视角投向核心素养的评价与语文教育的未来。第九章构建了语文核心素养的评价理论框架，详细介绍了过程性评价、表现性评价的应用，并探讨了素养导向的考试命题改革。最后，提出了高中语文核心素养评价的实施方案，并对核心素养背景下语文教育的未来发展进行了深刻展望。

本书体系完整、内容丰富、理论与实践结合紧密，是新时代语文教师提升专业素养、实施素养导向教学的必备参考书。



PRICE: \$60. 00



环境空气质量监测预警系统理论与实践
Theory and Practice of Environmental Air Quality Monitoring and Early Warning System

李红涛 著

Theory and Practice of Environmental Air Quality Monitoring and Early Warning System

环境空气质量监测预警系统理论与实践

李红涛 著



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

作者简介



李红涛，毕业于武汉大学环境规划与管理专业，本科学历，理学学士，高级工程师（专技五级）。现就职于武汉市江汉区生态环境监测站，任站长。长期从事环境监测工作，具备扎实的监测技术的理论水平和现场操作技能；同时参与或主持多项大气污染防治，环境噪声管理等研究项目，为辖区环境质量提升作出较大贡献，获得国家环境监测“三五”人才证书，被授予国家环境监测“技术骨干”称号。

Theory and Practice of Environmental Air Quality
Monitoring and Early Warning System

环境空气质量监测预警系统理论与实践

李红涛 著



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

CIP INFORMATION

Title: Theory and Practice of Environmental Air Quality Monitoring and Early Warning System

题目：环境空气质量监测预警系统理论与实践

Author: Hongtao Li

作者：李红涛

ISBN: 979-8-90040-184-3

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**Theory and Practice of Environmental Air Quality Monitoring and Early
Warning System**

环境空气质量监测预警系统理论与实践

Address: 100 N Howard St Ste R, Spokane, Wa, 99201. United States

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 15.75

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in June 2026

Printing: First printing in June 2026

**CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL
SCHOLARS**

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher.
Infringement will be prosecuted.

P 前言

REFACE

进入 21 世纪以来,随着我国经济持续高速发展与城镇化进程加速推进,大气环境污染问题日益凸显,尤其是以 PM_{2.5} 和臭氧为代表的复合型污染,已成为制约高质量发展和影响人民健康福祉的重大环境挑战。在此背景下,党中央、国务院高度重视大气污染防治工作,先后出台《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等一系列重大决策部署,明确提出要“构建天地空一体化的生态环境监测网络”“强化重污染天气预报预警能力建设”。环境空气质量监测预警系统,作为支撑科学治污、精准治污、依法治污的关键基础设施,其重要性已上升至国家战略层面。

然而,当前我国在环境空气质量监测预警领域仍面临诸多挑战:监测网络布局尚不均衡,部分区域覆盖不足;数据质量控制体系有待完善;多源异构数据融合分析能力薄弱;预警模型本地化适应性不强;监测—预测—预警—响应链条尚未完全打通。这些问题严重制约了环境管理决策的时效性与有效性。正是基于这样的现实关切与专业使命,笔者结合二十余年在环境监测一线的工作积累,特别是主持或参与多项大气污染防治与噪声管理研究项目的实践经验,撰写了《环境空气质量监测预警系统理论与实践》一书,力图系统回应上述关键问题。

本书的编写秉持“问题导向、技术驱动、系统集成、服务决策”的原则。首先,在理论层面,我们追溯了国际空气质量监测预警体系从“事件驱动”到“网络化监测”再到“智能预警”的演进历程,厘清了监测系统、预测系统与预警系统的概念边界与功能耦合关系,强调现代预警系统必须具备系统性、实时性、动态性、预测性与前瞻性五大核心特征。其次,在技术层面,本书全面覆盖了从传感器前端到数据中心后端的全链条技术要素,既包括传统自动监测站的建设运维规范,也纳入了卫星遥感、无人机、移动走航等新

兴监测手段的应用前景；既详述了经典统计回归与化学传输模型的原理局限，也探讨了人工智能与大数据技术在空气质量短临预报中的突破潜力。再次，在实践层面，本书特别注重可操作性，通过大量图表、流程图与案例分析，展示了如何科学布设监测点位、如何开展污染物来源解析、如何构建本地化预警阈值、如何实现预警信息的分级发布与应急联动。

尤为值得一提的是，本书始终贯穿“以人为本”的治理理念。预警不仅是技术行为，更是公共健康防护的社会行动。因此，系统设计必须兼顾政府决策需求与公众知情权，确保预警信息及时、准确、易懂、可响应。在“双碳”目标与美丽中国建设的新征程上，环境空气质量监测预警系统还将承担起评估减排成效、支撑气候协同治理、服务绿色低碳转型等多重功能。

本书的完成，离不开国家生态环境部、湖北省及武汉市生态环境部门长期以来的政策支持与项目依托，也得益于国内外同行在学术交流中给予的宝贵启发。同时，武汉大学环境学科的深厚积淀为本书的理论框架提供了坚实支撑。

限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

C 目录

CONTENTS

第一章 环境空气质量监测预警系统概述	1
第一节 环境空气质量监测预警系统的定义与特征	1
第二节 环境空气质量监测预警系统的发展历程	5
第三节 环境空气质量监测预警系统的组成与功能	8
第四节 环境空气质量监测预警系统的应用价值	13
第二章 环境空气质量监测技术基础	17
第一节 大气污染物监测原理与方法	17
第二节 空气质量自动监测站建设与运行	24
第三节 遥感监测技术在空气质量监测中的应用	30
第四节 移动监测与便携式监测设备技术	35
第五节 监测数据质量控制与保证体系	41
第三章 空气质量监测网络规划与设计	47
第一节 监测点位布设原则与方法	47
第二节 监测网络优化设计理论	53
第三节 区域空气质量监测网络构建	59
第四节 城市空气质量监测网络设计	63
第五节 监测网络评估与调整	68
第四章 空气质量监测数据处理与分析	73
第一节 监测数据采集与传输技术	73
第二节 空气质量数据质量控制方法	78
第三节 空气质量时空分布特征分析	83

第四节 污染物来源解析技术	87
第五节 空气质量趋势分析与预测	93
第五章 空气质量预警模型与方法	99
第一节 空气质量预警理论基础	99
第二节 统计预警模型与方法	103
第三节 数值模拟预警方法	108
第四节 机器学习在空气质量预警中的应用	112
第五节 预警模型验证与评估	116
第六章 空气质量预警系统构建	121
第一节 预警系统架构设计	121
第二节 预警指标体系建立	125
第三节 预警等级划分标准	130
第四节 预警信息生成与发布机制	134
第五节 预警系统运行维护	139
第七章 空气质量预警响应机制	145
第一节 预警响应体系构建	145
第二节 政府部门预警响应措施	149
第三节 企事业单位预警响应要求	154
第四节 公众预警信息接收与响应	158
第五节 预警响应效果评估	163
第八章 典型区域空气质量预警实践	169
第一节 京津冀地区空气质量预警实践	169
第二节 长三角地区空气质量预警实践	174
第三节 珠三角地区空气质量预警实践	178
第四节 重点城市空气质量预警案例分析	182
第五节 区域联防联控预警机制	188

第九章 空气质量监测预警系统评估	193
第一节 监测预警系统性能评估指标	193
第二节 预警准确率评估方法	198
第三节 系统响应时效性评估	204
第四节 预警效果社会经济评估	208
第五节 系统持续改进机制	213
第十章 环境空气质量监测预警系统展望	219
第一节 空气质量监测技术发展趋势	219
第二节 预警模型与方法创新方向	224
第三节 智慧环保与监测预警系统融合	229
第四节 国际合作与经验借鉴	234
第五节 未来监测预警系统发展路径	238
参考文献	243

第一章 环境空气质量监测预警系统概述

第一节 环境空气质量监测预警系统的定义与特征

一、环境空气质量监测预警系统的基本概念

（一）系统的定义与核心内涵

环境空气质量监测预警系统是集现代传感器技术、通信技术、计算机科学、环境科学等多学科知识于一身的综合性的技术平台。可以全天候、自动化、高精度地对区域内大气污染物浓度、时空分布、变化趋势进行监测、预测。该系统的核心内容不单单是简单的数据监测，更重要的是它的预警预见性以及主动性。其实质就是用大数据技术对海量、实时监测数据进行深度挖掘和智能分析，结合先进的空气质量预测模型，科学预测未来一段时间内空气质量状况及可能出现的重污染风险，及时向环保部门和社会公众发布预警信息，提供决策支持。

这并不是一些简单的技术工具集合，而是一个非常复杂的业务流程系统。它把数据采集、传输、存储、分析、预测、预警、发布、评估这些环节有机地结合了起来，形成了一个闭环的管理与响应体系。系统最终目的就是将传统被动的污染治理变为主动的风险防范，依靠科学预警引导社会各方面采取应对措施，例如启动应急预案、调整工业生产活动、引导公众健康防护等，最大限度降低空气污染事件造成的不良影响，是实现大气环境精细化、智能化管理的关键支撑。

（二）系统的主要构成要素

一个完整的、高效的环境空气质量监测预警系统一般由相互联系、相互配合的几个主要部分组成。各部分各尽其职、各负其责，保证整个系统一直正常运转。

环境空气质量监测预警系统主要构成要素

序号	要素名称	主要功能描述
1	感知与监测网络	获取一手数据的“触角”，由遍布监测区域的空气质量自动监测站（点）和微型设备组成，检测颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、臭氧、一氧化碳等污染物。
2	数据采集与传输网络	负责将前端监测网络采集到的原始数据，通过有线或无线通信方式安全、稳定、快速地传输到数据中心，并传送设备状态信息。
3	数据中心和业务平台	系统的“大脑”，对大量监测数据进行接收、存储、清洗、审核、管理和分析。承载数据可视化、统计分析、预测模型库、预警判定引擎等核心功能。
4	预测预警与决策支持模块	系统的核心价值所在，包含各类空气质量预测模型，根据监测数据和气象情况预测未来空气质量趋势，当达到预警阈值时自动生成预警信息并提供决策支持。
5	信息发布与服务系统	系统的窗口和喉舌，将审核确认的空气质量实况、预报预警信息及健康防护建议，通过官方网站、手机应用程序、社交媒体、户外显示屏等渠道广泛传播。

从上表可知，感知与监测网络为系统的数据基础，也是获取一手信息的“触角”。它由分布在各个监测区的许多个空气质量自动监测站组成，各个监测站都有能够检测出颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、臭氧、一氧化碳等污染物的专业分析仪器。感知层已经不再只是国控、省控的标准化监测站，大量的微型监测设备依靠传感器技术以低成本的方式加入其中，形成密集的网络结构来捕捉污染物的时间、空间变化。

2. 数据采集和传输网络: 这部分负责把前端感知监测网络收集到的原始数据，用有线或者无线通信方式(光纤、4G/5G等),安全、稳定、快速地传送到数据中心。数据传输的实时性、完整性是保证系统后面分析、预警时效性的前提。这个网络也要传送设备的状态信息，这样就可以对前端设备进行远程诊断和质量控制。

3. 数据中心和业务平台即系统的大脑，对大量监测数据执行接收、存储、清洗、审核、管理、分析的操作。业务平台是承载所有核心功能的软件，其中有数据可视化、统计分析、预测模型库、预警判定引擎等各个功能模块。在这里复杂数据转变成直观图表和有用的信息，给预警和决策提供支撑。

4. 预测预警和决策支持模块：系统价值所在的部分。该模块包含数值模型、统计模型等各种空气质量预测模型，可以对未来几小时或者几天内的空气质量变化趋势进行预测。当预测结果达到预警阈值的时候，系统自动生成预警信息，利

用信息发布系统向管理层提供应急处理建议以及决策支持。

5. 信息发布与服务系统：是系统与社会的窗口和喉舌，把审核通过的空气质量实况、预报预警信息、有关健康防护建议通过官方网站、手机应用程序、社交媒体、户外显示屏等方式及时、广泛的向社会公众和有关管理部门公布，保障公众的知情权，引导社会共同参与大气环境保护。

（三）系统及相关概念的辨析

讨论环境空气质量监测预警系统的时候，需要明确区分几个相关但内涵不同的概念，以免造成混淆，从而更好地认识其独特之处和综合性。

第一是和环境空气质量监测系统区分开来。传统的环境空气质量监测系统，主要是“监”，即通过布设的监测站点网络，客观、准确地记录某一时点、某一点的污染物浓度数据，其主要成果是过去和现在的空气质量状况报告。环境空气质量监测预警系统在此基础上实现功能扩展和智能化升级，不只具备监测功能，更重视用数据进行深度分析、模型预测，实现了从描述现状到预测未来的跨越，其价值在于预警能力，即提前发现潜在污染风险并触发响应。

其次是对“空气质量预测系统”的辨析。空气质量预测系统用各种数学模型（统计模型、化学传输模型等）预报未来空气质量状况。它关注的是预测算法的准确度和时效性。但一个独立的预测系统一般没有和实时监测网的无缝对接，也缺少标准的预警发布、决策支持流程。环境空气质量监测预警系统是完整的体系，把实时监测、动态预测、应急响应决策支持紧密结合起来，形成数据输入、处理决策、输出的闭环，注重各个子系统之间协同工作、信息联动。

需要与大气污染源在线监测系统区分开。污染源在线监控系统监控的对象是特定工业企业、排污口等固定的污染源的排污情况，其目的是监管企业是否达标排放。环境空气质量监测预警系统检测的是开放环境中环境空气质量，体现的是区域内所有污染源（工业、交通、生活、自然源等）综合影响下的环境质量情况。两者监测的对象、目的不同，但数据可以互相验证、互相补充，共同为大气污染防治的最终目标服务。

二、环境空气质量监测预警系统的基本特征

（一）系统性与整体性特征

环境空气质量监测预警系统最突出的特征就是系统性、整体性。它不是一些

独立的功能模块简单地堆砌起来的，而是一个由许多相互依赖、相互影响的子系统所组成的有机巨系统。从前端传感器探头到最后的数据报告，各环节环环相扣，形成一个完整的数据流和业务链。监测子系统所提供的数据成为预测子系统的基础输入，预测子系统的输出又成为预警子系统进行判断的依据，预警信息直接服务于决策支持和信息发布子系统。

整体性要求在顶层设计时，数据标准、接口协议、处理流程等各方面要达到高度的统一协调，使得信息在系统内部可以无障碍、高效地流转。任何一个环节的缺失或者故障，都会影响到整个系统的效能。监测数据一旦不准确，那么之后所做出的预测、预警就无从谈起，可靠性丧失；如果信息发布渠道不畅通，即便有准确的预警也起不到任何社会作用。因此，必须从全局、整体的角度来规划、建设、运维该系统，保证系统内部各个要素的协同联动，从而实现“1+1 > 2”的综合效果，为大气环境管理提供全方位、立体、一体化的支撑。

（二）实时性与动态性特征

实时性、动态性是环境空气质量监测预警系统与传统环境评价方式的区别，也是环境空气质量监测预警系统实现预警的生命线。实时性就是指数据采集、传输、处理、发布的时间分辨率为实时的。现代化的自动监测设备可以以分钟级或者更高的频率进行连续采样、分析，并可以近实时地将数据传送到中心平台。这样就可以及时发现污染物浓度的变化、突然发生的污染事件，为快速应对和处理污染事件赢得宝贵的时间。

动态性就是系统对环境变化所具有的适应、反应能力。空气质量受到气象条件、污染源排放强度、化学反应等很多因素的影响，是动态变化的过程。监测预警系统应该对整个过程动态进行跟踪，预测模型要用最新的监测数据、气象数据来不断修正和更新。系统是变化的，预警的阈值、应急措施会随季节、污染特点、控制目标等的变化而变化。实时感知和动态响应相结合，使系统不再是静态的观察工具，而是一个可以和环境变化过程相互作用、有生命力的管理系统。

（三）预测性与前瞻性特征

预测性、前瞻性是环境空气质量监测预警系统的价值体现，它是将环境管理从以前的“事后治理”转变成现在的“事前防范”。该系统把先进的空气质量数值预报模型和统计预报模型结合起来，可以全面考虑污染源排放清单、气象条件的变化、大气化学转化过程、区域传输等诸多复杂因素，对今后一段时间内（一

一般为几小时到7天)的空气质量状况、主要污染物及其时空分布做出科学的预估。

前瞻性的能力给环境决策者提供采取预防性行动的时间窗口。重污染天气过程来临时,系统就会发出预警,政府部门有充足的时间启动应急预案,提前安排工业企业限产停产、实施机动车限行、叫停建筑工地扬尘作业等污染减排措施,削峰降频,减轻重污染过程的严重程度。面向公众的前瞻性预报预警信息可以让公众提前采取健康防护措施,减少不必要的户外活动,佩戴防护口罩等,体现了以人为本的思想。这样,大气污染防治工作就变得很高效、科学了。

第二节 环境空气质量监测预警系统的发展历程

一、国际空气质量监测预警的演进阶段

(一) 起步阶段: 污染事件驱动的被动监测

国际上最早出现空气质量监测的意识,是由于一系列惨重公害事件。二十世纪中期,工业革命带来的环境问题集中爆发,比利时马斯河谷烟雾事件、美国多诺拉烟雾事件、震惊世界的伦敦烟雾事件等造成大量人员伤亡的极端污染惨剧,迫使各国政府和社会认识到空气污染的严重危害。本阶段监测完全是被动的,主要目的在于查明事故原因、评价健康影响。

此时的监测手段十分简陋,一般在污染事件发生之后,才采用简易的化学方法在固定地点取样分析。监测的污染物种类只有二氧化硫、总悬浮颗粒物等少数几种主要因子。缺少连续、系统的监测工作,也无预警作用。其最显著的特征就是亡羊补牢,监测活动是事后调查的手段,目的是为某个污染事件提供证据,为之后的责任追究以及初步治理提供依据,是整个监测预警体系的萌芽形态。

(二) 发展阶段: 网络化与标准化监测体系建设

伴随着环保法规日趋完善、环境科学不断进步,从二十世纪六七十年代开始,欧美等发达国家率先进入了空气质量监测网络化、标准化建设阶段。此时期的主要目标就是创建能长期、连续、稳定运行的区域乃至全国性的监测网络,以获得有代表性、可比性的空气质量数据,为环境状况评价和污染控制策略的制定提供科学依据。

美国按照《清洁空气法》建立全国环境空气监测站网,欧洲各国也相继建立

各自的监测站网。这一时期的重要进步就是制订了监测技术标准和建立了质量保证、质量控制系统。自动化连续监测仪器代替了以前的手工采样分析，数据可以及时得到。监测的污染物种类也越来越多，氮氧化物、臭氧、一氧化碳等光化学烟雾和机动车尾气污染物也被纳入常规监测范围。

网络化监测体系使得对污染物的时空分布情况能够进行系统的分析，可以较好地对区域性的污染输送状况进行评价，为跨区域联防联控提供数据支持。尽管当时的预警能力还处在初级阶段，主要是依靠监测数据阈值判断和简单外推来完成，但是它为之后的数值模型预报奠定了良好的观测基础，标志着空气质量管理工作的被动应对到系统化、科学化的主动管理的转变。

（三）成熟阶段：智能化与精准化预警系统应用

进入 21 世纪以后，计算机技术、卫星遥感技术、大气科学等学科飞速发展，国际空气质量监测预警系统也步入了智能化、精准化应用的新时期。此阶段最突出的特点就是形成了监测、预报、预警、评估一体化的完整体系，其核心能力是能对未来空气质量进行高时空分辨率的准确预测，提前发布预警信息指导社会采取预防性措施。

现代化预警系统把多种先进技术融合起来。地面监测网络做到了“全覆盖”，监测指标也从简单的数量增加到颗粒物化学组分、挥发性有机物等复杂的组分。天基卫星遥感技术可以得到宏观尺度上的污染物分布和输送状况，地面激光雷达等遥感设备可以对污染进行垂直结构的三维探测。这些天地一体化的立体观测数据，给数值预报模型提供前所未有的丰富输入。

在大气化学、物理过程、气象预报等空气质量数值模型(CMAQ、WRF-Chem等)的基础上成为预报预警的主要工具。人工智能，机器学习，大数据分析技术的使用，使得模型对复杂的非线性过程的模拟和预报精度大大提高。系统可以做到数天乃至更长时间的每小时、公里级的空气质量预报，并可以动态评价各种应急减排措施的效果，给政府科学决策和公众健康防护提供前所未有的精确指导。

二、我国空气质量监测预警的发展脉络

（一）从重点城市监测到全国性网络覆盖

我国最早的空气质量监测工作始于上世纪八十年代，最初是为了酸雨研究和重点工业城市污染源监管而开展的。当时的监测网络布局零散，站点少，技术手

段落后，主要分布在北方少数重工业城市和南方酸雨控制区，以手工采样、常规污染物监测为主。该阶段已有了初步的早期数据，但是还没有形成全国性的系统认识。

本世纪初的重要转折点是 2008 年北京奥运会的举办，大大加速了我国空气质量监测能力现代化进程。为了履行绿色奥运的承诺，在很早的时候北京及周边地区就建立起一种自动化、能监测各种污染物的先进的监测网络。从这里开始，我国开始在全国范围内加快推行空气质量自动监测系统。

在进入“十二五”和“十三五”之后，由于公众对于 PM2.5 问题的关注度不断提高，因此国家以前所未有的决心和力度加速推进监测网络的建设。到 2015 年底已经基本形成覆盖全国地级及以上城市的国家空气质量监测网，设置了超过 1400 个国家环境空气质量监测点。站点实行统一标准、统一质控、统一发布，成为世界上最大的空气质量监测网之一，完成了从点状、区域性监测到全国性网络化监测的历史性转变。

（二）从常规污染物监测到复合污染物特征分析

监测网络逐渐完善之后，我国空气质量监测的内涵也不断加深，监测重点从原先的煤烟型污染物转向了更为复杂的复合型大气污染。早期的监测主要是二氧化硫、氮氧化物、总悬浮颗粒物，这些是当时以煤炭燃烧为主的污染。

进入 21 世纪以后，由于经济结构的改变以及机动车保有量的急剧增加，以细颗粒物和臭氧为代表的区域性、复合型大气污染问题开始显现出来。为了适应这种新形式，我国对空气质量的评价体系也做了一项重要的改革。2012 年新的《环境空气质量标准》发布，最大亮点有以下几点：

2012 年《环境空气质量标准》亮点

亮点一	将 PM2.5、臭氧（8 小时平均）和一氧化碳纳入常规监测和评价指标
亮点二	收紧了 PM10 等原有污染物的浓度限值，与国际标准进一步接轨

该标准的实行，是我国空气质量管理步入以健康风险为导向的新时期。目前监测工作的前沿已经进入了对挥发性有机物、大气氨、颗粒物化学组分等的在线监测和分析，目的是探究重污染天气和臭氧污染形成机理，从而给源解析以及一市一策的精准治理提供科学依据。

（三）从数据发布到重污染天气预警体系建设

随着监测网络的逐步完善和评价标准的逐步建立，我国空气质量管理模式也

由原来单纯的发布数据，向主动开展重污染天气预警应急体系建设转变。早先空气质量数据大多被当作内部用途或者迟滞公开，公众感知和官方信息之间存在时间差。信息公开化进程的加快，特别是全国空气质量实时发布平台的开通，使公众可以随时获得所在地城市空气质量指数信息，环境信息的透明度明显提高。

更重大者为建立起完备的重污染天气预警应急体系。由于秋冬季经常发生区域性重污染过程，国家和地方先后制定重污染天气应急预案。该体系把空气质量预报作为核心，设置了蓝、黄、橙、红四级预警，并与具体的应急措施相联系。一旦预测到未来会发生重污染天气，相关地区就会提前启动应急预案，采取工业企业停产限产、施工工地停工、中小学停课、机动车限行等强制性的减排和健康防护措施。这一体系一形成并有效运转起来，对重污染过程实施“削峰降频”，极大地减轻了重污染天气对社会经济和公众健康的冲击，是我国环境治理体系和治理能力现代化的集中体现。

第三节 环境空气质量监测预警系统的组成与功能

一、系统的硬件组成与功能

（一）数据采集前端：监测站与传感器网络

数据采集前端是整个系统感知环境空气污染物浓度及气象参数的“眼睛”，主要任务就是准确采集环境空气中污染物浓度及其他相关气象参数。这一层有两大类设备：标准监测站、微型传感器网络。

标准监测站，一般称国控点或省控点，装备着国家标准的精密分析仪器，可以对二氧化硫、二氧化氮、可吸入颗粒物、细颗粒物、臭氧和一氧化碳等常规污染物进行高精度测量。这些都是数据准确性的参照站，因为建设及维护成本较高，所以布点比较稀疏，无法对整个区域的污染细节进行充分覆盖。

为了克服标准监测站点的空间分辨率的不足而提出了微型传感器网络。该类网络是由大量的低成本的小型传感器节点组成的，可以实现高密度网格化的部署，从而可以对污染物在城市范围内的时空分布进行更加细致的捕捉，对于识别局地污染源、追踪污染传输路径具有重大意义。微型监测站一般采用电化学或者光学散射原理的传感器，虽然其精度、稳定性不如标准站，但通过和标准站的数据动

态校准与数据融合，可以大幅度增加整个监测网络的覆盖面及时空分辨率，为精细化管理与预警打下基础数据支持。不管采用标准站还是微型站进行数据采集，都要保证全天候、自动连续工作，以保证数据的完整性、连续性。

这些前端设备就宛如城市里的哨兵一样，组成了数据采集的第一道防线。标准监测站就像是一个将军，可以准确地、及时地给出报告。遍布各处的传感器网络，就像侦察兵一样，随时把战场上的每一个微小变化上报出去。两者配合使用就形成了立体的、多层次的空气质量监测感知体系，为后面的数据分析、预警决策打下了坚实的基石，使对污染事件的观察从“点”扩展到了“面”。

（二）数据传输网络：通信链路与协议

数据传输网络是连接数据采集前端与后端处理中心的“神经网络”，主要负责把大量监测数据准确、快速、安全地传输到后端处理中心。前端设备是感官，传输网络是把感知信号传递给大脑的神经通路。该网络采用有线、无线相结合的方式满足不同的监测场景。

在建设条件允许的情况下，如存在固定的国家级或者城市级监测站，一般会以光纤等有线通信方式为主，因为光纤通信带宽大、延时小、稳定性好，可以保证核心数据的稳定回传。

广大的地理区域中，特别是布设了很多微型监测站组成的网格化监测系统里，无线通信技术起着举足轻重的作用。物联网技术发展以后，由于4G、5G等蜂窝网络技术具有覆盖面积大、部署方便等特点，因此被广泛使用。同时低功耗广域网技术，窄带物联网、LoRa等，由于低功耗、大连接、广覆盖、强穿透等特点，在环境监测方面得到迅速的推广。窄带物联网依靠已有的蜂窝网络设施，可以实现快速部署、广域覆盖；LoRa可以让用户自建私有网络，对于信号覆盖不到的偏远地区或者需要减少长期通信费用的场景来说，具有明显的优势。使用各种技术的组合，保证了无论是在城市中心还是偏远郊区，所有的监测数据都可以被采集并传送到回去。数据传输的及时性、完整性是预警系统发挥时效性的物质基础，任何一个环节的延误或者中断都会造成预报不准确、预警发布晚。

（三）数据处理中心：服务器与存储设备

数据处理中心是整个预警系统的“大脑”和“记忆库”，所有前端采集的数据最后都会在这里被存储、计算、处理。其硬件基础主要有高性能服务器集群和大规模存储系统。这些硬件设备为上层复杂的软件应用和模型运算提供了强劲

算力支持和安全的数据保障。由于环境监测数据存在海量数据以及高并发写入特性，因此数据处理中心的建立必须要有很强的可扩展性和可靠性。

服务器集群一般由运行空气质量模型的计算服务器、接收和分发数据的应用服务器、管理数据库的数据库服务器组成。服务器需要有强大的处理器、图形处理器计算能力，才能支持复杂的 CMAQ、WRF-Chem 大气化学传输模型以及 LSTM 机器学习算法的高效运算。数据量呈爆炸式增长，越来越多的机构用到了云计算平台，它具备弹性伸缩的计算能力以及专业的运维服务，使本地数据中心的建设及维护成本减少、系统的灵活性、可靠性得以提升。

关于数据存储系统要处理两种类型的数据，即关系型数据和时间序列数据。所以存储架构一般采用混合模式。海量的、按时间顺序产生出来的监测数据，比如每分钟或每小时的污染物浓度值，最适宜存放在专门的时间序列数据库里，因为时间序列数据库对高频写入和时间查询做了优化。结构化元数据，比如站点信息、设备参数、用户信息等一般用关系型数据库管理。为了保证数据的安全和持久性，会使用磁盘冗余阵列、定期备份、异地容灾等方法来防止由于硬件故障造成的重要历史数据的丢失，保证长期趋势分析和模型训练所需要的完整的数据记录。

二、系统的软件组成与功能

（一）基础支撑平台：操作系统与数据库

基础支撑平台给上层应用提供了一个稳定可靠的运行环境，是整个软件系统的基础。该平台主要是指服务器操作系统以及数据库管理系统。

从操作系统角度来说，因为稳定性、安全性、性能等各方面原因，Linux 发行版（CentOS、Ubuntu Server 等）才是部署后台服务、数据处理任务的主流选择，而且开源特性以及强大的社区支持也为系统定制开发、长期维护带来了方便。部分系统中使用 Windows Server，是因为其具有良好的用户界面以及商业支持。

数据库是数据管理的核心，选择好数据库才能保证数据存取效率，从而保证整个系统的性能。环境监测预警系统所处理的数据都具有明显的时序性，所有数据点都带有时间戳。因此数据库的选择一般会采用混合架构：

常见数据库类型及其应用场景

数据库类型	主要用途	特点	示例产品
时间序列数据库	存储和处理海量带有时间戳的监测数据	对高并发写入和基于时间范围的高效查询进行优化,适用于数据采集频率高、数据量大的场景	InfluxDB, TimescaleDB
关系型数据库	存储结构化元数据,如站点信息、设备参数、用户信息等	数据结构固定,事务处理能力强,查询语言灵活,适用于需要保证数据完整性与一致性的场景	PostgreSQL, MySQL

从上表可知时间序列数据库是专门用来处理和保存时间序列数据的,比如 InfluxDB、TimescaleDB 等等,非常适合存储大量的监测数据。它们对高并发写入和时间范围的高效查询做了优化,可以很好地处理每秒上万的数据点写入请求,也可以快速回答有关历史数据的聚合、降采样等分析查询。

关系型数据库,例如 PostgreSQL 或者 MySQL,主要是用来存放结构化的元数据。数据包括监测站点的经纬度、设备型号、维护记录、用户信息、权限设置等,数据结构比较固定,查询逻辑比较复杂。关系型数据库凭借强事务处理能力、灵活的查询语言可以很好地保证数据的完整性及一致性。

(二) 核心应用平台: 数据处理与分析模型

核心应用平台是对大量的原始数据进行深度加工、智能分析,最后得出空气质量评价、趋势预测、污染溯源等一系列结果的平台。该平台功能的实现要依靠复杂的数据处理流程以及高级分析模型。

对入库的原始监测数据进行严格的清洗和质量控制,剔除由于设备故障或者传输错误所导致的异常值,对于缺失的数据进行插补,做好数据的有效性检查工作,保证进入模型的数据都是有效的。

数据经过预处理之后就进入分析模型进行计算。系统会使用多种模型相结合的方式满足不同的分析需求。ARIMA 模型属于统计模型的一种,根据历史数据的时间序列特征进行短期预测,计算速度快、部署简单。物理化学模型又称为确定性模型,如社区多尺度空气质量模型、化学天气研究与预报模型等,是目前业务化预报的主流。模拟大气运动、化学反应、污染物扩散、沉降等复杂的物理化学过程,利用污染源排放清单、气象预报数据,可以给出未来几天污染物浓度时空分布的详细预报。

多样的模型结合使用,使得系统不仅可以回答现在的空气质量状况,也能预

测将来的空气质量情况，甚至可以探索性地回答污染来自何处，为决策者给出科学的预警依据。模型的准确性、可靠性是预警系统能否起作用的前提，因此模型的不断优化、迭代是平台运维的工作重点。

（三）人机交互平台：可视化与信息发布系统

人机交互平台作为连接系统功能和用户的桥梁，它用直观易懂的方式把后台复杂的计算结果展示给不同的用户角色，准确及时地将预警信息传递给公众和相关管理部门。平台设计的好坏直接影响系统的可用性以及最终效果。它主要由数据可视化系统和信息发布系统两大部分组成，是预警系统中的“仪表盘”和“广播站”。

数据可视化系统是做出决策的工具。利用地理信息系统技术，把各个监测站点上实时数据和模型预测结果叠加到电子地图上，用不同的颜色渲染或者等值线来表现污染物浓度分布图、空气质量指数热力图等，使管理者能一目了然地看到整个区域空气质量状况和空间差异。同时平台也提供了多种的数据钻取分析，用户可以交互式的仪表盘查看某个站点或者某个区域的历史数据曲线，污染物组分占比饼图，风向与污染物关系玫瑰图等，发现数据背后隐藏的规律与趋势。以图示方式呈现数据，可以很大程度上提升数据分析以及决策会商的效率。

信息发布系统是预警信息传递到最后一公里的主体。当系统判断需要发布预警的时候，信息就会通过该系统自动或者半自动地推送到各个渠道。公众可以通过官方网站、手机应用软件、社交媒体账号、城市电子屏幕等多种渠道获得目前空气质量情况、预警等级和健康防护建议。对于政府管理部门（交通部门、住建部门、工信部门等）、重点排污企业而言，通过短信、专用工作群、内部平台等方式向具体对象发送预警信息和应急响应指令，保证相关责任人按预定的应急预案立即实行应急。平台大体都会具备用户权限管理的功能，不同的用户只能访问、操作自己权限范围内的信息，从而保证了平台的安全性以及管理的规范性。

第四节 环境空气质量监测预警系统的应用价值

一、在环境管理决策中的应用价值

（一）支撑大气污染防治科学决策

环境空气质量监测预警系统实现了大气污染物全天候、高密度、多参数的连续自动监测，彻底改变了过去人工、间断性监测的不足。大量的、高时空分辨率的数据给科学决策打下了一个前所未有的坚实基础。经过对监测数据的分析，管理者可以知道这个地区的主要污染物浓度水平、空间分布和时间变化趋势，能确定污染最严重的地方和时间段，从而从依靠直觉决策变为有据可依。

系统用先进的数据可视化方式把复杂的监测数据用污染地图、浓度热力图、趋势曲线等直观的形式呈现出来，使决策者对区域空气质量状况有清晰、全面的认识。结合源解析技术、清单数据，还可以分析出不同的污染源对空气质量影响的贡献率，精准地找到造成环境问题的病灶所在，工业排放、机动车尾气还是扬尘污染都可以被量化。

以证据为基础的决策支持，使得大气污染防治工作更有针对性、科学性。系统如果预见到未来几天会遇到重污染天气，就会提前发出预警，给政府留出启动应急减排措施的宝贵时间。决策者可以依据系统给出的污染来源及贡献分析，制定出不同的控制方案，对主要污染源采取精准有效的减排措施，避免以前粗放的管理方式给社会经济正常运转造成干扰，最终达到环境效益和社会效益的统一。

（二）评估环境政策实施效果

任何环境政策的生命力都在于它最终的实施效果。环境空气质量监测预警系统就提供了一种客观的量化的评判标准。对政策实施前后空气质量数据进行跟踪分析，可以清楚地看出各项大气污染防治措施所取得的效果，从而直接提供出改善调整政策的参考依据。这种方式闭环管理的体现是环境治理体系、治理能力现代化。

以一个城市开展“煤改气”工程、淘汰老旧机动车或者划定高排放车辆禁行为例，监测系统网络可以很快地捕捉到相关区域二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等特征污染物浓度的变化。根据统计分析可以得到政策对环境的影响效果。量化评价比传统的估算模型更可靠，给决策者提供评价政策是否达到预期、是否需要

加大政策力度或者调整政策方向的、不可置疑的科学依据。从长远来看，系统累积的长期监测数据可以反映能源结构调整、产业升级等宏观战略对区域空气质量产生的深远影响，也可以为检验国家或者地区层面环保战略是否正确、有效提供重要依据。

（三）优化环境执法与监管资源配置

环境执法和监管是保证各项环保政策法规得以落实的保证。环境空气质量监测预警系统依靠它的千里眼功能，大大提高了环境执法的准确度和效率，使有限的监管资源能够用在最需要的地方，真正做到好钢用在刀刃上。传统的现场巡查费时费力并且具有一定的盲目性，数据驱动的监管模式彻底改变了这种情况。

系统可以实时检测出污染物浓度异常高的点位，这些点位很有可能是违法排污口或者没有得到有效控制的污染源。监管部门按照系统发出的异常预警信息锁定目标区域，派遣执法人员进行查验，从而大大提高执法精准度。从而由以往的“大海捞针”式的被动执法转变为依据线索的主动出击。

环境执法应用场景表

应用场景	传统模式	监测预警系统
发现偷排超排	随机巡查，效率低下	实时警报，精准定位
安排巡查重点	经验判断，覆盖盲区	热点分析，科学规划
跨区域污染追溯	困难，需大量人力	数据溯源，边界清晰
违法证据获取	取证困难，易狡辩	连续数据，证据链完整

从上表可以看出，具体应用体现在如下几个方面：

1. 系统可以立即发现工业园区或者某个企业附近污染物浓度突然变大，并向相关执法部门发出警报，给出具体的时间和地点信息，为执法人员及时查找偷排、超排等违法者提供帮助。
2. 根据系统给出的污染热点图、污染物时空分布情况，环境监管部门可以合理安排日常巡查的重点地区、重点时段、巡查次数，把有限的人员、物资力量首先集中到污染风险最严重的环节上，以达到最好的监管效果。

二、在社会经济发展中的应用价值

（一）促进产业结构优化与绿色转型

严格的环境标准、透明的监测数据一起组成了促使产业结构升级的强大动力。

环境空气质量监测预警系统给出的连续公开的排放数据,使高污染、高能耗的落后产能无处遁形,产生了巨大的环保合规压力。为了达到越来越严格的空气质量标准,企业不能再继续使用粗放的生产方式,只能增加资金投入进行技术改造和工艺更新。由于环保压力倒逼而产生的创新需求,直接催生了节能环保产业市场,加快了清洁生产技术以及高效末端治理设备的研发和应用,从而从宏观上推动整个工业体系向绿色、低碳方向发展。

系统所具有的监测与评价功能,可以给区域产业布局规划提供前瞻性的指导。政府在做城市规划、产业园区选址、重大项目准入决策的时候,可以用监测数据来评价区域的环境承载力,用模型模拟出不同产业布局方案下未来空气质量的变化情况。按照环境容量开展科学规划有利于引导高排放产业向环境容量较大、扩散条件好的区域转移,或者从源头上阻止其在环境敏感区的发展,促使绿色、高科技产业在核心城区或者生态功能区集中发展,进而形成符合环境承载力的、可持续发展的现代化产业空间布局。

（二）提升城市可持续发展能力与形象

空气质量好坏、生活环境是否宜居,已经成为评价一个城市现代化程度和综合竞争力的重要指标。一个先进高效的环境空气质量监测预警和管理体系,是城市治理能力现代化的具体体现,可以大大提高城市的可持续发展能力和对外形象。将环境健康放在第一位的城市对吸引和留住高素质人才、高端产业和资本有很强的吸引力。

城市创建并运行这一体系,便是在向外界表明自身是一个负责任、有担当的政府,致力于为市民和投资者创造一个健康、安全、可预期的生活和营商环境。形成了稀缺的软实力以及城市品牌。其价值主要表现在以下几个方面:

1. 优化营商环境透明的数据 + 科学规范的环境管理 = 更透明的政策,为企业创造了更公平的竞争环境。注重环境、社会治理的跨国企业、投资者更喜欢选择环境管理规范、数据公开透明的城市进行投资。

2. 塑造城市品牌,蓝天白云、空气新鲜是吸引游客最直接的广告。通过有效的空气污染治理以及持续公布空气质量信息,城市可以塑造起自身“生态城市”、“宜居城市”品牌形象,从而促进旅游、康养、体育等绿色服务业蓬勃发展,给经济增长增添新的动力。

（三）为气候与环境研究提供数据基础

环境空气质量监测预警系统长时间段、连续、高精度的观测数据，已经成为非常宝贵的科学数据资产，其价值远远超过日常的环境管理，为气候变化、大气化学、环境健康等基础研究提供了不可或缺的数据基础。由于大气污染物和温室气体常常来自相同的源头，比如化石燃料的燃烧，所以对它们进行协同观测研究有着重要的科学价值。

系统网络所获得的臭氧、氮氧化物、二氧化硫、颗粒物及其化学组分等详细信息，为认识大气光化学反应过程、气溶胶形成机理和污染物长距离传输规律提供了基础。科学家可以运用这些实测数据验证并改善大气化学模型和空气质量预报模型，使预测更加精确。而空气质量监测数据对提高气候模型解析度、可靠性起着很重要的作用，因此也成为进行气候变化情景模拟的主要手段。

地面观测数据也可以用来校准和验证卫星遥感反演的结果。虽然卫星可以给出大范围的空气质量宏观图，但是其精度需要用地面站点的“真实值”来标定。两者相结合就构成了一张天地一体化的立体监测网，极大地加深了人类对地球大气系统复杂性的认识。这是一份非常有价值的科学数据遗产，可用于未来数十年乃至上百年的科学家的科学研究，有利于对人类活动引起的大气环境影响展开探究，判断气候变化与空气污染之间的联系，为全球和区域性长期环境和气候战略规划提供可靠的科学依据。

第二章 环境空气质量监测技术基础

第一节 大气污染物监测原理与方法

一、常规气态污染物监测技术

（一）光学吸收光谱法的应用

光学吸收光谱法是基于物质分子对特定波长光的选择性吸收特性而建立的分析方法，其基本原理严格遵循比尔 - 朗伯定律。该定律认为，一束单色光在通过待测气体样品的时候，光的吸收强度与气体浓度和光程的乘积成正比。通过测量光强的衰减情况来反推出被测气体的浓度。该方法属于非接触测量，反应速度较快，不需要使用化学试剂等，在环境空气监测当中得到普遍应用。

实际应用中非色散红外吸收法、差分光学吸收光谱法是两种典型的手段。非色散红外吸收法主要用来检测一氧化碳和二氧化碳。一氧化碳分子在约 4.6 微米处有红外吸收峰，测量该波段的红外光吸收量就可以确定一氧化碳分子的浓度。该技术成熟稳定、抗干扰性好。差分光学吸收光谱法主要监测二氧化硫、二氧化氮、臭氧，这三种气体在紫外波段具有独特的窄带吸收结构。差分光学吸收光谱技术利用气体对某波段差分的吸收结构来进行研究，可以减少背景噪声、提高检测灵敏度及精度，适合进行远程开放通道监测。

紫外荧光法也经常被用来监测二氧化硫。其原理是二氧化硫分子吸收某一波长的紫外光后，跃迁到高能级的激发态，然后从激发态回到基态时，就会发出波长较长的特征荧光。一定浓度范围内，所发出的荧光强度与二氧化硫浓度成正比。采用光电倍增管等高灵敏度探测器对荧光强度进行测量，可以实现对低浓度二氧化硫的精确检测。该方法灵敏度高、选择性好，是国标方法之一。

（二）化学发光法的应用

化学发光法是以化学反应中光子发射现象为依据的分析技术。当某一化学反应发生时，生成物中会有一部分以电子激发态的形式存在，当激发态分子回到稳定的基态时就会释放能量，以光子的形式出现，产生发光现象。在某些情况下，

发光强度与参加反应的物质浓度成正比关系，为高灵敏度的气体定量分析打下了基础。由于该技术有很高的灵敏度、很好的选择性和很宽的线性范围，它已经成为环境监测领域中痕量气体测量的关键技术。

化学发光法最经典的应用就是环境空气中氮氧化物的测定。其主要的反应过程是样品中的一氧化氮和仪器内产生的臭氧反应，生成激发态的二氧化氮自由基。激发态的二氧化氮非常不稳定，会迅速跃迁回基态，在跃迁的过程中发出波长在 600 到 3000 纳米之间的光。发出的光子被高灵敏度的光电倍增管接收，转变成电信号，信号强度与一氧化氮浓度成正比。

因为该化学反应只对一氧化氮敏感，为了测定空气中总氮氧化物（一氧化氮和二氧化氮之和），需要把样品空气中的二氧化氮转化成一氧化氮。通常用铂或不锈钢做催化剂，在 325℃ 左右工作的转化器。样品气流经过转化器后，二氧化氮被还原成一氧化氮，此时测得的是总氮氧化物浓度。通过改变气路阀门，使样品气流交替直接进入反应室（测得一氧化氮浓度）和经过转化器后进入反应室（测得总氮氧化物浓度），两者浓度之差即为二氧化氮浓度。

该方法灵敏度很高，可以达到十亿分之一，线性范围宽，响应快。但是该方法也存在一些不足。转化器的转化率会随着时间的推移而降低，需要定期检测并更换。更值得注意的是高温转化器在将二氧化氮转化为一氧化氮的同时，也会将空气中其他含氮化合物（如硝酸、过氧乙酰硝酸酯等）一并转化为一氧化氮，导致二氧化氮测量结果产生正偏差，在光化学污染严重的地方这种现象就更为明显。

（三）电化学分析法的应用

电化学分析法就是测量物质的电化学性质（电位、电流、电导等）和浓度的关系来定量分析的方法。环境空气监测中主要使用的是基于安培分析原理的电化学传感器。这类传感器因为体积小、功耗低、成本低，所以被广泛的应用在便携式监测设备和分布式微型监测点上。

电化学传感器基本结构是由一个工作电极、一个对电极、一个参比电极，三个电极浸润在电解液中，通过透气膜与外界环境空气隔开。当待测气体分子（一氧化碳、二氧化硫、二氧化氮等）穿过透气膜到达工作电极表面时，在设定的电位下会发生氧化或者还原反应，产生微弱的电流。电流大小和被测气体浓度成正比。通过测量电流就可以换算成气体的浓度。一氧化碳传感器在工作电极上发生氧化反应，生成二氧化碳，同时产生电子而形成电流。

电化学传感器体积小、功耗低、成本低，使得大规模、高密度的网格化监测成为可能，可以更好地捕捉污染的时空精细分布。它们使用方便，不需要复杂的外设。但是，它们的缺点也十分明显。第一类问题是选择性问题，传感器对多种气体都会产生反应，即存在交叉干扰。二氧化氮传感器会对臭氧有响应，硫化氢传感器会对一氧化碳有响应等，这些交叉干扰都会影响到测量结果的准确性。传感器受到温度、湿度环境变化的影响大，需要进行算法补偿。传感器灵敏度与寿命有限，电解液会慢慢蒸发，电极也可能会被“毒化”，所以得定时校准和换零件，其数据品质的长久稳定程度一般不会比大型专业分析仪器好。

二、颗粒物监测技术

颗粒物是空气中悬浮着的固体和液态微粒混合在一起的混合物，质量浓度也是衡量空气污染程度的重要指标之一。准确测量颗粒物质量浓度，对公众健康风险评估和环境管理有重大意义。目前主要的在线监测技术依据物理原理，通过对与颗粒物质量有关的物理量变化进行测量来达到监测的目的。常见的颗粒物监测技术及特点对比如下表所示。

常见颗粒物监测技术对比表

特征	β 射线吸收法	微量振荡天平法	光散射法
测量原理	射线衰减	频率变化	光散射强度
测量量	颗粒物质量	颗粒物质量	颗粒物数量 / 粒径
测量方式	半连续（小时平均）	实时连续（分钟 / 秒级）	实时连续（秒级）
优点	直接测量质量，准确性高，自动化	实时性好，直接测量质量，高时间分辨率	响应速度快，体积小，成本低，可网格化部署
缺点	半挥发物损失造成负偏差，吸湿性颗粒物造成正偏差，半连续测量	加热导致挥发性组分损失，测量结果偏低	间接测量，受颗粒理化性质及湿度影响大，需校准
标准地位	参比或等效方法	标准方法	多为参考，需校准

（一） β 射线吸收法原理与特点

β 射线吸收法是颗粒物质量浓度自动监测领域被广泛认可的标准方法，它的主要原理就是依靠 β 射线穿透物质时强度衰减的物理现象。直接测量沉积在滤膜上颗粒物质量来计算颗粒物在空气中的浓度，被认为与手工称重法等可靠的检测技术。

测量过程如下, 仪器控制采样泵以恒定流量抽取一定体积的环境空气, 使空气通过一卷连续的玻璃纤维滤纸带, 空气中的颗粒物被截留在滤纸带的采样点上。采样前后, 用低能 β 射线源(一般为碳 14 或者氩 85)照射滤纸带上的同一采样点。 β 射线源设在滤纸带一侧, 高灵敏度的 β 射线探测器(闪烁计数器)设在另一侧。 β 射线经过滤纸带时, 能量会被滤纸带本身以及上面沉积的颗粒物所吸收, 导致探测器接收到的射线强度降低。按照朗伯 - 比尔定律的指数衰减关系, β 射线强度衰减量同吸收物质的质量成正比。通过测量采样前后探测器接收到的 β 射线计数率之差, 在已知采样时间的情况下, 就可以得到沉积在滤纸带上的颗粒物质量。最后用此质量除以同时段内收集的空气体积, 就得到该时段内颗粒物的平均质量浓度。整个测量过程由微处理器自动控制, 滤纸带采样结束后会自动移动到下一个洁净点, 从而达到连续监测的目的。

该方法具有以下几个显著特点:

1. 直接测量质量: 不同于其它间接的方法, β 射线吸收法测量的是与质量直接相关的物理量, 所以测量结果准确度高、长期稳定性好, 被许多国家作为参比或等效的方法。

2. 自动化程度高: 能够实现长期无人值守的连续自动监测, 减少了人工操作的误差和工作量。

3. 局限: 此方法为半连续测量, 一般以小时为单位给出平均浓度值, 不能反映分钟级别浓度快速变化的情况。采样过程中颗粒物中的半挥发性物质(硝酸铵、部分有机物)由于温度的变化而发生挥发损失, 导致测量结果偏低, 这就是负向误差。相反, 当环境湿度大的时候, 吸湿性强的颗粒物吸收水分之后会使测量结果偏高, 产生正向误差。

(二) 微量振荡天平法原理与特点

微量振荡天平法是另一个国际上公认的颗粒物质量浓度测量标准方法, 可以给出真正意义上的实时、连续的质量浓度数据。其主要部件是一根一端固定、一端自由的空心玻璃管, 在自由端装有一张可更换的滤膜。空心管在交变电场的作用下, 会以自身的共振频率作高频振动。

它的工作原理就是按照物理学的基本关系: 振荡系统共振频率与质量的平方根成反比。仪器开始测量时, 先记录安装有洁净滤膜的振荡管的初始共振频率。随后采样泵以一定的流量将环境空气吸入振荡管顶部的滤膜上, 空气中的颗粒物

就会不断地沉积在滤膜上。随着颗粒物质量的增大，振荡系统的总质量也增大，从而引起其共振频率发生微小但可精确测量的降低。仪器用高精度的电子系统连续地监测频率的变化，根据事先标定的频率—质量关系，实时计算出沉积在滤膜上颗粒物的质量增量。根据已知的采样空气流速，仪器就可以得出颗粒物的瞬时质量浓度。以分钟甚至秒级的时间分辨率连续输出质量浓度数据，对于研究污染过程快速变化以及污染源的识别有着重要的意义。该方法的特点是能直接、实时地测质量，时间分辨率很高。但是该方法的缺点也很明显：为了防止水汽在滤膜上凝结而影响测量结果的准确性，微量振荡天平仪器一般都会把采集到的气体加热到一定的温度（如 50℃）。在加热过程中，颗粒物中的挥发性、半挥发性组分（硝酸盐、铵盐、部分有机物等）会因为蒸发而减少，使颗粒物浓度测量值偏低。为了克服上述问题，后来研究者提出了带有滤膜动态测量系统改良型微量振荡天平。该系统增加了一个参比气路来动态地测量并补偿挥发性组分的损失，这样就大幅提高了测量的精度。

（三）光散射法原理与特点

光散射法是一种利用光学原理间接测定颗粒物浓度的方法，近些年来，由于设备小型化、成本低、实时响应等特点的凸显，其发展速度很快，在微型空气质量传感器以及便携式监测设备中得到了广泛的使用。基本原理就是当一束光（一般为激光）照射到空气中的颗粒物上时，光线会向四周发生散射。颗粒物大小、形状、折射率等物理性质一起决定散射光的强度、方向。

光散射法颗粒物监测仪内部一般会装有一个光源（激光二极管）和一个或多个光电探测器。含有颗粒物的气流经过光学检测腔室的时候，每一个颗粒物都会对入射光束实施散射。探测器置于一定的角度（前向或侧向 90 度），用来接收散射光信号。单个颗粒物经过检测区的时候，探测器会接收到一个光脉冲，脉冲的强度和颗粒物的粒径大小之间有函数关系。仪器通过对所接收到的光脉冲信号强度、频率进行分析，得到颗粒物的粒度分布、数量浓度等信息。随后仪器依靠内置的算法，按照颗粒物密度以及光学性质的假定，把颗粒物的数量和粒径信息转化为质量浓度。

该方法最大的优点就是响应速度很快，可以实时反映颗粒物浓度的瞬时变化，对污染源追踪和个人暴露评价具有较大的帮助。仪器结构简单，体积小、功耗低、成本低，远低于 β 射线法、微量振荡天平法，非常适合做大规模、高密度网格

化部署，弥补传统国控站点空间覆盖率低的不足。但是光散射法测量得到的是间接推算值，其精度受到空气中颗粒物的物理化学性质（粒径分布、形状、颜色、化学成分）以及环境相对湿度（颗粒物吸湿生长会使散射信号增强）的影响。因此，未经本地校准的光散射传感器数据只能作为定性或者半定量的参考。为了得到更精确的数据，必须定期用 β 射线法或者微量振荡天平法等标准方法对现场进行比对校准，得到适用于当地颗粒物特征的校准因子。

三、特征有机污染物监测技术

（一）气相色谱法的应用

气相色谱法是分离、分析复杂有机混合物最有效、经典的分析方法之一，也是目前环境空气挥发性有机物组分监测的标准方法。其基本原理就是利用混合物中各组分在气相（流动相）和固定相之间分配系数的不同来达到分离的目的。

在线气相色谱系统的工作过程一般由采样富集、热脱附进样、色谱分离和检测器检测四个部分组成。由于环境中的挥发性有机物浓度一般都很低，十亿分之一或者万亿分之一，直接进样分析很难达到检测要求。因此需要富集，即用采样泵抽吸大量的空气样品到装有吸附剂的低温冷阱中。挥发性有机物分子被吸附剂吸附，空气中主要的氮气、氧气等则直接穿过冷阱。富集后，冷阱快速升温，捕获的挥发性有机物组分受热释放出来，形成高浓度的样品蒸气，用惰性载气（高纯氮气或者氮气）带入色谱柱。色谱柱是一根内壁涂覆或者填充有作为固定相的化学物质的细长管子。样品蒸气随着载气流经色谱柱时，不同的挥发性有机物组分由于沸点、极性以及分子结构的不同，与固定相之间产生的相互作用力也各不相同。与固定相作用较弱的组分移动速度快，会先流出色谱柱；而作用强的组分被保留时间较长，最后流出。于是，复杂的混合物就被分成了一个接一个按时间先后流出的单一组分。

分离出的组分依次进入检测器。在挥发性有机物的分析中，常用的检测器为氢火焰离子化检测器。氢火焰离子化检测器对大多数碳氢化合物都有很高的灵敏度。有机物进入检测器并在氢火焰中燃烧的时候会发生化学电离的过程，产生离子，形成微弱电流。电流强度和进入火焰的有机物中的碳原子数成正比。色谱图上各个峰出现的时间（保留时间），用来定性分析物质种类，峰面积或者峰高用来定量计算它的浓度。这样就形成了一套在线的气相色谱 - 氢火焰离子化检测系

统，可以自动连续地对空气中几十种甚至上百种挥发性有机物组分进行准确定量分析。

（二）质谱分析法的应用

质谱分析法是用测量离子质荷比来确定物质分子量、化学结构的一种分析方法。它有着非常高的灵敏度并且有着无可比拟的定性能力，它被称作是化合物识别的“金标准”。在环境有机污染物监测上，质谱技术既能充当气相色谱的检测器，又可借助多种创新方式单独或与其它技术联用，从而达到对大气中有机物快速全面监测的目的。

质谱分析的基本过程包括离子化、质量分析、检测这三个基本过程。待测的中性分子首先要离子化，即变成带电荷的离子，这是质谱分析的先决条件。离子化的方法有电子轰击法、化学电离法、质子转移反应法。电子轰击属于硬电离方式，会产生大量碎片离子，质谱图就像分子的“指纹”，信息量大，适合用来鉴定化合物的结构。质子转移反应等软电离技术主要是形成分子离子峰，能较好地保留分子的完整信息。生成的离子被导入到质量分析器中，质量分析器是质谱仪的核心部分，它用电场或磁场把不同质荷比的离子在空间或者时间上分开。常用的质量分析器有四极杆、飞行时间、离子阱、磁扇区等。分离后的离子到达检测器，检测器将离子信号转换成电信号并放大，最后由数据系统记录下来，就得到一张以质荷比为横坐标、离子相对丰度为纵坐标的质谱图。

（三）在线联用监测技术的发展

为了处理大气中成千上万种有机污染物的复杂基质问题，满足高分离度、高灵敏度、准确定量的分析要求，单靠一种监测技术是远远不够的。因此，将不同原理的技术进行优势互补的联用技术，就是现代环境监测发展的必然趋势和研究前沿。其中应用最广、最成熟的就是气相色谱 - 质谱联用技术。

在气相色谱 - 质谱联用系统中，气相色谱起高效分离的作用，它把复杂的有机物混合物按照沸点、极性等差别，按时间顺序分开，然后一个一个地把纯净的单一组分送到质谱检测器那里。质谱是一个功能强大且专一的检测器，它对每一个流出色谱柱的组分进行即时分析，给出该组分特有的质谱“指纹”图谱。此组合可以获得时间、结构两方面的信息，气相色谱可以提供可靠的保留时间来进行初步的定性分析，而质谱可以提供确切的分子量、碎片离子信息来进行最终的结构确证和定量。气相色谱 - 质谱联用技术提高了分析的可靠度，可以识别、定量

复杂样品中痕量的目标物以及未知物。

随着分析需求的不断提升，联用监测技术也在持续创新和发展，呈现出以下几个重要方向：

1. 更高维度的分离技术：全二维气相色谱技术的出现，用串联的两根不同极性的色谱柱，使气相色谱的分离能力提高了一个数量级，可以分离数千种化合物，尤其适合于石油化工区等来源复杂的环境空气样品分析。全二维气相色谱与快速采集的飞行时间质谱联用时，就成为目前分析复杂挥发性有机物最强大的技术平台之一。

2. 更灵敏、选择性更好的质谱技术，串联质谱技术，如三重四极杆质谱，通过选择特定的母离子，进行碰撞诱导解离，只检测特征碎片离子，最大程度上排除基质干扰，实现对目标污染物超痕量级别的定量分析。

3. 更快的实时监测技术：以质子转移反应质谱、化学电离质谱为代表的直接进样质谱技术，省去了耗时的色谱分离过程，可以实现多种挥发性有机物和中间产物的秒级在线监测。这些技术以及气溶胶化学组分监测仪等设备的联合应用，给深入认识大气中新粒子生成、臭氧和二次有机气溶胶快速形成的过程赋予了前所未有的数据支持。

第二节 空气质量自动监测站建设与运行

一、自动监测站的系统构成

（一）采样系统与预处理单元

采样系统和预处理单元是保证监测数据代表性和准确性第一道关口。其主要任务就是无歧变、无损耗地将室外环境空气引入监测仪器内部。因此该系统的设计及选材十分重要。总悬浮颗粒物采样总管一般用特殊玻璃或石英制成，以免样品同管壁产生物理吸附或者化学反应，保持样品原始状态。总管的设计要符合等速采样原则，切割头能够把粒径过大的颗粒物如雨水、昆虫和杂物等去除掉。采样总管的末端接一个由惰性材料制成的采样分配歧管，将采集到的空气样品均匀地分配给各个分析仪器。

采样泵是整个系统的动力源，用来将环境空气连续吸入采样总管。为了保证

分析仪器得到稳定的样品流速，对采样泵的稳定性和耐用性有很高的要求。分配歧管到各个分析仪器之间的管路全部采用惰性材料，以减少样品在传输过程中的损失。预处理单元的主要功能就是除去空气样品中会影响测量的物质，特别是水汽和细小的颗粒物。水汽去除一般采用渗透膜干燥管或者冷凝装置，在不改变二氧化硫、氮氧化物等水溶性气体浓度的情况下，降低样品湿度。颗粒物过滤是在每台仪器的进气口处安装高效过滤膜来完成的，定期更换滤膜对防止仪器被污染和堵塞来说非常重要。整个系统的气密性必须严格保证，任何的泄漏都会造成环境空气与室内空气混合，产生错误的监测结果。

采样系统和预处理单元的性能好坏直接影响后续分析仪器的测量精度。因此，在建设阶段必须对所有的管路连接做严格的检漏测试，并保证采样总管的安装位置及高度符合有关的技术规范，不能受到局部污染源（如排气筒、道路扬尘等）的影响。持续监测采样的流量、系统的压力、预处理单元的状态，是获得高质量的监测数据的前提。任何一个环节出现差错，就会造成整个监测系统数据失真，丧失环境指示作用。

（二）分析仪器与数据采集仪

分析仪器是自动监测站的“心脏”，对采集到的空气样品进行定量分析，测定各种污染物的浓度。现代监测站一般配备有针对各种污染物所专设的分析仪器，仪器依据物理或者化学原理工作，具备高灵敏度、高稳定性和快速响应的特性。数据采集仪是系统的数据中心，主要对各个分析仪器产生的监测数据进行接收、处理、保存和传输。

针对气态污染物的监测，主流技术包括：

1. 二氧化硫分析仪：大多用紫外荧光法。样品中二氧化硫分子受紫外光激发后跃迁到高能态，当它回到基态时会发出特征荧光，荧光强度与二氧化硫浓度成正比。该方法选择性好，干扰少。

2. 氮氧化物分析仪：主要用化学发光法。样品空气中的一氧化氮和高浓度的臭氧反应产生光化学发光，光强和一氧化氮浓度成正比。对于二氧化氮需要先经过高温转化炉将其转化为一氧化氮之后才能进行测量。

3. 臭氧分析仪：紫外光度法。利用臭氧分子对 254 纳米波长紫外光的强烈吸收特性，通过测量样品气通过吸收池前后紫外光强度的变化来计算臭氧浓度。

4. 一氧化碳分析仪多采用非色散红外吸收法，利用一氧化碳分子对某一波段

红外光的选择性吸收来测量。

颗粒物浓度的监测仪器主要有微量振荡天平法、 β 射线吸收法两种。前者利用振荡元件上颗粒物质量引起的频率变化来计算浓度，后者利用颗粒物对 β 射线衰减的程度来推算它的质量。可以对 PM10、PM2.5 等各种粒径的颗粒物进行监测。

分析仪器的输出信号无论是模拟信号还是数字信号，都会送到数据采集仪。数据采集仪除了把原始信号转化成浓度值之外，还会储存仪器工作状态，故障报警信息以及校准数据。按照设定的时间间隔（每分钟、每小时等）来计算数据的平均值，然后将数据打包，通过有线或者无线网络发送到中心数据库，为后面数据审核、分析、发布提供支持。

（三）站房配套设施与安全系统

站房是放置各种监测仪器和辅助设备的物理空间，站房的配套设施、安全系统是否完善，是保证监测系统长期稳定可靠运行的前提。一个合格的监测站房是仪器的“家”，也是保证数据质量、人员安全的屏障。站房选址、建设要符合环保规定，有代表性，远离直接污染源和高大建筑物的遮挡。站房内部进行合理的空间布局，仪器室、气瓶间、值班室等功能区要分开设置，各仪器之间要留有足够的散热和维护空间。

环境控制是站房配套设施的主要部分。精密分析仪器对工作环境的温度、湿度有严格的要求，温湿度变化大容易造成仪器零点漂移、测量误差。因此站房要设置性能稳定的恒温恒湿空调系统，保证站房内温度常年处于规定范围（20-30 摄氏度），相对湿度小于 80%。电力供应稳定也很重要，为了防止电网电压波动或者突然断电，监测站必须配置交流参数稳压电源和不间断电源。稳压电源给所有的分析仪器提供干净稳定的电源，不间断电源在主电源断电的时候，给分析仪器和数据采集仪提供至少数小时的备用电力，保证数据不丢失，给应急响应留出宝贵的时光。

安全系统是站房建设中不可缺少的部分，防火、防盗、防雷等。因为部分监测项目会用到氢气等易燃气体作为辅助气源，所以站房内应设置可燃气体泄漏报警器和消防器材。气瓶间应单独设置，有良好的通风条件，防止气体泄漏积聚。防盗上采用坚固的门窗、视频监控、入侵报警系统等来保证仪器设备不被盗、不损坏。防雷接地系统同样不能忽视，根据规定做好接地网以及避雷设施，保护贵

重的电子设备不受雷击损害。完善的配套设施和安全系统一起构筑了一个稳定、可靠、安全的运行环境，是自动监测站充分发挥效能的物理保证。

二、自动监测站的日常运行管理

（一）仪器设备的定期巡检与维护

仪器设备的定期巡检、保养是保证自动监测站连续、稳定运行的重要工作。该项工作要求运维人员要具备高度的责任心及专业技能，对仪器实行全面、系统的检查以及预防性维修工作，及时发现并消除潜在故障点，保证仪器一直处于良好的工作中。巡检工作一般分为不同的周期，各有侧重。每日巡检为最基本的工作，主要是通过目视检查来确认仪器的运行状态指示灯是否正常，有无异常的声音和气味，查看仪表盘上显示的流量、压力、温度等各项重要参数，查看数据采集系统是否正常记录和传输数据。

日常巡检之外，每周或者每两周要进行一次较深的保养。一般包括对采样路上的颗粒物过滤膜进行检查、更换，防止滤膜堵塞造成采样流量降低；检查、清洗采样总管的切割头、集水装置，保证采样口畅通；对于使用渗透膜干燥管的系统，还要检查吹扫气流量是否正常。同时运维人员也会对仪器做一些简单的性能核对，比如查看零点空气发生器产生的气体是否纯净，仪器对零气的响应是否稳定在零点附近。

月度、季度、年度的维护工作就更为复杂、专业。对分析仪器多点校准，以检验整个量程范围内线性度；检查或更换采样泵的泵头、阀片等易损件；清洗仪器内部光路系统，检测探测器性能。部分仪器，例如化学发光法氮氧化物分析仪中的钨转化炉，需要定期检测其转化效率来保证二氧化氮可以被准确测量。所有的巡检和维护工作都要按照操作规程执行。

运维人员要详细记录每次操作的内容、时间、所用备件、操作前后仪器状态参数。这些记录是判断仪器健康状况的依据，也是数据出现异常时查找问题根源的依据。定期巡检及预防性维护可把仪器因故障停机的时间降到最低，仪器寿命延长，监测数据连续有效，一直给环境管理决策提供数据支撑。

（二）标准物质的传递与使用管理

标准物质是空气质量自动监测量值溯源和质量控制的基础，标准物质的管理及使用是否规范直接关系到监测数据的准确性、可比性。标准物质主要有浓度已

知的标准气体和零气发生器，它们是校准分析仪器、评定测量不确定度的“标尺”。对其实行全生命周期精细化管理，是质量保证体系中的重要部分。

标准物质的管理涵盖了从采购、验收、存储到使用的全过程，每个环节都需严格遵循规程。

1. 采购验收为源头：所有的标准气体必须从有资质的供应商处购买，并附带浓度值、不确定度、制备日期、有效期、溯源信息的证书。入库之前运维人员要检查标准气体外观、阀门、压力是否正常，核对证书信息是否齐全一致。对于高级别标准物质还要用比对等方法进行验证。

2. 存储及使用过程的管理不能忽视，标准气瓶应存放在专用的、通风良好、远离火源、热源的气瓶间内，并固定好，防止倾倒。助燃气和可燃气体应分库存放。使用时必须配置合格减压阀，用惰性材料的管路连接到仪器或者校准系统。运维人员要经常检查连接管路的密封情况，防止泄漏造成标准气的浪费或者浓度发生变化。

3. 动态管理并记录保证溯源性：要为每一瓶标准气体建立使用台账，登记启用日期、使用情况、剩余压力、更换日期。当气瓶压力低于某一阈值的时候，应该停止使用，以免压力过低造成气体浓度发生变化。对零气发生器，要定时查看其内部净化材料是否失效，还要检测它产出的零气纯度，保证可以给出符合要求的“零点”基准。

经过这一系列严格的管理措施，保证校准、核查所用的“标尺”自身的准确可靠，实现监测数据向国家或者国际基准的有效传递，保证不同站点、不同时间监测结果的一致性和可比性。

（三）运行记录与档案管理制度

运行记录与档案管理制度，属于自动监测站质量保证体系的重要组成。系统、规范地进行文件记录，给监测活动的全过程提供可追溯的证据链。完整的档案不单是日常运维工作的指引和备忘录，也是数据审核、有效性判断、对外审计的依据。健全的档案管理制度能保证监测站所有活动有据可查、责任分明。

运行记录主要是站房运行日志、仪器维护记录。站房运行日志是运维人员每天填写的一本综合记录，里面记载着站房温湿度、市电电压、仪器流量、压力等常规参数的抄录，也记载着当天发生的一切异常情况，比如仪器报警、断电、设备故障、周边环境的异常变化等等。日志就像是监测站的航海日记，是现场信息

最直接的记录，可以为事后分析数据波动的原因提供依据。仪器维护记录更专业，每次维护、维修、校准都要填专门的表，写明做了哪些工作、换上了什么型号的备件、用的标准物质是什么、操作前后的仪器性能参数怎么比。

校准记录在档案管理中占有重要位置，它同监测数据是否准确相关联。这部分档案应该包含所有的标准物质溯源证书、标准物质接收和使用记录，以及每次进行零点、跨度校准、多点校准的原始数据和结果报告。由此可以清楚的看到仪器运行周期内计量性能的变化过程，给数据修正和不确定度评定提供依据。所有的纸质、电子记录都应该进行系统的分类、编号、归档。

档案管理不仅仅要收集、存放，更主要的是建立一个便于查阅、利用的体系。设立专门的档案柜用来存放纸质文件，按照时间、类型整理归档。对于电子档案应建立明确的目录并定期做备份工作，防止档案数据的丢失。档案的保存期限也应明确规定，重要的原始记录、报告等要长久保存。建立操作运行记录和档案管理制度，规范了日常工作，同时创建了比较完整的质量追溯管理机制，提高了监测数据质量。

监测站点检测记录表

文档类型	内容概述	记录周期	重要性	保存期限
站房运行日志	站房环境参数、设备状态、异常情况 等	每日	高	长期
仪器维护记录	维护项目、备件更换、操作人员、 前后参数对比	按需 / 定期	高	长期
仪器校准记录	零点 / 跨度 / 多点校准数据、标准物 质信息、校准结果	定期	极高	长期
标准物质管理记录	采购、验收、存储、使用、有效期、 溯源证书	按需 / 入库	极高	长期
故障处理记录	故障现象、分析、处理措施、恢复 时间、影响评估	按需	中	长期
数据审核记录	数据有效性判断、质控标记、审核 人员意见	定期	高	长期

上述档案管理制度实施后，监测站点的各项运行情况一目了然，见上表。

第三节 遥感监测技术在空气质量监测中的应用

一、地基遥感监测技术应用

(一) 激光雷达探测颗粒物垂直分布

激光雷达是主动遥感探测设备，它的工作原理是向大气中发射脉冲激光，再分析大气分子和气溶胶等粒子产生的后向散射信号，进而反演出大气颗粒物垂直分布、边界层高度、云层结构等信息。激光与大气相互作用时会产生米氏散射，米氏散射信号强度与大气中颗粒物浓度及尺寸有关，这使得激光雷达成为探测大气颗粒物垂直结构最有效的方法之一。通过对回波信号强度随高度的变化进行分析，可以得到污染层准确的高度、厚度以及内部分层情况，给研究污染物垂直扩散和混合过程提供直接的数据。

激光雷达数据给重污染天气成因分析提供了一种独特的视角。可以随时观察逆温层的消长过程。逆温层像一个“盖子”，把污染物压在地面附近，是造成污染物积聚、浓度突然增大的重要气象条件。激光雷达可以准确得到逆温层的位置、强度、厚度，可以直观地看到逆温层对近地面颗粒物浓度的抑制作用。激光雷达可以观测区域性输送事件中空气污染团行进和下沉。经过连续观测，能够清楚地看到上风向污染带在不同高度的输送状况，进而判定其对本地空气质量的影响时间段和影响强度，为区域联防联控给予科学支撑。

先进的激光雷达技术，比如拉曼激光雷达、高光谱分辨率激光雷达、偏振激光雷达等等，正在把激光雷达技术的应用推进到新的层次。偏振激光雷达通过观测后向散射光的偏振特性来区分球形粒子（液滴）与非球形粒子（沙尘、生物气溶胶），进而区分沙尘、霾、云等不同类型的气溶胶。拉曼激光雷达使用特定的气体分子拉曼散射信号，不仅能反演气溶胶的光学性质，还可以反演水汽等气象参数，给研究气溶胶吸湿增长过程提供新方法。多参数、高精度的垂直探测激光雷达不但是监测工具，也是研究大气物理、大气化学过程的强大科研设备，其数据产品被广泛用于空气质量模型同化和评估，极大地提高了预报预警系统准确性。

(二) 被动遥感监测污染气体柱浓度

地基被动遥感技术并不主动发射电磁波，它只是接收并分析大气路径中经过自然辐射源（主要是太阳光）反射或散射后产生的光谱信息来反演大气中污染气

体的浓度。核心原理就是利用各种气体分子在特定波段有独特吸收光谱的特性。当太阳光穿过大气层到达地面接收设备时，在路径上存在的各种污染气体（二氧化氮、二氧化硫、臭氧、甲醛等）对某些波长的光会产生吸收作用，在接收到的太阳光谱上留下对应的吸收“指纹”。利用高分辨率光谱仪测定这些吸收特征的强度和形状，再结合大气辐射传输模型，就可以定量计算出仪器到大气层顶的整层大气中该污染物的总量，即柱浓度。

多轴差分吸收光谱技术为地基被动遥感中使用最多的一种技术。该系统通过在不同的仰角方向（从地平线到天顶）测量散射的太阳光光谱，并使用差分吸收光谱算法，不仅可以得到污染物的垂直柱浓度，还可以反演出对流层低层（特别是近地面）的气溶胶和痕量气体垂直廓线信息。这对及时掌握城市及其周边地区污染物水平、垂直分布情况有重要的意义，尤其是在监测城市近地面臭氧前体物（二氧化氮、甲醛）浓度日变化规律上。多轴差分吸收光谱仪体积小，可以长时间无人值守工作，给城市空气质量的长期趋势分析和卫星产品的验证提供稳定的数据源。傅里叶变换红外光谱技术也很重要，它能利用测量太阳直射红外光谱的方法来监测一氧化碳、甲烷、臭氧等许多温室气体和污染物的柱浓度，在全球和区域大气成分监测网络中起着非常重要的作用。

地基被动遥感技术获得的柱浓度数据不能直接等同于地面浓度，但是能反映整个大气垂直路径上污染物的总负荷，对认识区域污染物总体水平及输送情况有重要意义。在城市尺度上布置多轴差分吸收光谱观测网络，可以动态地绘制出二氧化氮等污染物柱浓度的平面分布图，清楚地显示出交通干道、工业区等主要污染源所在的区域。对卫星遥感数据进行验证时，地基遥感仪器可以提供高时间分辨率、高精度的地面“真值”参照，这对于校准和评判卫星传感器的表现、改进卫星反演算法来说是必不可少的。它和激光雷达等主动遥感技术相结合，可以形成对颗粒物、气态污染物的立体监测能力。

（三）地基遥感网络的组网应用

单一的地基遥感设备可以提供高时间分辨率的垂直信息，但是空间代表性差，一般只能反映测站上空的情况。为了克服这个局限，协同组网观测，即把多台同类型或者不同类型的地基遥感观测设备联合部署起来，已经成为提高区域环境监测能力的重要方法。地基遥感网络是在重点区域内合理设置遥感站，形成对整个区域的立体观测网络，实现区域尺度污染物时空分布及输送演变规律的连续、

动态、三维成像。

组网应用的核心价值就在于从点、到面再到体的跨越。以激光雷达网络为例，当在一个城市或者区域内部署几十台或者上百台激光雷达之后，利用统一的数据采集、处理、可视化平台，可以将所有的站点垂直探测数据进行融合，实时生成区域内颗粒物浓度、边界层高度等参数的三维空间分布图。这样决策者和科研人员就能清楚地看到污染团的形成、发展、输送、消散的全过程，准确找到污染高值区的空间范围和垂直层次，确定主要的输送通道。近乎实时的三维污染场信息，对重污染天气应急响应、区域联防联控策略制定、重大活动空气质量保障有着无可比拟的优势。它可以准确判断上游城市的污染何时开始影响到下游城市、影响的程度怎样，给下游城市预留出宝贵的时间窗口以便采取相应的措施。

地基遥感网络技术挑战与机遇表

方面	挑战	机遇
数据标准化	不同仪器观测结果一致性、可比性保障	统一数据格式与协议，提升数据共享效率
质量控制	海量数据实时质控，异常数据识别与处理	自动化质控算法，减少人工干预，提高准确性
数据融合算法	多源异构数据（遥感、地面、气象、卫星）融合复杂性	发展高级融合算法，实现信息互补与协同
协同观测策略	网络化观测设备的最佳布局与观测模式	优化站网布局，提升覆盖度与监测精度
数值模型同化	将高时空分辨率数据融入模型，修正模型偏差	大幅提高空气质量预报（特别是短临预报）准确性
智能化应用	从海量数据中提取决策支持信息的能力	推动环境监测向智能化、网络化、立体化发展

地基遥感网络的建设和使用不是简单的把各种硬件设备叠加在一起，它还包含数据标准化、质量控制、数据融合算法、协同观测策略等许多科学和技术难题。为了保证网络内各种仪器观测结果的一致性、可比性，必须建立严格的标定、运维规范。从数据应用角度来讲，将遥感网络数据、地面监测网数据、气象观测数据、卫星遥感数据等多种数据进行融合，并将这些数据同化到数值预报模型中，成为当前的研究热点。利用数据同化技术，将遥感网络观测得到的高时空分辨率的大气结构信息输入到模型中，修正模型初始场和边界条件，可以大大提高空气质量预报，尤其是短临预报的准确性。地基遥感网络的应用成功，说明环境监测

从以前的一测点模式向智能化、网络化、立体化的智慧环保迈进，主要技术难题与机会如上表所示。

二、空基遥感监测技术应用

（一）机载平台在区域污染巡查中的应用

机载平台即利用有人驾驶的固定翼飞机或者直升机，搭载先进的遥感载荷，是开展大范围、高精度区域性空气质量调查的优良工具。该种方式最大的优势就是搭载能力强、续航时间长，可以携带多种类型的传感器，比如高光谱成像仪、差分吸收光谱仪、扫描式激光雷达、原位分析仪器等，对目标区域内多种污染物（颗粒物、二氧化氮、二氧化硫、挥发性有机物等）进行同步、立体观测。飞行平台按照事先设计好的航线对重点工业园区、城市群、污染输送通道等区域进行细致的“扫描”式监测，获取地面监测网无法到达的高密度空间数据。

机载遥感在区域污染源排查与监管方面有很突出的作用。装有高灵敏度差分吸收光谱仪的飞机可以快速飞越广阔的工业区，绘制出二氧化氮、二氧化硫等污染物的高分辨率柱浓度分布图。这些图谱可以清楚地识别出没有得到有效监管的排放热点，甚至可以估算单个大型排放源的排放通量。自上而下的监测方法给环境执法提供准确的线索，有利于打击偷排漏排等违法行为。在秋冬季重污染频发的时段里进行区域性飞机航测，可以系统地采集整个污染区域污染物空间分布、垂直结构的数据，分析各个城市、各个行业对整个区域污染的贡献度，给科学合理的区域协同减排策略的制定提供有力的数据支持。

机载平台还是进行大气科学研究、了解污染形成机理的重要科学实验平台。在重大科学研究计划中，利用多架飞机在不同的高度层上协同观测，可以获取污染气团在三维空间内化学成分、物理性质、气象参数的全部信息。这些重要的“解剖式”观测数据对检验和完善大气化学传输模型十分重要。通过观测一个污染团从源头产生到下游地区沉降的全过程，可以对污染物输送过程中发生的化学转化、干湿沉降等复杂的物理化学过程，以及气溶胶与云的相互作用等过程有更深入的认识，并且可以对其进行量化。

虽然机载遥感监测存在成本高、空域限制、受天气影响和单次飞行覆盖面积和时间有限等缺点，但是它所提供的、高分辨率、多参数、三维数据集是其他监测手段所不能替代的。环境监管、科学研究、重污染过程分析等各个方面的成功

应用,证明了它在区域空气质量立体监测体系中不可缺少的地位,是实现区域大气环境问题“说得清、看得见、管得住”目标的重要技术保障。

（二）无人机在应急监测中的灵活应用

无人机,即无人驾驶航空器,近年来在环境监测领域特别是应急监测中已经成为尖兵。凭借体积小、成本低、起降灵活、响应迅速、可以进入复杂危险环境等特点,无人机大大提高了对突发大气污染事件的应对能力。无人机可以搭载轻量化气体传感器、颗粒物检测仪、微型光谱仪、高清摄像机等设备,形成一个灵活机动、空中检测勘察平台。

在化工厂爆炸、危险化学品泄漏、秸秆焚烧等突发环境事件应对中无人机的应用价值就更加突出。其灵活运用主要表现在如下几个方面:

1. 快速反应,近距离侦察,事故发生之后,无人机可以迅速飞抵现场核心区域上空,在保证人员安全的前提下,利用搭载的摄像头和热成像仪第一时间获取现场影像,对火势、泄漏范围等宏观态势做出评估。同时搭载的毒害气体传感器可以实时测量特征污染物的浓度,快速判断污染物的种类以及大致的浓度水平,给应急指挥部制定疏散方案、处置策略提供重要的初始信息。

2. 污染云团立体追踪:无人机可以按照预先设置好的网格化或者蛇形航线,在污染云团的不同高度层之间来回穿梭,从而迅速得到污染物的三维空间分布图。立体监测数据可以很好地展示污染云团的形态、边界、浓度梯度、扩散方向,对预测污染云团未来移动路径、评估周边敏感区域可能受到的影响提供直接证据,具有地面固定点所不具备的及时性和准确性。

3. 危险区域代替采样:对存在爆炸危险或者有毒物质浓度较大的时候,无人机可以替代现场人员进行近距离取样。采用机载采样泵、采样袋,可对指定位置的气体样品进行采集,带回实验室进行准确的组分分析,为事故定性定量评价及以后的环境损害评价提供物证。

（三）航空遥感数据的快速处理与解译

航空遥感平台在完成任务时,能在短时间内得到大量的多种异构数据,高光谱数据立方体、激光雷达三维点云以及高分辨率光学影像等。原始数据量庞大、结构复杂,不能直接做环境分析。因此,怎样快速、自动化地处理与解译航空遥感数据,把原始的数据变成可以辅助决策的信息和知识,就成为决定航空遥感技术应用成败的关键瓶颈。不但对计算能力有很高的要求,而且对先进的算法模型、

专业知识库有赖求。

航空遥感数据处理一般分为预处理和信息提取两大部分。预处理是信息提取的基础，它包括几何校正、辐射定标、大气校正。几何校正是使遥感影像的像素和正确的地理坐标一一对应，消除由于飞行姿态变化等引起的图像畸变。辐射定标是将传感器记录的无量纲的原始值，转化为有物理意义的辐射亮度或者反射率。大气校正在整个预处理过程中是最为复杂也是最关键的，它主要是消除大气分子以及气溶胶对于电磁波的吸收、散射的影响，从而准确地反演地表或者大气目标物真实的光谱信息。就空气质量监测来说，准确的大气校正是反演气溶胶和痕量气体的前提。

在信息提取和解译时，要按照不同的监测对象，开发并使用专门的反演算法。高光谱数据用差分吸收光谱算法或者最优估计算法可以反演二氧化氮、二氧化硫等气态污染物的柱浓度分布。对机载激光雷达数据进行处理之后，就可以通过后向散射信号来反演出气溶胶消光系数垂直廓线，进而估算颗粒物浓度。近些年来，人工智能尤其是深度学习技术的发展，给航空遥感数据的智能解译开拓了新的方向。像卷积神经网络等模型训练出来之后，能够自动识别并勾勒出工业烟羽、秸秆焚烧火点、城市扬尘这些污染源。智能化算法极大地提高了数据解译的速度和精确度，将从数据得到到形成决策支持产品的周期缩短了。为了满足应急监测的实时性要求，机载实时处理或者基于云计算的准实时处理系统已经成为了必然趋势，旨在实现即飞即采、即采即处、即处即用，给环境管理提供最及时的空基遥感信息服务。

第四节 移动监测与便携式监测设备技术

一、移动监测车的技术集成与应用

（一）移动监测平台的功能定位与优势

移动监测平台的核心功能定位就是它的“动态”和“精准”，是固定监测网络的有效延伸，也是精细化的补充。其主要应用情形分为3类：应急响应监测，在化学品泄漏、火灾等突发环境事件发生之后，可以快速到达现场获得污染物的种类、浓度分布等信息，为决策者划定警戒区、评估环境影响、指导应急处置等提供科学依据。其次就是污染源追踪与执法，对工业园区、重点排污单位或者群

众投诉热点区域进行走航监测，可以绘制高分辨率污染地图，精准定位异常排放源，为环境执法提供有力的证据。最后是科学研究与评价，可以研究特定区域（交通干道、施工场地等）的污染特征，也可以评估大型活动期间空气质量保障措施的成效，还可以验证空气质量模型的准确性。

移动监测平台的优势很多。其最明显的特点就是具有无法比拟的机动性和灵活性，可以克服复杂地形和地理位置的限制，对任意地点进行实时监测，获取固定站点无法覆盖区域的“点”和“线”上的数据。车载设备配备与国家环境空气质量监测网相当或者接近的分析仪器，保证监测数据的准确性、可靠性，可以对常规污染物（二氧化硫、氮氧化物、臭氧、一氧化碳、细颗粒物 PM_{2.5}、可吸入颗粒物 PM₁₀）和特征污染物（挥发性有机物）进行同步、连续监测。将高分辨率和高空间分辨率结合起来，可以捕捉到污染过程瞬时的变化和空间梯度，给研究污染物生成、输送、扩散规律提供了一个全新的角度。

移动监测车还有系统集成的优点。它不只是仪器的简单堆砌，更是集采样、分析、数据处理、定位、通讯、动力保障于一体的综合技术平台。监测数据同地理信息系统、全球定位系统相结合之后，就具备了精确的时空标签，可以即时产生可视化的污染云图，清楚显示污染物的空间分布情况以及运动路径。这样直观地呈现出来，极大地提高了环境管理的效能和水平，由过去的被动应对转变为主动防范。

（二）车载监测系统的集成与配置

车载监测系统的整合算是一个非常复杂的系统工程，要把各个子系统安放在有限的车载空间里，并且保证它们在车辆行驶以及各种环境条件下稳定可靠地工作。系统一般由车辆平台、分析仪器单元、数据采集与控制单元、辅助支持单元四个主要部分组成。好的系统集成才能保证移动监测数据质量以及平台功能的实现。

车载监测系统的配置需根据具体应用需求进行定制化设计，但其核心构成模块具有共通性。

1. 分析仪器单元：相当于整个系统的“大脑”，决定着这个系统可以对多少物质进行监测。常规配置有二氧化硫、氮氧化物、臭氧、一氧化碳等气态污染物分析仪，以及用光散射法或微量振荡天平法测量的颗粒物分析仪（PM_{2.5}、PM₁₀）。根据需要还可以加装高精度挥发性有机物监测系统，例如质子转移反

应质谱仪或者气相色谱-质谱联用仪,可以快速对上百种挥发性有机物组分进行定性和定量分析。根据不同的监测任务,还可以集成有毒有害气体检测仪、气象五参数仪等。所有仪器都应做防震处理,以适应车辆颠簸的路况。

2. 数据采集和控制单元:作为系统的核心,用工业计算机及配套软件集中控制、监视、采集并存储所有的分析仪器。它把各个仪器的分析结果同全球定位系统给出的经纬度、海拔和时间戳联系起来,产生带有地理坐标的一连串数据流。先进的系统还可以实现远程控制和数据传输,能够通过 4G 或者 5G 网络将数据实时传送到后端数据中心供指挥人员远程查看分析。

3. 辅助支持单元:给整个系统正常运转提供保障。动力系统是其核心,一般采用市电、发电机、不间断电源三种供电方式,保证任何情况下都能持续供电。温湿度控制系统(车载空调)给分析仪器创造了一个恒定的工作环境,从而大大减小了环境变化对测量精度的影响。采样系统由采样总管、采样泵和过滤装置组成,保证采集的空气样品具有代表性,不受到污染。

(三) 移动监测在污染溯源中的应用

移动监测技术在污染溯源,尤其是快速识别、定位未知或者偶发的污染源上,起着自己特有的、无法替代的作用。传统的方式依靠少量的固定观测站的数据加上复杂的扩散模型,不能迅速准确地反映现实的情况。移动监测依靠现场实测,由原来的被动等待污染物扩散变为现在主动追踪,极大提高了溯源的速度和准确度。

其应用逻辑主要遵循“空间扫描”和“浓度梯度”这两个原理。当检测到某地污染物浓度超标时,移动监测车能立刻对该地区及其周边区域做网格化或 Z 字形的走航监测。利用车载高精度分析仪对污染物浓度进行连续监测,同时通过 GPS 数据,可以迅速得到该地区污染物浓度分布图。图中高值区或者峰值点一般会直接指向污染源或者其附近区域。实时风向数据+操作人员上风向/下风向穿越式监测,比较上下风向浓度差,缩小污染源可能的范围。当监测车经过工业园区某一下风向的企业时,如果检测到挥发性有机物浓度突然增加,而其上风向的浓度较低,则该企业存在违法排放的可能性。

应对城市无组织排放源,餐饮油烟、道路扬尘、建筑工地逸散等,移动监测也大显身手。监测车沿着城市道路网络巡航,可以测量街道两边细颗粒物或者挥发性有机物的浓度。数据分析软件可以把高浓度路段做高亮标示,城市管理者很

快就能找到污染最严重的一些“污染街道”或“污染街区”，进而调动执法人员去精准排查，这对于传统的网格员人工巡查方式来说，无疑是一次技术上的升级。突发的异味扰民事件中，移动监测车是溯源的好帮手，带着可以分析特征异味物质的质谱仪，既可以知道异味的强弱，也可以知道异味的物质组成，根据物质的特性推断可能的来源行业（如化工、制药、垃圾处理等），为快速解决民生问题提供直接线索。

二、便携式监测设备的技术发展

（一）便携式设备的小型化与传感器技术

便携式监测设备的技术发展，是由于传感器技术小型化以及性能的提高而实现的。传统的分析仪器体积大、耗电高、价格贵，无法大量使用。而新型传感器技术则是希望在保证一定的测量精度的同时，把传感元件、信号处理电路和通信模块集成到拳头大小或者更小的设备中。这就是多种传感器原理创新应用带来的变化。

电化学传感器属于应用最广泛的低成本气体传感器之一。其工作原理就是待测气体在电极表面发生电化学反应，产生与气体浓度成正比的电流信号。这类传感器体积小、功耗低、响应快，被广泛用于检测二氧化碳、氮氧化物、二氧化硫、臭氧等常规气态污染物。但是它们也存在着选择性差（易受其它气体交叉干扰）、寿命短、易受温湿度影响等缺点，其数据质量常常需要借助算法加以校正。

光学传感器是另一条技术途径，其性能一般比电化学传感器要好。便携式PM_{2.5}检测设备上常用到的激光散射传感器，是通过测量颗粒物对激光的散射光强度来反演其质量浓度的，是目前便携式PM_{2.5}设备的主要技术。非分散红外技术利用气体对于特定的波长的吸收特性来测量气体浓度，主要是用来检测二氧化碳和碳氢化合物。光声光谱、光电离检测器等在挥发性有机物的便携式检测中有着很好的应用前景，具有灵敏度好、选择性好等特点。

便携式传感器类型、特点与应用表

传感器类型	原理概述	优点	缺点 / 局限性	典型应用
电化学传感器	待测气体在电极表面发生电化学反应产生电流信号	体积小、功耗低、响应快、成本低	选择性差、寿命短、易受温湿度影响	CO、NO ₂ 、SO ₂ 、O ₃ 等常规气态污染物检测
激光散射传感器	测量颗粒物对激光的散射光强度，反演质量浓度	相对准确、实时性好	对颗粒物形状、湿度敏感，易受环境颗粒物干扰	PM _{2.5} 、PM ₁₀ 等颗粒物检测
非分散红外	利用气体对特定波长红外光的吸收特性	稳定性好、选择性强，受其他气体干扰小	对复杂混合气测量有限，有时精度受限	CO ₂ 、碳氢化合物检测
金属氧化物半导体	待测气体与敏感材料接触后改变电导率	体积小、成本极低、易于大规模集成	选择性差、易受湿热影响、存在漂移现象	挥发性有机物及多种气体初筛

可见上表，各类便携式传感器各有其侧重与局限。

近些年来，依托微机电系统技术而发展的传感器发展势头不错，金属氧化物半导体传感器便是其中之一，它会察觉待测气体同敏感材料碰上之后引发的电导率发生怎样的改变，从而判定气体浓度。该类传感器体积小、成本低，适合大规模生产与部署。未来的发展方向就是将不同的传感器集成在同一片微小芯片上，构成电子鼻或者多种功能合一的环境监测模组。结合人工智能、机器学习等算法来对传感器的响应信号进行模式识别与计算，以克服单个传感器的不足之处，达到多种污染物协同精准测量的目的，促进便携式设备向着更小型化、智能化、可靠化方向发展。

（二）便携式设备的校准与质控方法

尽管便携式监测设备给人们带来很多方便，但是数据可靠性的问题一直都是业界所关注的焦点，也是便携式监测设备推广的瓶颈。由于低成本传感器本身存在的漂移、交叉干扰、环境依赖性问题，未经过校准、无质控的原始数据与标准方法测得的结果往往相差很大，很容易得出错误的结论和决策。因此建立科学规范的校准和质量控制方法体系，是保证便携式设备数据“可用”、“可信”的基础。

设备校准是数据准确性最基本的保证。目前主流的校准方法是用参考站点来比对。具体做法就是将一批便携式设备与国家或地方标准空气质量监测站（国控点、省控点）的参考级仪器并排布置，进行数周或者数月的同步观测。通过采集

大量的配对数据（传感器读数与参考仪器读数），采用统计学方法（一元或多元线性回归、随机森林、神经网络等）来建立两者之间的转换关系，即校准模型。该模型可以对传感器的测量误差进行系统性修正，也可以补偿温度、湿度等环境因素。校准模型质量直接决定设备实际部署以后数据的质量，所以必须经常更新和检验。

质量控制是设备的全过程。设备安装完毕后，要进行一系列的质量控制工作来保证数据质量。数据的实时审核，通过合理设置阈值、变化率可以自动识别出异常的数据点；远程诊断也不能少，在物联网平台上可以对设备的电池电压、内部温度、风扇转速等状态进行实时监控，及时发现异常并发出预警。定期到现场对采样口进行清洁、对设备外观进行检查、开展单点核查等也是不能缺失的环节。对大规模的网格化监测网络，可用移动校准车或者高精度便携设备当作“传递标准”，定时到网络里的各个节点去巡回比对，评价它们的性能衰减状况，从而决定是否要重新校准或者替换。创建起覆盖实验室校准、现场安装、实时监测以及定期保养的全部生命周期闭环质量控制程序，这才算是便携式设备发挥出最大效能的根基所在。

（三）便携式设备在网格化监测中的应用

便携式监测设备具有低成本、易部署的特点，产生了一种高密度网格化监测的新型环境监测方式。该模式是在城市或者某个区域内密集布置微型监测站点（便携式设备或者其发展起来的小型站），形成类似棋盘的监测网络，从而对空气污染物的时空分布特征进行前所未有的精细描绘。网格化监测很好地弥补了传统稀疏站点空间代表性的不足，将监测尺度由城市级细化到社区、街道、楼宇。

网格化监测在城市环境管理上应用价值巨大。可以实时动态展示整个城市污染“热点图”，让环保部门随时掌握污染严重区域和时段，从而对症下药精准治污。通过对网格化数据的分析，管理者可以发现某个工业区夜间挥发性有机物浓度异常，或者某交叉路口早晚高峰时段氮氧化物浓度远高于其他地区。这些小信息是传统监测手段得不到的，有了这些小信息，环境监管从“大海捞针”变成了“按图索骥”，执法效率大为提高，环境改善效果也更好。网格化数据还可以用来评价各项污染控制措施的效果，在实行交通管制或工业企业错峰生产之后，将管制前后的相关网格点的浓度进行比较，从而量化的评估出政策的实际效果。

网格化监测数据给城市规划、公众健康、科学研究提供重要的数据资源支撑。

高分辨率的空气质量地图可以给城市绿地系统、通风廊道的规划建设提供指导，也可以给学校、医院等敏感建筑选址提供依据。公众健康上，用网格化监测数据加上人口分布数据，就能对各个社区居民真正面临的污染物暴露水平有个更精确的了解，给环境健康风险评价以及关联的流行病学研究赋予扎实的数据支撑。公众可以利用手机应用程序等途径查询自己所在社区的实时空气质量，使公众对环境问题有知情权和参与感，有利于形成全社会共同参与环境保护的良好氛围。网格化监测得到的大量数据也给大气科学研究，特别是城市尺度下污染物扩散规律、源汇关系、化学转化机制等的研究提供了丰富的数据基础，有力地推动了环境科学的发展。

第五节 监测数据质量控制与保证体系

一、数据质量控制的核心环节

数据质量控制属于保证监测结果准确性的基础工作。它主要侧重于监测过程中具体的操作技术及管理，依靠一系列标准化的办法，目的是防止、发现和纠正影响数据质量的各种误差，构筑起数据质量的底线防线。

（一）监测仪器的性能指标与校准

环境空气质量自动监测仪器的性能好坏决定数据质量的好坏。其主要的性能指标有准确度、精密度、检出限、零点漂移、跨度漂移、响应时间等。准确度是反映监测结果与真值的接近程度，是衡量仪器性能好坏的标准；精密度是反映重复测量结果的一致性，是衡量仪器稳定性的标准。检出限决定着仪器能够可靠检测到的污染物最低浓度，这对低浓度污染事件的监测来说十分重要。零点漂移是指仪器测量空白样品时，响应信号随时间变化的情况，跨度漂移是指仪器测量标准气体时，响应信号随时间变化的情况，零点漂移、跨度漂移都是评价仪器长期稳定性的重要参数。

为了保证仪器一直保持在最佳的工作状态，必须定期或者根据需要进行校准。校准是用已知浓度的标准气体或标准物质，对仪器响应进行标定和调整，建立准确的浓度 - 响应关系曲线的过程。校准方式有两点校准和日常零点 / 跨度校准。多点校准一般在新仪器安装、大修后或者法规要求的周期内进行（如每半年或者

一年)。通过不同浓度点标定来评价并校正仪器线性度、斜率和截距。日常零点校准一般一天一次,用来跟踪和补偿仪器在短小时内产生的漂移,保证短时数据的精度。

校准过程本身也要严格依照技术规范。校准用标准气体应能溯源至国家或者国际基准,动态气体校准仪等设备也要定期检定。校准操作要在稳定的环境条件下进行,校准前后仪器状态、校准数据、计算过程和结果、仪器调整等重要信息都要详细记录下来。可以用来评判仪器性能、质量追溯。经过科学严谨的性能评价、周期性的校准维护之后,才能从根本上保证监测仪器输出的原始数据是准确的。

(二) 标准物质的溯源与使用

标准物质,尤其是标准气体在空气质量监测中起着量值传递的作用,是量值传递的基础,也是保证监测数据准确性的重要环节。其质量好坏、使用是否规范,直接影响到整个监测网络量值是否统一、数据是否可靠。因此标准物质的管理要涵盖标准物质的整个生命周期,也就是从选择、购买、验收、使用到报废的全部过程都要加以控制。标准物质最重要的是它的量值准确并且可以溯源。溯源性指通过一条不间断的比较链,把测量结果同国家或国际计量基准联系起来的能力。即现场监测仪校准用的工作标准气体浓度值,必须能追溯到国家一级标准物质或更高级别的国际标准。这样的溯源体系使得无论何时何地、使用什么仪器测量,结果都是可以比较的,是建立区域乃至全国统一监测网络的基础。

标准物质的管理也不能轻视。标准气体钢瓶应该在有效期内使用,存放于温湿度适宜、通风良好、远离腐蚀性气体之地。使用前要检查钢瓶压力是否足够,阀门、管路有无泄漏。仪器校准的时候必须保证标准气体的流量足够且稳定地进入检测仪器,防止因为流量不稳、管路污染或稀释比例错误造成误差。对于其它形式的标准物质(渗透管),其存储条件和使用方法也应符合规范,保证渗透率的稳定和准确。零气作为校准的零点基准,其纯度很关键,用来产生零气的空气净化系统要定时保养,这样才能保证它能有效地去除待测污染物,避免由于基线偏高造成测量结果系统性偏低。

(三) 日常运维中的质量检查

日常运维是保证监测系统连续、稳定、可靠运行的基础,主要是高频次巡检、核查、维护,及时发现问题、解决问题,防患于未然。质量检查是日常运维工作的重中之重,它把质量控制措施融入到每一个操作细节里,是一个保证数据质量

持续稳定的动态过程。运维人员对监测站房的环境情况开展常规检查，涉及温度状况，湿度情况，供电电压稳定情况以及站房是否严密整洁等诸如此类的环境要素，这些都会直接影响到精密仪器的工作效能及其使用寿命。日常运维质量检查的主要项目及内容见下表。

日常运维质量检查项目及内容

检查项目	具体内容
仪器运行状态	每日检查远程系统及现场巡检，确保各监测仪器运行状态灯正常，反应室温度、压力、流量等重要参数在正常范围。查看报警信息并进行故障排查。
采样系统	定期检查采样总管及各仪器采样支路，确保其干净、畅通、无泄漏。检验采样切割头是否完好，并适时清洗或更换。颗粒物监测仪需检查滤膜 / 滤带消耗情况并及时更换。
零点 / 跨度漂移	每日自动检测零点和跨度漂移，判断仪器短期稳定性。若漂移超出警告限 / 控制限，立即诊断原因（仪器、标气或其他），并采取校准或维修措施。
数据采集与传输	检查数据采集器与仪器之间、采集器与中心平台之间的数据通讯是否正常，保证数据链的完整畅通。核对本地存储数据与平台接收数据的一致性，防止传输丢失或错乱。

所有的运维工作及质量检验工作应该被详细规范地记载下来，形成完整的运维日志和质量控制档案。这些都是对系统运行情况的“体检报告”，也是数据出现异常时，进行问题追查的凭据。对日常运维质检进行系统化、规范化管理，能很大程度上减少因设备故障、状态偏离而造成的无效数据，从而保证监测数据的连续有效。

二、数据审核与质量评估方法

数据审核与质量评定，即对已经产生的数据的可用性、合理性、准确性进行系统的检验。它是数据质量管理的最后一道防线，使用一系列的技术和统计方法，剔除无效、异常的数据，对整体数据质量做出客观的评价，保证预警系统和社会公众所发布的数据是可靠的、有代表性的。

（一）数据有效性的判断标准

数据有效性是衡量监测数据是否可用作统计与评价的第一个标准。一个数据点或者一个时段的数据是否有效，取决于监测系统在该时段运行状态是否满足一系列预设条件。这些标准一般会在有关的技术规范和法规中加以规定，是数据审核中客观且刚性的评判标准。自动监测数据的有效性判断一般是分层次的，先对

分钟数据、小时数据，再对日均数据，逐级进行。

仪器状态是判断依据。在仪器出现故障、校准、维护、断电、预热等非正常工作时产生的数据一般视为无效数据。第二，数据捕获率，例如平均一个小时的数据有效采集到的分钟数据比例是否达到规定值（75%）。同样，日均值是否有效，也取决于组成它的小时数据中有效小时值的多少（比如 20 小时以上）。

质量控制的结果也是判断的标准。在日常的零点、跨度核查中，若发现仪器漂移超出规定控制限，则从上次合格到本次发现问题并完成校准之间所产生的数据，可能需要判为无效或者可疑。对于受到不可抗力的自然灾害或者附近突发污染事故明显影响的数据，即使仪器正常运行，但数据代表性不够，也应当做标记，在后续数据使用中需要特别说明或处理。数据库中所有的无效数据不能直接删除，而应该用特定的标识码标记，保存原始值，便于之后的质量稽查与问题追溯。

（二）异常数据的识别与处理

异常数据，又称离群值，是指数值上显著不同于数据集内其他大部分观测值的数据点。数据由于仪器瞬时故障、环境突然变化、人为干扰等原因造成，如果不及时处理，将会严重影响数据分析和评价的结果。异常数据识别是用统计学的方法结合专业知识进行的一种综合判断。

常用的异常数据识别方法包括：

1. 逻辑核查 + 阈值核查，看数据是否超出物理或者理论上可能的最大值，比如浓度值为负数或者数值突然跳变至历史极值以上。同时查看数据变化率是否正常，浓度不可能短时间内发生剧烈的跳变。

2. 用统计学原理， 3σ 准则（拉依达准则）认为，如果数据服从正态分布，那么把均值加减三倍标准差范围的数据点视为异常。箱形图法用四分位距来确定异常值的范围，对于非正态分布的数据有较好的适应性。

3. 利用数据在时间、空间上的相关性：监测点的数据一般和前一时刻的数据连续，同时间段内相邻监测点的数据也有一定的相关性。如果某个数据点与这两个维度的期望值差别很大，那么这个数据点是异常值的可能性就比较大。

4. 模型预测法：用 ARIMA 等时间序列模型或机器学习模型进行预测，将实际观测值和模型预测值比较，差异太大就认为是异常。

对异常数据识别之后，处理方式要慎重。首先要进行溯源，分析异常产生的原因。如果是仪器故障或者记录错误，则此数据为无效数据。对不能确定原因的

孤立异常点，可适当处理，常用的方法有剔除、插值法修复（如线性插值、均值替换等），任何修复操作都必须标注清楚。对于大量监测数据来说，可以建立自动识别和标记出异常数据的系统，人工审核为辅，这是比较有效的方法。

（三）监测数据质量的综合评估

监测数据质量综合评价是在基础数据审核完成之后，从更高层次、更长周期的角度，对整个监测网络或者单一站点进行整体数据质量系统评价。目的是反映数据质量水平、发现系统存在的缺陷、为质量保证体系的持续改进提供方向。综合评价一般将定性指标和定量指标结合起来，形成一个多维度的评价体系。

评价的内容主要是数据的准确性、精密度、完整性、代表性和可比性。系统偏差、随机误差的精度、准确性可以采用更高等级的参考方法或者移动监测车进行对比检验，也可以通过定期的实验室间比对、能力验证活动来检验。完整性用有效数据率来衡量，即有效数据量占应该获取的数据总量的百分比，这是评价监测系统运行稳定性及运维保障能力的重要指标。代表性和可比性更多依靠站点布设、监测方法、校准溯源体系的合规性来保证。

为了达到综合评价的目的，可以创建一个数据质量指数。该指数是按照关键质量指标（零漂合格率、跨漂合格率、多点校准合格率、数据有效率、审核标记数据比例等）加权平均计算出来的。通过数据质量指数长时间的跟踪，可以清楚地看到数据质量的好转或者恶化的趋势，也可以比较不同站点或者不同的运维单位的数据质量管理水平。评估报告要对各项指标背后的缘由加以剖析，数据有效率低是由于仪器时常出故障还是电网不稳定造成的，都要分析清楚，再给出相应的改进措施。依靠数据、依靠不断循环的综合评价和反馈，成为整个监测预警系统数据质量螺旋式上升的动力。

第三章 空气质量监测网络规划与设计

第一节 监测点位布设原则与方法

一、监测点位布设的基本原则

（一）代表性原则

代表性原则是监测点布设的首要原则，即监测点所得到的数据要能客观、真实地反映其所覆盖的某个空间范围的环境空气质量平均水平和时间、空间的变化规律。具有代表性的点位监测结果不但可以反映该点位周围的空气质量状况，而且还可以代表一个功能区、一个城市或者一个区域的整体空气质量特征。为了达到上述目的，点位的选择不能靠近小范围污染源和无组织排放源，例如远离建筑工地、餐馆烟囱、小型锅炉、停车场等经常活动的地方。采样口周围要保证空气流通，防止建筑物遮挡或者特殊地形（洼地、狭窄街道峡谷等）造成污染物扩散受限，出现局部高浓度或者低浓度的区域，使得监测数据缺少空间代表性。

点位的代表性范围不是固定不变的，它会因监测目的、点位类型的不同而不同。城市总体空气质量观测点的代表范围一般为 0.5 公里到 4 公里；受区域传输影响的区域点，其代表范围可以达到几十公里。所以，布点规划阶段必须根据历史监测数据、污染源清单、气象扩散模型、土地利用类型等多源信息对备选点位的代表性进行科学的评价。利用模型模拟和数据分析可以预测各个点位对污染物响应的敏感程度，从中选择能够最大程度反映目标区空气质量共同特性的点位。代表性就是指监测数据能够科学地评价人群暴露水平、判断污染源对环境的影响、验证模型预测结果、给公众提供可靠的健康指导。

点位代表性还表现在对不同的环境功能区进行覆盖上。城市空气质量的分布不是均等的，工业区、商业区、居民区、交通干道、公园绿地等不同功能区的污染情况也不一样。监测网络的设计应该考虑到空间异质性，通过布置不同的监测点来反映各个功能区空气质量的情况。一方面可以得到更细致的空气质量信息，另一方面可以为分区、分类的污染控制措施提供依据。整个监测网是用代表性的

点位组成的一张城市空气质量分布图，为精准治污、科学决策提供支持。

（二）空间覆盖性原则

空间覆盖性原则也叫整体性或者均衡性原则，即要求监测点位在地理空间上合理、均衡地覆盖，从而构成一个可以全面反映整个目标区域空气质量状况的网络，而不是孤立的点位简单组合。这一原则是从宏观上对网络进行规划，保证监测网络可以体现区域内空气污染物的空间分布特征、浓度梯度、污染高值区和清洁区。监测网络的点位分布要与城市建成区范围、人口密度分布、主要功能区布局相适应，不能出现某个区域点位过多而另一个区域大片空白的情况。

实际操作中想要达到有效的空间覆盖，就要综合使用多种技术手段。地理信息系统是开展空间规划的有效手段，利用城市地图叠加分析人口分布热力图、污染源分布图、土地利用规划图等，可以直观地找到需要重点管控的地区以及监测力量薄弱的区域。根据主导风向、地形地貌等气象地理因素，初步规划出点位的空间分布格局，保证点位在空间上分布的均匀性、合理性。城市建成区的点位应该相对均匀地分布在各个行政区、不同的功能区，在人口密集的居民区、公共活动区适当增加点位的密度，从而更好地评价人群的实际暴露风险。对于面积较大或者形状不规则的城市，还要考虑建成区未来的发展趋势，预留发展空间，保证网络长期有效的覆盖。

（三）可比性与稳定性原则

可比性原则就是要求同类型监测点位设置条件尽量相同，从而保证不同地区、不同时段取得的监测数据有科学的横向和纵向可比性。横向可比性指的是在同一时间点上，不同城市或者同一城市内不同功能区的同类型监测点测量的数据，由于采用同样的布置、运维标准，可以直接比较，用以评价区域间空气质量差别。纵向可比性是指单个监测点长时间序列上数据的一致性，即数据的变化能够真实反映空气质量实际的波动，而不是由于点位周边环境的变化或者仪器更替等人为因素造成的。

为了保证数据可比，在布设点位时一定要遵循一些标准化的技术要求。即采样口高度应在3米到15米之间；与周边建筑物、树木的距离大于建筑物的高度或树木的高度的两倍；交通道路边缘要保持一定距离，以免受到微环境的影响。所有的点位应使用符合国家标准的监测仪器，采用同样的质量保证与质量控制程序，同样的校准与维护程序，这些都是保证数据可比性的重要环节。只有这样，

全国或者区域监测网络汇集起来的数据才能形成一个逻辑上自洽、标准统一的“大数据库”，给跨区域联防联控策略的制定以及政策效果的评价提供可靠的支持。

稳定性原则是可比性原则在时间上的延伸和保证，它强调监测点位经过科学的论证之后就应该长期稳定，原则上不能随意变动。环境空气质量监测的重要目的之一就是分析它的长期变化趋势，用以评价污染治理的效果和预测其未来的发展趋势。如果监测点位频繁改变，就会造成监测数据集的连续性断开，新旧点位所代表的微环境可能会不一样，不能直接接上，从而严重影响趋势分析的准确性、可靠性。一个点位的历史数据是很有价值的资产，它的价值随着时间的推移只会越来越大。

稳定性并不是绝对的静止。只有当城市规划引起监测点周围环境发生根本性改变，原来的居民区变成大型商业中心或者交通枢纽，使得点位原有代表性不再时；或者由于不可抗力导致点位不能继续使用时，才需要启动点位变更或者迁建程序。这个过程必须要经过严格的科学论证，在新旧点位并行监测一段时间后，通过数据分析来确定二者之间的换算关系，从而尽可能的保证数据序列的连续性。规划阶段就充分考虑城市未来发展规划，选择周边土地用途可预见的未来较为稳定的区域布设点位，这是保障点位长期稳定的前瞻性措施，是监测网络规划的远见和科学性。

二、不同功能区的点位布置方法

城市环境空气是一个复杂的系统，其质量在空间上存在明显的异质性，异质性主要是由于各个区域的功能定位、污染源特征等所造成的。因此不能用“一刀切”的方式进行布点，应该根据各功能区的特点采取不同的点位布置方式，才能真实反映各个区域空气质量的差异。

常见空气质量监测点位类型与特征表

点位类型	主要目的	选址特征	代表性范围	核心考虑因素
城市背景点	反映城市区域的本底空气质量水平	城市主导上风向远郊，远离城区污染源	较大区域（如20公里外）	远离污染源、地形开阔、未来规划
区域对照点	监测更大地理尺度的区域本底空气质量	远离城市群、工业密集区，偏远地区	数十乃至上百公里	纯净环境、远距离传输、全球气候变化
污染监控点	监测特定污染源对局地空气质量的影响	大型工业源下风向最大浓度落地区域	较小范围（几百米半径）	污染源排放参数、气象扩散模型、敏感受体
交通污染点	监测机动车尾气对道路周边空气质量影响	车流量大、易堵的城市主干道、交叉路口附近	道路两侧狭长地带	靠近路边、下风侧、人体呼吸带高度
城市评价点	评估城市建成区整体空气质量及变化趋势	均匀分布于建成区，兼顾功能区代表性	整个城市建成区	网格化布局、人口密度、功能区覆盖

从上表可知不同类型的监测点位在目的、选址及代表性范围等方面存在着明显的差别，但是它们一起构成了城市空气质量监测网络完整的体系。

（一）城市背景点与区域对照点的布设

城市背景点和区域对照点在全部监测点当中处于特殊的地位，二者一起组成用来评价某一个地区空气质量本底水平的参照。此类点位的核心布置目的就是获取不受城市或者局部污染源直接影响、可以反映较大范围清洁空气水平的空气质量数据，用以判断外来输送污染、评价城市污染贡献。

城市背景点又叫清洁对照点，布设选址首先要避开城市建成区内各种人为污染源。一般设在城市主导上风向的远郊或者乡村地区，与最近工业区、主要道路、居民区等保持一定的安全距离，一般大于20公里才能保证监测数据反映的是该城市所在区域的背景值，而不会被该城市本身的污染所影响。选址时还要考虑以下因素：

- 1. 地形地貌，选择地势较开阔，空气流通较好的地方，不宜选在山谷、盆地等不利于污染物扩散的地形上。
- 2. 植被覆盖：周边宜有较好的植被覆盖，如公园、林地或农田，这有助于减少本地扬尘的产生。

3. 未来规划：必须了解当地的城乡发展规划，保证所选点位在未来很长一段时间内不会被新的开发项目所包围，从而失去它的背景属性。

布设城市背景点可以去除城市活动对空气质量的净影响，不能替代本地污染贡献率的量化，区域联防联控成效的评价。

（二）污染监控点与交通污染点的布设

污染监控点、交通污染点的布置集中在城市中污染最严重、最突出的“热点”地段，其主要目的就是対某个污染源或者某类污染进行监测，评价它对周围局部空气质量的影响，以及高浓度污染物对人体健康造成的危害。这两种点位布设方式针对性很强，直接对准主要的污染排放源，是开展精细化污染源监管、环境健康风险评价的重要技术方法。污染监控点的布设，主要是对大型固定工业污染源，如发电厂、钢铁厂、化工厂、水泥厂、大型工业园区等。布点的主要原则就是找到污染物排放源附近的最高落地浓度点。这就得依靠大气污染扩散模型，把污染源的排放参数（烟囱高度，排放速率，烟气温度等等），再加上当地多年气象资料（风向，风速频率，大气稳定度等等）拿来，模拟算出污染物在下风向不同距离处的浓度分布。一般情况下，点位设置在模型预测的最大浓度落地区域或者其附近，同时考虑居民区等敏感受体的分布情况，在主要下风向的居民区设置监控点，直接评价对人群的影响。此类点位的代表性范围小，一般为几百米的半径范围，监测数据不能直接参与城市空气质量的总体评价，但是对核实企业排放是否达标、评价污染治理设施效果、发生污染事故时进行应急监测等方面起着非常重要的作用。

交通污染点是用来检测车辆尾气对道路附近空气造成的影响的。随着城市化的加快，交通污染已经成为大城市的主要空气污染源，在道路两侧形成街道峡谷的地方，污染物容易积聚起来，形成局部的高污染区。交通污染点的布置方法主要根据道路本身的特征来定，有明确的规定。点位一般设置在车流量大、容易堵车的典型城市主干道、交通枢纽或者交叉路口附近。采样口应尽量靠近路边，距离道路边缘不大于 20 米，并且位于道路的下风侧，方便采集车辆排放的污染物。采样口高度也需考虑周全，应处于人体呼吸带高度附近，以更好地体现行人及周边居民的暴露状况。由于交通污染物的浓度随距离的增加而迅速衰减，交通点的代表性范围主要是道路两侧的狭长地带。监测数据主要是了解与交通有关的空气污染情况，探索交通污染物随时间和空间的分布规律，从而为制定交通管理、尾

气控制政策提供一定的参考。

（三）城市评价点的布设

城市评价点是形成环境空气质量监测网络的主体和骨架，城市评价点布设的根本目的是科学、客观地反映城市建成区环境空气质量整体状况及长期变化趋势。这些点位的数据是计算城市空气质量指数的基础，也是进行城市之间对比、评价地方政府大气污染防治工作成效的基础。因此城市评价点布设的方法要全面、均衡、有代表性，点位组合能够反映整个城市空气质量的全貌。布设过程一般用网格化布局和功能区叠加相结合的方法。将整个城市建成区划分为大小相近的网格，网格的大小一般为 2 公里乘 2 公里或 4 公里乘 4 公里，以此为基础框架，在网格内或网格交点处选取初步备选点位，保证空间分布的初步均匀性。该方法可以有效地防止因为主观选择而造成布局失衡，保证监测网络对整个建成区的基本覆盖。

在网格化布局的基础上还要根据城市功能区进行优化调整。一个城市包含商业区、交通区、混合区、工业区等不同的功能区，各功能区的污染源类型、强度也各不相同。所以评价点网络要保证每个主要功能区至少有一个监测点，这样才能反映出各个区域的空气质量特点。在商业繁华、人口稠密的地区、典型居民小区、工业比较集中的地方都应设置代表性的评价点。点位数量及位置的最终确定要结合建成区面积、人口规模、污染源分布特征、气象条件等因素来考虑。相关技术规范会给出城市人口或建成区面积下最少布点的数量，在此基础上，尽可能使点位分布和人口密度分布正相关，即人口稠密区应该布设更多的点位。

最终确定城市评价点位就是进行迭代优化和科学论证的过程。初步方案确定之后，还要依靠历史数据，模型模拟等方式来评价备选点位网络的代表性。把评价点网络得到区域平均污染浓度与高密度加密监测或模型模拟的“真值”进行比较，保证误差在 10% 到 15% 内。点位的选取还要考虑现场操作的可行性，供电、通讯方便，仪器安全，维护人员能到达等。采用这样的系统布置方式，城市形成之后，可以以最低的成本，给城市提供稳定可靠并且充分代表的一组监测数据，以此为基础，给城市的空气质量管理与决策提供强有力的支持。

第二节 监测网络优化设计理论

一、监测网络优化的目标与准则

监测网络的改良过程是包含诸多目的、诸多约束的复杂决定过程。其关键之处在于确定一套恰当的评价目标以及判定标准。这些准则给网络设计的合理性、科学性提供评价依据，指引优化方向，保证最后设计的网络布局能全面满足环境监测和管理的各项要求。通常优化目标有获取信息能力、经济投入、系统稳定性等各个不同的方面，在这些不同的目标中找到最佳的平衡。

（一）信息最大化准则

信息最大化准则认为，监测网络的设计要以获取区域空气质量时空分布最丰富、最有效信息为宗旨。其基本思想是每个监测站点的布置应该使整个网络获得的信息最大，而使各个监测站点之间的信息冗余最小。信息最大化并不是监测数据的广覆盖，而是要保证监测数据可以真实的反映整个地区的污染情况。评价一个网络是否满足信息最大化的标准，就是考察该网络能否正确反映污染物的空间梯度变化、能否有效识别出高值区和典型背景区、能否为污染物扩散模型的验证和校准提供足够有效的数据。

要达到该准则，需要有对区域内污染特征的先验知识，即主要污染源分布、强度、类型、区域地形地貌特征和主导气象条件等。根据上述分析可以大致得出哪些地区的信息价值较高。在污染源密集的工业区、交通干道两侧以及不同功能区的交界处，污染物浓度变化较大，在此设置站点有利于获得有关污染源的影响和局地扩散规律的信息。污染物浓度分布比较均匀的地区可以减少监测点的数量。

信息最大化准则在实践中一般会用量化指标来度量。如用区域内任意一个未监测点的估算浓度与实际浓度之差，评价此网络信息获取能力的好坏，差值越小，说明此网络给出的信息越准确。另一个指标就是站点之间的空间相关性。如果两个站点的污染物浓度序列相关性高，说明它们提供的信息大部分是重复的，其中一个站点就可以作为冗余站点。在优化过程中要找出这类冗余站点，将其移至信息量大或者信息不确定性高的地方，从而有效提高整个网络的信息效率。

信息最大化准则的应用，目的在于使监测网络不只是一堆数据点，而是一个能系统地、结构化地反映复杂大气环境过程的信息系统。它要求网络的布局要体

现污染事件从产生、发展到消散的全部过程，给认识污染成因、评价控制措施效果提供重要的数据支撑，进而推动空气质量的持续改善。对于信息价值的追求，促使着监测网络的设计由原来的均匀布点或者经验布点，向更加科学化、精细化的方向发展。

（二）成本效益最优化准则

成本效益最优化准则，指在监测网络的规划、建造、运行和保养全部时日当中找出最佳契合点。建设并经营一个环境空气质量监测网络要投入很多资金，涉及站点选址与建设、设备购买、日常运作、人员安排、数据质量控制及传输等各项开支。成本效益原则是要求在达到基本监测目标的基础上，实现环境、社会、经济效益最大化，并把经济投入最小化。该原则本质就是用有限的预算来获得最大的监测网络价值。

监测效益属于综合性的概念，它的内涵非常广泛。直接效益就是获得空气质量数据的质量和数量，数据的准确性、完整性、代表性、时空分辨率等。高质量的数据是之后所有环境管理活动的基础。间接效益更为广泛，例如给公众健康风险评估提供支持，从而减少由于空气污染造成的健康损失；为环境政策制定和评价提供科学依据，防止决策失误造成巨大的经济和社会损失；为企业排污治理、减排技术改造更新提供方向指导，推动绿色发展；通过及时的预警预报，削减重污染天气对社会生产生活造成的冲击。

在做成本效益分析的时候，需要对网络的“成本”和“效益”进行量化。成本量化比较直接，可以用预算、决算清晰核算出来。效益的量化比较复杂，一般要依靠环境经济学的方法。即可以通过衡量监测数据在减少公众健康支出、避免工农业生产损失、提高城市宜居性等方面所起的作用，从而把其转化成货币价值。还可以利用非市场价值评价的方法，如意愿支付法，来度量人们对于质量更高的空气信息的支付意愿。建立成本函数和效益函数，分析不同网络规模和布局方案所导致的成本和效益的变化，找到边际效益等于边际成本的最佳点。

（三）网络稳健性准则

网络稳健性准则，又叫鲁棒性准则，指监测网络在部分站点失效、设备故障、数据丢失、外在环境条件出现非预期变化等情况之下，仍然可以保持大部分监测功能和信息输出的性能。稳健的监测网络具有较强的抗干扰能力、容错性，不会因为局部或者偶发的故障造成整个监测系统瘫痪，也不会造成输出信息质量出现

断崖式的下降。环境监测过程中，由于断电、设备检修、通讯中断等种种原因造成站点暂时不能提供有效数据的情况十分普遍，因此网络的稳健性对保证数据的连续性、预警系统的可靠性十分重要。

评估网络稳健性的关键在于分析单个或多个站点失效对整个网络信息获取能力的影响。

1. 如果网络中移除某站点后，区域空气质量评价的不确定性变化不大，则该站点在网络中就具有很高的可替代性，整个网络的稳健性也较强。如果某一个关键站点的缺失会导致某一个重要区域（如重污染区、人口密集区等）的污染情况完全无法掌握，或者造成区域平均浓度估算出现巨大的偏差，那么就说明这个网络对于该站点的依赖性过高，稳健性差。

2. 优化设计不能造成关键节点过于集中，应该采用合理的冗余设计和站点布局，使各个站点的功能可以互相备份、支撑。以一个功能相似的区域为例，设置多个站点，虽然在一定程度上会造成信息的重复，但是可以极大地提高网络的抗风险能力。当某个站点出现故障的时候，其他站点的数据也可以给该区域的空气质量状况提供大致判断。

网络的稳健性还表现在对于动态变化的适应能力上。因为城市化进程、产业结构调整、污染源的变化，所以区域污染的空间格局不是一成不变的。一个稳定的监测网络应该具备一定的灵活性和前瞻性，其布点既要反映目前的污染情况，也要考虑到将来可能发生的变化。例如，在新城市规划区或者可能产生污染的附近保留一些监测容量，就可以保证网络在城市格局改变之后仍然有效。

因此网络稳健性标准从系统可靠、长期有效两个方面对监测网络提出要求。它要求网络的设计要实现信息的最大化、成本的最小化，还要考虑系统的抗风险能力。在关键位置适当增加冗余节点，保证各个站点的互补性，并不断地分析并调整网络的结构特点，可以提高监测网络的稳定性和适应性，保证不同情况下都可以为环境和公众健康提供支持。

二、监测网络优化的数学方法

为了把上面优化的目标和准则从理论概念转化为可以实施的方案，就需要一系列科学的数学方法。这些方法可以对监测网络的布置做定量分析、评价，系统性地找到最优或者接近最优的方案。不同的数学方法侧重点也不同，它们从统计

学、地理信息科学、信息论等学科的角度，给监测网络优化设计提供强有力的理论手段和计算支持。各种方法的特点和应用场景见下表。

监测网络优化数学方法对比表

方法类型	核心思想	主要技术与指标	适用场景与优势
基于统计学	利用历史数据揭示污染物时空变异与相关性	空间方差最小化、主成分分析、因子分析、聚类分析	区域达标评价、识别污染源影响、精简冗余站点
基于空间插值	通过已知点推算未知点浓度，追求插值精度最小	克里金插值、反距离加权、样条函数	绘制精细污染图、识别污染热点、暴露评估、发现监测盲区
基于信息熵	衡量网络信息量及不确定性，最大化信息获取	站点信息熵、互信息、转移熵	识别信息冗余、大幅降低成本、智能化设计、大样本数据

（一）基于统计学的优化方法

基于统计学的方法是监测网络设计中最常用、也最成熟的一类方法。该方法的基本思想是利用历史监测数据或者模型模拟数据，经过统计分析来发现污染物浓度场的时空变化特征以及相关性结构，然后根据这些特征和结构来决定站点的增减或者迁移。其实质就是通过重新布置站点，使得根据站点数据对整个区域污染状况的统计推断（如估计区域平均浓度、绘制浓度等值线图等等）最为理想。

最常用的统计学指标之一就是空间方差。全区平均浓度估算误差最小化属于经典的优化目标。该估算误差的方差大小，就体现了监测网络对区域总体污染水平的代表性。经由数学推导可知，估算误差方差同站点数量、站点位置以及污染物浓度的空间自相关函数有着密切联系。可以设计出一种优化算法来寻找一组站点位置，使得估算误差的方差最小。这样可以保证监测网络用最高的统计效率来反映区域的平均污染情况，更适合以区域达标评价为主的监测网络。

另一类重要的统计学方法是主成分分析或者因子分析。多元统计的方法可以用来分析多个污染物或者多个站点之间的相关性。多污染物浓度数据做主成分分析，可确定主要的污染来源种类和影响区域，据此在优化布点时着重覆盖主要污染贡献源的影响区。对多个站点的监测数据进行分析，也能反映出各个站点的信息冗余度。如果多个站点的浓度变化趋势非常接近，那么这些站点受到的污染过程是相同的，存在信息重复。由此可以对这些站点进行筛选，保留代表性强的站点或者将部分站点移到信息缺失的区域。

聚类分析也被广泛地应用在了网络优化上。该方法可以对有相似污染特征的区域或者站点进行分类。按照污染程度、污染物种类、日变化规律等特点,将城市区域划分为若干个均质的子区域。优化目标就是每一个子区域至少要设一个代表性的站点,保证网络的全面性。对于已有的监测网络,也可以对所有的站点进行聚类,如果发现有多个站点被聚类到同一个类别中,那么就说明存在冗余,这就为网络的精简调整提供了一个直接的依据。这些统计学方法把复杂的布点问题转化为了计算性的统计量优化问题,给决策提供了一个客观量化科学依据。

（二）基于空间插值的优化方法

基于空间插值的优化方法属于地理信息科学和环境科学交叉应用范畴,核心是用已知监测站的观测值来推算空间中任意未知点的污染物浓度。空间插值精度是反映监测网络对区域污染物空间分布表征能力的指标,好的监测网络应使整个区域的插值误差最小。这类方法非常适合绘制详细的污染地图、找到污染热点区域和做暴露评价等工作。

克里金插值法是该领域中最重要、也是最流行的一种方法。它是以变异函数理论为基础,无偏的最优估计方法。变异函数表征的是污染物浓度在空间上相关性和变异性,两点间距离越近,其浓度值差就越小。克里金法不仅可以给出未知点的最佳估计值,还可以给出估计值的方差,即插值误差的大小。这个估计方差可以反映这个点的信息的不确定程度。因此,监测网络优化目标就是使整个区域的平均克里金估计方差最小。按照此准则,新站点应该设在克里金方差最大的区域,因为这些地方就是目前网络信息最薄弱、不确定性最大的地区。网络裁减时,则应该先去掉对整体插值方差贡献最小的站点。

除经典的克里金法外还可以用反距离加权法、样条函数法等其它空间插值方法。尽管这些方法的理论基础以及复杂程度各有不同,但是它们在网络优化中应用的逻辑是相同的,也就是通过对各种布点方案下全区的插值精度进行评价,从而找到最佳的布局。可以用逐个剔除的方法简化网络,即逐个假设去掉网络中的一个站点,计算剩下的站点对全区插值产生总误差,选择移除后总误差最小的那个站点作为裁撤对象。增设站点时,在所有可能的候选位置里选择加入后会使全区插值总误差最小的位置。

（三）基于信息熵的优化方法

基于信息熵的优化方法起源于信息论,给监测网络所提供信息量赋予了一种

独特的视角。信息熵是衡量系统不确定性的指标，信息熵越大，系统不确定性越高，包含的潜在信息量也越大。环境监测网络优化时，该理论被用来衡量监测站点或者监测网络可以提供多少信息内容，优化目标通常是最大化整个网络所获得的总信息量，或者最小化移除站点造成的信息损失。

核心概念就是利用监测数据计算单个站点的信息熵、站点之间的转移熵或者互信息。单个站点信息熵可以反映该站点监测数据自身变化性、不确定性。如果污染物浓度变化剧烈、规律性差，则该站点信息熵大，所能提供的环境动态变化信息也就越多。站点间的互信息用来衡量两个站点数据的相关性或者信息重叠度。如果两个站点之间的互信息很高，那么这两个站点所提供的信息是一致的，是冗余的。因此网络优化的一个主要任务就是合理布置站点，使各个站点自身信息熵较高，而站点间互信息较低，从而达到整个网络信息获取效率最高。

在应用信息熵的优化中，一般按照如下步骤来执行：第一步计算网络内各个站点的信息熵值；第二步找到信息量比较小的站点作为裁减对象；第三步计算站与站之间的互信息；第四步选择信息高度冗余的站组合。根据单个站点的信息量和站点之间的冗余度来考虑，可以对每一个站点在整个网络中的价值以及可替代性做出系统的评价。新增加站点的时候，候选位置应该选取在可以最大程度提高整个网络总信息熵的位置上，也就是现有网络覆盖比较弱、环境状况不确定性较高的地方。

相比于前两种方法，基于信息熵的方法并不直接依靠空间分布的无偏或者最优估计，而更多的是从数据本身的不确定性和相关性结构方面来评价信息量，这就为网络优化提供了一个新的角度。它可以很好地识别出数据中的冗余，在保证信息总量基本不变的情况下，大大降低监测成本。用该方法优化地下水监测网络可以大幅度减少监测井数量，几乎不影响整个网络所获得的信息量。本方法对于大样本量、多维数据集特别适用，可以从错综复杂的相互关系中提取网络本身的信息结构，为环境监测网络的智能化设计提供有力的理论基础。

第三节 区域空气质量监测网络构建

一、区域监测网络的构建目标

（一）反映区域空气质量背景与传输特征

区域空气质量监测网络的第一目的，就是对大范围内空气质量本底及污染物跨区域输送规律进行准确刻画。不同于仅覆盖城市建成区的监测点位，区域监测网络在更广大的地理空间里进行有策略性的布设，从而获得不受城市局部污染源直接干扰的区域背景空气质量水平。背景监测点一般设在远离城市和工业区的郊区或者乡村，其监测数据代表的是广域范围内的环境空气质量基线，可以作为评价城市污染程度的参照。经过长时间的连续监测，可以反映区域大气环境的大体变化趋势，给制定长时间的环境保护战略给予宏观上的支撑。

该网络的主要任务就是对污染物在区域间流动的过程进行动态监测。大气污染物不是静止的，在气象条件的作用下会发生复杂的跨界流动。在重点区域，于城市之间、城市群之间以及不同的行政区域交界处合理布置传输通道监测站，就能较好地捕捉并量化污染物的输送通量和路径。在上风向和下风向的关键通道站点布设监测点，可实时跟踪污染团的移动、扩散、转化过程，从而判定各城市或者区域间对空气质量影响的轻重。这些数据对解析重污染天气成因很关键，可以帮决策者找出主要的污染来源地和传输贡献，进而冲破行政壁垒，给实施有效的区域联防联控举措赋予直接的科学依据。

（二）支撑区域大气污染联防联控

建立区域监测网络，成为实施大气污染联防联控战略的技术基础。对于灰霾、臭氧污染等日趋严重的大气区域性复合污染，单靠一个或几个城市地区是无法根治的。由于污染物在各个行政区域间相互影响、相互输送，所以协同治理势在必行。区域监测网络给地方政府提供全面的、可以比较的实时监测数据，地方政府站在统一信息平台上诊断污染原因、评价污染情况，从而打破“以邻为壑”的局面，形成统一的污染防治行动打下了坚实的基础。

当预报或者已经出现区域重污染天气时，区域监测网络的数据就可以显示出污染物的分布、严重程度和污染物随时间变化的空间趋势。据此区级部门可以快速启动联防联控预警机制，采取企业限产、停产，机动车限行等应急减排措施。

在这个过程中，监测网络像“指挥官的眼睛”，可以及时对各项联防联控举措的落实、减排成效进行监测，跟进行污染峰值的削减和空气质量的改善状况，给后面决策调整给予迅速反应。由此，区域监测网络把分散的治理力量凝聚成一股强大的合力，大大提高了重污染天气应对的效能，是实现区域空气质量共同改善不可或缺的重要支撑。

（三）服务于区域环境规划与评估

区域监测网络不但是短期应急响应的手段，也是中长期环境规划和效果评价的战略性基础设施。在制定区域发展规划、产业布局调整、能源结构优化等重大决策的时候，长时间累积起来的区域空气质量监测数据，能够给予重要的环境容量与背景约束方面的信息。通过对历史数据的分析可以评价各个区域的大气环境承载力，找到环境敏感区和污染热点区，进而指导区域内城市规划及工业项目选址更加科学合理，避免由于规划不合理导致区域性环境问题加重。例如在规划新的工业园区的时候可以利用监测网络所揭示的主导风向、污染物传输路线来选择对下游敏感目标影响最小的地点。

该网络也是客观、公正评价区域大气污染防治政策与规划执行效果的重要手段。不论是国家级的大气十条这样的大规模方案，还是京津冀、长三角等地制定出的细化措施，最终也都必须依靠具体的监测数据来评定。由区域监测网络得到的一系列连续、一致的数据，可以反映出政策实施前后整个区域的空气质量总体变化趋势，重点污染物浓度的变化幅度，重污染天数和重污染强度的变化状况。这种依据证据来开展的评价方法，一方面可以对政策是否有效作出判断，并为之后的政策改良给予参考支撑，另一方面也可以向民众明确展示环境治理的成果，改善政府的信誉度，进而构建起一个从规划、推行再到评价的闭环式管理体系。

二、区域监测网络的架构设计

一个好的区域监测网络应当具有宏观的代表性、微观的精确性，并且可以合理的科学的整合起不同功能、不同层次的监测站点。这样的设计不仅要确定监测点位如何布设，还要谋划监测内容和协同机制，最终创建起一个可以全方位剖析区域大气环境复杂性的立体观测体系。

区域监测网络主要由不同功能定位的站点构成，其主要类型及功能特点可见下表。

区域空气质量监测站点类型及功能特点表

站点类型	主要功能	布设原则 / 位置	监测重点
超级站	技术引领，科学研究核心；深入剖析污染成因；支撑模型预报与评估	区域代表性中心城市或污染复合突出区域	常规污染物、颗粒物组分、VOCs、气溶胶垂直分布、边界层高度、温室气体
背景站	标定基准，反映区域本底空气质量水平；分析远距离传输影响	远离城市和工业区，如国家公园、自然保护区、偏远山区	区域环境空气本底水平，长期变化趋势
传输站	刻画污染物迁移路径；监测跨界输送；量化区域间影响	重点城市群之间、工业区上下风向、行政区域交界处关键通道	污染物输送通量、传输路径，区域间影响
城市站	反映城市建成区空气质量；服务城市环境管理与公众信息发布	人口稠密居民区、商业区、交通干道旁	城市内部空气质量，市民暴露水平，本地污染源

（一）超级站的引领作用与功能定位

大气环境监测超级站是区域监测网络整体架构中起着引领技术、进行科学研究的作用的一个核心点。其功能远超过一般监测站点，除可以检测二氧化硫、颗粒物等六种基本污染物外，还有大量的高精度分析仪器，主要为了研究大气化学过程。核心功能可以概括为如下几点：

1. 深入分析污染成因：超级站可以对大气颗粒物的化学组成、粒径分布、光学性质和挥发性有机物的详细组成做高时间分辨率的在线监测。这些数据对分析PM2.5 和臭氧等二次污染物的形成机理，确定污染源有很重要的作用。通过对监测数据进行分析可以得出本地和区域传输的贡献度，进而为提出具体的治理方案提供科学的依据。

2. 支撑模型预报与评估：超级站获得的气溶胶垂直分布、边界层高度、温室气体浓度等立体多参数观测数据是空气质量数值预报模型研发、检验及改进的重要数据来源。精确的本地化参数可以明显提高模型预报的准确率，给重污染天气的预警预报、减排措施效果评价提供更加可靠的依据。

3. 区域技术高地：超级站是试验新型监测技术和方法的基地。无论是卫星遥感反演算法的地面验证、新型传感器的性能比对等，超级站都能提供一个标准化的、可以参照的实验环境，从而推动整个区域监测技术水平的整体提高。

超级站一般设在有区域代表性的中心城市或者污染复合性明显的地区，是整个监测网络的技术核心。它产生的深度数据和科学认知可以辐射到区域内其他的站点，进而指导各个站点进行功能定位和数据解释，提高整个网络的科学性以

及实用性，将网络由单纯的数据收集系统变为驱动科学认知，精细化管理的核心引擎。

（二）背景站与传输站的布局策略

背景站、传输站在区域监测网络中起着标定基准、刻画传输路径的战略作用，布设方案决定着整个网络能否准确反映出区域污染的整体情况。背景站的选址必须遵循“纯净”原则，即设置在基本不受任何直接污染源和城市活动影响的区域，如国家公园、自然保护区或偏远山区。其主要目的就是监测国家或者大区域范围内环境空气质量本底水平。这个本底值就好比衡量空气质量的标尺，给其他地区污染程度的评价提供了一个绝对的参照系。长期观测背景空气质量的变化可以分析全球或者洲际尺度的气候变化、污染物远距离输送对区域本底的影响，具有重要的战略意义。

传输站的布点采用“通道”原则，即监测污染物在区域内的迁移以及跨界输送。此类站点主要设置在重点城市群之间、主要工业区上下风向、行政区域交界处的重要输送通道上。布设时要综合考虑历史气象资料、数值模拟结果以及卫星遥感数据，正确找出污染物的主要输送路径和汇集区。京津冀地区常在太行山、燕山山前地带布设传输站，来捕捉污染物在地形作用下的汇聚、输送过程。传输站获取的数据可以反映城市或者地区受到外来输送污染的程度，以及它对下游区域的影响。这些数据给区域联防联控责任划分、污染补偿机制建立以及预警应急措施联动提供最直接的数据支撑，是区域协同治理不可缺少的部分。

（三）区域网络与城市网络的协同关系

区域监测网络与城市空气质量监测网络不是相互独立的，而是互相补充、紧密联系的立体观测网络。城市监测网络是由若干个监测点组成，主要反映城市建成区内空气质量状况及变化趋势，为城市环境管理、公众信息发布等服务。这些站点分布在人口稠密的居民区、商业区、交通干道旁，主要是用来评价市民实际暴露水平，找出本地污染源。区域监测网络是宏观的，研究的是区域背景、污染物输送和总体空气质量。

二者之间是相互补充，又彼此融合的。区域网络所提供背景值和传输数据，给解读城市监测数据提供了宏观的参照。当城市多个监测点出现污染指数突然升高的时候，结合区域传输站的数据，就可以判断出此次污染是由于本地排放累积造成的，还是由于区域性输送造成的，进而采取针对性的对策。城市网络高密度

监测数据可以给区域模型提供更多的地面校准信息，进而可以修正、校正区域污染源清单，提高区域尺度预测预警的精度。将两级网络数据放到同一个平台上加以综合分析，就能构成一幅从宏观到微观、从背景到局地的空气质量全景图谱，进而对污染过程实现立体化、多维度的认识，环境管理的科学化、精细化水平得到极大提升。

第四节 城市空气质量监测网络设计

一、城市监测网络的功能定位

（一）全面反映城市空气质量状况

城市空气质量监测网络最主要的作用就是全面、客观、及时地反映整个城市空气质量的时空分布特征以及变化趋势。因此监测网络的点位布局要具有代表性，能够覆盖城市的各个功能区，即人口密集的居民区、商业活动频繁的商业区、工业企业集中的工业区、交通干道两侧的交通影响区以及用作对照的清洁区。在这些地方设监测点，获得各处的污染物浓度数据，绘制出城市的污染地图，找到污染热点区。

监测网络要对许多重要污染物展开连续自动监测。一般包括 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃、CO 这六项基本参数。根据城市产业结构和环境问题，还会适当增加挥发性有机物、黑碳等特征污染物的监测。如常见的空气污染物及主要来源表所示。监测数据的连续性十分重要，高时间分辨率的数据可以体现污染物浓度的日变化、小时变化甚至分钟级变化，对分析污染过程、判断突发污染事件有着重要的意义。也是对公众发布实时空气质量信息、启动重污染天气预警应急响应的前提。一个设计良好的监测网络，所产出的数据是城市空气质量评价的基础，给市民健康防护赋予了科学的指引，而且也为城市规划、土地利用等长时间发展的决策给予了环境方面的思索依照。

常见空气污染物及其主要来源

污染物	描述	主要来源	健康影响
PM2.5	细颗粒物	燃煤、工业排放、机动车尾气、扬尘、 生物质燃烧等	呼吸系统、心血管疾病
PM10	可吸入颗粒物	扬尘、燃煤、工业排放、机动车尾气	呼吸系统疾病
SO2	二氧化硫	燃煤、工业过程	呼吸道刺激、酸雨
NO2	二氧化氮	机动车尾气、工业排放、燃煤	呼吸道疾病、光化学烟 雾前体
O3	臭氧	NOx 和 VOCs 在阳光下发生光化学反应	呼吸道刺激、植物损害
CO	一氧化碳	机动车尾气、不完全燃烧	缺氧，心脑血管影响
VOCs	挥发性有机物	工业排放、溶剂使用、燃料燃烧、交通	刺激性、致癌性、O3 前体
BC	黑碳	柴油车尾气、生物质燃烧、不完全燃烧	呼吸系统、全球变暖

（二）识别城市主要污染源与来源

城市空气质量监测网络就是识别、分析污染源的“天眼”。通过对监测数据、气象数据和污染源排放量进行综合分析，可以较好的辨别出城市内以及周边区域主要污染物种类及所占比例。通过对各个监测点位二氧化氮与一氧化碳浓度比值的分析，可以大体上判断出该区域的污染源是机动车尾气排放还是工业燃烧。高浓度的二氧化硫一般和燃煤或者特定的工业过程有关，臭氧的产生则和氮氧化物、挥发性有机物在光照条件下发生的复杂的化学反应有关。

利用化学质量平衡模型、正定矩阵因子分解法等源解析技术，可以对监测点采集到的颗粒物样品进行化学成分分析，定量地计算出扬尘、燃煤、工业过程、机动车尾气、生物质燃烧等各种污染源对 PM2.5 浓度的贡献率。对污染源进行精细化的分析，对制定科学有效的污染控制策略来说十分重要。如解析结果得到机动车尾气为污染源，则管理部门应该重点开展淘汰老旧车辆、发展公共交通、改善道路通行条件等具有针对性的措施。

（三）评估城市环境管理成效

城市空气质量监测网络不断产生的长期、连续监测数据，是衡量城市环境管理政策措施是否有效的标准。任何一项大气污染防治行动，其最后的效果都要用空气质量实际改善的程度来衡量。监测网络给这样的评价提供科学、量化的并且可以追溯的数据支撑。

1. 政策效果量化评估，城市实施新的环保政策的时候，比如能源结构转型、

产业升级改造、机动车限行、重点行业超低排放改造等等举措之后，就可以通过对比措施实施前后监测数据变化的情形，来判定这些举措是否实现了预期的环境效益。分析供暖季前后二氧化硫浓度的变化，可以评价“煤改气”、“煤改电”工程的实施效果；分析特定工业园区周边监测点污染物浓度的长期变化趋势，可以评价园区污染治理的效果。

2. 目标完成情况考核，空气质量改善目标一般会纳入政府的年度或中长期发展规划。监测网络所给出的年度、季度、月度的平均浓度值、达标天数比例等主要指标，是评价各级政府环保责任落实情况、衡量区域空气质量改善目标完成速度的直接依据。依靠数据进行考核的方式把环境管理的重心从过程转移到结果，强化了政策执行的刚性约束。

3. 发现污染治理新问题，通过监测数据分析可以及时发现污染治理面临的新问题、新挑战。当细颗粒物得到有效控制之后，臭氧污染就可能逐渐显现出来，这时监测网络就能及时地发现这种变化，促使管理机构改变策略，转而开展PM2.5 和 O3 的协同控制。对重污染天气应急响应效果的评判，也要依靠监测网络所记录下来的污染物浓度“削峰”状况，从而不断改良应急预案。

二、城市监测网络的层级结构

现代城市空气质量监测网络为实现多重功能定位，一般会采用分层次的立体结构。它把不同精度、不同成本、不同覆盖范围的监测设备有机地组合在一起，形成由宏观到微观、由整体到局部的多维监测系统，保证监测信息的完整性、准确性。城市空气质量监测网络的层次结构及特点见下表。

城市空气质量监测网络层级结构对比表

网络层级	主要构成	功能定位	数据特点	覆盖范围
骨干网络	国控点、省控点	宏观评价、政策制定、区域联防联控	权威性高、数据准确、法定依据	城市/区域整体、代表性区域
基础网络	市控点、县控点	精细化管理、属地责任落实、补充骨干	细致反映区域差异、地方决策依据	城市内部各行政区、功能区
补充网络	网格化微型站点	问题发现、过程监控、污染溯源	高时空分辨率、辅助性、需校准	街道、社区、污染源周边、全城加密

（一）骨干网络：国控与省控点

骨干网络是城市空气质量监测体系的根基和关键所在，它主要是由国家环境空气质量监测网（国控点）、省级环境空气质量监测网（省控点）站点构成。这些监测点使用国际或者国内标准方法设备，监测数据最准确最权威，是城市空气质量评价、排名及国家、省级环境管理的依据。国控点、省控点选址按照技术规范执行，目的是反映城市和区域整体空气质量状况，一般设置在能体现城市平均污染水平的区域，避开局部强污染源。

这些站点的功能定位是战略性的、宏观的。国控点数据直接上报到国家环境监测总站，用以评价全国范围内的空气质量情况，也给国家大气污染防治决策、区域联防联控提供支持。省控点服务省级环保部门，是考核省内各地方空气质量改善情况的手段，也是省级环境规划与监管的支撑。骨干网络监测的污染物种类全面、数据质量控制体系完善，长期稳定的运行可以给研究空气质量年际变化、季节性规律、评价长期治理措施的宏观效果提供基准数据。这些站点就像是城市的心脏，站点的数据如果发生波动，那么整个区域的环境空气质量就可能会发生根本性的变化。

（二）基础网络：市控点与县控点

在骨干网络的基础上，城市会按照自身管理需求建设更加密集的基础网络，主要有市级控制监测点（市控点）、县级（或者区级）控制监测点（县控点）。这一层级的网络是对国控点和省控点的加密和补充，目的在于更加细致地反映城市内部各个行政区、功能区之间空气质量的差别，以满足地方政府精细化管理的要求。市控点、县控点的数量远远大于骨干网络站点，布设灵活，可以在建成区、工业园区、交通枢纽、居民区等重要地点进行重点布设。

监测点数据主要是提供给市、县两级环保部门使用，为地方政府掌握所在地区空气质量现状、发现当地主要污染问题、制定和调整属地化的管控措施提供了重要的依据。当某个区县的监测点数据一直超标的时候，该区县政府必须马上组织力量去调查污染源，并采取相应的治理措施。市控、县控网络的存在把环境管理责任落实到更基层的单位上，形成了以网格化管理雏形为特征的“谁的辖区谁负责”的管理模式。

虽然市控、县控点的设备标准会比国控点低一些，但是也不能低于相应的技术规范 and 质控要求，保证数据的可比性、可靠性。这些监测点同骨干网络一起组

成了城市常规空气质量监测的主要部分，给城市范围内的空气质量预报预警模型提供重要的输入数据，提高了预报预警的准确性。它们是宏观战略与微观治理的桥梁，也是实现城市大气污染科学化、精细化管理不可缺少的一环。

（三）补充网络：网格化监测点

补充网络一般是指以微型、小型传感器为主构成的网格化监测网络，是近年来伴随着物联网、传感器技术的发展而出现的一种新的监测方式。其主要特点就是点位数量巨大，可达几百、几千甚至几万个，远超过传统监测站的密度来覆盖整个城市，构成一张高时空分辨率的感知网。微型站点成本低、安装方便，可布设在路灯杆、建筑外墙等处，实现对街道、社区、重点污染源周边等区域的全方位监测。

网格化监测系统的核心功能就是发现问题、过程监督。由于它具有很高的空间分辨率，可以快速锁定异常污染排放的源头，比如某个违法排放的工厂、扬尘控制不力的建筑工地等，给环境执法提供准确的线索，实现污染的“靶向”监管。重污染天气期间，网格化监测可以对工地停工、企业限产等各项管控措施落实情况 and 实际效果做实时的评定。它们清楚地展现了污染物在城市内部传播和扩散的情况，给认识小范围内污染分布规律提供了前所未有的数据支持。

需要指出的是，微型传感器的精度与稳定度一般不如标准方法设备，其得到的数据不能直接用于空气质量的法定评价、考核，只能作为重要的辅助和补充。因此，网格化监测数据要同国控、省控等标准站点数据进行校准和融合，形成标准点定准、微型站定性工作模式。利用大数据分析和可视化技术创建的这张“天罗地网”，城市空气污染状况一目了然，环境监管的效率和智能化程度也得到了极大的提高。

第五节 监测网络评估与调整

一、监测网络评估的指标体系

(一) 空间代表性评估指标

空间代表性是反映监测点位布置是否合理、科学的重要指标,决定了监测数据能否真实的、准确的反映出被覆盖区域整体的空气质量状况和局部的污染情况。评估空间代表性要从宏观和微观两个方面使用多种技术手段进行考察。宏观上一般使用地理信息系统结合空间分析方法,评价监测站点对建成区、人口密集区、主要功能区(工业区、商业区、居住区)覆盖情况及覆盖的均匀程度。计算各个点位的势力范围或者影响半径,分析有无监测盲区或者重复覆盖区,从而判断网络整体布局是否均衡。微观层面更注重单个点位的代表性,即该点位的监测数据能否代表周围一定范围内的平均污染水平。这一般要依靠污染物扩散模型或者高密度移动监测数据来加以验证。通过对模型模拟浓度与站点实测浓度、移动监测浓度与固定站点浓度的相关性进行对比,可以评价点位对周边环境的代表程度。一个空间代表性强的监测网络,点位的布置应能较好地反映城市背景、交通干道、工业园区等各种不同的污染源的复合影响,形成功能上互补、信息上配合的有机整体,为精细化溯源、分区管控提供依据。在评估过程中也会加入站点之间相关性分析,如果两个站点长期监测数据高度相关,则说明该信息存在冗余,为之后的点位优化调整提供线索。

(二) 时间覆盖率评估指标

时间覆盖率也叫做数据捕获率或者有效数据率,是评价监测网络在时间维度上连续稳定运行水平的重要指标。空气质量存在明显的日变化、周变化和季节性变化特征,任何一个时间段的数据缺失都会造成对于污染规律判断的错误,进而影响预警预报的准确性。所以保证高水准的时间覆盖率是进行网络运维管理的最基本要求。该指标评价一般用小时作为基本单位进行计算。常用的指标之一就是有效数据捕获率,在某一个统计周期内(日、月、季、年等),经过质量控制审核后得到的有效监测数据(即实际获取的监测数据)的数量与理论上应该获取的数据总量之间的比值。国家以及地方一般会针对此指标做出最低要求,例如一个站点的单项污染物日均值有效性要求当天至少有20个小时的有效数据。除了整

体的数据捕获率之外，数据缺失的模式也应该被考虑进去。长时间的连续数据缺失比随机、零散的缺失对数据分析的破坏性要大。因此，可以引入最大连续缺失数据长度这样的指标，对监测数据的连续性进行专门评价。实践中造成时间覆盖率降低的因素有很多，主要是仪器故障、断电、网络传输中断、日常校准维护、极端天气等。对这些原因进行分类统计分析，可以找到监测网络运行过程中的薄弱环节，给改进运维策略、提高设备可靠性、优化维护程序提供重要的依据。保证监测数据链的完整性，是开展空气质量长期变化趋势分析、重污染过程完整溯源、环境健康效应准确评价的基础。

（三）数据质量评估指标

数据质量是环境监测的生命线，数据质量好坏直接关系到监测结果是否可靠、可用。数据质量评价，保证从监测仪器最初的输出到最后向公众发布的一条数据都是正确的、可信的。评价过程包含数据采集、流转、处理、保存的全部生命周期，创建起一套严格的质量保证和质量控制体系。评价指标体系一般以数据准确度、精密度、完整度、可比性这四个方面的内容来构建。

1. 准确性、精密度的评估：准确性是指监测结果与真实值的接近程度，一般用标准物质或者更高级的标准方法来进行对比，包括示值误差、零点漂移、跨度漂移等。精密度是重复测量结果的一致程度，用平行双样、重复性试验等方法来评定，用相对标准偏差表示。定期仪器校准、质控样考核、实验室间比对是保证和评价准确性的主要手段。

2. 数据有效性与完整性审核，即对数据从最初记录到最终入库的全过程进行审核。系统会根据事先设定的规则自动或者人工对数据进行审核，剔除由仪器故障、维护、校准等非正常工况所产生无效数据和异常数据。评价指标有数据有效率（与时间覆盖率有关，但更侧重有效性），异常值检出率等。审核规则的科学严谨性直接影响到数据质量的好坏。

3. 网络一致性及可比性评价为了保证整个监测网络中各个站点、各个仪器之间监测结果的横向可比性，必须对整个监测网络进行传递标定和巡回检查。采用同样的传递标准对网络内的所有仪器进行校准，可以评价并校正各个站点间的系统性偏差，使整个网络的测量尺度保持一致。评价指标可以是站点之间的相对偏差，也可以是一致性考核通过率。这些综合性的质量评估指标一起形成了监测网络数据质量的“防火墙”，保证输出的每一份空气质量报告都能够通过科学和实

实践的检验。

监测网络评估指标汇总表

评估维度	主要指标	核心考量	典型方法 / 工具
空间代表性	覆盖率、均匀性、盲区 / 冗余、点位对周边代表性	布局合理性，反映区域整体及局部污染情况	GIS 空间分析、污染物扩散模型、移动监测
时间覆盖率	有效数据捕获率、最大连续缺失数据长度	数据连续性，反映污染规律及预警准确性	小时有效数据统计、缺失模式分析
数据质量	准确性、精密度、有效性、完整性、可比性	数据可靠性，确保监测结果科学可信	仪器校准、质控样考核、平行样比对、系统审核

监测网络评估指标汇总表（如上表所示）清晰展示了各个评估维度及其核心考量点和典型方法。

二、监测网络的动态调整机制

（一）定期评估与调整制度

制定并实行定期的评价和修订办法，是保证监测网络动态化的制度基础。该制度把网络评估由随机、被动的应对方式变成计划、前瞻的主动管理。评估周期要根据区域环境变化速度和管理需要来确定，一般按照国家或者地方五年规划周期做一次网络效能综合测评，穿插年度常规检测。全面的综合评价是一项系统工程，要成立一个由环境监测专家、大气科学家、城市规划师、数据分析师和管理部门代表组成的专家委员会。评价内容包括上面所有的指标体系，即空间代表性、时间覆盖率、数据质量，以及过去一个周期内城市的发展变化、污染源清单的更新情况、预警预报的准确率、公众的反馈等各个方面。评估报告应该清晰地反映出现有的网络存在的主要问题，例如监测盲区出现、功能定位偏离、信息冗余存在等等，并且给出初步的调整建议方案，即具体清单，如增设、迁移、撤销或重塑功能等。年度评价主要是考察网络的运行效率、数据质量，找出仪器老化、运维不到位等问题，处理紧急的局部调整要求。定期评价制度有效运转需要有明确的分工、标准化的评价方法、公开的决策过程。将评价结果和改进方案公布，接受社会监督可以提高决策的科学性和公信力，也有利于形成社会共识，有利于监测工作不断改进。依靠这样的制度化的循环反馈和改进，监测网络就能够不断地自我完善、升级。

（二）基于城市发展的动态调整

城市是个动态的生命体，城市空间结构的扩张、城市产业布局的改变、城市交通体系的变动，都会影响到城市区域内污染物排放源强、污染物散布和散播。因此环境空气质量监测网络必须要随着城市的发展做出适应性的调整，否则就会陷入“刻舟求剑”的境地，渐渐失去环境感知的敏锐性。调整要有前瞻性，有响应性。一方面，监测网络的规划要同国土空间规划、城市总体规划等深入对接。在城市新区开发、大型工业园区创建、主要交通枢纽规划等重大项目论证阶段，就应同步开展环境影响评价，提前规划新的监测点位，保证在污染潜在增长区域形成有效的监控能力之前，监测网络能“先行一步”。可以避免问题出现之后再被动补建的滞后情况。另一方面，监测网络要对已经发生的城市变化做出迅速反应。随着城市中心区产业的退二进三，原有的工业区监测点已经不能反映出该区域的代表性了，需要考虑迁移到能够反映新型污染源（生活源、商业源）的监测点。同样，旧城改造、路网加密、大型居住区的形成都会造成局部区域污染物浓度场发生变化，需要在评估之后决定是否增设新的监测站。采用卫星遥感、大数据分析这些新兴的技术手段，可以更有效地识别城市建成区、植被覆盖、交通流量等信息，从而给评价城市发展对空气质量的影响赋予更加丰富、精确的决策依据。把城市发展蓝图同环境监测网络改进融合起来，让二者成为城市可持续发展管理体系里相互联系的有机部分，这就是提高环境治理现代化水平的表现。

（三）监测点位增设与撤销的技术流程

监测点位增删属于网络动态调整当中最重要的一个环节，需要严格按照科学严谨透明的技术流程来进行，保证每一个决定都有充足的依据。新增加一个点位或者撤销一个已经存在的监测点，都必须经过充分的科学论证，并且经过严格的程序审查，不能随意更改而破坏网络整体性以及历史数据的连续性。

1. 启动与需求论证：流程的开始就是识别和论证调整需求。这可能由于定期评估的建议，城市规划的调整，新的污染热点区域的发现，或者是现有的监测点因周围环境剧烈变化而丧失代表性等。需求方要给出详细的论证报告，阐述调整的理由，预期达到的目的，不调整会产生的问题等。

2. 选址勘察与模拟分析：点位增设属于重要的技术工作。首先做宏观选址，用GIS、扩散模型等方法，在目标区域内筛选出几个符合基本布点原则的候选点位。对候选点位进行详细的现场踏勘，综合考虑采样口周边环境、电力通信保障、

交通便捷程度、安全性、未来规划稳定等各方面因素，形成踏勘报告。对撤销的点位，需要分析它的数据在多大程度上可以被周围的站点所替代，判断撤销后对网络整体信息量的影响。

3. 方案比选及专家论证，根据勘察、分析的结果形成包含不同候选点位或者撤销方案的比选方案。组织跨学科专家评审会，对各种方案的科学性、技术可行性、经济合理性进行全方位的、客观的评审。专家组应当给出明确意见，即推荐方案或者修改建议。

4. 社会公示与决策审批，为保障公众的知情权、参与权，在最终的决策前应将优化后的调整方案向社会公示，征求公众意见。能够提高决策的透明度以及接受度。综合考虑专家评审意见、公众意见以后，环境保护主管部门才可以执行最后的审批程序。

5. 实施与网络整合：方案获批后，按照相关技术规范实施新站点的建设、仪器的安装调试或者旧站点的拆除。新的监测站点在经过一段时间的试运行、对比试验，并保证数据质量稳定可靠之后，才能正式并入监测网络，对外公布数据。撤销站点的历史数据应妥善保存，做好数据应用的衔接说明。整个流程结束之后，还要对调整后的网络做一次后评估，检验调整的效果是否达到了预期的目的。

第四章 空气质量监测数据处理与分析

第一节 监测数据采集与传输技术

一、数据采集的通信协议

(一) 现场总线技术在站内的应用

现场总线技术是一种生产现场使用的,连接智能现场设备和自动化控制系统的数字式、双向、多站通信网络,在环境空气质量监测站的数据采集上起着举足轻重的作用。彻底改变了传统的点对点的模拟信号或者简单的数字信号的连接方式。监测站房内 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃、CO 等分析仪及气象参数测量仪、动态校准仪等辅助设备,都需要将自身的测量数据和状态信息实时、准确地传输给数据采集仪。利用现场总线技术,如应用广泛的基于 RS-485 物理接口的 Modbus RTU 协议,可以将所有的仪器设备连到一条或者几条总线上。数据采集仪作为总线上的主站,采用轮询的方式对作为从站的分析仪器发出指令,从中读取污染物浓度值、设备运行状态码、故障报警信息等存储在内部寄存器中的数据。大大简化了站内布线,减小了线路繁多造成的电磁干扰、故障点,提高系统集成度、可维护性。总线式结构有利于系统的扩展。当新增加监测项目或者仪器的时候,只要将其接入已有的总线,并做相应的设置即可,不需要对整个系统实施大规模的硬件改变,表现出非常出色的灵活性以及可扩充性。

现场总线技术的应用,在数据交换的深度和宽度上都有了很大的提高,不但改善了物理连接,而且在数据交换的深度和宽度上也得到很大的提升。传统的模拟信号传输(4-20mA 电流环)只能传送一个测量值,而现场总线的数字通信可以传送信息包。除了核心的浓度数据外,仪器内部的光源强度、反应室温度、采样流量、风扇转速、试剂余量等重要的运行参数也可以被数据采集仪获取。从而中心端运维人员可以对前端仪器的健康状态做出详细的评价,实现了从遥测到遥信、遥诊的跨越。当中心平台发现某台 SO₂ 分析仪的紫外灯能量持续衰减的时候,可以在其完全失效之前就提前安排维修人员带备件去更换,从而避免数据中断,

实现预测性维护。深度设备信息交互能力,是保证监测数据长时间、连续、稳定、可靠产出的技术保障,提高了整个监测网络的运行效率和数据质量。

(二) TCP/IP 协议在远程传输中的应用

监测站的数据被数据采集仪成功采集之后,接下来的重要工作就是怎样把这些数据安全、完整地送到远处的中心数据服务器上。TCP/IP 协议簇由于其成熟、开放、普适等特点,已经成为远程通信领域里的事实上的标准。TCP/IP 协议是个分层的协议体系,传输层的 TCP 协议能给出面向连接的可靠字节流服务。即发送端和接收端在数据发送之前必须先建立一个逻辑连接,也就是三次握手。TCP 协议利用序列号、确认应答、超时重传等方式来保证每一个数据包都能够正确、无误地按顺序到达目的地,解决数据在网络上传输时可能会出现丢包、乱序、出错等问题。

在环境监测系统实际部署的时候,每一个前端监测站点的数据采集仪或者网关设备都被设置为 TCP 客户端。它会主动去连接省市级环境监控中心处设有固定公网 IP 地址的数据服务器。建立连接后,前端设备会根据国家或者地方环保部门所制定的数据通信标准(HJ 212-2017《污染物在线监控系统数据传输标准》),把本地缓存的实时小时数据、分钟数据、设备状态数据等格式化包装好,通过已建立的 TCP 连接通道传出去。中心服务器 TCP 服务端一直监听指定端口,接收各站点数据,解析,校验,入库。此种客户端和服务器的模式结构清晰,便于管理,可以支撑起庞大的监测网络同时处理大量的连接。并且利用 TCP/IP 协议可以方便地对前端站点进行远程控制,即可以远程对设备状态进行查询、下发控制指令(启动校准、仪器重启等)、进行远程固件升级等,极大地提高了运维管理效率。

TCP/IP 协议能够广泛应用的原因之一就是它对底层物理链路具有透明性。不管采用有线的光纤、ADSL 还是无线的移动通信网络,只要物理层能够提供 IP 数据包的承载能力, TCP/IP 协议就可以在这些物理层之上正常工作。这样就使监测站点的选址更多地考虑环境代表性的要求,而不再像通信设施那样受到太多限制。为了提高数据在公网中传输的安全性,一般会与 VPN 技术一起使用。在前端站点与中心服务器之间建立 IPSec VPN 或者 SSL VPN 隧道之后,所有 TCP/IP 传输的数据都会被加密通道封装起来进行传输,在此过程中,数据不会被外界监听、篡改或者伪造,这对于环境监测这种带有准司法性质的敏感数据来说,提供了一个相当坚实的安全传输保障。

（三）无线通信技术的应用

随着移动通信技术的发展，无线通信由于部署灵活、建设周期短、覆盖范围大等特点，在环境空气质量监测数据传输中得到了更广泛的应用。对于山区、水域等铺设光缆费用高，地理位置偏僻的区域以及临时的应急监测点来说，无线通信是唯一的途径。目前主流的无线通信技术有 4G LTE、5G 以及面向物联网专用的 NB-IoT 等，给监测数据稳定、有效地传输提供了多样化的途径。关键技术的带宽、时延、连接密度、功耗等参数如下表所示。

主流无线通信技术特点对比

特性	4G LTE	5G	NB-IoT
带宽	中高，满足常规数据与视频回传	超高，支持高清视频、大数据量传输	低，满足少量数据传输
时延	中	超低，支持即时响应与控制	高
连接密度	中	海量，支持大规模设备接入	海量，支持海量微型传感器
功耗	中	中高	超低，电池寿命可达数年
覆盖	广	广	广，穿透力强，支持地下/室内覆盖
应用场景	常规站点数据传输、视频监控	高清视频、激光雷达、高光谱、实时控制、精细化网格监测	微型站点、移动设备、免维护传感器网络

从上表可知，不同的无线通信技术各有侧重，适用于不同的环境监测场景。4G LTE 网络技术成熟、带宽大，可以满足一般监测数据（分钟值、小时值）的传输需求，也可以实现站房视频监控图像的实时回传，给无人值守站点的安全监控带来便利。

5G 技术的商用给环境监测带来新的可能。三大特性，就是超高带宽，超低时延，海量连接，这三大特性跟未来环境监测网络的发展方向非常吻合。超高带宽可以支持高清视频监控，也可以支持激光雷达、高光谱成像等新型监测设备产生的大数据量实时传输。超低时延使对污染过程的即时响应与精确控制成为可能，重污染应急响应时能实现重点污染源秒级监控与反馈。海量连接特性正对应了未来网格化、精细化监测体系中大量的微型、小型监测站点接入的场景，可以撑起一座城市上万个监测节点构成的大网。

对成本和功耗有较高要求的微型监测站或者移动监测设备上使用 NB-IoT（窄

带物联网)技术会有一定的优势。NB-IoT工作在授权频段,信号穿透力强,覆盖广,在城市角落或者地下空间等信号较弱的地方也能保持稳定的连接。终端设备功耗很低,一节电池可以支持设备工作数年,适合部署“撒播式”的、免维护的微型传感器网络,获取高空间分辨率的污染物分布图谱。无线数据传输单元在实际应用中是实现无线通信的主要设备。它经由串口同数据采集仪相接,内部集成了对应的无线通信模块,对采集仪的数据执行协议封装以后,借助移动网络传输至指定的中心服务器IP地址,达成监测数据的“最后一公里”无线传输。

二、数据采集与传输的可靠性保障

(一) 数据传输的加密与安全

环境空气质量监测数据是评价环境状况,指导环境治理的科学依据,同时也是对地域、对企业进行考核问责的依据,所以具有较高的法律敏感度和社会价值。数据在从监测站传输到平台中心的全过程中,要采取严格的保密措施来防止数据被非法窃取、篡改或者攻击,从而保证数据的机密性、完整性和可用性。数据加密属于保证传输安全的重要方式之一。使用SSL或者TLS协议在传输层建立加密的数据传输通道,可以让采集终端与中心服务器之间进行加密通信。数据在发送前用事先共享的密钥或非对称加密协商出的会话密钥加密,到达接收端后再用相应的密钥解密。即使数据包在公网被截获,攻击者也无法解读其内容,从而保证了数据的机密性。

除通信信道加密外,数据自身的完整性校验也不能缺。一般采用数字签名或者消息认证码技术来实现。发送端在发送数据包之前,先用哈希算法(SHA-256等)对原始数据计算出固定长度的摘要,再用私钥加密该摘要得到数字签名,然后将数字签名和数据一起发送出去。接收端收到数据后,用公钥解密签名得到摘要A,同时对收到的数据重新计算哈希摘要B,通过比对A和B是否一致来判断数据在传输过程中是否被篡改。这样的机制可以保证数据的真实性、不可否认性。纵深防御安全体系还要在网络层实现保护,用VPN技术创建虚拟专用网络,站点与中心之间建立逻辑隔离的私有通道。同时在网络边界处设置防火墙,并设定严格的访问控制策略,只允许合法并且已经通过身份认证的监测设备接入系统,对异常流量进行检测和阻断,从而构筑起一道牢固的数据安全防线。

（二）传输中断的恢复与补传机制

由于无线信号的波动，公网链路上的抖动、设备临时性故障以及断电等因素的存在，监测站点与中心平台之间网络连接中断现象很难完全避免。若没有有效的应对措施，就会造成宝贵的监测数据永久性丢失，形成数据链条上的断点，严重影响数据的连续性以及后续统计分析的准确性。因此一个好的监测系统必须要有很强的数据缓存和断点续传功能。其主要思想是“先存后发”，即保证任何时候都不会因为网络问题造成数据的丢失。

前端数据采集仪或者 DTU 设备内部要具备一定容量的非易失性存储介质，如 Flash 存储器、工业级 SD 卡等。分析仪器采集的所有数据（包括测量值、状态值）在发送到中心服务器之前都会加上准确的时间戳，并可靠地保存在本地缓存区里。数据采集仪会对与中心服务器的网络是否连通进行监测。网络正常时，按照先进先出的原则，把缓存区内数据包整理后发出。在得到服务器成功接收确认之后，才会将该数据从缓存区中标记成已发送或者直接删除。网络断开时数据发送失败，但是由于数据已经被安全保存在本地存储中，不会造成数据的丢失。数据采集仪会处于离线状态，继续正常的采集存储数据，周期性的尝试网络重连。网络连接恢复之后，数据采集仪就会马上开始数据补传。它会先同中心服务器联系，获得该服务器最后一条已接收的数据时间点，并从本地缓存里找出在该时间点之后所有的未传输数据，按照时间的先后顺序一一重新发送，直到把中断期间积压的所有数据都补传完为止。通过自动的存储转发确认补传闭环机制，网络状况不好的情况下也不会造成数据丢失，最大程度上保证数据记录的完整性和连续性。

（三）前端设备的远程监控与维护

环境空气质量监测站点数量多、分布广，大多数是无人值守的空气质量监测站。传统的定期巡检维护方式存在人力、物力消耗大、响应速度慢等缺点，不能很好地应对突发的设备故障。完善前端设备的远程监控和维护体系，对于提高整个监测网络的运行效率、保证数据质量来说具有非常重要的作用。该体系的目标是让中心端的运维人员可以随时随地，如同亲临现场一般，对每一个站点所有的设备运行情况有清晰的了解，并且具有一定的远程诊断和控制能力。这就意味着数据采集传输系统不仅要传输污染物浓度数据，还要同时传输大量的设备状态诊断数据。

现代智能分析仪器内部装有大量的传感器，用来监测本仪器的重要部件工作

情况。数据采集系统应该能够通过现场总线协议,从这些内部参数中读取到分析仪的机箱温度、反应室压力、采样流量、光源能量、高压模块电压、风扇转速等参数。这些被称为状态量,其重要性同被测的污染物浓度数据不相上下。状态量数据和测量量数据一起打包,通过远程传输网络发送到中心监控平台。运维人员可以利用平台的图形化界面,对各个站点、每台仪器的健康状况进行实时查看,也就是查看仪表盘。平台可以预先设置各个状态参数的正常阈值范围,当某个参数超出范围的时候,系统就会立即自动触发告警,并且通过短信、APP 推送等形式把告警信息推送给对应的运维人员。

根据实时获取的设备状态信息,运维人员可以进行初步的远程故障诊断。流量小是滤膜堵塞还是采样泵损坏?运维人员可以先通过远程下发反吹清洗或者重启设备指令来观察。若问题仍然存在,则可以根据此来确定故障的原因,带齐相应的备件和工具实施有针对性的现场修理,可以大大缩短故障响应及修复时间。对设备状态参数进行长时间的趋势分析,就能实现预测性维护。系统发现某台臭氧分析仪的紫外灯能量在过去的几个月里一直缓慢地、持续地下降时,就应该在紫外灯能量降到失效阈值之前,及时地把紫外灯能量降至失效阈值之前的紫外灯更换掉。这种由被动应对转为主动预控,再向预测性保养的运维方式变革,一方面削减了运维成本,另一方面从源头上保证了前端监测设备稳定工作,从而保证了监测数据高有效、高可靠。

第二节 空气质量数据质量控制方法

一、实时数据质量控制技术

(一) 数据范围检查与逻辑判断

数据范围检查是最基础也是最有效的实时质控方法之一。该技术依照物理学定律以及历史经验,给每一个监测参数设定一个合理的取值范围,也就是上下限阈值。颗粒物、气态污染物(二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳、臭氧)浓度值理论上不能为负,这就是下限检查的标准;根据仪器量程以及环境空气中污染物可能达到的实际浓度,设定一个物理上限。一旦数据点超出这个范围,系统就会把数据点当作超限异常处理并提示人工查验。

逻辑判断是在单个参数范围检验的基础上，引入多个参数之间以及参数和环境条件之间的内在联系审查。这种检查更加智能，可以发现那些虽然没有超过单个参数的范围，但是明显不符合常理的数据。典型的逻辑判断规则为：细颗粒物的浓度不能大于同一时间点的可吸入颗粒物的浓度；臭氧是二次光化学反应的产物，它的浓度一般在午后日照强的时候达到峰值，夜间较低；若出现夜间浓度远高于白天的反常现象，则说明数据存在异常；在没有特殊污染源影响的情况下，一氧化氮、二氧化氮和臭氧之间存在复杂的光化学平衡关系，它们的浓度变化应该遵循一定的消长规律，如果违背这些基本规律的数据也会被系统识别为逻辑错误。

这些检查规则被固化为算法程序，嵌入到数据采集器或者中心数据接收平台中，对传入的每一行数据进行秒级或者分钟级的实时检验。因此大量粗大误差在进入数据库之前就被有效地识别并隔离，从而保证了数据流的初步纯净。

（二）数据变化速率检查

环境空气中污染物的浓度变化一般是个比较缓慢的过程，是连续变化的。即便在重污染天气或者突发污染事件期间，污染物浓度在短时间内出现的任何变化也都不会太大。数据变化速率检查就是根据这个物理特性来设置某个时间段（如 5 分钟或者 1 小时）里数据允许的最大变化量或变化速率阈值，从而找出那些出现“跳变”或者“断崖式”变化的异常数据。

该方法主要是计算相邻两个或者多个连续数据点之间的差值或者斜率，然后将计算得到的差值或者斜率与设定好的阈值进行比较。当变化量超过阈值时，系统就把该数据点或者数据段判定为异常。监测站点在一分钟之内细颗粒物浓度从 50 微克每立方米突然增加到 500 微克每立方米，或者瞬间降到 0，从物理上来说几乎是不可能的。这种现象很可能是由于仪器采样系统堵塞后突然通畅、电源瞬间断电恢复或者通信错误所引起的。这些问题能很快地通过变化率来检测出来。阈值的确定要考虑到污染物的特性、季节性、监测站点所处的环境、历史数据统计特征等众多因素。过于严格的阈值容易造成对于实际污染过程的误判，过于宽松的阈值又不能很好地检测到异常数据。

（三）多参数相关性检查

多参数相关性检验为一种比较精细的实时质控方法。不孤立地检查单个参数，而是根据不同污染物之间、污染物和气象参数之间协同变化的内在规律来判断数

据是否合理。在某个区域、某种气象状况下，多种污染物常常存在同源性或者相互的消长关系，这种相关性给数据质量把控赋予了有力的支撑。

燃烧排放的标志性污染物二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳等，在交通早晚高峰时段、工业生产时期等特定时间段内常常出现较高的正相关性。细颗粒物和能见度一般呈负相关，细颗粒物浓度越大，大气透明度越低。风向、风速、温度、湿度等气象参数对污染物的扩散、输送、化学转化起决定作用。将这些参数代入到相关性模型中，可以更加合理地判断污染物浓度变化是否合理。

多参数相关性检验一般要建立统计模型，如线性回归模型、相关系数矩阵或者机器学习的聚类、异常检测算法等。系统通过对大量的历史有效数据的学习，形成各参数之间正常的联系模式。如果某组数据脱离上述设定模式，例如可吸入颗粒物浓度突然增大，在风速极大、风向清新的情况下二氧化氮浓度增加而一氧化碳浓度没有发生变化等，系统就会把该组数据标记为“相关性异常”。

此法对于发现单个仪器小幅度漂移，某通道故障等隐蔽问题非常有效。这些问题一般不会触发简单的范围、速率检测，但是会破坏数据之间的内在关联和谐性。经过多参数交叉检验之后，数据质量控制的深度和宽度都有了明显提高，可以发现更多之前不容易被察觉的数据质量问题。

二、离线数据审核与标识方法

（一）人工审核的流程与要点

人工审核属于系统化的工作，主要任务是对经过初步机器审核的数据进行深度诊断和最终裁定。审核人员不能只注意机器标记出的异常数据，而应该主动发现机器不能识别出来的潜在问题。

其标准流程与核心要点通常包括：

1. 数据可视化审查，用时间序列图、散点图、玫瑰图等不同的图表来形象地显示数据。审核人员通过观察图形整体趋势、波动形态、周期性规律、孤立的、不协调的“毛刺”或“平台”来把握数据质量。长时间完全水平的直线数据一般表示仪器读数卡死或者处于维护状态。

2. 多站点比对分析：把地理位置相近或在同一传输线路上的多组站点（数据为同类污染物）叠加对比。区域性污染中相邻站点的浓度变化趋势应该有很好的吻合度。如果某一个站点的数据变化和其他站点“格格不入”，那么这个站点的

数据质量就需要引起重视。

3. 审核人员必须仔细查阅站点的运维日志、校准记录、仪器更换记录、气象事件记录等辅助信息。大部分的数据异常（校准过程出现的峰值、设备故障造成的缺值等）都可以通过对日志信息进行分析而得到合理的解释。数据表现同运维活动联系起来，就是判定数据是否有效或者无效的最直接证据。

4. 异常追因程序：审核中发现的重大异常要启动追因程序。需要联系站点运维人员确认现场情况、调取仪器内部诊断参数或分析周围有无突发未记录的污染源（火灾、工业事故等）。根据充分的证据链来判断数据是否真实。

（二）数据有效性标识规则

为了使审核通过的数据达到统一规范，方便利用，就必须建立一套完整的、统一的数据有效性标识规则。这套规则意在给不同品质状态的数据赋予相应的编码或者标签，从而使得任何数据的使用者都能够明确知晓每一个数据点的可信度。数据标识远远不是简单地区分有效和无效，其精细程度远远超过此。

标识体系一般由有效数据、无效数据、存疑数据、缺测数据四类组成：有效数据代表数据已经经过全部审核，质量可靠无误；无效数据指由于仪器故障、校准、断电等原因造成的数据不能使用；存疑数据指数据虽然没有被最后判定为无效，但存在不确定性或者疑点；缺测数据指该时间段内无法采集到数据。

为了使每一种标识的定义清楚，判定标准明确，就显得尤为重要。尤其在无效数据类别之下，还可以对不同的异常情况赋予不同的原因代码。具体的无效数据原因代码及其含义，可以参照下表：

无效数据原因代码表

原因代码	释义
I-CAL	校准导致的数据无效
I-PWR	断电导致的数据无效
I-FAIL	仪器故障导致的数据无效
I-COMM	通信故障导致的数据无效
I-MAINT	维护操作导致的数据无效

细致的标识有利于之后的数据清洗统计，有利于评价监测网的运行情况和仪器的稳定性，可以进行量化评价。所有的审核员必须按照这套标准来开展数据标识工作，这样才能保证其一致性以及客观性，从而保证整个数据库的一致性和可用性。

（三）异常数据的成因分析与处理

对审核过程中发现的不正常的现象数据进行详细的分析其产生原因，是数据质量控制闭环管理的重要一环。它牵涉到目前数据的合理利用，也牵涉到监测网络的改善以及未来数据质量的提高。异常数据产生的原因是多样的，大致可以分为仪器设备问题、环境干扰、人为因素、真实极端事件这四类。

仪器设备的问题也是造成异常的主要原因之一，具体包括：传感器老化引起的信号漂移；采样管路被污染物或者水汽堵塞而导致的读数异常偏低或者归零；泵或者风扇故障引起采样流量不稳；电路板故障引起信号噪声或者数据“卡死”等。问题常常以缓慢偏离、阶梯状跳变、无规律剧烈波动等形式在数据图上表现出来。

环境干扰因素同样不能忽略，监测站点附近短时间内的施工扬尘会导致颗粒物浓度瞬间上升，夏季雷暴天气会引起仪器电路的瞬时干扰，产生异常脉冲信号，昆虫或者蜘蛛网进入采样头也会造成数据异常。分析出现的问题，联系站点的视频监控、气象数据以及周边环境信息。

人为因素主要是由于运维和管理过程中操作失误造成的，比如校准操作不规范造成气体连接错误、参数设置错误、维护后忘记将仪器调回正常测量模式等。这些原因一般可以通过核对运维记录和与运维人员交流来确定。有些数据异常，实际就是真实的极端污染事件所造成的，比如沙尘暴过境、秸秆焚烧、工业事故泄漏等。因此对于此类数据要慎重对待，如果可以确定为真实的极端污染事件数据，则可以作为有效数据使用并注明事件发生的原因。

由于各种原因造成的异常数据，其处理方法也各不相同。被判定无效的数据要打上标记，在一般的统计分析中排除，但不能被物理删除，以便后续的核查。分析结果要及时交给运维人员，让他们尽快找到仪器的故障并加以改正，改善操作流程，这样就能从源头上降低类似问题再次出现的几率。

第三节 空气质量时空分布特征分析

一、空气质量时间变化特征分析

（一）日变化特征分析

空气中主要污染物浓度在一天内有规律地变化,日变化特征同人类活动节律、局地气象条件密切相关。对于交通源排放量大的污染物,例如一氧化碳、氮氧化物等,一般表现为双峰型变化。早晚高峰时段机动车辆上路多,污染物排放量大增形成两个浓度峰值;中午和深夜车流量少,浓度降低。在城市中表现得尤为明显,直接体现出通勤活动给空气质量造成的即时影响。

二次污染物如臭氧的日变化是单峰型。臭氧主要是氮氧化物、挥发性有机物在紫外线的作用下发生光化学反应而产生的。因此其浓度一般在清晨随着日照强度的增加而逐渐上升,午后两到四点左右达到峰值,此时太阳辐射最强,光化学反应也最剧烈。随后,太阳辐射减弱的时候,臭氧浓度逐渐下降,夜晚时最低。臭氧和氮氧化物的浓度在日变化上常常是此消彼长的关系,夜晚氮氧化物累积会消耗一部分臭氧。

除污染源排放的影响外,气象条件日变化、大气边界层高度变化等因素对污染物浓度也有着非常大的影响。夜间地面辐射冷却造成大气层结更加稳定,边界层高度降低,好像一个盖子把污染物关在近地面层里,使污染物的浓度不断累积起来。日出以后地表受热后,大气对流增强,边界层抬升,垂直扩散条件变好,有利于污染物的稀释扩散。

（二）月际与季节变化特征分析

空气质量的季节性变化是时间变化分析的一部分,主要是由于各季节气象条件、能源消耗结构、自然源排放的不同所导致的。总体上讲,中国大部分城市都表现出冬季最差、夏季最好、春秋两季居中的普遍规律。冬季,特别是北方地区,由于燃煤取暖,使得二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等一次污染物的排放量剧增。同时冬季气温低,大气层结稳定,逆温频发,边界层高度为全年最低,极不利于污染物扩散,所以重污染天数多。

春季和秋季属于过渡季节,空气质量情况比较复杂。春季北方地区经常有沙尘天气发生,造成颗粒物浓度迅速增加。秋季一般天高气爽,大气扩散条件好,

是全年空气质量较好的时期之一。夏季强烈的太阳辐射、高温天气给臭氧生成创造了有利的条件，使其成为夏季最主要的污染物，而频繁的降雨能有效地清除大气中颗粒物和水溶性污染物。夏季大气边界层高度最高，强烈的对流作用有利于污染物向高空扩散，除臭氧以外其他污染物的浓度均处于年度最低。

（三）长期变化趋势分析

长期变化趋势分析，即对空气质量进行数年到数十年时间跨度上的分析，目的是了解宏观政策、产业结构调整、科技进步、气候变化等对空气质量的长期影响，同时也是检验污染防治成效的一种方法。经由分析长时间序列的监测数据，可以体现空气质量的总体改善或者恶化趋向，找出关键污染物的变化特点，从而给国家和区域环境保护战略的制定和调整给予关键支撑。

分析长期趋势所用的统计学方法有很多，不同的方法各有其适用场合和优缺点。长期趋势分析常用统计方法对比表中列出了一些常见的方法：

长期趋势分析常用统计方法对比

方法名称	核心原理	适用场景
滑动平均法	计算固定时间窗内平均值，平滑短期波动	消除年际气象波动，凸显长期趋势
线性回归分析	用直线拟合污染物浓度随时间变化	趋势近似线性的数据
Mann-Kendall 检验	非参数检验，基于数据序列的相对大小判断趋势	适用于非线性、非正态分布数据及存在异常值的情况

根据数据的特点以及研究的目的综合选择适合的分析方法。滑动平均法是最基本、最直观的一种方法，用某一固定时间长度内数值的平均数代替该时间段内的实际数值，以消除短期波动，突出长期变化趋势。用五年滑动平均可以较好地消除年际气象波动的干扰，更能反映污染物浓度的长期变化趋势。线性回归分析采用直线来拟合污染物浓度随时间变化的速率，其斜率直接体现变化趋势和强度，此方法简单实用，但要求变化趋势近似线性。对非线性复杂的趋势，采用非参数检验方法如曼肯德尔检验以及与 Sen’ s 斜率估计相结合的方法，具有更好的优势。该方法不需要数据服从特定的分布，对异常值不敏感，可以很好地判断长序列中是否存在单调的上升或者下降趋势，在环境科学领域得到了广泛的应用。

自从实施大气污染防治行动计划以来，我国大部分地区主要污染物 PM2.5、二氧化硫等的浓度明显下降，说明国家采取的一系列强有力的污染控制措施已经取得了明显的成效。但是也有部分地区臭氧污染情况日趋严重，呈上升趋势，说

明污染治理的重点正在转变，今后要更加重视氮氧化物与挥发性有机物的协同控制。

二、空气质量空间分布特征分析

（一）城市尺度空间分布格局

城市内部属于一个相对微观的空间，城市内部空气质量的空间分布状况千差万别，受到污染源种类、土地利用方式、城市下垫面状况、局部环流等众多因素的影响。不同的城市根据自己所处的产业布局、能源结构和地理位置，会形成各自不同的污染空间形态。工业城市一般呈现北高南低或者西高东低的格局，与工业区布局、主导风向有关。

污染源分布是形成城市空气质量空间格局的主要因素。工业区属于典型的点源集中区域，其周边一般为二氧化硫、氮氧化物、工业粉尘等污染物浓度的高值区。交通干道、高架桥、交通枢纽等处为线源，这些地方两侧的氮氧化物、一氧化碳浓度比其他地方要高，在道路峡谷效应比较明显的地方，污染物更容易积聚。大部分居民区、商业区属于“面源”，其污染物主要来自于生活燃煤、餐饮油烟和交通排放的叠加。

城市地表形态和功能分区布局对污染物的分布有着较大的影响。公园、湖泊、绿地等生态空间由于植被的吸附沉降作用以及人类活动强度低，常常成为城市里的“空气清新岛”，污染物浓度比周边建成区明显低。相反，高楼林立的中央商务区或者建筑密集的旧城区由于建筑物阻挡，风速降低，容易产生街道峡谷效应，阻碍污染物的水平、垂直扩散，造成污染物在局部区域内堆积，形成污染热点。因此合理的城市规划，比如改善工业布局、增加通风廊道、增植绿化等，对改善城市整体的、局部的空气质量都很重要。

（二）区域尺度污染分布特征

当观察范围从一座城市扩大到城市群或者更大的地理范围时，空气污染就表现出很强的区域性和流域性。污染物不是单独存在于某一个行政单元之中，而是通过大气环流实现远距离输送，在一定的气象、地形条件下，形成跨城市的范围广、时间长的污染事件。区域性污染已经成为我国目前大气污染防治所面对的主要问题之一。京津冀、长三角、汾渭平原等区域工业和人口高度集聚、能源消耗强度大，在不利气象条件下容易出现连片重污染区。

大气输送是产生区域性的污染过程。在以高压脊控制下的静稳天气为主的气象条件下，一个城市的局地排放可以影响到下风向数百公里外的其他城市，污染物在输送过程中还会发生复杂的化学转化，生成更多的二次污染物，加重区域整体污染水平。输送效应冲破了“一城一策”的治理束缚，显示出来的是区域联防联控的紧迫性。相邻城市之间存在相互影响，某地空气质量的好坏，并不是只与本地地区的排放有关，还与周边地区污染的输入有关。

地形地貌对于形成区域污染格局也起着同样的作用。山脉对于气流起着阻挡、抬升的作用，会造成污染物滞留在山前平原地带，不能扩散出去。由于太行山、燕山山脉的存在，污染物很容易在华北平原的东南部和南部堆积。盆地地形，四川盆地、关中盆地，四周高、中间低，像一个大碗，污染物在碗里积聚，长时间重污染。沿海地区受海陆风环流的影响，白天从海洋吹向陆地的清洁气流可以稀释污染物，夜间从陆地吹向海洋的风会将污染物带到海上或者次日回流，影响近岸空气质量。

（三）基于 GIS 的空间插值与可视化

由于空气质量监测站是随机分布的，所以监测到的数据只能反映站点附近的一小部分地区的空气质量。为了获得整个区域的空气质量分布情况，找出没有被监测覆盖的区域污染情况，地理信息系统技术和空间插值方法就起到了不可替代的作用。地理信息系统可以把分散的站点监测数据变成连续的污染分布图，给污染源识别、影响评价和公众通报提供直观的、科学的依据。

空间插值就是利用已知样点（监测站）的属性值来推算未知位置的属性值的基本原理。常用的插值方法分为确定性方法和地统计方法两种。反距离权重法是一种简单的确定性方法，根据地理学第一定律即距离越近的事物相关性越大，给预测点附近监测站赋予更大的权重。此方法计算简便，但是没有充分考虑到数据的空间自相关性。

而克里金插值属于比较先进的一种地统计学方法，在环境科学中得到广泛应用。克里金法在考虑样点之间距离的同时，也用变异函数来分析数据的空间自相关性，即数据在各个方向、不同距离上的变异情况。可以得到无偏最优估计，在给出预测值的同时还可以对预测结果的误差或者不确定性进行评价，这对于评价插值结果的可靠性至关重要。除上述两种方法外，还有样条函数法、趋势面分析法等其他插值方法，根据数据的特点和研究的目的选择最适合的方法。

用地理信息系统强大的可视化功能展示插值结果。利用等值线图、栅格晕渲图或者动态热力图等形式，把抽象的污染物浓度数据转变成生动的地理图像。专题地图可以清楚的表现出污染的“高-高”集聚区（污染热点）、“低-低”集聚区（清洁区）以及污染的扩散路径和变化过程。一方面有利于环境管理者、科研人员进行分析决策，另一方面也使空气质量信息以更加易于理解的方式传递给公众，提高环境信息公开的透明度和有效性。

第四节 污染物来源解析技术

一、受体模型的应用

（一）化学质量平衡模型的应用

化学质量平衡模型，简称 CMB，是应用最广、技术最成熟的一种源已知类受体模型。基本原理是建立在质量守恒定律上，认为大气中各种化学组分从污染源传输到受体的过程中是稳定的，不会相互转化。因此，在受体处测得的各种化学组分浓度，就是各个污染源对受体处贡献的线性叠加。模型是通过解一个多元线性方程组来定量解析来源，这个方程组把各个源类的贡献率当作未知数，把受体样品和源成分谱中化学组分的浓度当作已知量。

CMB 模型解析的前提是要获得准确的、有代表性的污染源成分谱和受体样品的化学组成数据。源成分谱指的是各类污染源（燃煤、机动车尾气、扬尘等）排放颗粒物的化学组分谱，是区分不同源类的“指纹”。受体样品数据是通过在监测点采集大气颗粒物滤膜后，送到实验室进行元素、离子、碳组分等化学物质分析得到的浓度数据。模型求解一般采用有效方差最小二乘法，把源成分谱和受体测量数据的不确定性考虑进去，来得到最佳的源贡献估计值。模型输出结果中包含各个污染源对颗粒物总质量的贡献比例，也给出卡方值、R 平方等诊断参数，用来评价解析结果是否可靠、合理。

虽然 CMB 模型的原理比较清晰，技术也比较成熟，但是它的应用仍然存在着一些局限性。模型对高精度本地化源成分谱数据库的依赖性很强，源谱的准确性直接了解析结果的好坏。CMB 模型不能很好地解决二次污染物（二次硫酸盐、二次硝酸盐）来源的问题，因为二次污染物不是直接从源排放到大气中的，

而是在大气中通过化学反应产生的。对于成分谱相似或者共线性较高的污染源(如各种扬尘),模型的辨识就会出现問題。为克服这些不足,研究人员又发展出一些改进型的 CMB 模型,比如二次粒子产生机制的 I-CMB 模型,或者和其它模型结合起来使用。

(二) 主成分分析 / 多元线性回归模型的应用

主成分分析同多元线性回归结合的方法,即 PCA/MLR,属于典型的源未知类受体模型。与 CMB 模型需要先知道各种污染源的化学指纹不同,PCA/MLR 法是通过大量受体样品化学组分数据的统计分析,找到潜在的污染源(主成分因子),再对其进行量化。该法不需要详细的源成分谱信息,特别适合于源类特征不明或者源谱数据缺少的地方。

该法操作步骤大体上分为两步完成。第一步是主成分分析。主成分分析的基本思想是把众多相互联系的化学组分变量,变成少数几个互不相关、能概括原始信息的新综合指标,即主成分。这些共同的变化背后一般会对应一个或者一类特定的污染源。如某一个主成分中铅、锌、溴等元素的含量比较高,则一般认为是机动车尾气排放。分析各主成分的因子载荷(即各个化学组分在主成分上的权重)可以定性地确定出该主成分所代表的是哪种污染源类型。

第二步是多元线性回归。利用主成分分析得到的污染源因子,以这些因子得分作为自变量,大气污染物总浓度作为因变量,建立多元线性回归方程。回归方程的系数是各个主成分(污染源)对污染物总浓度平均贡献率。求得回归方程后就可以定量估计出各个污染源的贡献率。为了提高解析结果的准确性,一些研究用绝对主成分得分代替标准化得分做回归分析,此法能更加真实的反映各污染源的贡献量。PCA 和 MLR 各有特点,但可以看成源解析的有效组合工具,PCA 识别污染源,MLR 定量的分析出污染源的贡献。

(三) 正定矩阵因子分解模型的应用

正定矩阵因子分解,简称 PMF,在颗粒物来源解析领域中应用越来越广,是一种高级的因子分析受体模型。与传统的 PCA 方法相比,PMF 模型在算法上做了重要的改进,其中最突出的就是分解过程中引入了非负约束,保证解析出的源成分谱和源贡献矩阵中所有的元素都是非负的。这一约束具有明确的物理意义,因为在实际环境中不可能存在负的排放量或组分浓度,所以 PMF 的解析结果更加符合实际情况,避免了 PCA 等方法可能产生的无物理意义的负值。

PMF 模型的核心数学原理就是把受体化学组分浓度数据矩阵 X 分解成因子贡献矩阵 G 与因子谱矩阵 F 的乘积，再附加一个残差矩阵 E 。其中 G 矩阵表示的是各种样品里各污染源的贡献浓度， F 矩阵表示的是各个来源化学成分的谱图。模型通过迭代计算来找到最合适的 G 和 F 矩阵，使得根据公式 $X=GF+E$ 计算得到的模型值与实际观测值之间的加权残差平方和，也就是目标函数 Q 的值，尽可能的小。PMF 模型的优势就在于可以利用每个数据点的不确定性信息，给不确定性大或者精度低的数据赋予较小的权重，给高质量的数据赋予较大的权重，从而大大提高模型解析的稳健性和准确性。

PMF 应用流程主要是数据准备、模型运算、结果诊断这三个步骤。用户需要输入颗粒物化学组分浓度数据和对应的测量不确定度数据。用户在模型运算前需要预先设定待解析因子（污染源）的数量，并反复调试优化模型才能得到最稳定的、物理意义最清楚的解。模型输出结果包含各个来源的化学组成谱，各源对于各个样品贡献浓度的时序曲线，以及用以检验模型的稳定性、可靠性的各种诊断工具。

1. 非负约束：保证了解析结果的物理解释性，源贡献和源成分谱不会出现负值。

2. 误差加权：模型可以处理数据中出现的缺失值、不精确值，给每个数据点加上不确定度来优化求解。

3. 灵活性：不需要预先输入源成分谱，能够根据数据自身的结构识别出污染源。

因为 PMF 模型具有上述诸多优点，在大气颗粒物、挥发性有机物来源分析研究中 PMF 模型成为使用最广泛的模型之一。

各种受体模型的特点对比可见下表。

主要受体模型特征对比表

特征	化学质量平衡模型	主成分分析 / 多元线性回归 (PCA/MLR)	正定矩阵因子分解
模型类型	源已知受体模型	源未知受体模型	源未知受体模型 (高级因子分析)
基本原理	质量守恒; 源组分线性叠加	统计降维; 识别潜在因子	矩阵分解; 非负约束迭代优化
数据需求	源成分谱、受体样品组分数据	大量受体样品组分数据	受体样品组分数据、不确定度
核心特点	原理清晰, 应用最广泛成熟	不依赖源谱, 适用于源类不明区	非负约束, 结果物理意义强; 误差加权
主要优势	计算速度快, 易于理解与实施	识别潜在源类, 适用性广	结果更真实, 鲁棒性强, 处理不确定性
局限性	强依赖准确源谱; 难处理二次污染; 难区分相似源	可能识别出无物理意义因子; 因子解释需经验	需要经验设定因子数; 计算复杂
代表性应用	城市尺度常规污染源解析	源类探索与初步定量分析	大气颗粒物 /VOCs 精细化来源分析

二、源模型的应用

(一) 空气质量模型在来源解析中的作用

空气质量模型属于源解析体系中的关键工具，本质上就是一套复杂的数学方程组，主要目的在于定量描述大气环境里发生的各种物理、化学过程。数值求解这些方程，就可以在特定的排放、气象条件下得到污染物浓度在三维空间中的分布以及随时间的变化。在来源解析中，空气质量模型不但可以模拟污染物浓度，更重要的是建立了排放源和受体浓度之间明确的响应关系，即可以定量识别出是哪个污染源对受体造成了影响。

目前国际上主流的第三代空气质量模型，CMAQ、CAMx、WRF-Chem 等，都内置有先进的源解析模块。这些技术大致可以分为三类：第一类是源敏感性或者开关法分析，在模型中开启或者关闭某一个污染源（如某城市或者某行业）的排放，通过对比模拟结果差异来直接评价该污染源对受体浓度的贡献。其次为粒子示踪或者标记物种技术，此技术针对模型里特定源排放的污染物加以“染色”或者标记，在整个模拟流程中跟踪这些污染物的行进路线，最后在受体点统计所有标记物的浓度，以此来完成对来源的细致划分。

复杂的空气质量模型可以考虑复杂的非线性化学反应过程，不但可以解析一次颗粒物的来源，还可以追溯二次颗粒物（硫酸盐、硝酸盐）是由哪些源排放的前体物（二氧化硫、氮氧化物）转化而来的。它们可以分辨本地污染堆积同外地输送对本地空气质量产生的影响，给开展区域联防联控赋予重要的科学支撑。因此，在分析重污染过程成因、评判减排措施成效、预测将来空气质量变动趋向等方面的工作里，空气质量模型有着不可替代的意义。

（二）排放清单的建立与校验

大气污染物排放清单是源模型方法得以运行的基础，它是把一定时间段内，特定地理范围内所有已知污染源向大气排放的各类污染物进行汇总的。清单的准确性、完整性、精细程度直接影响源模型模拟结果的好坏。高质量的排放清单要包含工业固定源、移动源、扬尘源、农业源、生活面源、生物质燃烧源等所有主要源类，同时还要包含二氧化硫、氮氧化物、颗粒物、挥发性有机物、氨等主要污染物。

建立排放清单是项繁杂且系统的工作，一般采取“自下而上”的技术路线。主要的方法就是用活动水平和排放因子的乘积来计算排放量。活动水平数据是指引起污染物排放的生产或者社会活动的规模，例如燃料消耗量、产品产量、车辆行驶里程等。排放因子就是单位活动水平所对应的污染物排放量。数据的取得要依靠大规模的实地调查、统计数据收集、文献研究、现场实测等众多方式。大型工业点源可以通过对企业的环境统计报表的调查，或安装在线监测设备来获得相对准确的排放数据；而对数量众多的、分散的面源，比如居民燃煤、餐饮油烟等，更多采用的是抽样调查和统计数据进行估算。

清单建立之后就要对清单进行严格的校验以及不确定性分析，这是保证清单质量的重要步骤。校验方法多种多样，有将数据与其它来源（能源统计数据等）进行交叉比对，也有将数据与地面或者卫星监测的污染物浓度数据进行对比验证等。将清单输入空气质量模型中，模拟出的污染物浓度与实际监测站点的观测值吻合度越高，说明清单质量越好；反之，偏差越大，就需要回溯到清单的编制过程，找到可能存在问题的排放源或者参数，并进行修正。因为活动水平和排放因子本身具有不确定性，所以排放清单也具有不确定性，必须用蒙特卡罗模拟等方法进行定量估算，以了解最终排放估算值的偏差范围。清单动态更新机制是不可或缺的。随着社会经济活动、环保措施等的改变，清单内容也应作相应的调整，

以保证清单能够反映目前的排放情况。

（三）源模型与受体模型的耦合应用

源模型和受体模型在污染物来源解析方面各有侧重、互有长短，两者不是相互排斥的，而是具有很强的互补性。源模型可以模拟污染物的时空分布、化学转化、区域输送，但是模拟结果很大程度上取决于排放清单的准确性；受体模型直接根据受体观测数据进行模拟，模拟结果更接近于实际测量值，但是对二次转化、区域输送问题的处理能力较差，对源的识别能力也较弱。因此把两种模型结合起来，取长补短，已经成为现在来源分析领域的主要趋势和前沿研究方向，可以大大提高解析结果的全面性和可靠性。

常用的方法就是用源模型的模拟结果辅助和约束受体模型。空气质量模型可以给出各个区域或者源类对受体点的贡献的大致估计，这些信息可以作为先验知识加入到受体模型中，有利于受体模型更好地识别和区分来源，特别是对于化学成分相似的源类。源模型还可以给出二次污染物转化率等信息，弥补受体模型处理二次气溶胶的不足。

反过来，受体模型解析出的结果也可以用来检验、修正源模型所依赖的排放清单。如果某个城市的受体模型得到的燃煤源贡献，远大于源模型根据现有清单模拟得到的数值，则强烈说明该地区燃煤排放量很可能被低估了，这就为该地区排放清单的修订指明了方向。经过这样一种迭代反馈、互相验证的过程之后，排放清单的质量以及模型模拟的精度可以逐步提高。

综合大气污染成因分析项目中，两种模型结合使用可以得到更全面、立体的图景。在重污染事件的分析中可以先用 PMF 模型分解高时间分辨率的在线监测数据，从而快速识别污染过程中主要贡献源类动态变化。然后使用 CMAQ 等源模型做情景模拟和溯源分析，定量评估各地区的输送贡献以及本地各种源的排放累积影响，从而全面揭示重污染生成、发展和消散的过程。综合分析的方法能制定出准确、有效的应急控制措施以及长期治理规划提供最有力的科学支持。

第五节 空气质量趋势分析与预测

一、基于统计方法的趋势分析

（一）时间序列分解方法

时间序列分解属于一种经典而有效的统计分析手段。其基本思想是把原始的空气质量数据序列分解成几部分，一般是长期趋势项、季节性或周期性波动项和不规则的随机项。经过分解之后，研究人员便能够清楚地看到污染物浓度随时间变化的大体走向，是上升、下降还是维持稳定。

长期趋势项代表的是在观测周期内，由于气候变化，能源结构转变，持续的污染控制措施等长期因素造成的本质变化。季节性波动项是由于年度内固定的时间，例如季节、月份等因素引起的周期性变化，冬季供暖期颗粒物浓度升高、夏季强光照下臭氧生成增多等都是季节性波动项。而不规则随机项是由短时、偶发事件（临时天气过程、突发污染事件）所造成的无规律波动。

乘法模型、经典的时间序列分解模型如加法模型，用在空气质量的月度报告、季度报告以及年度报告中。分离出长期趋势以后，决策者就可以评价大气十条等长期政策的宏观效果，对季节性规律进行深入分析之后，可以制定出更有针对性的季节性管控措施，例如在冬季采暖季和夏季臭氧高发期采取不同的应急预案，进而提高环境管理的精细化、科学化水平。

（二）Mann-Kendall 趋势检验方法

Mann-Kendall 趋势检验是环境、水文等领域时间序列分析中经常用到的一种非参数统计方法。不需要数据样本符合某个概率分布，也不会受数据中异常值的影响，所以对于复杂、非正态分布的空气质量监测数据具有很好的稳健性和可靠性。MK 检验主要是通过对序列中所有的数据对进行比较，从而判断序列是否存在单调上升或者单调下降的趋势。

原理就是用一个统计量来衡量时间序列的趋势。如果时间序列的后面时刻数值比前面时刻数值要大，则统计量是正数，说明存在上升趋势；反之，如果后面的数值比前面的要小，那么就是负数，说明有下降的趋势。统计量的绝对值大小反映的是趋势的强弱。把该统计量同标准正态分布的临界值对比之后，就能判定所观察到的趋势在统计学上是否具备显著性。

空气质量趋势分析中 MK 检验经常用来判断单个监测站或者区域性主要污染物（PM_{2.5}、SO₂、NO₂）年均浓度、月均浓度的长期变化趋势。以某城市近十年 PM_{2.5} 年均浓度进行 MK 检验，可以科学的判断该城市空气是持续好转、持续变差还是保持现状。明确的趋势判断，可以为评价区域大气污染防治工作长期有效性提供有力的证据支撑，也有利于找出环境质量出现转折的关键年份或者时期。

（三）回归分析方法在趋势分析中的应用

回归分析是研究变量之间相互关系的重要方法，在空气质量趋势分析上，它可以描述污染物浓度随时间变化的情况，也可以探究造成这种变化的原因。建立回归模型，把空气质量指标当作因变量，把时间、气象参数、能源消耗、产业结构、机动车保有量等影响因素当作自变量，可以量化各个因素对空气质量变化的贡献度。

回归分析在趋势分析中的应用形式多样，各有侧重：

1. 线性回归：污染物浓度与其他变量之间存在线性关系时，可采用简单或者多元线性回归。将 PM_{2.5} 浓度与年份做简单的线性回归，斜率就代表了 PM_{2.5} 浓度的年均变化率。多元线性回归可以反映出温度、湿度、风速等各种气象因子对于污染物浓度的影响。

2. 非线性回归，由于环境过程的复杂性，污染物的变化趋势不一定是线性的。此时使用多项式回归、指数回归等非线性模型去拟合复杂的曲线趋势，能够较好的体现污染物浓度变化过程中所具有的加速期、减速期、平台期等阶段特性。

3. 逐步回归、岭回归：在处理大量的潜在影响因素的时候，可能会出现变量之间存在多重共线性的问题。逐步回归可以自动地选择出对于因变量有显著影响的自变量子集，构建最优的模型。岭回归等正则化方法对模型的系数进行惩罚，能有效地解决多重共线性的问题，使模型更加稳定，预测的效果也更好。

研究者采用上述回归方法，在检验空气质量长期变动趋势的同时，也可以探究其背后的社会经济和自然驱动因素。这对制定科学的减排策略、评价政策实施效果、预测未来环境质量走向有极其重要的指导意义。模型分析可以得出某地空气质量改善主要是因为工业减排，而另一地的改善主要是能源结构调整所导致的结论，这样的结果可以给政策调整指明方向。

二、基于机器学习的短期预测

（一）神经网络预测方法

神经网络，特别是深度学习模型有着很强的非线性拟合能力，空气品质预测方面有很广阔的发展空间。此算法模仿人脑神经元的运作模式，构建出一个包括输入层、多层隐藏层、输出层的一套繁复的网络，它能够从大量的历史数据中自己寻找并挖掘出深层次特征规则。

空气质量预报输入层得到的数据有各个站点的污染物浓度，气象数据（温度，湿度，风速，风向，气压），时间信息（小时，星期几，季节等）。经过隐藏层的多层非线性变换之后，就会逐层抽象和组合，最后在输出层得到未来一段时间，比如未来 1-72 小时的污染物浓度预测值。神经网络的训练过程就是利用反向传播算法，不断调整神经网络中各个连接的权重，使神经网络的预测输出与真实观测值之间的误差最小。

近些年来，循环神经网络，尤其是其变种长短期记忆网络，由于能够很好地处理时间序列数据里的长期依赖关系，成了空气质量预测研究的热门方向。传统的神经网络在处理序列数据的时候可能会忽略时间上的联系，LSTM 凭借自己独特的门控机制（输入门，遗忘门，输出门），会挑选性地保存和删除过去的信息，这样就能更好地抓住污染物浓度随着时间推移而变化的动态模式。像 LSTM 模型就可以学到早高峰交通结束之后，氮氧化物浓度对于午后臭氧产生可能带来的影响，这种跨越时间步长的复杂联系，传统的模型是很难学习到的。

尽管神经网络在应用中取得了一些成功，但是它也存在着模型结构比较复杂、需要大量的训练样本、很容易过拟合、模型的可解释性不好等一些问题。因此在实际运用的时候，往往要依靠专业的领域知识来开展特征工程，并且精心挑选模型、调节参数，进而搭建起一个既准确又稳定的预测体系。

（二）支持向量机预测方法

支持向量机属于一种基于统计学习理论之上的机器学习方法，其最初被用来做分类任务，后来发展成为支持向量回归。空气质量预报中也被广泛应用。SVR 的核心思想就是找到一个最优超平面，使得所有样本点到这个超平面的总误差最小，并且尽可能增大不同类别样本之间的间隔。

与神经网络力求拟合所有的训练样本不同，SVR 更注重那些处于决策边界

附近的点，也就是支持向量。SVR 灵巧地采用非线性核函数（多项式核、高斯径向基函数核），将原本在输入空间里线性不可分的数据，映射到较高维度的特征空间当中，然后在线性回归的时候，在这个高维的空间里执行线性回归。这就使得 SVR 可以很好地处理空气质量数据中复杂的非线性关系，即污染物浓度和各种气象因子之间互相影响的关系。

SVR 模型一般把历史污染物浓度、气象条件等当作输入特征，预估未来几小时的空气质量指数或者某污染物浓度。与神经网络相比，SVR 对于小样本、高维问题有较好的泛化能力，也就是对于未见过的数据有较好的稳定性，且模型结构简单，可解释性强。通过选择最优的核函数、调整模型的惩罚系数 C 、核函数参数 γ 等，可以得到高精度、鲁棒性强的预测模型。

（三）集成学习预测方法

集成学习是一种先进的机器学习范式，它的基本思想并不是依靠单一的专家模型，而是通过综合多个学习器（或者叫基模型）的预测结果来获得比任何单个学习器都好的性能。该汇集集体智慧的方法可以明显提高预测模型的准确性、稳定性、鲁棒性，在大气环境预报中具有明显的优势。

集成学习大体上可以分为 Bagging 和 Boosting 两类。Bagging 方法典型的代表就是随机森林，它利用多个独立的决策树来预测。每棵树都会从原始数据集中有放回地随机抽取出样本，在分裂节点时只考虑特征的一个随机子集。双随机性导致各个决策树不同，最后通过对所有树的预测结果取平均（回归问题）或者投票（分类问题）来达到减小模型方差、降低过拟合风险、提高模型泛化能力的目的。

集成方法中 Boosting 有梯度提升决策树、xgboost 等等。与 Bagging 中各个基模型并行训练不同，Boosting 是串行的，后面一个模型是为了修正前面一个模型的不足。它会迭代地训练出很多个弱学习器，每一轮都会更加重视上一轮预测错误样本，给这些样本更大的权重。最终把所有的弱学习器的预测结果加权相加，得到最终的强学习器。因此 Boosting 模型可以不断减小预测误差，从而达到更好的预测准确率。集成学习方法把多个模型的优点综合起来，是目前用来创建高精度空气质量预测系统的主要技术。

机器学习模型特点对比表

模型类型	核心优势	常见应用	主要挑战	适用于数据类型
神经网络	强大非线性拟合能力，自动特征学习	长期依赖关系预测，复杂模式识别	结构复杂，需大量数据，易过拟合，解释性差	大规模、高维、时间序列数据
支持向量机	小样本泛化能力强，处理高维数据	边界敏感，非线性回归	参数选择敏感，对噪声敏感	小样本、高维、非线性关系数据
集成学习	提高预测精度、稳定性、鲁棒性	综合预测，降低过拟合	计算资源需求较高，模型复杂度增加	异构数据，提升单一模型性能

从机器学习模型特点对比表中可以看出不同的机器学习模型各有侧重，应用场景以及优势也不一样。在实际的空气质量预测中，按照数据特性以及预测目的，合理选择或者组合这些模型，是提高预测效果的重要方法。

第五章 空气质量预警模型与方法

第一节 空气质量预警理论基础

一、预警的基本概念与内涵

（一）预警的定义与构成要素

预警是在灾害或者风险事件发生之前，对灾害或风险事件发生的可能性、影响范围、影响程度进行监测、分析、研判，及时把预警信息传递给有关单位和个人。它是一个系统性的概念，目的在于提前防范，减少或者避免潜在的危害。就环境空气质量来说，预警是为了预测未来可能会出现空气污染事件，从而给采取有效的控制措施、保证公众健康争取时间。完整的预警系统一般由许多互相联系的要素组成，它们共同发挥作用，保证预警信息的准确产生和传递。

构成预警系统的基本要素有四个，即信息获取、风险评价、预警决策、信息发布。信息获取是预警的基础，其中包含的信息有监测信息、空气质量监测数据、气象观测数据、污染源排放数据、社会经济活动数据等。多源异构数据一起成为预警分析的数据基础。

风险评价属于预警系统的一项技术工作。它依靠专门的预警模型，依靠得到的信息，模拟并预估将来空气质量的发展趋向。按照事先设定的标准来判定重污染事件发生的概率以及严重程度。这一过程把科学计算和专业判断结合起来。预警决策是在风险评估之后，管理部门根据预案的规定，决定是否发出预警、发出几级预警、采取何种应急措施的活动。最后一步就是信息发布，它借助广播、电视、网络、手机应用等众多渠道，迅速把预警信息传递给受影响的公众、企业、社会团体等，并告诉他们该怎么做才能做好防护。

（二）预警的分类与等级划分

为了实现对不同种类、强度的空气污染事件的差异化管理与响应，需要对预警进行科学的分类和分级。从而可以保证预警系统具有针对性、有效性，使得社会资源得到合理配置，用最小的社会成本获得最大的减灾效果。分类方式多样，

一般按照预警时效、预警空间或污染物种类来进行划分；等级划分主要依据预测的空气污染程度。

预警有多种分类方式。按照预警时间尺度的长短可以分为短时预警、短期预警、中长期预警。短时预警指的是未来几小时到一天内空气状况的变动，给公众即时出行、保健等提供参照。短期预警主要是对未来三到七天内的污染过程进行预警，是政府部门开展区域联防联控、工业企业实施应急减排的重要依据。中长期预警是针对未来几周或者整个季节的空气质量走向做出的预测，目的是为制定中长期污染防治策略提供科学依据。按空间范围，预警可以分为城市预警和区域预警。前者侧重单个城市精细化管理，后者侧重多个城市之间污染输送和协同控制问题。

空气质量预警等级的确定一般要和空气质量指数预测值联系起来，便于公众理解、政府部门执行。我国普遍使用四级预警体系，具体的划分标准可以参照下表：

中国空气质量预警等级划分表

级别	名称	预测条件	建议措施 / 特征
四级	蓝色预警	AQI 日均值 > 200 (重度污染)，不确定是否持续	提醒公众关注空气质量变化
三级	黄色预警	某天及以上 AQI 日均值 > 200 (重度污染)	确定发生重污染，建议公众健康防护
二级	橙色预警	连续 2 天及以上 AQI 日均值 > 200 (重度污染) 或 某天 AQI 日均值 > 300 (严重污染)	采取较严格的社会、工业减排措施
一级	红色预警	连续 2 天及以上 AQI 日均值 > 300 (严重污染) 或 某天 AQI 日均值 > 500 (极严重污染)	实行非常严厉的应急措施 (如机动车限行、停课)

（三）预警的不确定性分析

空气质量预警系统是一个复杂的预测体系，它的结果不可避免地带有一定的不确定性。不确定性分析属于预警理论的一个重要部分，主要目的在于识别、度量预警结果中的不确定性来源及其影响，从而改善预警系统。对不确定性有更深刻的认识，可以使得决策者在利用预警信息的时候，能够意识到预测结果本身就存在一定的局限性，从而做出更为慎重和科学的决策，避免因过度依赖预测结果而造成的误判。

预警系统不确定性的来源主要有三个方面，即输入数据的不确定性、模型本身的不确定性、预报过程的随机性。输入数据的不确定性体现在很多地方，污染

源排放清单的估算有误差,有些污染源的排放量很难准确统计,它们的时空分配也与实际情况不一样。气象预报数据本身就带有误差,在大气化学模型的运算中会被传递、放大。模型的不确定性来自于对大气物理、化学过程认识的不完全,模型本身是对真实大气过程的简化和近似。模型对二次颗粒物生成机理、非均相化学反应过程等描述还不完善,参数化方案的选择也会造成差异。大气系统内部具有混沌特性及随机扰动,所以精确预测在本质上是是不可能的。

为了应对和度量这些不确定性,研究人员提出了各种各样的分析方法。集合预报是目前主流方法之一,它通过在初始条件、物理参数或者排放源等方面加入微小扰动,运行多个模型或者同一个模型的不同版本,得到一系列的预报结果。由此得出的结果形成一个预报集合,其离散度用来度量预报的不确定性;一般说来,集合平均值比单个确定性预报要更可靠一些。概率预报也越来越普遍地被使用。它不给出一个具体的空气质量指数预测值,而是给出空气质量指数大于某一阈值的概率,这样的表述能给决策者、公众提供更全面的风险信息。贝叶斯方法、卡尔曼滤波等数据同化技术也被用来把实时观测数据纳入模型中,动态地对模型轨迹进行调整,降低预报的不确定性,提高预报的精度。

二、空气质量预警的科学基础

(一) 大气污染形成机理

大气污染是由多种污染物、复杂的过程所造成的一种现象,它的形成机理是建立预警模型的基础。污染物按照形成过程可以分为一次污染物和二次污染物。一次污染物是指直接从污染源排放进入大气中的物质,比如燃煤产生的二氧化硫、一氧化碳,汽车尾气排出的氮氧化物和挥发性有机物等。这些物质进入大气中后就会使空气质量变差。

二次污染物更加复杂,它们是由一次污染物在大气中经过一系列的物理化学反应生成的。此类反应发生的条件有强烈的太阳辐射、高温、高湿等气象条件。两种最为主流且被重点关注的二次污染物为臭氧、细颗粒物中的二次组分。近地面臭氧主要是通过光化学反应生成的,即氮氧化物和挥发性有机物在紫外线的照射下发生复杂的链式反应,最后生成臭氧。夏季晴朗无风的午后是臭氧生成的最佳时间。此时高浓度的臭氧会对人体呼吸系统造成刺激,同时对植被也会造成损害。

二次颗粒物的形成机理也更加多样。二氧化硫、氮氧化物等气态污染物会发生气-粒转化,即在大气中被氧化成硫酸盐和硝酸盐,这些盐类是PM_{2.5}的主要组成。这期间有气相化学反应、液相化学反应(云雾滴)和非均相颗粒物表面反应。挥发性有机物在大气中被氧化剂(羟基自由基、臭氧等)氧化后,会生成低挥发性的产物。这些产物经过成核或者凝结过程产生二次有机气溶胶,这也是PM_{2.5}的组成部分。

了解大气污染形成机理,不能只注意一次污染物的排放,也还要重视大气环境中化学转化过程这一大反应器。预警模型必须要能正确模拟出这些重要的化学反应和相变过程,才能对PM_{2.5}和O₃等二次污染物的浓度做出准确的预测。

(二) 天气系统与污染过程的耦合关系

大气不是静止的容器,污染物在其中的扩散、传输、清除都受到天气系统的严格控制。天气系统同污染过程之间的耦合关系,是进行空气质量预报预警时的又一个重要科学问题。认识并掌握这种关系,才是判断污染产生、消失、变化和强度的依据。不同的天气系统对污染物水平输送、垂直混合、干湿沉降的过程起到决定性的作用。

从宏观上看,静稳天气是造成重污染频发的主要气象条件。当某地长期处于均压场或者弱高压脊控制下时,近地面风速小,水平扩散能力弱,污染物容易在源区积聚。同时常常出现的逆温层犹如锅盖一样阻碍了污染物的垂直扩散,使污染物被限制在近地面混合层内,造成浓度急剧升高。相反,强冷空气过境常伴有大风天气,强烈的水平和垂直湍流混合可快速稀释并吹散污染物,起到清除雾霾的作用。降水过程是大气最重要的湿清除过程,雨雪可以将大气中的颗粒物和可溶性气体冲刷到地面,起到净化空气的作用。

天气系统控制着污染物在区域间的传播。从区域角度来讲,秋冬季节,当偏北风占优势的时候,北方的污染物就会被输送到下游的地区,造成区域性重污染。局地环流,海陆风、山谷风、城市热岛环流等都会对污染物在局地的分布产生影响。城市热岛效应造成城市中心温度比郊区高,从而产生由郊区指向城市的向心气流,有可能把郊区的工业污染物带到市中心,使城市污染加重。海陆风白天把污染物从陆地吹向海洋,夜间再把污染物从海洋吹回陆地,造成沿海地区污染物的循环和累积。因此,空气质量预警模型必须能够精确地模拟这些天气系统及其与污染过程的耦合效应,才能准确预测污染的强度、范围和持续时间。

（三）污染源排放的时空变化特征

污染源排放是造成大气污染、引起空气质量变化的物质来源。污染源排放清单的准确度、细粒度和动态性，是决定空气质量预警模型预测效果好坏的关键。掌握污染源排放的时空变化规律对了解污染原因、提高预警准确率有重大意义。排放的时空变化在源类上存在，在不同时间尺度上存在，在空间单元上也存在。

按照排放源类型分为工业源、移动源、生活源、农业源等。工业源如发电厂、钢铁厂、水泥厂等属于点源，排放量大而稳定，但是也会因为生产计划、环保政策等因素造成波动。移动源主要是机动车，其排放为明显的线源，有明显的日变化特征，早晚高峰时段排放量最大。生活源，冬季居民取暖、餐饮油烟等，有明显的季节性、日变化特征，分布广，为面源。农业源的排放和季节性的农事活动有关系，比如施肥产生的氨排放、秸秆焚烧产生的颗粒物和气态污染物的排放等，都属于农业源。

就污染源排放的时间尺度来说，它有多个周期性。就小时而言，交通源的早晚高峰特征最明显。从周的角度来看，工作日的交通流量和工业活动水平与周末不同，产生排放量的周末效应。就季节而言，北方地区冬季燃煤供暖造成污染物排放量剧增，夏季高温会加大挥发性有机物的挥发排放。时变特征必须在预警模型所用的排放清单中体现出来。污染源的分布极不均匀，大城市、工业区是排放的高密度区，广大农村地区为低密度区。这种空间异质性就决定了污染物浓度的大致空间格局。高分辨率并且能实时更新的污染源排放清单，是进行空气质量精细化预警的前提。

第二节 统计预警模型与方法

一、回归分析预警模型

（一）多元线性回归模型

多元线性回归模型是回归分析中基础性的一种模型，研究的是多个自变量和因变量之间存在线性关系。该模型把空气质量指标，即 PM_{2.5} 浓度等变量当作风速、温度、湿度和其它污染物浓度的线性组合。模型建立过程首先要找出与目标污染物浓度显著相关的影响因子，作为模型的自变量。利用历史监测数据，用最小二乘法等算法求出模型中各个变量的回归系数。系数数值、正负反映了各个

影响因素对于污染物浓度影响程度及方向。负的回归系数表示风速增大可以促进污染物的扩散稀释,使浓度降低。

构建出来的多元线性回归模型形式简单,可以清楚地反映各变量间的关系。在其他条件不变的情况下,可以指出二氧化硫浓度增加一个单位时,PM_{2.5} 浓度预期增加多少。所以它的解释性很清晰,模型的结果容易被决策者所理解、接受。除了预测之外还可以进行因子重要性分析,即通过对标准化回归系数进行比较,得到对空气质量影响最大的因素,从而为制定精准的污染控制措施提供依据。

虽然多元线性回归模型有很多优点,但是它也存在着一定的局限性。核心假设是变量间存在线性关系,但是空气污染是一个非常复杂的物理化学过程,很多影响因素和污染物浓度之间是非线性关系。各个影响因素之间存在多重共线性,即自变量之间有相互关系,这会导致模型参数估计的稳定性差、准确性不高,造成模型失真。因此,在利用多元线性回归进行预警时必须对数据严格检验,并谨慎地评价模型适用的范围。有时候甚至要采用其它更加复杂的模型才能达到更好的预警效果。

(二) 逻辑回归模型

逻辑回归模型属于广义线性回归分析的一种,主要用来解决因变量是分类变量的问题。它不会给出具体的污染物浓度数值,而是预测某一段时间内出现空气污染的概 率,比如未来 24 小时内空气质量指数有没有可能大于 100,达到轻度或者重度污染级别。它能够对分类的“是”或者“否”这类问题作出回答,给风险评价以及预警等级确定带去特殊价值。

该模型的核心就是用逻辑函数(Sigmoid 函数)把线性回归得到的连续预测值映射到(0, 1)区间,从而得到一个概率值。模型的自变量可以是气压、逆温层强度、污染源数据、前一时段污染物浓度等。对大量的历史数据进行训练,模型就可以学会这些因素和空气污染超标事件之间的关联模式。例如模型发现当风速低,湿度高,二氧化氮浓度高时,PM_{2.5} 超标的可能性就会非常高。预警系统可以设定一个概率阈值(例如 70%),预测的超标概率大于这个阈值就会报警。

逻辑回归模型的优点就是输出结果直观、容易转换成决策指令。它提供的概率信息比单纯的预测值更能体现出预警的不确定性,利于管理部门做出风险权衡。同时模型也能像线性回归一样,用各个自变量的系数来判断各个因素对污染事件发生的影响大小,从而为污染溯源提供线索。逻辑回归经常被用来建立重污染天

气的分级预警，根据预测出的不同污染等级出现的概率发布蓝黄橙红预警。

（三）逐步回归模型

逐步回归模型是多元线性回归的一种优化方法，主要用来解决多元分析中变量选择的问题。建立空气质量预警模型的时候，研究者常常会碰到许多可能的影响因素。但并不是所有的因素都会对预测目标造成显著的影响，有些因素甚至会成为噪声，降低模型的精度。逐步回归是一种自动从大量的候选变量中挑选出最优子集的方法，目的是建立回归方程、简化模型、提高预测效率、避免多重共线性。

逐步回归主要有以下三种基本策略：

1. 前向选择法，从不含任何自变量的空模型开始，每次迭代都选择能最大程度提高模型解释力的变量（一般用F检验的p值或者赤池信息准则AIC等指标），将其加入模型。不断重复，直到没有变量加入能显著改善模型为止。

2. 后向剔除法：与前向选择法正好相反，它是从一个包含所有候选变量的“全模型”开始，然后每次去掉对模型贡献最小的变量。同样不断重复，直到模型中所有的剩余变量都显著为止。

3. 双向逐步回归法：该方法把前向选择和后向剔除结合起来。每次加入新的变量之后，就会对模型中所有的变量进行重新考虑，看是否有变量因为新变量的加入而变得不再显著，如果有就将其移除。这样的进退结合的方法一般被认为是更灵活稳健的方法。

环境空气质量预测中，逐步回归的应用价值是非常高的。臭氧浓度的预测中会牵涉到温度、湿度、风速、风向、太阳辐射强度、氮氧化物浓度、挥发性有机物浓度等几十个候选变量。利用逐步回归分析可以自动找到某个区域、某段时间内影响臭氧生成起决定作用的主要因子组合，进而得到更简单有效的预警模型。不仅可以提高模型的预测精度，还可以为认识区域大气污染形成机理提供重要的科学解释。

各类回归分析预警模型的特点与适用场景可见下表所示。

回归分析预警模型比较表

模型类型	核心思想 / 目的	因变量类型	主要优点	主要局限	典型应用
多元线性回归	探究多个自变量与因变量的线性关系	连续型变量	理论基础好，解释性强，模型直观	假设线性关系，易受多重共线性影响	预测 PM2.5、SO2 等污染物浓度数值
逻辑回归	预测事件发生的概率，处理分类结果	分类型变量	输出概率直观，易于决策，体现不确定性	只能处理二分类或多分类，不直接预测数值	预测空气污染超标概率，构建分级预警
逐步回归	从大量候选变量中自动选择最优子集	连续型变量	简化模型，提高预测效率，避免多重共线性	依赖统计指标，可能忽略业务逻辑，局部最优	筛选关键影响因素，优化多元回归模型

二、时间序列预警模型

(一) 自回归移动平均模型

自回归移动平均模型，简称 ARIMA 模型，是时间序列分析中最经典、最常用的方法之一。它很好地刻画了平稳时间序列数据内在的随机结构。该模型有三部分组成，即自回归、差分整合和移动平均。AR(p) 表示利用过去的 p 个时刻的观测值进行线性组合得到当期值；MA(q) 表示现在观测值与过去 q 次的预测误差（白噪声）的关系；I(d) 表示使用 d 次差分使有明显上升或下降趋势的原序列变为平稳序列；这是使用 ARMA 模型的前提。

建立 ARIMA (p, d, q) 模型时，一般会遵循某个标准化的过程。用序列图、自相关函数图判断序列是否平稳，不平稳就做差分处理来确定差分阶数 d。再分析平稳序列的自相关函数图和偏自相关函数图特征（拖尾或截尾）来大致判断自回归阶数 p 和移动平均阶数 q。然后根据赤池信息准则或者贝叶斯信息准则等标准，在众多候选模型中选择信息准则最小的模型作为最优模型。对选择的模型残差做白噪声检验，保证残差序列中没有未被提取的有效信息，从而证明模型已经充分拟合数据。

ARIMA 模型对于 PM2.5、SO2 等污染物的小时或者日均浓度预测效果较好。可以较好地捕捉污染物浓度短期内的持续影响，也就是惯性效应。而某个小时的高浓度值往往预示着接下来的几个小时浓度也可能较高，自相关性正好可以用 ARIMA 模型的自回归部分来描述。该模型的最大优点是它有严格的统计理论基础，模型形式比较简洁，只用污染物自身的时间序列数据就可以进行相对准确的

短期预测，给应急响应提供宝贵的提前量。

（二）指数平滑模型

指数平滑法属于时间序列预测中的一种特殊方法，它的基本理念是认为时间序列的未来值是过去观测值的加权平均，权重随着时间的推移呈指数衰减。这也就意味着越接近的观测数据权重就越大，越远离的观测数据权重就越小，这与空气质量变化中“近期的信息更加重要”的直觉非常吻合。指数平滑模型计算简单、对数据要求不高、短期预测效果好，在空气质量快速预警中占有一定的位置。

根据数据的不同性质，指数平滑模型又可以分为几种。最简单的指数平滑法适用于没有明显趋势、季节性的时间序列，它用平滑系数 α 来平衡当前的实际观测值和上一期的预测值。对于线性趋势没有季节性的空气污染物序列，可以使用二次指数平滑（即 Holt 线性趋势模型）。二次指数平滑是在一次指数平滑的基础上再加入一个趋势项平滑方程，可以对序列的水平和趋势做动态的更新和预测。

对有明显趋势、有季节性波动的空气质量数据，臭氧浓度日变化、年变化都有周期性峰值，可以采用三次指数平滑即 Holt-Winters 模型。在二次平滑的基础上加入了季节性分量，用三个平滑系数分别控制水平、趋势、季节性分量的更新速度。可以很好地把序列的长期趋势、季节周期以及随机波动分离开来，从而进行综合预测。Holt-Winters 模型考虑到了工作日和周末、冬季供暖期等系统的规律性特点，从而使预测未来的几天的 AQI 更加准确。

（三）季节性时间序列模型

季节性时间序列模型是 ARIMA 模型的扩展，主要是用来处理存在明显周期性波动的时序数据，典型的季节性自回归移动平均模型就属于此类。空气质量数据有明显的季节性特征，北方城市冬季由于供暖造成 PM_{2.5} 浓度普遍偏高，夏季由于光照强烈导致臭氧浓度呈周期性峰值。对于以天、周或者年为周期的重复性规律，普通的 ARIMA 模型很难描述，而 SARIMA 模型由于加入了季节性参数，因此对它们的建模效果更好。

SARIMA 模型可以写成 $SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_m$ 的形式，其中 (p, d, q) 是非季节性部分的参数，与标准 ARIMA 模型相同。 $(P, D, Q)_m$ 为新的季节性参数， m 为周期长度，比如月度数据 $m=12$ 。 P 为季节性自回归阶数，即当前值与上一周期相同时间点的值有关； D 为季节性差分阶数，用来消除季节性趋势； Q 为季

节性移动平均阶数，用上一周期相同时间点的预测误差来预测当前值。

SARIMA 模型的建立要比 ARIMA 模型复杂得多，尤其是要确定非季节性和季节性两套参数的时候。同样要借助自相关函数图和偏自相关函数图的分析，在滞后 m 、 $2m$ 、 $3m$ 等季节性周期整数倍的位置上，ACF/PACF 图会出现特殊的模式，给季节性参数的选择提供线索。模型选定之后，还不能忽视对残差的检验，以判断所选择的模型是否有效。SARIMA 模型由于可以处理趋势性以及多重季节性，在空气质量预警中的中长期（数周到数月）空气质量趋势预测方面具有明显的优势，可以为区域性、季节性污染防治策略调整提供有力的定量支撑。

时间序列预警模型的具体特征与优势，可见下表列出。

时间序列预警模型比较表

模型类型	核心处理特性	数据要求	主要优点	适用场景
ARIMA	捕捉序列的趋势、季节性和自相关性	平稳序列（非平稳需差分）	理论基础严谨，短期预测准确	预测 PM2.5、SO2 等短期浓度，捕捉惯性
指数平滑	过去观测值的加权平均，权重指数衰减	历史时间序列数据	计算简单，短期预测效果好，适应数据变化	快速预警，单次 / 二次 / 三次分别应对无趋势 / 有趋势 / 有趋势有季节性
SARIMA	同时处理趋势性与多重季节性	具有季节性的非平稳序列	能捕捉复杂周期性规律，中长期预测能力强	预测 AQI 中长期趋势，考虑季节性、周期性污染

第三节 数值模拟预警方法

一、排放清单在数值模拟中的作用

（一）排放清单的时空分配

最开始的污染物排放清单一般是以年为单位的总量，并且是按行政区进行汇总。这样的粗略数据不能直接用于需要高时空分辨率输入的数值模型。因此需要对年排放总量进行空间、时间上的分配，使之符合各个模型所要求的网格、时间步。空间分配，根据行政区排放量，利用空间代理数据将排放量分配到各个地理网格上。常用的空间代理数据有人口密度、GDP 分布、土地利用类型、夜间灯光数据、道路网信息、详细的企业点源坐标等。工业点源排放可以精确地分配到它的地理坐标对应的网格中，农业面源排放可以按照农田分布来分配。

时间分配即把年排放量分解成月、周、日、小时等尺度上的变化曲线。需要根据不同的排放源活动特点来考虑。电力排放受季节性用电需求（冬季取暖、夏季制冷等）的影响比较明显，交通排放有明显的早晚高峰，居民生活排放也有日变化、周变化的规律。引入反映活动规律的时间剖面因子，可以将年排放量分配到每个模拟时段上，使污染物排放的实际动态更加真实的反映出来，对于准确模拟臭氧日变化、重污染过程的生消等非常重要。

（二）排放清单的不确定性及其影响

排放清单的构建过程中有很多估算和简化的地方，其不确定性是造成空气质量模拟整体不确定性的一个重要原因。清单的不确定性来自于两方面，活动水平数据以及排放因子。活动水平数据，如工业产量、能源消耗量、机动车保有量、行驶里程等，统计本身就存在误差或者代表性不足的问题。排放因子指的是单位活动水平的污染物排放量，它由生产工艺、燃料品质、污染控制技术及其运行状况等众多因素所决定，因而其变化范围较大。如果使用区域平均或者缺省排放因子，那么估算的结果就会产生较大的误差。

不确定性会被直接传递，在模拟过程中还会被放大。如果某地的氮氧化物排放量被系统高估了，那么模型模拟出的硝酸盐浓度、臭氧生成潜势就会偏高，而造成对污染形势的误判。反之，忽略重要的挥发性有机物排放源就会低估区域臭氧、二次有机气溶胶的生成量。所以，做排放清单的不确定性分析，定量评判其对模型输出结果的影响范围，这对客观评价预报系统的可靠程度，明确清单改进的优先方向有着长远的意义。

（三）本地化高分辨率排放清单的构建

为了克服一般或者全球排放清单在区域或者城市尺度上的误差问题，建立一个可以反映本地排放特点的高分辨率排放清单，是提高预警预报准确度的一个有效途径。本地化清单的形成是项系统工程，要采用“自下而上”的办法，尽可能多地搜集本地区实测数据及详细的活动信息。

1. 详尽的源头调查是基础。要融合环境统计、污染源普查、排污许可、企业在线监测等数据源，创建详尽的工业重点污染源数据库，保证每一个企业都有精确的位置，生产工艺，产能，燃料种类，治污设施及其运行状况等信息。对于面源、移动源要开展更具针对性的调查，获取本地化的农作物秸秆燃烧情况、溶剂使用情况、餐饮油烟排放特征。并且依据交通流量监测数据，本地的车型结构以及路

网信息来创建移动源排放模型。

2. 本地化参数测试应用很重要。通过实测典型排放源的排放因子来反映本地区的技术水平和管理状况，从而代替通用推荐值。对本地主要车型的实际道路排放进行检测，或者对某类工业炉窑的排放情况作出测定，均能很大程度上提高排放的估算准确性。

3. 多源数据融合校验可以提高清单的可靠性。可以将“自下而上”得到的估算结果同根据环境监测数据、卫星遥感反演得到的“自上而下”约束信息进行对比验证。用卫星观测的二氧化氮柱浓度反向约束氮氧化物的排放空间分布，用地面监测到的挥发性有机物组分数据来优化物种分配方案。采用迭代优化的方式，逐步降低清单的不确定性，得到越来越贴近实际的高分辨率动态排放清单。

二、数值模拟预报的业务化应用

（一）多模式集成预报方法

由于每个单一的空气质量模型都有其固有的不确定性以及系统偏差，任何一个模型都无法在所有的天气条件下、所有的区域内都准确预报空气质量。为了克服单模型本身的缺点，提高预报的稳定性和准确性，多模式集成预报应运而生。核心思想是取长补短，即将多个不同模型（或者同一个模型采用不同的物理化学方案）的预报结果综合起来，得到一个综合性能更好的集成预报产品。

集成的方法有最简单的算术平均法、按照历史预报表现加权平均法、多元线性回归以及神经网络、随机森林等比较复杂的机器学习方法。算术平均法能很好地消去各个模型的随机误差，使得预报结果更加平稳。加权平均法则按照各个模型在最近期或者类似天气状况下的预报水平，给予不同模型不同的权重，一般情况下，预报水平较好的模型在集成结果中所占的权重较大。近些年来，伴随着人工智能技术的发展，用机器学习算法构建非线性集成模型成为研究的热点。此类方法可以揭示各个模型预报偏差同气象状况、污染物浓度等众多因子之间复杂的联系，进而建立更加智能的订正和集成模型，重污染天气预报方面有良好的应用前景。

（二）预报结果的解释应用

数值模型输出大量的格点化污染物浓度数据，这些原始数据不能直接作为最终预报结论。预报员要对这些结果做出专业的解释并加以应用，变成直观易懂的

预报产品。这个过程就是检验和评价模型预报结果。预报员把模型输出的浓度同地面监测的实况数据比较，分析模型系统性的偏差（偏高或者偏低），以及动态趋势把握的情况。这是认识模型性能并形成修正思路的主要途径。

第二结合天气形势综合判断。预报员要分析未来天气背景，冷空气活动、高压或低压系统、降水、边界层结构变化等，来判断气象条件对污染过程的影响，进而评价模型预报的合理性。像预报有强冷空气过境的时候，如果模型没有显示出明显的清除过程，那么预报员对模型的结果就要保持谨慎。最终预报员把数值预报、统计预报和自身经验结合起来，对未来空气质量等级、首要污染物、AQI范围、污染过程的生消时间做出综合判断，制作成面向公众、管理部门的预报单、预警信息、污染过程分析报告。

（三）预报系统的自动化运行

为适应空气质量预报时效的要求，达到预报系统全自动化运行的目的，业务化建设是必然的。自动化预报系统可以大大减轻预报员的工作负担，保证预报产品每天按时、稳定生成。自动化流程一般是由一系列前后相连的脚本或者程序控制的，包括了数据获取、模型运行、后处理到可视化呈现的全过程。

流程开始为自动下载全球气象预报数据和本地环境监测数据。随后自动触发排放清单处理程序，生成模型需要的动态排放文件。核心空气质量模型开始运算，计算未来几天（72小时或者更长的时间）的污染浓度变化。模型计算结束之后，后处理程序会自行开启，从众多的输出文件当中挑选出重要的信息，算出AQI，再同观测数据相比较，从而得到检验统计量。可视化模块会自动生成各种预报图件，例如污染物浓度空间分布图、时间序列变化图、城市站点预报曲线图等。所有的预报产品将会以网页、邮件、应用程序接口等方式分发给用户。整个过程不需要人工干预，保证预报业务的连续性、高效性，使预报员能够把更多的精力投入到预报结果的深度分析、研判上。

第四节 机器学习在空气质量预警中的应用

一、传统机器学习预警方法

以下是对几种常见的传统机器学习预警方法的详细介绍，它们的特性对比可见下表。

传统机器学习模型特性对比表

模型类型	核心思想	优点	缺点 / 局限性
决策树	基于规则划分数据，形成树状结构	透明度高，易于理解	易受数据波动影响，易过拟合
随机森林	集成多棵决策树，整合预测结果	高精度，抗过拟合，可评估特征重要性	模型解释性相对弱于单棵决策树
支持向量机	寻找最优超平面，利用核技巧处理非线性	处理小样本、高维度、非线性数据效果好，泛化能力强	对参数和核函数选择敏感，计算开销大
人工神经网络	模仿生物神经元，自动学习复杂非线性关系	强大的非线性拟合能力，无需预设数学关系	解释性差（黑箱），易过拟合，训练复杂

（一）决策树与随机森林方法

决策树是基础而直观的机器学习模型，核心思想就是用一系列判断规则把数据分到不同的区域，最后形成一棵树，叶子节点代表预测出的类别或者数值。空气质量预警任务里决策树模型会用各个影响因素（温度、湿度、风速、前期的污染物浓度等）来构建判断节点，根据历史数据形成容易理解的预警规则。模型就会得出这样的规则，风速小于 2 米每秒，相对湿度大于 80% 时，接下来的 6 小时内颗粒物浓度很可能会超过阈值。此方法的好处是透明度高，决策过程符合人的思维逻辑，有利于环境学家和政策制定者理解、检验。

单个决策树模型很容易受到数据微小波动的影响，从而产生过拟合的现象，即在训练数据上表现很好，但是在新的、没有见过的数据上预测性能差。为了克服这个缺点，随机森林方法就被提出了。随机森林属于集成学习的一种，随机森林通过建立很多棵决策树，然后把这些决策树的预测结果进行整合（分类问题采用投票，回归问题采用取平均的方式），从而提高整个模型性能和稳定性。在构造每棵树的时候，随机森林引入了两种随机性，一种是自助采样法，即有放回地从原始数据集中随机抽取样本，用这些样本来训练单棵决策树；另一种是在每个

节点分裂的时候，不是从所有的特征中选择最优的特征，而是从随机抽取的特征子集中选择。

这二种随机性的加入，使模型变得很繁杂，模型的方差变小了，预测的准确率和鲁棒性变好。随机森林不仅可以处理高维数据，还可以分析各个特征在所有决策树中所起到的作用，得到特征的重要性排序。这个功能能找到影响空气质量的主要驱动因素，为科研人员进一步分析污染成因提供基础，并能为控尘措施的设计打下基础。因此随机森林凭借高精度、抗过拟合能力好以及可以评价特征重要性等优点，在传统机器学习预警方法中成为标志性的、被广泛应用的算法。

（二）支持向量机方法

支持向量机是基于统计学习理论的监督学习模型，对分类问题、回归问题的解决都具有很好的效果，特别是对于小样本、高维度、非线性数据。支持向量机的思想是找到一个最优的超平面，把特征空间中不同类别的样本尽量分开。空气质量预警问题可以转化为一个分类问题，即判断空气质量等级是否超标，也可以转化为一个回归问题，即预测未来某个时间点的污染物浓度。分类时最优超平面不仅要能够将两类样本分开，还要保证最接近超平面的样本点（支持向量）到超平面的距离尽可能大，提高模型的泛化能力。

现实世界中的空气质量数据大多为线性不可分，污染物浓度与各种影响因素之间的关系很复杂。支持向量机使用核技巧来解决它。核技巧的巧妙之处在于，它使用一个非线性映射函数，把原始输入空间里线性不可分的数据映射到更高维的特征空间，在新的空间里数据变得线性可分或者近似线性可分。常用的核函数有线性核、多项式核、径向基函数核等。一般使用径向基函数核来描述污染物和气象因子等复杂非线性的关系，效果很好。与其它模型相比，支持向量机是基于结构风险最小化的原则，其目的是使经验误差和模型复杂度之和最小化，因此理论上它比一些采用经验风险最小化算法（如传统神经网络）的模型更不容易产生过拟合。

（三）人工神经网络方法

人工神经网络以生物神经系统的结构和功能为参考，建立起来的计算模型，用大量的简单处理单元（神经元）广泛地联系在一起，模仿大脑处理信息的方式。人工神经网络具有很强的非线性拟合能力，因此常用于建立输入因子（气象参数、污染源排放、其它污染物浓度）和目标污染物浓度之间复杂的映射关系，用来做

空气质量预警。典型的人工神经网络模型一般是由输入层、一个或者多个隐藏层和输出层组成的。输入层将外部的数据送进来，经过加权求和和非线性激活函数进行加工处理，最终得出预测结果由输出层给出。

模型训练一般用反向传播算法，根据模型预测值和实际观测值之差不断修改网络神经元间的连接权值，直到获得所要求的预测精度为止。人工神经网络在空气质量预测中应用的流程大体上包括以下几步：

1. 数据预处理：收集整合历史空气质量监测数据、气象数据及其他相关数据，并做数据清洗、填补缺失值、归一化等处理来消除因变量量纲差异带来的影响。
2. 网络结构设计：根据问题的复杂程度以及数据量来设计网络结构，确定隐藏层的数量、每个隐藏层里的神经元个数，选用什么样的激活函数。
3. 模型训练和优化：把预处理后的数据分成训练集和测试集，用训练集训练网络，在验证集上根据它的表现调整超参数（学习率、批量大小）来防止过拟合。
4. 性能评价与应用，用测试集检验模型最终结果，常用的评价指标有均方根误差、平均绝对误差、相关系数等。训练好的模型就可以投入使用来开展实际的空气质量预警业务。

人工神经网络的优点在于能够自动学习、逼近任意复杂的非线性函数，不需要事先设定输入和输出之间的数学关系，因此非常适用用来描述大气化学和物理过程内部的复杂性。很多研究证明，经过良好训练的神经网络模型，预测精度一般会比多元线性回归等统计方法要高一些。

二、深度学习预警方法

（一）循环神经网络与 LSTM

循环神经网络是专门处理序列数据的神经网络。空气质量数据，比如每小时的污染物浓度、气象参数等，本身就有很强的时序相关性，具有时序性。循环神经网络是在普通神经网络的基础上，在隐藏层中加入了循环连接，使得当前时刻的输出不仅仅和当前的输入有关，而且和上一时刻的隐藏状态有关联，从而可以记忆并使用先前的信息。其结构可以捕捉到时间序列中动态变化的规律，适合做空气质量的滚动预测。

传统的循环神经网络在处理长序列的时候，经常会遇到严重的梯度消失或者梯度爆炸的问题，这样一来，模型就很难去学习序列中相距较远的依赖关系。模

型很难利用数日前已出现的静稳天气对当前污染累积的影响。为此，长短期记忆网络应运而生。LSTM 是循环神经网络的一种特殊变体，它的主要创新就是加入了遗忘门、输入门、输出门这三个门控机制。这些门的结构就像阀门一样，通过学习来决定保留还是删除历史的信息，决定是否更新单元的状态，该使用哪一个。

遗忘门决定上一时刻记忆单元中哪些信息需要丢弃，输入门决定当前时刻输入的信息中哪些需要记录下来，输出门决定当前记忆单元中多少信息被输出到当前隐藏状态。LSTM 靠着这三扇门一起工作，把筛选出来的、传得远的时序信息送进去，准确抓住空气质量数据里那些复杂长期依赖的模式、季节性、周期性等特点。在空气质量预警过程中，LSTM 模型可以考虑以前几小时或者几天的污染物浓度、气象条件变化的趋势等，来进行更加准确的未来空气质量预测，预测效果比很多传统的模型都要好。

（二）卷积神经网络

卷积神经网络最早是因为在图像识别方面取得了巨大成功而闻名的，它的最大优势就是能够利用卷积核提取数据的局部空间特征。尽管空气质量数据看起来是时间序列而不是图像，但是研究人员仍然将其用于空气质量预测，尤其是在处理时空数据的时候。常见做法是把分布在城市各个区域的多个监测站点数据，在某一时刻的观测值组成一个二维矩阵或者“图像”，矩阵中的每一个像素值代表一个站点的污染物浓度。时间维度就可以视作图像的通道或者序列。

卷积神经网络有很强的特征提取能力，能自动地识别出污染物在空间上的分布以及互相之间存在的关联。卷积核在浓度“图像”上滑动时，可以得到该区域内污染物的聚集情况、污染物由一个区域向另一个区域扩散的梯度情况、各个监测点之间的协同变化情况。对于理解污染物的输送和扩散过程来说，该能力十分重要。除了上面的方法外，有的人用一维卷积神经网络直接处理单个监测站的时间序列数据，在时间轴上做卷积，提取时间序列的短期模式和突变特征，补充循环神经网络捕捉长期依赖的能力。把卷积神经网络，LSTM 这些模型混合起来，形成混合模型，就能同时考虑到空气质量数据在时间和空间这两方面复杂的特性，从而让预警模型更准确，更可靠。

（三）图神经网络

传统卷积神经网络处理空间数据一般要求数据是规则分布的网格，比如图像的像素格。但是空气质量监测站的位置一般是不规则的，这就限制了标准卷积神

神经网络的应用。图神经网络的出现给出了解决这个问题的一种有效途径。图神经网络可以直接对图结构的数据进行学习，在图结构数据中，每个监测站点都是一个节点，站点之间的关系（地理距离、风向影响、交通联系等）可以用边来表示。

于是整个城市的空气质量监测网络就被抽象成了一个图。图神经网络的基本思想就是用消息传递的方法，在图的节点之间不断聚合、更新信息。每个节点在每次迭代时都会收集邻居节点的信息，再结合自身的特征更新自身的状态表示。此过程模拟的是污染物在各个站点之间实际的扩散以及相互间的影响。上风向站点污染物浓度信息，经由图的边传给下风向站点，从而使得模型可以更加精确地预测出下风向站点未来的浓度。

图神经网络可以处理任意拓扑结构的监测网络，可以显式地把站点之间的空间关联性加入到模型中，很好地捕捉非欧几里得空间里复杂的依赖关系。近些年来，把图卷积网络同循环神经网络融合起来的时空图神经网络模型，在空气质量预测上有着领先的发挥。不仅可以学习污染物在图结构上的空间传播模式，也可以学习污染物在时间上的动态演化规律，可以对整个城市区域未来各点的空气质量进行高精度、精细化预警，是当前该领域最前沿的研究方向之一。

第五节 预警模型验证与评估

一、模型验证的数据集划分

（一）训练集、验证集与测试集的划分

在模型的开发中，数据集的划分是基础中的重要部分。通常一个完整的资料集会被分成训练集、验证集和测试集这三个相互独立的子集。训练集是模型学习的教科书，模型会从训练集中学习输入特征和输出目标之间的关系。验证集就是起到“模拟考试”作用的集合，它不会参与到模型的训练当中来，主要用来调整模型的超参数，比如神经网络的层数、学习率等等。根据验证集上的表现来选择最佳的超参数组合，从而有效地防止模型过拟合。

测试集是模型最后的“大考”，不在训练和调优中使用，只有在模型开发完成之后，才对测试集进行评估，得到模型最后的性能和泛化能力。在测试集上得到的评价结果，可以衡量模型是否能适应实际的应用场景。对于空气质量这样的

具有明显时间序列特征的数据，数据集划分不能用简单的随机抽样。简单的随机划分会把未来的资讯透露给用作训练模型的历史数据，致使评价结果过于乐观，不能真实体现模型在实际预测情况下的水平。

所以更严谨的方法是使用时间序列来进行划分。用 2018 年到 2020 年的数据做训练集，2021 年数据做验证集，2022 年数据做测试集。这样按照时间先后顺序来划分的方式，保证模型总是用过去的资料去预测未来的事情，更加接近现实情况，也更能客观地评估模型的预测水平。划分比例一般按照数据量来进行划分，常用的划分比例有 70% 训练，15% 验证，15% 测试，也有 80% 训练，10% 验证，10% 测试的。

（二）交叉验证方法

当数据量较小时，如果简单地将数据集分成固定大小的训练集、验证集和测试集，那么模型的性能评估结果就会具有较大的随机性，评价结果的好坏在很大程度上取决于数据的划分方式。为了克服这个问题，交叉验证成了更加稳健的评价方法。它的基本思想是多次不同的数据集划分、模型训练、模型评估来获得一个更稳定的、可靠的性能估计。

K 折交叉验证为常用的一种方法。用随机方式把训练数据分成 k 个互斥的、容量大致相等的子集。每次验证的时候，从中选取一个子集当作验证集，其余的 $k-1$ 个子集作为训练集来训练模型，之后用验证集来进行评估。此过程重复 k 次，每次选择不同的子集做检验集。把这 k 次评价结果求平均，作为模型最终的性能指标。由于使用了全部的数据，所以评估结果的方差较大，更具有说服力。而空气质量预测的时间序列数据用标准的 K 折交叉验证也存在数据泄露的问题。因此需要使用专门针对时间序列的交叉验证方法，即时间序列划分交叉验证或者滚动预测原点交叉验证。后者每次迭代时都会增加训练集，模拟模型实际工作的时候会不断接收新的数据并重新训练的过程，从而得到更准确的评价结果。

（三）独立样本验证方法

独立样本验证是模型评价中最为严格的，最接近真实世界应用环境的一种方法。用未在模型开发阶段（训练、验证、调优中见过的）数据集来评价最后选定的模型。这个独立样本集在时空上应当与训练数据有明显的区分，可以是模型开发所用数据之后一整年的数据，也可以是同一区域内但未参与建模的其他监测站点的数据。

它的价值在于能够检验模型对于新数据、未知数据的反应能力，是检验模型泛化能力、稳健性的试金石。如果一个模型在训练集和验证集上的表现很好，但是在独立样本集上表现急剧下降，那么这个模型就存在着严重的过拟合问题，这说明模型只是记住了训练数据的特征，没有学习到普遍的规律。环境空气质量预警业务中，季节变化、气候异常、突发污染事件等都会引起数据分布的变化。独立样本检验可以检验模型对于这些变化的适应性。因此要在模型上线前对样本进行独立验证，这是保证预警系统在实际业务中能够稳定可靠的前提。

二、模型性能评估指标

（一）回归模型的评估指标

回归模型用来预测连续性污染物浓度值，其评价重点就是衡量预测值和实际观测值之间的误差。常用的评估指标有不同的侧重点，能从不同的方面来体现模型预测的精度。

1. 平均绝对误差就是将每一个观测值的预测误差的绝对值加起来，然后除以观测值的个数。它有容易理解、量纲和原始数据相同、能清楚显示预测误差平均大小等优点。平均绝对误差对于异常值不敏感，因此它衡量的是模型普遍的、平均的预测性能。

2. 均方根误差就是求预测误差的平方平均数，再开方。相比于平均绝对误差，均方根误差会把误差比较大的样本对总误差的贡献放大，因为误差被平方了。因此均方根误差对异常值很敏感，当模型在某一时刻出现较大的预测偏差的时候，均方根误差的值就会明显增大。在重污染过程出现的时候，准确的预测就变得非常必要，此时均方根误差更能体现模型在关键时刻的能力。

3. 决定系数，表示的是模型可以解释的数据变异程度，取值范围是 0-1。决定系数越接近于 1，说明该模型对因变量的解释能力就越强，模型预测出来的数值与实际数据相关度就越高。它给模型拟合好坏给出一个综合评价。决定系数很高，说明空气质量预测模型的预测趋势和实际观测趋势非常接近。

回归模型评估指标速览表

指标名称	计算方式	敏感性	优点
平均绝对误差	误差绝对值之和的平均	不敏感	易理解，量纲一致
均方根误差	误差平方平均的根	敏感	突出大误差，反映关键时刻能力
决定系数	解释变异性程度	综合	衡量拟合优劣，反映相关性

从上表可以看出，不同的回归模型评估指标各有侧重，可根据具体需求选择。

（二）分类模型的评估指标

当预警系统的输出结果是一个离散的空气质量等级（优、良、轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染）的时候，模型评价就变成了一个多分类问题。评估指标主要衡量的是模型把正确分类样本的能力。混淆矩阵是分类模型评价的一个基本的工具，把模型预测出来的类别同实际类别一一对应。根据混淆矩阵可以得到一系列的核心评价指标。

准确率是最直观的一个指标，即分类正确的样本数占总样本数的比例。当各类样本数量大致相等时，用准确率来衡量是一个比较好的标准。但是优良天气样本一般远远多于重污染天气样本，数据分布不均衡。此时，仅仅预测为优或者良的模型也可能有很高的准确率，但是它对于重要的重污染事件没有任何预警作用。

因此需要使用更加精细的指标，精确率表示模型预测为某一个等级的样本中真正属于该等级的比例，它衡量的是“预测得准不准”。召回率是指对于某个特定等级上所有的真正样本而言，被模型正确识别出来的比例，即衡量的是“找得全不全”。预警任务中，重污染等级的召回率比较重要，它关乎是否会漏掉严重的污染事件。F1 分数是精确率、召回率的调和平均数，它将两者综合起来，是不平衡分类问题里经常用到的综合性指标。

（三）预报等级的准确率评估

在具体的业务应用中，除了通用分类模型的评价指标外，还需要根据空气质量预报等级的特点来设计更加有针对性的评价方法。预报等级准确率的评判，除了看是否完全预报正确之外，有时候也会考虑到接近的预报。将轻度污染预测成中度污染虽然不是完全正确，但它的误差要比把优预测成轻度污染要小得多。

因此可以引入模糊评价或者容差评价的思想。将预报准确定义为预报等级与实况等级完全一致，预报基本准确定义为预报等级与实况等级相差一个等级，预报错误定义为预报等级与实况等级相差两个及以上等级。通过统计这三种情况的

发生次数来评价模型的预报效果。评价方式更加符合预警服务实际的需求，它承认了预测中固有的不确定性，并且可以对不同种类的错误进行区分。另外还可以针对重污染及以上等级的污染物分别计算其命中率、漏报率、空报率。命中率指的是正确预报出的重污染事件占全部事件数目的百分比；漏报率是指没有预报到实际发生过的重污染事件所占的比例；空报率是指预报了重污染但实际上并未发生的比例。它们可用于评价预警系统对于重要天气过程的反应情况并予以完善。

第六章 空气质量预警系统构建

第一节 预警系统架构设计

一、系统总体架构设计

（一）分层架构设计

分层架构是软件工程中一种经典且成熟的架构设计模式，把系统划分成若干水平层次，每一层职责清晰，只和相邻层次交互。环境空气质量监测预警系统的分层模型一般被划分成数据采集层、数据处理和存储层、业务逻辑和模型层、应用表示层。数据采集层主要把各种监测站点、气象服务、污染源清单等来源的数据进行汇集。数据处理和存储层负责对采集到的多种异构数据进行清洗、转换、校验，并进行持久化存储。

业务逻辑和模型层是系统的大脑，其中包含空气质量预测模型、污染物扩散模型、预警规则引擎、数据分析算法等主要的功能。这一层会调用数据处理层的服务，做繁杂的运算和分析，然后产出预测成果和警报信号。应用表示层是用户与系统交互的窗口，用 Web 门户、移动应用程序、大屏幕可视化等多样的形式，将分析的结果以及预警的信息直观地呈现给各级环保部门的管理人员、专家学者以及社会公众，提供查询、配置、管理等一系列的操作功能。

这种分层设计模式最大的优点就是解耦性非常高。每一层的变动一般不会影响到其他的层，只要接口不变就可以。更换新的传感器只需要在数据采集层做适配逻辑的修改，引入更先进的预测算法只需要在业务逻辑层做升级。职责的明确划分使系统具有很强的可维护性、可扩展性、团队协作效率，把复杂的系统分解成一个个可以独立开发、独立测试的单元，从而有效地控制项目风险、保证系统质量。

（二）微服务架构设计

系统功能越来越复杂，数据量不断增大，传统的单体应用架构在灵活性、扩展性、容错性上越来越显现出它的不足。微服务架构出现，它的主要思想就是把

一个庞大而繁杂的系统分解成许多小的、自治的服务模块。每一个服务都是围绕某一业务功能来搭建的，可以独立进行开发、部署、扩展，服务之间采用轻量级的通信方式来进行交互。

空气质量预警系统中的各项核心功能可以设计成独立的微服务。例如可以设置数据接入服务来专门对接各种监测设备和数据源，数据清洗服务来进行数据质量控制和预处理，模型预测服务来封装并运行各种空气质量预测模型，预警判断服务根据预设规则和模型输出来产生预警事件，信息发布服务通过短信、邮件、应用程序推送等多种方式发送预警信息，以及用户权限服务、地理信息服务、可视化数据服务等。

使用微服务架构后，各个服务可以被不同的团队独立进行维护，根据各种服务的负荷情况选择适合的技术栈和数据库，从而使得开发的速度和灵活性都得以极大的提高。对于面临高并发压力的业务，比如数据预测，只需要扩展模型预测服务实例的数量，不需要扩展整个系统。服务的独立性可以提升系统的容错能力，单个服务故障不会造成整个系统崩溃，利用熔断、降级等手段可以保证核心功能的持续可用，对高可靠要求的预警系统来说非常重要。

（三）云原生架构设计

云原生架构不是指某一个具体的技术，而是一套利用云计算优势来创建和运行应用程序的方法论。其主要思想就是容器化、微服务、持续集成与持续交付、声明式 API。把空气质量预警系统建立在云原生架构之上，就意味着系统将具有前所未有的弹性、韧性和敏捷性。

容器化技术，特别是以 Docker 为代表的那些实现方式，把应用及其所依赖的一切都打包进一个轻量级的、可移植的容器镜像。这就保证了从开发、测试到生产的环境一致性，彻底消除了“在我机器上可以运行”的兼容性问题。预警系统里众多的算法模型和服务，容器化可以大大简化部署过程，还能让其快速更新迭代。

容器编排系统，比如 Kubernetes 在此基础上实现了大规模容器化应用的自动化部署、弹性伸缩和高效管理。Kubernetes 可以实时调整微服务实例的数量来达到弹性伸缩的效果。它集服务发现、负载均衡、自愈等功能于一身，当某个服务实例出现故障时，系统会自动重启或者替换该服务实例来保证整个预警系统的高可用性。依靠 DevOps 文化和持续集成 / 持续交付流水线，开发团队可以频繁且

可靠地向业务发布新功能，使得预警系统可以快速应对业务和技术创新。经过优化的预测模型可以被快速打包成容器镜像，然后通过流水线无缝部署到生产环境，实现模型的快速上线和验证。因此，预警系统从诞生之日起就具备了云原生的特征，可以充分地利用云平台动态资源、自动化的能力。

不同架构模式在特点与优势上各有侧重，具体对比详见预警系统架构类型对比表。

预警系统架构类型对比表

架构类型	核心特点	优势
分层架构	明确的水平职责划分，各层仅与相邻层交互	职责清晰，高度解耦，易于维护与扩展，提升团队协作效率
微服务架构	系统拆分为自治小型服务，独立开发、部署、扩展	灵活性高，可独立伸缩，容错性强，技术栈选择自由
云原生架构	基于容器化、微服务、持续交付、声明式 API 构建	弹性强，韧性高，敏捷交付，充分利用云平台动态资源

二、系统数据架构设计

（一）数据湖与数据仓库技术

面对环境监测领域数据呈爆炸式增长和多样化特征，单一的数据存储技术已经不能满足要求了。数据湖与数据仓库结合使用，成为目前的主流。数据湖是集中式存储库，可以以原始格式存储海量结构化、半结构化、非结构化数据。对于空气质量预警系统来说，来自空气质量监测站的秒级或者分钟级数据、气象观测数据、卫星遥感影像、社会经济统计数据乃至网络舆情文本等都可以直接注入数据湖，不改变原始信息。“先存储后治理”模式给数据科学家、算法工程师提供大量丰富的原始素材，有利于开展探索性分析、训练复杂模型，有利于发现数据中隐藏的深层联系。

数据仓库不一样，它存的大多是清洗过、转换过、整合过、汇总过的高质量结构化数据，数据模型一般面向某个具体的分析主题，像区域污染趋势分析、污染源贡献分析等等。数据仓库给业务分析人员和决策者提供稳定、可靠、高性能的查询环境，是产生标准化报表、仪表盘和业务洞察力的重要基础。数据仓库里的数据给日常空气质量评定、预警效果复盘以及管理决策提供支持。构建数据湖和数据仓库的协同体系，也就是湖仓一体架构，可以兼顾灵活性、性能，达到优

势互补的效果。原始数据沉睡在数据湖里，经过 ETL 过程，把有价值的部分提取出来，再装载到数据仓库里，于是形成了一条从原始数据到业务洞察的完整数据链路，全方位满足从深入探究到业务决策的各种数据需求。

（二）数据中台的建设与应用

数据中台是近些年出现的一种企业级数据管理和服务思想，它的主要目的是把数据当作一种可以复用的核心能力，将公共数据资产和计算能力沉淀下来，然后以服务的方式提供给前台业务部门，从而避免数据烟囱和重复建设的情况。在空气质量预警系统以及相关的环保业务生态当中，创建数据中台有着非常重要的战略价值。

数据中台的建设内容主要为统一数据采集、统一数据标准、统一数据模型、统一数据服务。它要创建全域数据资产目录，把散落在各个业务系统里的空气质量数据，气象数据，污染源数据等等收罗起来，整合到一起，变成统一标准，高质量的公共数据层。在此基础上把通用数据处理逻辑、分析能力和算法模型进行封装和沉淀，例如统一的空气质量指数计算服务、污染物时空插值服务、短期预测模型服务等。

开发新的应用，针对公众的空气质量查询应用程序，面向特定行业的污染管控分析系统等等，开发者不需要从零开始进行数据采集和处理，可以直接使用数据中台提供的标准 API 服务，获取需要的数据和分析结果。从而大大降低应用开发成本，加快业务创新速度和灵活性。数据中台使数据能力可以被复用、组合，把数据真正地变成一种可插拔、可调用的企业级核心资产，不断为企业环保决策、科学研究、社会服务创造价值。

（三）数据治理体系

技术架构给数据流动赋予了管道，数据治理体系才是保证管道内数据干净、可信、安全的制度约束。缺少有效的数据治理，数据湖就容易变成“数据沼泽”，数据仓库的分析结果也就失去了它的意义。因此构建起完整的数据治理体系才是数据架构成功的关键因素。该体系包括组织、流程、制度和技术等各方面的内容。

空气质量预警系统当中，数据治理的第一项工作就是数据质量治理。这包含创建数据品质准则（监测数据的完备性，精确性，及时性，一致性），搭建自动数据品质检测和警报体系，找出，标示并清除不合乎要求的数据。其次就是元数据管理，也就是对数据的描述数据进行管理，内容包含数据的业务定义、技术口

径、存储位置、数据血缘、处理历史等等。清晰的元数据可以方便用户理解和使用数据，也为数据问题的追溯提供依据。数据安全与合规属于数据治理的内容之一，应该确定好数据分类分级规范，实行严密的访问控制措施，保证敏感信息不会外泄，并且能够满足相关的法规要求。数据生命周期管理就是对数据从产生、使用、归档到销毁全过程的规划，从而控制存储成本和数据风险。健全完善的治理机制可以提高数据的价值密度，从而为预警的准确性以及决策的科学性打下坚实的基础。

第二节 预警指标体系建立

一、常规预警指标体系

（一）AQI 指数预警指标

空气质量指数是把各种常规污染物的浓度转化为单一的、概念性的指数，以告知公众短期空气质量状况及其对人体健康的影响。AQI 指数预警指标是目前使用最广泛的预警判据，主要是设置不同的预警级别（蓝色、黄色、橙色、红色）AQI 阈值来触发预警。预测未来一段时间内 AQI 达到并超过某一数值时，就会发出预警。预测未来 24 小时 AQI 大于 200 就发出橙色预警；大于 300 就发出最高等级的红色预警。

该指标体系最大的优点就是综合性以及易理解性。它把复杂的多种污染物浓度数据（SO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、O₃、CO 等）经由统一的算法转换成一个无量纲的数值，并附带颜色及健康指引，极大地方便了信息的传播与普及。公众不需要了解各种污染物具体浓度和危害，只要通过 AQI 的数值和颜色就可以迅速判断空气质量的好坏以及出行建议，这对提高全社会的环保意识和健康防护能力具有非常重大的意义。

建立 AQI 指数预警指标要确定几个要素，首先是参与计算的污染物项目，关系到指数的全面性；其次就是各个污染物的分级浓度限值，是指数计算的基础，需要根据最新的环境空气质量标准和健康风险研究结果来确定；再者就是预警启动的条件，除了考虑 AQI 的峰值之外，还要考虑高污染水平持续的时间，例如“预测 AQI 日均值 > 200 且持续 2 天以上”等，以此来避免因短暂波动而频繁启动

或者解除预警，保证预警的严肃性和权威性。

但是该指标体系在实践中也存在一定的不足。由于 AQI 取的是各分指数的最大值，所以会忽略其他也超标但是数值较小的污染物，造成预警信息不能完全反映复合型污染的实际情况。在某些情况下 AQI 可能会被单一污染物（例如 PM2.5）所主导，但是臭氧的浓度也可能同时超过或者等于标准限值。在这种情况下，仅依靠 AQI 的预警不能使有关部门采取针对臭氧前体物的协同控制措施，造成污染防治措施不精准。

（二）分污染物浓度预警指标

由于 AQI 指数的综合性强，会带来信息损失，因此建立以单一污染物浓度为预警指标的体系就成为必要。分污染物浓度预警指标，是直接使用各个关键污染物（PM2.5、PM10、O3、SO2 等）的预测浓度值来进行判断，设置各个污染物独立的预警启动阈值。更准确地识别出主要污染物，给制定差异化的、精细化的应急减排措施提供直接的依据。

在建立该指标体系的时候，对每一种常规污染物都要按照其环境质量标准和健康效应，分等级设置不同的浓度限值。将 PM2.5 预测值为 75 微克 / 立方米、115 微克 / 立方米、150 微克 / 立方米、250 微克 / 立方米时分别定义为蓝色预警、黄色预警、橙色预警、红色预警。PM2.5 预警值的分类可以参照下表。

PM2.5 预警级别划分表

预警级别	24 小时平均浓度 (微克 / 立方米)
蓝色	> 75
黄色	> 115
橙色	> 150
红色	> 250

这样设定预警信息就更加具体。当 PM2.5 成为首要污染物的时候，管控措施就可以集中到扬尘、工业粉尘、机动车尾气等颗粒物的主要来源上。

秋冬季重污染天气频发的地区 PM2.5、PM10 浓度为预警工作的重点。预警系统可以预知两种颗粒物浓度的峰值，也可以预知这两种颗粒物浓度的持续时间以及分布情况，在启动区域联动响应之后采取相应的防护措施。而夏秋季节臭氧污染愈发严重，因此以臭氧（尤其是日最大 8 小时平均浓度）作为预警指标十分重要。预测臭氧浓度超过某个阈值的时候，应急响应重心就转移到对 VOCs 和

NO_x 排放的控制上，比如午后高温时段可以对涉 VOCs 排放的企业实行错峰生产或者引导公众减少户外活动。

分污染物浓度预警指标的实践价值是十分具体的。它让环境管理者可以清楚地知道是什么导致了空气质量变差，从而在应急响应时不会采取含糊其辞的措施。对不同的污染物进行独立预警，可以针对工业源、移动源、面源等不同的排放源采取精准调控，从而提高环境管理的效率和科学性，最大限度地减少应急措施给社会经济正常运转造成的非必要干扰。

（三）污染过程特征预警指标

污染过程特征预警指标更加深入一步，它探究的是一大气污染事件从产生、发展直至消亡的整个过程以及相关的物理化学机理，而不仅仅是某个浓度的阈值。它不再只是判断“高或者低”，而是要探究污染是怎么形成的、会持续多久、会产生怎样的影响，进而给出更有预见性、更深入的预警信息，以便支持更加主动、更加科学的决策。

这类指标体系通常包含多个维度：

1. 污染累积速率是指单位时间内污染物浓度增加的速度，是反映、预测污染累积速率的指标。一个快速累积的过程一般说明本地排放量大、静稳气象条件迅速形成，预示着重污染过程的爆发将会很快发生，必须立即启动紧急的应急响应措施。

2. 持续时间以及峰值浓度，即预测高污染状态（AQI > 200）所持续的小时数或者天数，以及过程中达到的最大小时浓度或者日均浓度。持续时间是反映污染事件严重程度和健康影响的指标之一，也是判断预警级别和采取应急措施的依据。

3. 气象参数，把气象参数（边界层高度、地面风速、相对湿度、温度垂直分布等）加入到预警指标中。用边界层高度小于 500 米并且连续 6 小时以上作为触发预警的先决条件或者加权因子，从而可以从污染产生的源头——气象条件上进行预测。

4. 区域传输通量用模型计算和监测数据分析的方法，得到上游地区污染物输送给本地空气质量造成的程度以及贡献率。预测到跨区传输比较明显的时候，即便本地排放没有明显增加，也要提前发布预警并启动区域联动控制，携手上下游地区一起应对。

这些过程特征指标的出现,就表示着空气质量预警已经从现象描述走向机理预判。依靠高分辨率的数值天气预报模型、空气质量化学传输模型、先进的数据同化技术,对大气物理、化学过程进行模拟,从而揭示污染事件内在的驱动力。不仅可以增加预警的提前量和准确度,而且可以对污染进行溯因、追源,评价减排措施的效果,是现代预警系统智能化、精细化发展的象征。

二、特色预警指标体系

(一) 臭氧污染预警指标

臭氧属于典型的二次污染物,它的产生机理比较复杂,和前体物(NO_x 、VOCs)浓度、光照强度、温度等许多因素都有关系,具有与 $\text{PM}_{2.5}$ 不一样的污染特点。因此,给臭氧单独设立预警指标体系就显得十分必要。此体系可以提前发现并预警光化学烟雾事件发生的风险,为社会提供有效的防护和控制措施。

特色化的臭氧预警指标除了有日最大8小时平均浓度等臭氧本身的浓度之外,还有和臭氧生成有关的前体物以及气象条件指标。比如可以创建一个综合的光化学污染潜势指数,把区域内 NO_x 排放清单、VOCs排放清单、实时浓度监测数据、未来几天的光照时数、最高气温、相对湿度、风速等气象预报参数全部纳入其中。当该指数超过某一个临界值的时候,即使当前的臭氧浓度还很低,系统也能提前发出预警,提示存在形成高浓度臭氧污染的重大风险。

VOCs和 NO_x 的比值也可以用作预警的参考指标。不同的比值区间,臭氧的生成分别受VOCs或者 NO_x 的控制。监测和模拟该比值随时间的变化,可判断该区域现在属于哪一个控制区(VOCs控制区或者 NO_x 控制区),从而给应急减排工作提供更加精确的指导。当预测会出现高臭氧污染,并且处于“VOCs控制区”的时候,预警后的应急措施就要重点削减工业涂装、石化等行业的VOCs排放。以生成机理为基础的指标使臭氧污染的控制从事后应对变成事前预防,大大提升了臭氧污染防治的科学性与有效性。

(二) 健康风险预警指标

传统的空气质量预警主要是以污染物浓度为基础,它可以告诉人们“空气有多脏”,但是不能回答人们更关心的问题,“这对我有什么风险?”健康风险预警指标体系就是为了弥补这一不足而建立的。它把环境监测数据同毒理学、流行病学的研究成果融合起来,针对空气污染也许引发的健康损害展开量化的评价

和预警，这样一来，就完成了由浓度预警向风险预警的跨越。

体系的核心就是建立污染物浓度、暴露水平、健康效应三者之间响应关系的模型。它首先要依靠高精度的大气质量预报，得到未来某一时段各个地区的污染物浓度分布。再根据 GIS 中的人口空间分布数据（人口密度、年龄结构、社区分布等）计算人群的污染物暴露量。关键一步就是使用暴露响应函数，暴露响应函数来自于长时间的流行病学研究，定量表示出污染物浓度增加一个单位时，某种健康终点（比如呼吸系统疾病发病率、心血管疾病死亡率、急诊就诊人次等）增加的风险。

最终输出的是与公众健康密切相关、风险指标为公众健康提供直接参考的预期超额死亡人数、儿童、老人、哮喘患者等敏感人群的发病风险等级、区域综合健康风险指数等。这些指标可以利用风险地图直观地表现出来，清楚地显示出在未来一段时间里哪些地区、哪些人群所受到的威胁最大。公共卫生部门根据预警信息提前做好医疗资源调配工作，向高风险社区、高风险人群发布相应的健康防护指南，必要时还可以建议学校调整户外活动时间安排。以人的生命安全为本的预警模式，极大地提高了预警信息的社会价值和公共服务水平。

（三）社会经济影响预警指标

空气污染不仅会危害人类的健康，还会给社会秩序、经济活动等各方面造成严重的不良影响。社会经济影响预警指标是用来量化、预测重污染天气对关键社会经济领域可能造成的冲击，从而给政府应急管理、权衡环境效益与经济成本、维持社会稳定提供决策支持的。即环境预警系统开始从单一的环境领域向整个社会治理领域发展。

该指标体系的建立要展开跨学科整合分析。一方面要建立空气质量，特别是能见度和交通系统运行效率之间关系的模型。当预测 PM_{2.5} 浓度将导致能见度下降到某一数值以下的时候，系统就会提前预警高速公路可能会因为能见度低而关闭、航班会因为天气状况而延迟或者取消。另一方面该体系可以评价空气污染给生产活动带来的影响。统计各个行业的重污染应急响应停产、限产数据，结合投入产出模型，可以预测预警事件造成的工业产值损失、就业影响等，使决策者在考虑应急预案的经济代价时更加全面。

该指标体系也可以纳入对某个行业或者活动的直接影响评价。就旅游业来说，可以预测空气质量等级对游客出游意愿、景区人流量等的影响，从而提前发布旅游舒适度指数预警。对农业来说，可以建立臭氧浓度与农作物（小麦、玉米等）产量

损失的关系模型，预警高浓度臭氧事件对农业产量造成的潜在危害。这些指标把抽象的环境问题变成了具体的经济社会影响，让决策者在决定是否启动应急响应的时候，可以更明白地知道决策的利弊，从而能在环境保护、公众健康、社会稳定这三者之间找到最好的平衡点，促使环境管理朝着更加综合、理性的方式发展。

社会情绪、舆情反应也可以考虑进来。运用大数据分析技术，对社交媒体、新闻报道等平台上关于空气污染的公众讨论热度、情绪偏向、关注重点展开监测，可以构建起环境舆情风险指数。当预测到重污染天气即将来临的时候，该指数可以预知公众会产生的焦虑情绪以及信息需求，提示政府相关部门及时公开信息，做好与公众的沟通引导工作，防止不必要的恐慌产生，维护社会稳定。

第三节 预警等级划分标准

一、预警等级划分的依据

（一）基于污染程度的划分

预警等级划分最直接的标准就是环境里污染物浓度的高低。本方法以客观的监测数据为基础，主要的监测指标为空气质量指数、PM_{2.5}、PM₁₀、O₃等污染物的浓度值。当预测出未来一段时间内这些指标会超过某个阈值的时候，就形成了触发预警的基本条件。污染程度的划分不能仅仅依靠浓度峰值，而应该注重污染持续时间。例如预测空气质量指数日均值持续大于200就是触发预警的常见情况。由于持续的污染暴露比短时间内的低浓度污染暴露对环境、健康造成的累积影响更为严重，所以预警等级的判定一般会考虑二维矩阵，即污染物的预测浓度和污染过程的预计持续天数。预测四天重度污染过程的预警等级，一定比一天重度污染过程的预警等级要高。用强度和时长相结合的方式，更准确的体现出污染事件的程度，为后续差别化控制提供准确的依据。现代预警系统利用先进的空气质量数值预报模型，考虑气象状况、污染源排放清单、区域传输等各方面因素，可以对将来几天的空气质量变化趋势做出动态的预测，这对于按照污染程度来划分预警等级起到重要的决策作用。

（二）基于健康影响的划分

保护公众健康是建立空气质量预警系统的目的，所以不同级别的预警应该对

应不同程度的健康风险。划分依据主要是从环境流行病学和毒理学研究的结果中得出的，这些研究揭示出污染物浓度和人群健康效应之间剂量 - 反应的关系。空气质量指数本身就考虑到了健康的影响，不同的指数区间对应着不同的人群可能受到的影响，从轻微的呼吸道刺激到明显增加的心血管疾病发病率和死亡率。因此预警等级就是按照潜在健康风险来设定的。当预测空气质量会变差，对敏感人群造成影响的时候，系统会发出低级别预警，建议儿童、老年人、有基础疾病的人减少户外活动。随着预测污染的加重，当空气污染可能会对健康人造成普遍影响的时候，预警等级就会随之提高，并发布更严格的健康防护指南。将预警信息视作环境参数的同时，也视作一份明确的公共健康风险提示。

具体来说，健康影响的评估可分为几个层次，并与预警等级关联：

1. 轻度影响对应较低级别的预警，此时的空气污染会对极度敏感人群产生轻微的呼吸道刺激症状，但对大多数健康人群影响不大。

2. 中度影响，此时敏感人群症状加重，部分健康人也会出现眼部、鼻腔或者喉咙不适等症状，心肺疾病患者过早死亡的风险也随之增加。

3. 重度影响：属于最高等级预警，此时健康风险明显增大，人群中相关疾病发病率、死亡率都可能出现统计学上可测量的增加，所有人都应尽量避免或减少户外暴露。

（三）基于管理需求的划分

预警等级的确定还要考虑政府、社会等各方面的管理可行性以及响应成本。每一个预警级别都对应一套具体的应急响应措施，启动应急响应就会产生相应级别的社会经济成本。因此分级标准的制定要兼顾公众健康保护和社会正常运转的平衡，保证各级别的响应措施具有清晰性、可操作性、逐级递进性。有效的预警分级体系应该成为决策者手中精确的调节阀，根据污染程度启动相应强度、相应范围的管控。以最低等级的蓝色、黄色预警为例，主要引起的是建议性的减排措施以及健康防护提示，倡导公众绿色出行，工业企业自觉错峰生产等，对社会正常秩序干扰较小。当预警升级为橙色或者红色的时候，就一定要实施强制性的减排举措，部分工业企业停产限产、施工工地停止作业、重点车辆禁行、中小学停课等等。这些措施对于经济活动和社会生活有着较大的影响，其启动决定必须要有可靠的预警等级判定。预警等级划分的合理性，直接关系到社会资源能否得到有效利用，既不能出现小题大做造成不必要的经济损失，也不能出现反应不足而

造成公众健康受损的情况。它把复杂的空气质量问题变成清楚的、可以执行的管理命令，是环境监测预测和社会应急行动之间的联系人。

二、国家预警等级标准解读

（一）蓝色、黄色、橙色、红色预警标准

中国的重污染天气预警体系用颜色表示，从轻到重分为蓝色、黄色、橙色和红色四级预警，分别对应四级、三级、二级、一级应急响应。近几年来，伴随着实践的改进，大部分地区以及国家的指导意见越来越重视黄色、橙色、红色三级预警的强制性应急响应，而把蓝色预警更多地看作是健康提示或者内部关注级别。国家标准的核心就是对未来空气质量指数日均值的预测。空气质量指数日均值大于 200 就称为重度污染，这是触发预警的最低标准。按照国家最新的指导意见，预警分级标准更加完善和明确。国家重污染天气预警等级启动条件见下表。

国家重污染天气预警等级启动条件

预警等级	应急响应级别	启动条件（满足任一即可）
黄色预警	三级	预测 AQI 日均值 > 200，或预测 AQI 日均值持续 > 150 达 48 小时以上
橙色预警	二级	预测 AQI 日均值连续 48 小时 > 200，或预测 AQI 日均值连续 72 小时 > 150
红色预警	一级	预测 AQI 日均值持续 72 小时 > 200，其中至少有 24 小时 AQI 日均值 > 300；或预测某天 AQI 日均值将达 500（即使仅持续一天）

黄色预警（三级）的启动条件一般为预测空气质量指数日均值将超过 200 或者预测空气质量指数日均值持续大于 150 达 48 小时以上。重污染天气已经出现或者即将出现，需要启动初步的应急响应。

橙色预警（二级）启动的标准比较严格，一般是预测空气质量指数日均值连续 48 小时大于 200，或者预测空气质量指数日均值连续 72 小时大于 150。这就说明污染过程具有一定的连续性，需要采取更强的控制措施来阻止污染的积累。

红色预警（一级），属于最高级别的警报，启动条件最严格。标准为，预测空气质量指数日均值连续 72 小时超过 200，其中至少有 24 小时空气质量指数预测值超过 300（即达到严重污染水平）。极端情况下预测某天空气质量指数达到 500，哪怕只有一天，也要马上启动红色预警。该标准清楚地表明预警等级与污

染程度、持续时间、峰值浓度之间存在着直接联系，使预警科学、严肃。

（二）预警启动与解除条件

预警启动并不是在污染已经发生时才开始，而是根据科学预测来预先进行防御的一种过程。当生态环境部门与气象部门的联合会商结果表明，未来一段时间内空气质量有可能达到上述任一预警等级的启动标准时，应急指挥机构就会启动决策程序。为了给社会、相关单位留出准备时间，国家规范要求预警信息原则上要提前 48 小时或者更早发布。发布预警时应当说明预警开始时间、预警级别、主要污染物以及应当采取的措施，保证各项应对工作有序开展。两次重污染过程间隔时间小于 36 小时的视为一次重污染过程，从高等级启动预警，保证应对的连续性。

解除也要按照科学的程序进行，不能只看空气质量的好转作为唯一标准。解除预警的决策要以预测结果为依据，即预测未来一段时间空气质量会明显好转，可以稳定地维持在相应预警等级标准以下 36 小时以上。这样做是为了防止由于气象条件稍有好转就提前解除预警，造成污染在短时间内又卷土重来，产生“朝令夕改”的管理混乱和公众疑虑。预警解除也必须通过官方渠道提前发布信息，告知社会应急状态将在何时结束，各种管控措施随之终止，保证社会生产生活秩序平稳恢复。整个启动和解除过程体现出预警工作具有前瞻性、严格性。

（三）预警等级的动态调整

大气污染过程受到气象条件、本地排放、区域传输等众多因素的瞬时变化影响，具有很高的不确定性。因此预警等级在发布后并不是一成不变的，需要根据污染形势的实际变化做出动态调整，这是预警系统科学性、灵活性的集中体现。应急响应期间，环境监测部门将实时对空气质量进行监测，依据最新的天气预报情况，对于接下来的空气质量趋势做出滚动分析以及再判断。如果实际的污染程度比预报严重得多，或者预测未来气象条件不利于污染物扩散的情况将持续下去的话，则该地区的实际污染指数将大于原先的预警级别上限值，在这种情况下，应急指挥机构应尽快做出判断并把预警级别上调。如将已发布的黄色预警升级为橙色预警，加大应急减排措施。升级调整能够有效地抑制污染的进一步加重，保障人民健康。

预警等级的降级或者提前解除也属于动态调整的内容。有利天气系统（强冷空气过境）提前到来的话就会使污染物迅速被清除，空气质量大幅度提高。当预测证明改善趋势可以持续，并且满足解除或者降低预警等级的条件时，相关部门可以提前解除预警或者降级预警。这样避免了应急措施的过度使用，当污染威胁

消失或者减弱的时候，可以尽快恢复正常的社会经济活动，从而减少不必要的社会成本。动态调整机制可以使预警系统更好地适应环境的变化，把科学决策同精细化处理有机结合在一起，使重污染天气的应对效果得到提升。

第四节 预警信息生成与发布机制

一、预警信息的自动生成

（一）预警触发条件的判断

预警触发条件的判断是自动生成流程逻辑的开始，它的好坏直接影响到预警的准确率。系统里设置的是多种不同方面、不同层次的触发限值。其中一部分参考国家制定的《环境空气质量指数技术规定》的标准，还有一部分则是按照本地的污染情况以及管理规定而设定的。判断逻辑会实时监测各个监测站点污染物浓度数据，比如细颗粒物、可吸入颗粒物、二氧化硫、二氧化氮、臭氧、一氧化碳浓度值。当单个或者多个污染物浓度超过设定的限值并且持续一定时间之后，系统就会作出初步的判断，即认为触发条件已经满足。

更加复杂的判断会考虑预测模型的结果。系统会把未来二十四小时、四十八小时乃至更长时期的空气质量预测数据加以分析，再联系气象扩散条件模型（风速、风向、温度、湿度、混合层高度等）的输出，预估将来也许会出现怎样的重污染过程。预警系统以预测为基础，因此预警具有前瞻性，可以在事前启动预警，为社会各界争取时间。假设系统预测未来两天均是静稳天气，不利污染物扩散，区域内主要污染物浓度将会持续累积，达到重度污染水平，此时虽然空气质量仍然较好，但是系统会自动触发对应的预警级别，达到“未雨绸缪”的效果。

触发条件的判断逻辑还应该有很好的灵活性和可配置性，可以适应各种特殊的情况。以重大活动保障为例，预警触发阈值就会被设的更严。系统还要能识别并排除由于设备故障、数据传输错误等造成的异常数据，避免由于异常数据造成误报警。只有打造一个实时监测数据 + 多种预测方式 + 气象状况分析 + 动态阈值调节这样的综合判断引擎，才能使得预警能够准确自动的触发。

（二）预警信息模板的定制

预警条件触发以后，系统就会依照预先设定好的模板，迅速产出结构化，标

准化的预警信息。预警信息模板的定制，就是把复杂的监测数据转化成公众容易理解并接受的信息。模板设计要兼顾科学性、实用性、易读性，不同的预警级别、发布渠道、受众对象做差异化设计。

模板的内容大体上是由预警标题、发布单位、发布时间、预警级别、预警区域、主要污染物、污染状况说明、健康防护指引和建议性减排措施等组成。以红色预警模板为例，标题上就会明确标示出“重污染天气红色预警”，内容中也会清楚地告知影响范围、预计持续时间，并给出最严格的健康防护建议，“建议儿童、老年人及患有心脑血管、呼吸系统等疾病的易感人群留在室内，确需外出者应采取最高级别的防护措施”，还会列出强制性的减排措施，“特定区域实行机动车单双号限行，所有建筑工地停止一切室外作业”等。

为了加快信息生成的速度，在模板中使用了大量的动态数据域。系统触发预警时就会把导致预警的监测数据、预测的空气质量指数峰值、预警的起止时间、涉及的城市或区域等变量填入模板中相应位置。既保证了信息的准确性、及时性，又大大减少了人工编辑的工作量。系统可以预设多种模板，其中一套是详细的官方网站发布模板、另一套是简短的手机短信发布模板、还有一套图文并茂的社交媒体传播模板。

模板的语言风格也要精心设计，面向公众的信息应该尽量避免使用专业术语，采用简单、明了、通俗易懂的语言。将污染物浓度处于高值修改为空气污染比较严重。对信息模板进行科学、合理的定制后，在紧急情况下，预警系统输出的信息既快又准，真正起到了指导公众、服务社会的作用。

（三）预警信息的审核与签发

尽管预警信息是由系统自动产生的，但是发布权必须交给专业人员。审批、签发是保证预警信息权威性、严肃性的一道最后一关。此步骤融合了技术判断和人工智慧，属于人机协同决策的典型表现。其主要目的就是提高预警的及时性，在保证预警准确性的同时，最终确认预警的必要性和适度性，防止由于系统误判或者信息不完整而造成的人力物力浪费和公众恐慌。

预警信息自动生成之后，不会立即对外发布，而是以待审核状态进入内部工作平台，并立即通过系统通知相关审核人员。审核组一般由环境监测知识面广的专家、预报人员、应急管理人员组成。他们的第一件事就是回顾触发预警的原始数据以及模型的预测结果，看是否存在数据异常或者模型偏差。专家结合本地区

污染源和气象条件的了解，根据近时段天气大环境的分析，对系统的判断进行二次确认。例如系统监测到短暂的沙尘过境并发出高级别预警，但是专家通过天气图和卫星云图判断该过程影响时间很短，就可以决定不发布预警或者降级处理。审核过程也包括对预警信息文本内容的核对工作，保证文字表述无误，防护建议合理且符合地方政府应急预案相关要求。审核完毕后，将把信息交由有权签发的领导。签发属于一项具备法律效力的行政行为，一般情况下是由地方政府或者环境保护部门的领导来担任签发人。签发人会按照审核小组的专业意见，从社会管理、公共安全的角度做出最后的决定。指令一发出，预警信息就正式生效，系统随即会自动或者手动启动后续的多渠道发布。严格的审核签发程序，在信息产生之后几十分钟内就完成了从信息产生到最终决策的全过程，体现了应急响应的“快”与决策的“稳”的有机统一。

二、预警信息的多渠道发布

预警信息产生并签发之后，它的价值实现还要依靠全面、高效、立体的发布体系。单一的发布渠道不能满足现代社会信息传播的需求，必须建立一个覆盖面广、各具特色、互相补充的多渠道发布矩阵，最大限度地扩大预警信息的覆盖面和影响力，使预警信息能够到达所有应当被告知的人。不同的发布渠道各有特点，在适用场景方面见下表。

预警信息主要发布渠道特点一览表

发布渠道	主要特点	优势	局限性	适用场景
官方网站	权威详尽，信息全面	公信力强，信息量大，可追溯	需主动访问，传播速度相对慢	详细公告，数据查询，深度科普
手机应用程序	个性化推送，交互性强	及时、精准触达，移动便捷	需安装应用程序，可能受网络限制	实时预警，个性化健康建议
社交媒体	传播迅速，互动性强	覆盖广，易分享，形式多样	信息易碎片化，可能产生误读	快速扩散，公众互动，提升参与
短视频平台	视觉冲击力强，易于理解	传播力强，年轻受众，科普生动	信息容量有限，可能娱乐化	动态展示，动画演示，专家解读
手机短信	强制触达，覆盖面广	无网络限制，普适性强，高触达	字数限制，信息量小	紧急通知，特定人群（如老年）
广播电视	广域宣告，公信力高	权威性强，覆盖广，不受网络限制	单向传播，信息更新相对慢	紧急插播，重大预警，老年群体

（一）官方网站与应用程序发布

官方网站、专属手机应用程序，是预警信息发布的主阵地、权威平台，承担发布最完整、最准确、最及时信息的职责。两种渠道发布的信息的公信力都比较高，是公众获得权威信息和核对信息的主要渠道。它们不只是信息公告牌，更是具有强大功能的服务平台。

官网信息最全，有完整的预警公告、详细的实时监测数据表、各站点空气质量指数变化曲线图、未来几天空气质量预报、对应预警级别健康防护建议和企业的减排措施清单。很多网站还加入了地理信息系统，以地图的形式清楚显示区域内各个地方的污染情况和趋势，给公众和管理者提供空间信息的服务。

手机应用程序则将官方服务延伸到了移动端，实现了信息的个性化与主动推送。

1. 用户可以按照自身的地理位置或者所关注的区域来订阅预警通知。一旦此区域发出预警，应用程序就会借助手机系统的推送功能，快速把简要的预警信息显示在用户的手机锁屏上，这叫“信息找人”。

2. 应用程序内嵌有和官方网站类似的实时数据查询、预报信息浏览等模块，对移动端的交互体验也做了相应的优化。用户可以随时随地知道身边的空气是怎样的，得到针对性的健康建议，比如是否适合出门运动、是否需要戴口罩等。

3. 一些功能齐全的应用程序还会加入历史数据查询、污染过程分析、环保知识普及这些增值功能，把应用程序由单纯的预警发布工具变成全面的环境健康管理助手。权威详尽的网站、便捷主动的应用程序，二者一起成为预警信息发布的坚实基础。

（二）社交媒体与短视频平台发布

由于信息的传播越来越碎片化、视觉化，社交媒体和短视频平台就成了预警信息快速扩散、到达年轻人、提高公众参与度的主要渠道。这些平台有庞大的用户群和独特的流传方式，可以迅速把信息传达到数以亿计的民众之中，很好地弥补了传统官方渠道在流传速度和范围上的不足。

微信公众号、官方微博等社交媒体账号是发布信息的主要阵地。运营团队就会把审核通过的预警信息转为社交媒体容易传播的形式。即使用更简明的标题、更简短的摘要和更亲切的语言风格。为了使公众更方便地阅读、观看，把纯文字公告用色彩化、重点化的方法，制作成了一图读懂的长图文。信息图把预警级别、

影响范围、健康提示、防护措施这些重要信息灵巧地融合在一起，用户只需要匆匆一瞥屏幕就能抓住重点，很适合在朋友圈、微信群里分享并二次传播。

以抖音、快手为代表的短视频平台开创了新的视觉传播之路。环保部门制作标准化短视频预警模板，时长大多在 15 秒 -1 分钟。视频内容会动态显示污染态势地图、动画演示的健康防护要点（正确佩戴口罩怎么戴），经常有真人主播口播或者背景音乐、文字提示。短视频冲击力强、信息密度大，由于算法推荐机制可以实现病毒式传播，可以到达传统媒体难以覆盖的受众群体。平台还具有直播的功能，在重污染天气持续的时候，可以邀请专家开直播，即时解读空气质量的变动，回答问题，并且深入讲解，互动，从而有效地引导社会舆论，消除公众的疑虑，提升政府的透明度和亲和力。

（三）短信、广播、电视等传统媒体发布

虽然新媒体发展迅速，但是手机短信、应急广播、电视新闻等传统媒体在预警信息发布体系中仍然无法取代。这些渠道依靠强制触达、覆盖面广、不受网络状况制约等特性，成为达成预警信息全方位覆盖，尤其是守护特殊人群信息获取权利的“最后一百米”。无论发生什么情况，社会上所有的人群都能及时得到重要的安全信息。

手机短信属于具备很强穿透力的个人化通信方式。与电信运营商合作取得授权之后，预警系统就可以向某一区域内所有的手机用户发送预警信息。覆盖了绝大多数手机用户，不管使用智能手机还是功能机，也不管是否安装了某个应用或者关注了某个账号。虽然短信内容受到字数的限制，但是可以有效的向居民传达预警级别、主要防护建议等信息。对于不常上网的老年人或者居住在网络信号不好的地方的人们来说，短信是他们获得预警信息最直接甚至唯一的途径。

应急广播系统和电视媒体负责对一定范围内的人员进行广域宣告。当重污染天气出现时，广播电台可以在交通、新闻等重要频率插播预警信息，提醒正在驾车或者收听广播的市民注意防护。电视台可以用新闻报道、滚动字幕、天气预报时段特别提示等形式进行播报。尤其是发布最高级别红色预警的时候，电视甚至会中断正常的节目，插播紧急预警公告，这样的方式具有很强的权威性和警示性。传统媒体经过长期发展已经形成了强大的公众信任度，所发布的消息也更容易被大众所接受，从而成为预警信息发布体系中可靠且稳固的重要组成。

第五节 预警系统运行维护

一、系统日常运行监控

系统日常运行监控主要是为了保证预警系统的稳定预警作用，及时发现并规避风险，保证各个功能正常稳定的运行。它包含了对系统硬件性能、数据处理、业务应用等各个方面的监测。系统日常运行的各个要点见下表。

系统日常运行监控概览

监控类型	关注重点	关键指标 / 内容
系统性能监控	软硬件资源健康与效率	CPU 利用率、内存占用、磁盘 I/O、网络吞吐 / 延迟、响应时间
数据流转监控	数据时效性、完整性、一致性、准确性	站点在线情况、数据上报时间、数据包完整性、清洗预处理、数据库性能、ETL 错误、模型输入数据
业务流程监控	核心业务功能准确执行	关键业务节点状态、操作时间限制、用户交互模拟测试、预警条件判定、信息发布渠道

（一）系统性能监控

系统性能是环境空气质量监测预警系统能够提供稳定服务的先决条件，对系统性能进行有效的监控是运维工作的第一要务。性能监控的主要目的，在于保证支撑系统运行所必需的软硬件资源处于健康、高效的运行状态，避免由于资源的瓶颈或者硬件故障，造成服务的终止或者响应速度变慢。要用专门的监控工具对服务器集群、网络设备、存储系统等基础设备实行全天候全方位地监测和分析。具体要监控的是 CPU 利用率，内存占用量，磁盘 I/O 速度，存储容量，网络带宽吞吐量和延迟等。

运维团队要给关键性能指标设定合理的科学的阈值。阈值不是一成不变的，它是随着系统历史运行数据、业务高峰期负载情况、以后的扩展计划而动态调整的。CPU 使用率一般应该维持在较低的水平，但是在模型运算或者数据批量处理的时候会出现周期性的峰值，监控策略需要能够区分正常的峰值和异常的飙升。当任意一个指标超过设定的安全阈值时，监控系统就应该立刻启动告警机制，通过短信、邮件或者即时通讯工具等方式，把告警信息准确地推送给指定的运维工程师，从而让他们可以及时地进行处理。

除了被动告警，还必须做主动性能趋势分析。对历史性能数据进行长时间跟踪分析，可以预估系统资源消耗的趋势，给容量规划和系统优化提供数据支持。当磁盘空间使用率以每月固定的速度增长的时候，运维人员就可以提前做好存储扩容的规划，从而避免磁盘空间满载造成数据无法写入。同样地，对应用响应时间进行持续监控可以找到代码中的性能瓶颈，进而改善代码的性能，提高用户体验以及系统的整体处理能力，从而创建一个稳定的并且具有前瞻性的系统运行环境。

（二）数据流转监控

数据是环境空气质量监测预警系统的生命线，数据能否顺畅、准确、完整，直接决定了预警结果是否可靠。数据流转监控就是对数据的产生、处理、传递等过程进行追踪，保证数据符合既定的规范和标准。其包含从前端监测站点的数据采集，数据传输，数据清洗，数据入库，数据加工，数据分析一直到预警模型和信息发布平台的最终应用。监控的主要目的就是保证数据的时效性、完整性、一致性、准确性。

数据采集和传输为监控打下基础，要实时监视各个监测站点是否在线、数据上传的时刻等，并保证数据能够在规定的时间内传送给中心数据库。当网络中断、设备离线或者数据传输有延迟的时候，监控系统就应该马上察觉并发出警报。接收端必须能自动校验数据包是否完整，基本格式是否正确，对不完整、格式不对的数据包作出标记、隔离，并马上通知有关人员检查处理。该环节是为了保证原始数据的量、质不受外部因素的影响。

数据进入系统之后，就会经历一系列的处理过程。数据清洗和预处理是重要的步骤，监控系统要记录运行状况，无效值、异常值的剔除规则是否正确执行，数据标准化、单位换算有无错误。数据加载到核心数据库之后，数据库的写入速度、数据索引的健康状况、存储空间的剩余情况就成了新的关注点。必须保证数据可以高效的存储，并且在之后的查询、调用中能够快速的响应。ETL、数据关联等任何步骤出现错误都要被记录并且触发告警。

数据用来驱动预警模型的运算以及各种业务的应用。监控要覆盖到这里，保证模型所用的最新、最适合的资料库，还要对模型给出的结果做逻辑检查。如果预测浓度值出现与历史规律大相径庭的极端跳变，系统就应该将该结果标记为可疑并提示分析人员进行人工复核。运维人员借助端到端的数据流转全景视图，能

够清楚地看见数据在系统内怎样完成全部的流转过程，一旦出现状况，就能立刻找到故障发生的确切环节，无论是数据卡在传输队列里，处理脚本有误，还是模型没有正确加载数据，都可以做到对数据流整个链条的精细管理。

（三）业务流程监控

业务流程把系统功能同用户需求联系在一起，对业务流程加以监视，就能保证主要业务功能的准确运作，其中包括，污染过程预测、重污染事件预报、应急处置支持等等。业务流程监控比底层资源的性能监控、数据流转监控更贴近实际应用场景，是用模拟用户操作过程、系统业务逻辑的方式来检验整个服务链条的健康程度和正确性的活动。

业务流程监控就是对重要业务节点进行追踪并予以确认。这就需要把一个完整的业务过程拆分成一系列的连续步骤，再对每一个步骤的状态进行监控。完整的重污染预警发布流程可以分为以下几个关键节点：

1. 数据汇集、模型运算。监控系统应该保证用于预报的各个监测数据和气象数据按时汇集，空气质量数值预报模型在规定的窗口内可以准时启动并完成运算。

2. 预警条件判断，系统用模型输出的预测结果和国家或者地方预警启动标准做比较。检验逻辑是否正确，判断产生的警告类型（橙色）是否正确。

- 3.3 预警信息产生及审批，根据判断结果，系统自动生成预警单，预警单上会显示预警级别、涉及范围、持续时间、健康指导、建议措施等内容。监控要保证预警单准确无误地进入内部审批流程。对跟踪审批流程的流转情况，避免流程停滞。

4. 信息发布和渠道推送，预警信息批准之后，就发布到官方网站、手机App、社交媒体、合作媒体等渠道。监控要保证各个渠道的发布情况，保证信息能准时、准确地到达公众及有关的应急部门。

对这些业务节点的监控，不是只看“成功”或者“失败”。运维团队要给每个操作步骤设定操作时间限制以及合理的超时值。某个步骤执行时间如果比正常情况长很多，即使最终完成，也存在潜在的性能问题或者逻辑缺陷，应该立即介入调查。业务流程监控也要包含用户交互操作的模拟检测，用自动化脚本定时对用户登录，数据查询，报告下载等操作是否正常进行检查，保证系统的可用性以及用户的使用感受。这样就形成了全方位保障网，使预警系统的核心任务得以顺

利完成。

二、系统故障应急处理

（一）故障诊断与定位

故障诊断与定位属于应急处理的第一步，该环节效率的高低直接影响到后面恢复工作速度和成效。针对复杂的系统架构，想要快速定位故障的根源是很困难的，需要有系统的方法以及强大的技术工具的支持。告警信息的接收是告警处理过程的开始，告警信息来自于系统性能监控、数据流转监控或者业务流程监控等地方，给故障排查提供最初的线索。

应急响应团队接收到告警以后，首先要对故障现象进行初步的评估和分类，确定故障的影响范围和紧急程度。是单个监测站点数据断开，还是整个预警发布服务不可用。随后启动系统诊断程序，日志分析是故障定位最常用也最有效的方法之一。运维人员需要查看操作系统日志、中间件（数据库、消息队列等）日志、应用程序自身的业务日志和错误日志。对不同的系统在故障发生的时间点附近日志信息进行关联分析，经常可以找到明显的错误码或者异常堆栈信息，从而直接定位到问题模块。

当日志信息不足或者指向不明确的时候，就要采取更有逻辑的排查方法。常用的方法有“分层排查法”和“排除法”。分层排查法是从系统的最上层或者最下层开始，逐层向下或者向上进行检查。比如 Web 页面打不开，就从最上面的应用层开始看，Web 服务是否在运行；再到中间的网络层，看端口是否连通，防火墙规则是否正确；最后到最底层的基础设施，看服务器的硬件是否正常。排除法就是通过逐个验证或者排除故障原因来缩小故障排查的范围。如果怀疑数据库异常造成服务不稳定，可以尝试连接备用数据库，如果备用数据库可以恢复服务，则可以判定为主数据库存在故障。

现代化的监控系统给故障诊断提供了更为有力的支持。通过分布式链路追踪技术，能清晰展示一笔业务请求在微服务架构中的完整路径及各环节耗时，一旦某个环节出现异常或延迟，便能一目了然。把资源性能监控数据关联起来，如果故障发生的时候 CPU 和内存突然暴增，那就更能说明故障产生的原因。如果日志中有很多数据库慢查询，并且监控显示数据库服务器的 CPU 使用率达到 100%，那么故障原因很可能是 SQL 性能问题。最终依靠多种方法的综合应用，

找到具体的代码、配置、硬件单元、外部依赖等,给后续应急恢复提供准确的目标。

（二）应急预案的启动与执行

应急预案是在故障发生前事先编制好的、指导应急响应的纲领性文件。故障初步诊断定位之后,就要按照故障的性质和严重程度,尽快启动对应的应急预案。预案启动以后,应急处理工作就由无序摸索排查转变为有条理、标准化的操作执行。启动决定一般由应急指挥小组或指定的负责人依据预设启动准则做出,启动准则规定不同等级故障应该启动什么样的预案。

预案一旦开始运行,就有一个清晰的指挥、协作体系开始运转。应急组织架构在预案里已经详细地列出了总指挥、技术支持组、数据处理组、对外联络组等各方责任人以及他们的联系方式。总指挥统一调度资源、做重大决策;技术支持组由资深的运维、开发工程师组成,具体实施恢复工作;数据处理组负责评估故障对数据质量的影响并加以修正;对外联络组按照指令,在规定时间内和范围内对外发布信息。故障发生的时候各自分工合作,避免相互干扰。

预案的执行要严格按照事先拟定的步骤和流程图来进行。按照网络中断、数据库崩溃、应用服务宕机、数据污染等不同的故障类型,在预案中给出相应的操作指南。每一个指南都会详细说明要执行的命令、操作界面、检查重点、每一步骤的预期结果。对于数据库无法连接的故障,预案中会给技术人员提供如下顺序的步骤:检查数据库进程状态、查看数据库告警日志、重启数据库实例、如果重启无效就启动主备切换流程。每一步操作都要有详细的记录,方便之后的复盘。

执行阶段信息通报机制起着非常重要的作用。应急团队内部要经常、高效地交流,及时传递处置进展、新出现的问题、需要的支持。同时根据预案中信息公布的规定,在必要时对外公布。对影响公众服务的故障,必须通过官方渠道首次对外发布故障情况和预计修复时间,故障修复到一定程度或者完全恢复时,也应及时更新相关信息,保证透明度和公信力。应急预案的有效执行不仅能快速恢复系统的功能,更能体现出一个组织面对突发事件的能力和水平。

（三）故障恢复与系统加固

故障恢复是应急处理的主要目的,即利用一系列的技术手段,使系统功能从异常状态恢复到正常状态。根据故障种类以及严重程度来决定恢复方式,大体分为止损、核心修复和全面修复。恢复工作完成后,一项重要的工作就是对故障进行复盘分析,并采取加固措施,防止类似的问题再次出现,提高系统的整体健壮性。

最直接的恢复办法就是重启服务或者服务器，一般可以解决由资源泄露、进程僵死等引起的软件问题。当单个组件发生故障的时候，就可以采用隔离的方法将其从服务集群中剔除出去，从而使得剩下的部分仍然可以提供一些有限的服务。更严重的情况就是硬件损坏或者数据损坏，这时候就需要用到复杂的恢复方案。这就需要启用备用服务器或者做数据库主备切换，或者用备份的数据来恢复。数据恢复是十分关键而又非常敏感的一环，一定要依照预案的程序进行操作，首先要确定备份数据的完整性和可用性，再进行恢复，防止二次破坏。整个恢复过程必须在严格的监督下进行，每一步操作都要达到预期的效果，直到系统所有的功能经过测试确认恢复正常为止。

系统恢复之后，故障处理的工作也并没有结束。事后复盘总结就是故障审查、系统不断完善的部分。应急团队要安排专人对故障从发生到恢复的全过程进行回顾，找到根本原因。分析不能只停留在直接的技术原因，更要从流程、管理或者设计上寻找深层次的原因。像这样的由于配置错误引发的故障，其背后真正的源头也许并不是“配错”，很可能是缺少对配置发布的审核流程以及自动校验工具。

明确根本原因之后，系统加固工作就提上日程了。加固手段针对性、预防性强。技术方面修复代码缺陷、优化数据库查询、增加服务器冗余、设置智能化的监控告警规则、实现故障自动切换等。流程上要完善变更管理流程，加强发布前的测试，加强运维人员培训。经由把故障里吸取的教训转化为具体的改良项并加以落实，形成“发觉问题—解决问题—防备问题”的闭环运作，预警系统可靠且弹性的特性会在一次次的实战检验中日渐强化，从而塑造起一个能自我完善、具备很高弹性的运行维持体系。

第七章 空气质量预警响应机制

第一节 预警响应体系构建

一、预警响应体系的基本框架

（一）政府主导、部门联动

在空气质量预警响应体系中，确定政府的主导地位是十分重要的。政府作为社会的公共管理者，有制定政策、调动资源、组织协调的权力和义务。重污染天气来临时，需要一个强有力的指挥中心进行统一调度，避免各自为政、步调不一的混乱局面。各级政府都设立了重污染天气应急指挥机构，如大气污染防治联席会议或者应急指挥部，负责应急预案的审批、高级别预警的发布、重大应急决策。政府的主导作用保证了应急响应的权威性、强制性，为各项措施顺利实施打下了基础。

部门联动就是政府主导原则在执行中的具体表现。空气污染的原因复杂，影响面广，单靠一个部门难以完成治理工作。因此要创建跨部门的协同作战机制。生态环境部门负责监测预报预警信息的发布；工业和信息化部门负责工业企业停产限产的监督；交通运输部门执行机动车限行及运输调度的规定；住房和城乡建设部门管控建筑工地扬尘；卫生健康部门对公众健康防护工作进行指导。各部门依照预案所定的职责，既各司其职又相互配合，形成强大的应对力量，保证应急措施覆盖所有的重点污染源，取得最好的污染削减效果。

（二）社会参与、分级负责

空气质量预警响应不是政府的“单打独斗”，需要全社会的“群防群治”。社会参与是响应体系有活力、有韧性、有生机的根基。公众的认知、支持和参与对提高应急措施的执行效果起着决定性的作用。依靠新闻媒体、社交平台、手机应用等众多途径展开宣传教育，可促使群众自觉地挑选绿色出行、节约能源之类的减排举动，自觉遵守健康防护指引，保证自身的健康。动员社区、非政府组织、志愿者等多方力量参与宣传、监督、互助等活动，形成全民共治的良好局面。媒

体监督、公众监督属于促使政府、企业履行责任的外部力量,能提升整个响应体系的透明度与公信力。

分级负责原则,这是精准、高效响应的前提。该原则按照预警级别(黄色预警、橙色预警、红色预警),结合各行政层级及责任主体的职责范围,对责任进行划分并落实。国家层面主要负责顶层设计、跨区域协调以及宏观指导。省级政府对本行政区域内应急工作进行统筹,组织区域应急联动。市、县级政府为应急响应的具体实施主体,承担主要的属地管理责任,负责制定、执行详细的应急方案,保证各项措施落实到每一个企业、工地。企事业单位按照行业性质和自身条件来承担相应的污染排放责任。层次分明、职责明确、分工合理,各责任主体可以各司其职,既可统一协调,又可因地制宜、精准施策,避免一刀切造成的不必要的干扰。

根据不同的污染物造成的重污染天气情况,采取不同的处理手段。细颗粒物污染应急减排措施要严格依法制定;臭氧污染则应该加强挥发性有机物、氮氧化物排放源的日常监管,并及时向社会发布健康提示信息。精细化的管理思路体现的是科学治污的思想,是分级负责原则的深化和具体化。从而使整个社会成为一个统一指挥、分工明确的有机整体,共同应对重污染天气。

(三) 预防为主、响应及时

预防为主是空气质量管理 and 应急响应的基本原则,也就是依靠长时间、不间断的源头治理,使重污染天气的发生频率和严重程度降低。核心思想就是应急响应是必要的补救措施,但不能代替根本的污染防治工作。它要求工作重点前移,放在产业结构调整、能源结构调整、落后产能淘汰、工业企业深度治理上。推广清洁生产技术、发展清洁能源、实行更严格的排放标准,从根子上减少区域污染物的排放总量。只有基础排放水平大幅度下降,才能在恶劣的气象条件下有效防止或者减轻重污染的发生,从而减少应急响应的启动次数,减轻对社会经济活动的影响。

响应及时是预警系统在紧急情况下发挥最大作用的保障,也是决定应急处理是否能够达到预期效果的重要因素。预测系统预报未来可能发生重污染天气的时候,应急体系要立即启动。一般需要提前 48 小时或者更早发出预警信息,以便给政府、企业、公众留出足够的准备时间。预警信息发布以后,各个责任主体要按照预案的要求,在规定的时间内启动对应的应急响应级别。及时性是指决策和

信息发布要迅速,使预警指令能第一时间传达到所有有关方面,行动要迅速,保证限产、停产、限行、停工等措施能够迅速落实到位,在污染累积、加剧之前起到作用。快速反应可削峰,大幅削减污染过程的峰值浓度,最大限度保护公众健康。

二、预警响应的流程设计

(一) 预警信息的接收与传达

预警信息的接收和传递是整个应急响应流程的起点,也是它的神经中枢。环境空气质量监测预警系统在分析监测数据和数值模型之后,若预测未来空气质量会达到预警启动标准,就会产生预警建议。市级重污染天气应急指挥机构办公室(一般设在生态环境部门内)是预警信息的第一接收单位。预警建议接收到以后,马上组织有关的专家和部门进行会商,评判预警的必需性和精确性。研判内容为污染过程的持续时间、峰值浓度、主要污染物、影响范围等。这一环很专业、很科学,是后面所有行动选择的准绳。

应急指挥机构一旦决定发布预警,传递给他人的信息就要又快、又广、又准。内部传达时,应急指挥部办公室利用正式文件、应急指挥平台或者电话通知等方式,把预警等级、开始时间、应对措施等指令性信息,精确传达给工信、住建、交通等各个成员单位以及下级政府。各有关机构接到指令后,马上展开内部响应程序,并把指令传达给所负责具体监管的工业企业和施工工地等。

对外发布,即向社会公众发布预警信息,也十分关键。信息公布应该以提前、广泛和有力的原则,一般应提前 24 小时或者 48 小时公布。发布渠道应该多样化,尽量覆盖到尽可能多的人群。即通过政府官方网站、主流电视广播、报纸等传统媒体发布权威信息,同时也要利用微博、微信公众号、新闻客户端等新媒体平台以及城市户外电子显示屏、手机短信等方式进行快速、滚动播报。发布的信息内容要通俗易懂,既要把预警级别和时间告知公众,也要给出健康防护的建议和倡导性减排的措施,引导公众科学防护、主动参与。

(二) 应急措施的启动与执行

应急措施的启动和执行属于响应流程的决定性阶段,应急措施的启动及执行质量好坏直接关系到应急响应的成败。应急措施启动的号令是政府发布预警指令,按照预警级别分级开展应急工作,做到应急的力度要与污染的程度相匹配。具体的预警级别、表中列出了预警级别、触发条件和主要减排措施。

空气质量预警响应级别及措施表

预警级别	触发条件	主要减排措施	减排比例
Ⅲ级响应 (黄色预警)	AQI 连续 2 天 以上日均值 ≥ 200	- 工业企业：减少生产负荷，提高污染控制强度 - 施工场地：暂停部分土石方作业 - 道路：提高清扫保洁频次 - 交通：建议性错峰出行 - 教育：建议中小学及幼儿园停止户外活动 - 公众：建议性健康防护	10% 左右
Ⅱ级响应 (橙色预警)	AQI 连续 3 天 以上日均值 ≥ 200	- 工业企业：部分生产线停产，严格执行限产 - 施工工地：停止所有室外作业 - 交通：限行中重型货车及高排放车辆 - 教育：督导中小学及幼儿园停止户外活动 - 强制性健康防护	20% 以上
Ⅰ级响应 (红色预警)	AQI 连续 4 天 以上日均值 ≥ 200 或 AQI 单日日均值 ≥ 300	- 工业企业：重点排污企业大范围停产 - 施工工地：全面停工 - 交通：机动车单双号限行 - 教育：中小学及幼儿园停课 - 强制性健康防护	不低于 30%

措施实施阶段各个监管部门执法、督查工作非常关键。生态环境、住建、城管、公安交管等部门会派督查组对企业、工地、道路等进行全方位、不间断的巡查检查，并采用在线监控、无人机、遥感等科技手段提高监管效率。督查目的在于保证所有的责任主体都依照预案的要求落实了减排措施，对发现的违规行为依法进行快速处理并予以严厉处罚，以此保证应急措施的权威性和有效性。

（三）响应效果的评估与反馈

对应急响应效果进行评价并加以反馈，对形成应急管理闭环以及持续改进起着非常重要的作用。其目的在于科学、客观地评价每一次应急响应行动的得失，把评价结果作为改进今后应急工作的基础。评估工作一般在应急响应结束之后马上开始，由应急指挥机构办公室来组织，专家及相关部门参加。评价内容是多方面的，有环境效益评价、社会成本评价、管理过程评价。

环境效益评价是重点内容，主要用定量分析应急措施对改善空气质量的实际效果。技术人员会用空气质量监测数据对比采取应急措施和未采取应急措施(模拟)两种情况下污染物浓度变化的情况，从而得出污染物浓度削峰效果和减少的重污染天数。此种评价方式可以直观体现应急减排效果，可以判断是否达到预期的减排目标。同时还要对主要污染源减排量进行核算，检验减排清单的科学性、准确性。

管理过程评价主要是对整个响应流程是否顺畅、高效进行评价。评价内容有

预警发布及时准确；信息传递有无延误、盲区；各部门之间有无协同配合；执法监督有无薄弱环节；企业、公众响应情况如何。经过复盘整个过程，找出流程设计以及执行上的问题。还会对应急响应造成的社会经济影响进行评估，比如停产限产给企业造成的经济损失、交通限行给市民出行带来的影响等，以便今后工作更好地协调环境保护与社会经济发展。在下次修订应急预案、改进响应流程、修正减排清单的时候，会把本次评估报告提出的问题及建议纳入考虑，从而形成一个从实践中出发，经评估、修改再投入实践的良性循环体系，使空气质量预警响应体系日臻成熟、高效。

第二节 政府部门预警响应措施

一、建议性减排措施

下表概览了这些建议性措施的主要内容：

建议性减排措施概览

措施名称	目的	主要方式	预期效果
倡导公众绿色出行	减少城市交通污染物排放	媒体宣传、公共交通激励、共享出行支持	降低移动源排放，提升环保意识
建议排污单位控制污染工序生产	精准治污，减少工业源排放	发布指导清单、建立沟通机制、动态评估激励	降低工业源污染物排放，争取应急时间
减少机动车日间加油	精细化控制臭氧前体VOCs	错峰加油倡议、媒体科普、经济激励	减少臭氧生成，形成环保习惯

（一）倡导公众绿色出行

倡导公众绿色出行是应对空气污染预警最基本的社会动员方式，其主要目的就是减少城市交通造成的污染物排放。预警期间政府会在广播、电视、网站、社交媒体平台和户外电子显示屏上发布信息，提倡市民出行尽量选择乘坐地铁、公交等公共交通或者步行、骑自行车的非机动方式。不仅直接减少了私家车的使用量，而且对城市居民生活方式以及环境价值观念起到了积极的引导作用。

为了提高倡导的效果，政府一般会配套采取一系列激励和保障措施。预警期间临时加大公交发车间隔、延长部分线路的运营时间，提高公共交通的方便度以及运载能力。部分城市还会出台临时性的公共交通票价优惠政策，用经济杠杆来

吸引更多的市民放弃私家车。共享单车、公共自行车调度养护,使市民能方便快捷使用共享单车、公共自行车,也是倡导措施落实的重要环节。通过综合的措施,将“绿色出行”从一句口号变成恶劣天气下市民自觉的选择,积小成大,汇聚成降低整个城市移动源排放的巨大力量。

该项措施产生的社会效益是全方位的。从环境角度来看,私家车出行的每一次减少都会直接降低氮氧化物、挥发性有机物、细颗粒物的排放量,从而减缓污染的累积速度和峰值浓度。从社会角度来讲,可以提高人们的空气污染问题的认识与参与意识,使环保意识深入人心又入行。建议性措施的减排效果难以准确计算,并且会受公众响应程度影响,但是它在塑造长期环境友好型社会文化、建立政府与民众环境治理互信合作关系方面起着不可替代的作用,是全社会共同应对环境挑战的基础。

(二) 建议排污单位控制污染工序生产

空气质量预警刚起步时,就对排污单位提出控制污染工序生产的做法,属于精准治污、减少对经济活动过度干涉的柔性管理手段。本措施的核心不是要求企业全面停产,而是让企业根据自身生产流程特点,自主、有选择地减少或停止污染物产出强度高、非连续性、非核心的生产环节运行负荷。露天堆场、物料输送、喷涂、焊接、干燥、有机溶剂使用等工序都是工业源挥发性有机物、颗粒物的常见排放源。

政府部门发布这些建议的时候,常常会附上一份详细的行业指导清单,上面列出各个行业在预警期间可以调控的典型污染工序。该清单的制定,要依靠对各个行业产排污特征的深入研究,再结合长期监测数据的分析。这使企业更清楚地了解自己在应急响应中应该做什么、该怎样做。执行方式如下图所示

1. 根据家具制造、汽车维修、化工、包装印刷等不同行业的特殊性制定污染工序清单,给出详细的操作手册,预警期确定重点控制的排放工序。

2. 建立沟通联络机制,经由行业协会、工业园区管委会等途径,尽快把建议信息传递给有关企业,创建反馈渠道,随时掌握企业执行时出现的困难,给予必要的技术支持。

3. 通过在线监测数据比对、定期检查等方式,评价采纳建议的企业节能减排的效果,把它们加入正向激励名单中,用作后面环境管理及政策支持的参考。此举目的在于提高企业环保的自觉性,使企业认识到承担社会责任和自身长期发展

正相关。经由非强制引导，在污染天气初起之时，用最小的经济付出换得一定程度的环境收益，从而为应付可能的污染升级赢得宝贵的时刻。

（三）减少机动车日间加油

减少机动车日间加油，是对 VOCs 挥发性有机物进行精细化控制的一种方式。汽油在加注时，会放出大量的油气，即挥发性有机物。白天，特别是夏季气温高、光照强的时候，这些 VOCs 在空气中会和氮氧化物等物质发生复杂的光化学反应，造成近地面臭氧浓度超标。臭氧污染已经成为夏季许多城市首要的空气质量问题，对人类健康和生态系统造成危害。

将加油行为安排在温度较低、光照较弱的夜晚或傍晚时分，便可以从源头上大大降低日间光化学反应中 VOCs 的参与量。夜间紫外线辐射弱，油气挥发到大气中，产生臭氧的效率也会大大降低。温度越低汽油自身挥发性越弱，从加油枪口和油箱口逸散的油气量也就越少。这是典型的以时间换效益的做法，通过改变人类活动的时间来避开不利的气象条件，从而达到减少污染的目的，具有成本低、易实施、公众接受度相对较高等特点。

政府部门要想推行这项措施，就要采取多种途径、全方位的宣传手段。应该通过交通广播、导航软件、社交媒体等以驾驶员为主要受众的平台反复传播、推送科普知识以及倡议信息，使广大车主了解到“错峰加油”的环境意义。可以和石油销售企业合作，在加油站悬挂宣传横幅、张贴广告，在日间加油高峰期安排加油站工作人员对车主进行口头提醒。进一步推动的方法就是用经济激励手段，比如协调加油站开展“夜间加油优惠”活动，用微小的价格差异来引导消费者行为的转变。

该建议性措施一实施，就能立即控制臭氧污染，而且它的深远影响还在于给公众树立起一个科学细致的治污观念。环境治理不是一味地采取“一刀切”的限制措施，在保证公众生活便利性的基础上，用智慧、人性化的方法来提高环境质量。潜移默化的影响，有利于形成全社会践行环保的生活习惯，为建设环境友好型社会提供源源不断的动力。

二、强制性减排措施

（一）工业企业停产、限产

工业企业停产、限产是空气重污染应急响应的主要手段，也是最有效的强制

性减排方式之一。此措施直接作用于工业生产这个主要的固定污染源,依靠依法强制减少或者停止工业生产,达到在短时间内减少污染物排放的目的。预警级别越高,限产、停产的范围和力度也越大。在较低一级的强制性响应时,可能要求企业限产 20% 或者 30%;而在最高一级红色预警的时候,则会要求部分重点排污企业全部停产。

该措施是否有效,是由一套科学完备的前期准备和动态管理来决定的。政府环保部门一般会提前编制“重污染天气应急减排清单”,按照企业的排放量、污染治理水平、所处行业等指标,把企业划分成 A 级、B 级、C 级、D 级或者引领性、非引领性企业。评级越低的企业,在应急响应的时候所承担的减排比例就越高,有的企业甚至需要先停产。差异化管控策略体现的是多排多限、少排少限、不排不限的公平原则,也促使企业加大环保投入、提高治理水平,争取应急期间获得更多的生产豁免权。

停产、限产指令能否落实,要靠强有力的监督执法来保证。预警启动以后,生态环境部门就会安排执法人员采取无人机巡查、在线监控系统数据比对、用电量监控、深入企业现场核查等手段,对清单内企业的落实情况进行全方位、无死角的监督检查。对不执行、阳奉阴违或者弄虚作假的企业,将予以严厉的处罚,即高额罚款、公开曝光、列入黑名单等措施来保证应急指令的严肃性、权威性。虽然会产生一定的短期经济运行影响,但是为了应对重污染天气给公众健康造成的严重威胁,在紧急情况下为了保障环境容量和公众健康而牺牲一部分经济利益,是必要且合理的决定。

(二) 施工工地停工

重污染天气预警期间,强制要求施工工地停工,是控制城市扬尘污染的有效措施。建筑施工、道路开挖、拆迁作业等活动是城市颗粒物(主要是 PM₁₀)的主要来源。其产生的扬尘排放点多、面广、无组织,在静稳等不利气象条件下,极易导致局部甚至整个城市空气质量急剧恶化。因此,对施工工地实行强制性停工管控,可以立即、有效地消除这一重要的污染源。

停工指令包含的具体内容依预警级别而定,具有很强的针对性。橙色或红色预警期间,除重大民生工程、抢险救灾工程外,全市所有施工工地不得进行土石方作业、建筑拆除、喷涂粉刷、护坡喷浆、混凝土搅拌等易产生扬尘的环节。还要全面禁止建筑垃圾、渣土、砂石等散装物料运输车辆上路行驶,实现从源头到

运输的全过程管控。为了保证指令能够得到严格的执行，住房和城乡建设、城市管理、交通等相关部门会联合执法，采取网格化巡查、视频监控、无人机航拍等方式对辖区内的工地进行严密监控，对违规施工的单位和个人依法从重处罚，形成高压震慑态势。

（三）机动车限行

机动车限行，即行政强制在一定时间、一定范围禁止部分机动车上路行驶，快速、有效地降低整个城市移动源污染物排放总量。机动车排放的氮氧化物、挥发性有机物、细颗粒物是城市空气污染的主要来源，也是形成 PM_{2.5} 和臭氧的前体物。重污染天气实行机动车限行能立即减少路面车辆数量，从而降低全路网污染物排放强度。

限行方案设计一般会考虑科学性和可行性。最常见的方法是按车牌尾号实行单双号限行，即单日允许车牌尾号为单数的车辆通行，双日允许车牌尾号为双数的车辆通行，理论上可以使日均车流量减少一半。按照车辆排放标准，可以对国三及以下车辆实行全天禁行，精准管控高污染贡献车辆。为保证城市基本运行和公共服务，限行措施一般会对公交车、出租车、新能源汽车、邮政、环卫、执行公务的特种车辆等予以免除。差异化的管理方式既可以保证减排效果，又可以最大限度地减少对社会正常生活秩序的影响。

机动车限行能否有效执行，很大程度上依靠现代化的交通管理技术以及严格的执法系统。遍布于城市主要道路上的电子警察、车牌识别系统可以自动抓拍违反限行规定的车辆，并将其录入非现场执法系统进行处罚。路面交警加强巡逻、盘查、定点，当场对违规上路的车辆作出处罚。政府会在限行命令发布前通过各种媒体广泛宣传，并同步加强公共交通运输力保障，增加公交、地铁发车班次来满足市民由于限行产生的替代性出行需求，保证措施平稳推行。尽管机动车限行会给市民出行带来不便，但作为应对重污染天气严峻挑战时的一种能快速见效的应急减排手段，其必要性、有效性已经在很多城市实践中被反复证明。

第三节 企事业单位预警响应要求

一、工业企业的响应要求

（一）编制应急预案并备案

应急预案不是徒有其表的工作文件，它是根据预警等级来决定具体的减排操作办法的操作指南。编制要以企业自身生产工艺、产排污环节、污染物性质、排放量的全面、准确评价为基础。根据“一厂一策”原则来制订符合实际状况的减排路径，保证预案的可操作性以及有效性。这就意味着企业要确定主要的排污设备，识别出紧急情况下可以进行一定程度调整的生产线。

这些措施应当具备可量测、可考核、可监督的特点。橙色预警时某条生产线限产 50% 或者某个工序比如烧结、熔炼生产负荷降到某设定值。预案中还要明确各项措施的负责部门和责任人，确定企业内部指挥、协调、信息通报的程序，保证企业收到预警后能够迅速启动应对措施，避免延误、混乱。

备案程序不但是法定义务，也是把企业应急响应纳入区域联防联控体系的重要一步。备案使得监管部门可以对预案的科学性、完整性进行审核，保证企业所采取的减排措施符合区域整体应急目标。备案预案是日常监管和应急检查的重要依据，对未按照规定编制备案、预案内容不真实或者落实不到位的企业，将依法进行严肃处理。促使企业重视预案的编制工作，由被动应对变为主动管理，把环境风险纳入到企业经营管理的重要部分。

（二）落实停产、限产措施

停产、限产属于重污染天气应急响应的直接且最有效的污染物减排手段。这两项措施通过直接减少或者停止生产活动，从根本上减少污染物产生和排放量，对迅速降低区域污染物浓度峰值起着决定性作用。应急预案里规定的停产、限产的措施，是企业在得到预警信息后必须无条件执行的强制性指令。

落实停产措施，即企业根据预案中确定的生产线或者整个工厂的生产活动全部停止。这就要求企业制订周密的停机方案，在保证安全、环保的前提下平稳停车，妥善处理停产期间的物料、设备、遗留污染物。对于连续生产型化工、冶金等行业来说，突然停机会带来很大的安全风险和经济损失，因此应急预案中必须包含详细的安全停车操作规程。限产措施更加细致化，要求企业将生产负荷降低到预案所规定水平，一般采用降低设备运行速度、减少投料量或者减少生产班次

等方式实现。限产比例根据预警等级和企业绩效等级(A级、B级、C级、D级)采取不同的、具体的措施。

对停产、限产措施的监督核查是确保其有效落实的关键。生态环境部门会运用多种手段进行验证。

- 1. 对企业用电量数据进行对比,根据生产设备的启停及运行负荷与用电量的关系,查询企业的电网数据,即可判断企业是否按照要求落实了停限产措施。
- 2. 用在线监测系统。安装在烟囱上的在线监测设备可以实时传输污染物排放数据,排放总量的显著下降就是限产措施落实到位的最直接证据。
- 3. 开展现场突击检查,执法人员到企业车间去查看生产台账、检查关键设备运转情况,看企业是否存在虚报、瞒报或者夜间偷排行为。

工业企业环保绩效分级差异化管理表

绩效等级	污染治理水平	应急响应差异化措施
A级	行业领先,深度治理	可豁免或降低限产比例
B级	达到排放标准,设施完善	按照预案要求进行限产
C级	环保设施一般,有提升空间	严格落实限产要求
D级	治理水平较差,污染严重	更严格限产或停产
列入“正面清单”企业	环保管理优秀,贡献突出	享受豁免或降低限产比例

为了推动企业开展深层次的治理和绿色发展,在应急响应中实行环保绩效分级制以及正面清单制。环保绩效评级为A级或者被列入正面清单的企业是行业内环保绩效的标杆,在重污染天气预警期间可获得豁免或限产比例减低的优惠。由上表可以看出,该种差异化的管理方式一方面可以保证产业链、供应链的正常运转,另一方面更重要的可以给各企业以正向激励,促使企业增加环保投入,推动行业由粗放型污染生产方式向高效清洁型生产方式转变。

(三) 加强污染治理设施运行管理

执行停产或限产措施的同时,加强对仍在运行的生产线配套污染治理设施的管理,是保证减排效果的又一重要方面。即使生产负荷下降,污染治理设施的运行效率也不能随之下降,而应保证污染治理设施处于最佳运行状态,使污染物得到最大程度的削减。这体现的是应急响应的减产、减排两手抓、双管齐下的思路。

企业必须保证所有在运的污染治理设施,即脱硫、脱硝、除尘、挥发性有机物回收或者销毁等系统,均处于正常高效的运行状态。这就要求对设施的关键参数进行监控,吸收剂添加量、反应温度、催化剂活性、过滤材料压差等参数都应处于最

佳的设计区间内。应急响应期间要加大巡检的频次，在第一时间发现存在的隐患并及时予以处理，避免因治理设施出现问题而造成非正常排放的情况。还要保证环保耗材（石灰石、液氨、活性炭等）的供应充足，不能因为物料不足而影响治理效果。

记录与台账管理是证明治理设施有效运行的依据。企业要保证污染治理设施运行日志记载详尽，包含各项重要参数随时间发生的变动情况，操作人员所作的记载，设备的保养状况，耗用的物料等信息。这些台账是企业自证清白、承担环保主体责任的凭证，也是生态环境部门核查的重要内容。通过对生产数据与治污设施运行数据进行对比，可知企业所采取的治理措施是否真正做到了“应开尽开、应收尽收”，是否存在治污设施空转、效能低效等情况。规范化的运行管理，保证每一项减排工作都能取得实际的环境效益，防止应急响应中出现的管理漏洞。

二、建筑施工单位的响应要求

（一）停止土石方作业

重污染天气预警期间，停止土石方作业是控制建筑扬尘最直接、最有效的第一道防线。土石方作业包括土方开挖、回填、转运、场地平整、建筑物拆除等，扬尘浓度最大，影响范围最广。这些作业会造成大面积的土壤扰动，产生大量的粉尘颗粒，在恶劣的气象条件下很容易悬浮到空气中，加重该地区的颗粒物污染。

收到黄级以上预警时，所有建筑工地一律停止此类作业。此项要求具有强制性，不以项目规模或者工程进度为条件。施工单位应当建立内部应急响应程序，现场管理人员接到指令之后应立即通知所有相关作业班组，监督其立即停止机械作业和人工挖掘。对正在开挖的区域要进行现场临时稳固和覆盖，防止已开挖土方成为新的扬尘源。

监管部门对于落实情况实行严格监督检查。网格化巡查制度是由执法人员对辖区内所有在建工地进行巡查。高清视频监控系统、无人机航拍等现代化监管方式，可以实现对施工现场 24 小时、全方位、无死角的监控，有效防止工地夜晚或者隐蔽处违规施工。对不按要求继续开展土石方作业的施工单位，采取高额罚款、停工整修、记入企业不良信用记录等严厉处罚手段，保证应急响应的严肃性、权威性，形成强大震慑。

（二）加强施工场地洒水降尘

在停止土石方作业等产生核心粉尘的活动的的基础上，主动采取增湿抑尘措施

也是建筑工地应急响应的又一要求。加强施工场地洒水降尘，增加空气和地表湿度，使粉尘颗粒变重，从而有效地抑制粉尘的悬浮和扩散，是目前降低施工场地扬尘的有效方法。

应急响应期间施工单位要加大洒水作业的频次和范围。常规的每日定时洒水要升级为全天候、高频率的循环洒水。洒水范围应包括工地内部所有裸露地面、主要通行道路、物料堆放区和作业平台。特别是对进出车辆较多的道路，一定要保证路面始终湿润，这样才能冲刷掉车轮带出的泥土，减少车辆行驶时扬起的尘土。大型工地为了提高施工效率应该积极使用雾炮车、自动喷淋系统等专业的设备。雾炮车可以将水雾化成微米级水珠，覆盖面积大，降尘效果好，适合大面积裸露场地和高处拆除作业。工地边界处设置的自动喷淋系统可以形成水幕，阻挡场内扬尘外溢。

洒水降尘工作是否能顺利开展，很大程度上是依靠精细化管理和充足的资源保障。施工单位应当在应急预案中确定洒水作业责任人、设备配置、水源保障和作业流程。做好洒水作业日志，记录洒水作业的时间、区域、使用的设备等信息，供检查时查验。同时提倡使用中水或者收集的雨水作为洒水水源，积极响应环保号召，践行节水理念。建筑工地在应急期间通过系统化、常态化洒水降尘管理，可以将自身对环境空气质量的负面影响降到最低，履行建筑建设者对环境的承诺。

（三）覆盖裸露场地和物料

对施工现场裸露的场地、建筑材料实施全方位、全覆盖的防护，是从源头上静态控制扬尘污染的必要措施。未经覆盖的土壤、沙石、水泥等散体物料，在风力的作用下会产生逸散性扬尘，成为一个长时间存在的污染源。即便是无风的时候，人员和车辆的扰动也会使它们进入空气之中。因此，在重污染天气期间，对所有会产生扬尘的静态源头进行有效的遮盖，就是工地扬尘精细化管控。

此项要求全面且强制，工地内所有 24 小时以上不进行作业的裸露土地，必须使用符合标准的防尘网或者防尘布覆盖。防尘网的选择要考虑到目数和遮盖率，保证可以有效阻挡粉尘颗粒。覆盖要平整、严密，网与网之间要搭接，用重物或钉桩把边缘固定住，防止被大风掀开。长期裸露但暂时不开工的地块要采取长效措施，临时绿化速生草皮或者对地面进行固化剂硬化。堆放的建筑材料如沙子、石子、土方、水泥等必须用篷布严密覆盖或者存放在密闭的仓库或料仓内。建筑垃圾应集中堆放，及时覆盖，日产日清。这些措施的目的就是把所有的扬尘源进

行封闭处理，最大程度地减少扬尘源与大气的接触。

监管部门检查的时候，会把覆盖措施的落实情况当作重点。除检查覆盖率外还要检查覆盖质量，防尘网的破损情况、边角固定、有无死角。经由细致入微的管控需求，促使施工单位把扬尘防控融入日常管理的每个角落，从根子上转变以前粗放型的施工模式，创建绿色、文明的施工新风尚，为改良城市空气质量作出贡献。

第四节 公众预警信息接收与响应

一、公众获取预警信息的渠道

为确保预警信息的及时、全面、权威发布，应该创建一个多元化的、立体的传播矩阵。该矩阵把传统媒体与新兴媒体的优势结合起来，使各个年龄、生活习惯不同的社会群体都能及时、准确地获取到与自身健康有关的重要信息，为后续防护和应对措施地开展打下良好的基础。

公众获取预警信息渠道概览

渠道类型	特点	优势	覆盖人群
官方媒体	权威、规范、广覆盖	公信力强，信息统一，触达传统用户	中老年群体、信息接收习惯传统的民众、驾驶员
互联网与新媒体	快速、互动、精准	传播迅速，个性化推送，信息二次传播	年轻群体、移动互联网用户、特定关注者
社区与单位通知	组织化、强制性、具体	信息精准落地，保障特殊群体，促进具体行动	社区居民、企事业单位员工、学校师生、老年人

从上表可以看出，各类渠道在信息传递中发挥着独特作用，共同构建了全面的预警信息网。

（一）官方媒体发布渠道

官方媒体是信息发布的权威渠道，它的权威性和公信力是其它途径所不能比拟的。重污染天气预警期间，各级政府环境保护部门同主流媒体联系密切，依靠电视、广播、报纸等传统媒体，面向大众发布统一的预警信息。电视台会在天气预报、新闻时段这些黄金时间，以滚动字幕、专题报道、专家评述等方式公布空气质量指数实时数据、未来几天空气质量预报、预警等级（蓝色、黄色、橙色、红色）、相应的健康影响以及建议的防护措施。这种方式覆盖面广，可以接触到中老年人群以及信息接受习惯较传统的群众，从而保证信息传递的普惠性。

广播电台在触达移动人群上有着无法替代的作用，尤其是对于大量的驾驶员而言，在车载广播里听到实时的路况和空气质量预警，成为了他们改变出行方案、采取车内防护的关键依据。交通广播频道会不断插入预警信息，让市民注意少开窗，开启内循环。报纸等平面媒体的时效性要稍差一些，但是可以给出深入的解读和详细的背景分析，刊登专版文章，详细介绍重污染天气产生的原因、不同污染物对人健康的危害、详细的个人和家庭防护措施等，知识更深入。官方媒体统一、规范的发布有利于避免信息混乱，有利于社会形成严肃、科学应对环境问题的氛围，从而促使公众形成统一的认识并采取统一的行动。

这些传统的官方渠道互相配合形成了一张基础性的信息安全网，保证预警信息的基础覆盖率以及权威性。政府部门同媒体签署合作协议或者搭建应急信息发布绿色通道，保证预警启动之后的第一时间内，相关信息能够被置于显眼之处，并且迅速传递给广大市民。在这种模式之下，信息发布受到严格控制，被反复核实的新闻可以大大降低产生谣言或者错误信息的风险，为社会有序地作出反应打下了信任的基础。

（二）互联网与新媒体平台

伴随着信息技术的迅速发展，互联网、新媒体平台依靠传播速度快、互动性好、覆盖精准的特点，已经成为环境空气质量预警信息发布中不可缺少的新兴力量。各级生态环境部门创建了官方网站、政务微博、微信公众号等线上阵地，形成了全天候、即时化的信息发布能力。官方网站一般设有空气质量信息发布专栏，提供各个监测站点实时数据、历史数据查询、空气质量预报预警、健康指导等一站式服务，是信息发布的主要渠道，也是数据的重要来源。

移动应用软件普及之后信息推送就进入掌上时代。由政府主导开发或者权威机构认证的空气质量应用，能够按照用户的地理位置信息，向用户推送街道级别的准确数据以及预警信息。用户可以按照自己的需求来订阅某一区域的预警信息，当空气质量下降或者预警级别发生变化的时候，手机就会马上接收到推送提醒。一对一式的个性化服务，大大提高了信息的传递效率以及信息的适用性。用户不但是被动的接受者，而且还可以利用应用的互动功能来发表自己的看法或者建议，从而增加大众的参与感。

社交媒体平台，微博、微信等，依靠强大的社交裂变式传播，成为预警信息扩散的放大器。一条简单直接的预警微博，一个颜色醒目的预警等级图示，几句

话通俗的防护建议，在极短的时间内就能被大量转发，迅速覆盖数以万计的用户。微信公众号可以用图文并茂、视频解说等多种形式对预警信息做深度解读，发布详细的科普防护文章，在微信群和朋友圈里广泛传播，从而实现信息的二次甚至三次传播，渗透到社会的每一个角落。

新媒体平台虽然方便了人们的生活，但是也存在着信息碎片化、谣言传播的隐患。因此政府官方账号必须不断提高自身运营能力与公信力，持续发布权威、科学、及时的信息，努力成为人民群众心中最可靠的信息来源。同时要健全网络舆情监测机制，及时对不实信息予以辟谣、澄清，引导公众科学地认识新事物，防止因为误解或者谣言而造成社会恐慌，营造一个健康向上的网络环境，使新媒体渠道在应急响应中能够起到积极的作用。

（三）社区与单位通知

社区、单位是社会治理的基本单元，是政府与个体之间的“最后一公里”，在预警信息传递、应急措施落实等方面具有其他任何主体无法替代的作用。这条渠道的优势在于它的组织化、强制性，能将宏观的预警指令转化为微观的、具体的行动要求，保证信息不只是被“看到”，还能被有效执行。市级或者区级预警一触发，对应指令就通过行政系统迅速传达到街道办事处、社区居委会、各企事业单位。

社区中信息传递的方式更加多样化，贴近生活。社区工作人员会用书面通知张贴在小区公告栏上、电子屏循环播放信息或用业主微信群发的方式将预警等级、建议性健康防护建议（要求老少外出要少）以及响应性管控措施（禁止露天烧烤、焚烧垃圾等）告知每个居民。对没有智能手机的老年人等特殊人群，社区网格员或者直接上门，或者打电话告知，不漏掉一个人。该种表达方式更加具体直观，可以有效地提高居民的防范意识。

单位层面的通知主要是对组织内部的生产经营活动进行调整。机关、学校、医院、企业等单位接到预警通知后，通过内部办公系统、邮件、工作群等方式向全体员工或者师生发布预警通知。通知内容除了个人健康防护提示之外，更多的都是强制性减排措施的传达和落实。如停止土石方作业、要求重点排污企业按照预案实施停产或限产、学校停止户外体育活动、安排有条件的企业实行弹性工作制或远程办公等。自上而下的组织动员是达到社会层面应急减排目标的关键部分，它直接关系到预警响应的好坏。

二、公众参与减排行动

（一）选择公共交通出行

机动车尾气排放是城市大气污染物中氮氧化物、挥发性有机物的主要来源，对细颗粒物、臭氧的形成起着很大的作用。因此，在空气重污染预警期间提倡和鼓励人们使用公共交通工具，又成为实现迅速、有效减排的又一重要途径。预警发布以后，政府部门一般会推出一系列的引导性政策，促使市民选择绿色的出行方式。

公众环保意识提高和社会责任感是促使人们行为改变的深层原因。个人选择乘坐地铁、公交、通勤班车或者骑自行车、步行等出行方式直接降低了私家车的使用次数和行驶里程。虽然单个个体的减排碳量微乎其微，但是当城市里成千上万的市民都做出这样的选择时，所产生的累积效应却是十分可观的。道路交通流量减少一方面会降低污染物排放总量，另一方面也可以减轻交通堵塞情况，拥堵时车辆怠速或者低速行驶的排放强度比正常行驶要高得多。因此推广公共交通出行可以同时达到减排和治堵的双重效果，可以大幅度改善整个城市的大气环境质量，尤其是在扩散条件不好的静稳天气下，从源头上减排的效果更为明显。

为了更好地推动这一行动，政府和社会层面可以采取多种协同措施：

1. 交通管理部门在预警期间应该增加公共交通发车班次、延长运营时间、优化线路布局，保证公共交通系统便捷性、舒适性，降低市民出行转换成本。
2. 可以推出临时的公共交通票价优惠或者免费政策，用经济杠杆吸引更多的私家车主改乘公共交通。
3. 宣传部门要利用媒体大范围宣传绿色出行的环境效益、健康效益，营造出“同呼吸、共责任”的社会氛围，把选择公共交通当作一种时髦、文明、负责的公民行为。

依靠政策激励、服务优化、文化引导这三个方面共同的作用，可以调动民众参与绿色出行的积极性，削减污染峰值，改善空气质量。

（二）减少烟花爆竹燃放

烟花爆竹集中燃放，是造成春节等传统节日期间空气质量急剧恶化的瞬时污染源。燃烧时会产生大量的细颗粒物、可吸入颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等有害气体，短时间内局部区域的空气污染物浓度会突然急剧上升，甚至出现空气质量指数“爆表”。在空气污染预警已经发布的情况下，不利的气象扩散条件会导

致这些污染物长时间滞留、积累，从而加重污染程度，对公众健康造成严重危害。

因此，在重污染天气预警期间，响应政府号召，自觉减少或者不燃放烟花爆竹，是公众参与大气污染防治的一项直接有效的行动。近些年来，中国许多城市由“限放”变为“禁放”，该政策得以顺利推行，离不开广大民众环保意识的提高和传统习俗观念的改变。人们慢慢认识到清新健康的空气比热闹的场所更重要，它是一种应该珍视的、比年味更重要的年味，保护环境就是保护自己及家人的健康。在预警期间，自觉性显得十分重要，市民的主动配合可以有效地避免污染的“雪上加霜”，对城市空气质量的稳定和改善起到积极的作用。

推进此种行为改变要依靠不断宣传教育和社会倡导。政府、媒体、社区组织大力宣传燃放烟花爆竹对空气质量的影响，燃放烟花爆竹对人们的身体健康造成的危害，重点突出在污染天气下燃放烟花爆竹的双重危害。同时积极推广环保、安全的新型庆祝方式，举办电子烟花秀、灯光秀、社区集体联欢等文化活动，用丰富的文化活动取代传统的燃放习俗，既保持了节日的喜庆，又做到了绿色环保。公众的积极响应，不单单是遵守法规，也是现代公民环保意识、公民社会责任的一种直接表现。

（三）节约用电，减少能源消耗

节约用电属于公众参与减排的一种形式，它的逻辑链条不像减少驾车那样直接，但对区域空气质量的影响绝不能小觑。我国能源结构很长一段时间都是以煤炭为主，火力发电是我国电力供应的主要来源。燃煤发电是二氧化硫、氮氧化物、烟尘等主要大气污染物的排放源之一。因此，社会终端的每一个节电行为都会使上游发电侧能源需求下降，从而间接减少火电厂的煤炭消耗量和污染物排放量。

在家里，公众可以做很多力所能及的事来参与这场“指尖上的减排”。随手关灯，拔掉不用的电器插头节约待机耗电；把空调温度夏天设在 26 度以上、冬天设在 20 度以下的合适范围内；优先选择高能效等级的家用电器；白天尽量利用自然光，减少开灯时间。看似很小的习惯，在千万个家庭中乘以巨大的基数，就会产生大量的能源节约量。重污染天气预警期间，全社会都参与进来，自发减少用电负荷，可以缓解区域电网的压力，减少发电企业应急调峰排放。

商业、公共领域的节能减排潜力也很大。商场、办公大楼等公共建筑是大能耗单位，在预警期内可以通过提高照明亮度、改变空调系统的开启时间和模式、提倡低楼层人走楼梯不用电梯等方法来节省能源。工业企业可以通过生产流程的

优化，使用节能设备，合理地安排生产计划，在基本运营的基础上尽量减少不必要的能源消耗。公众作为消费者、员工可以对积极履行节能责任的商场进行消费，也可以在工作岗位上积极践行节能办公，从而推动整个社会形成绿色、低碳的生产和生活方式。节约能源既是解决短期空气污染的应急之策，又是推进能源结构转型、实现长远可持续发展的根本之策，需要每个社会成员长期的坚持和共同的努力。

第五节 预警响应效果评估

一、响应效果评估的指标体系

（一）污染物浓度削减效果评估

污染物浓度削减效果评价是预警响应评价中最为核心而直接的环节，它的根本目的就是量化应急减排措施实施后，环境空气中各种污染物浓度的实际改善程度。主要污染物以 PM2.5、O3、SO2、NO2 等为主，在预警响应期间对这些污染物浓度变化情况进行分析，从而判定预警所采取措施是否能够达到预期的环境目标。不仅可以直接表现干预措施和空气质量改善之间的因果关系，也是判断预警行动是否成功的主要标准。

构建具体的评价指标时一般会用到多种量化参数，目的是从多方面、系统性地来衡量预警响应措施对于环境空气质量的实际改善效果。下表为污染物浓度削减效果评价的主要指标及说明，是评判预警行动效果的主要指标。

污染物浓度削减效果评估主要指标

指标名称	定义与目的
污染物绝对浓度削减量	预警响应期间污染物的实际浓度与未采取应对措施情景下的模拟浓度之差，直观反映措施的直接成效。
污染物浓度相对削减率	以百分比形式表示，即绝对浓度削减量占未采取应对措施情景下浓度的比例，便于在不同区域、不同时段之间进行横向比较和评估。
重污染天数变化	预警响应期间 AQI > 200 天数与未采取应对措施情景下模拟 AQI > 200 天数的差值，衡量重污染事件的发生频率是否降低。
重污染过程峰值浓度削减	衡量重污染过程的最高浓度下降程度，反映措施对污染强度峰值的抑制作用。
重污染持续时间缩短情况	衡量重污染过程持续时间被缩短的程度，反映措施对污染事件周期的影响。

为了保证评价结果的科学性、客观性，一般会在预警响应阶段把监测数据同某个精心挑选的基准进行对比。这个基准可以选用的是历史同期，也可以选择预警启动之前的一个阶段或者未受控制的邻近参照区。根本目的就是利用可比条件深入分析，更准确地判断出减排措施的实际贡献，有效避免气象条件等因素的干扰。

（二）健康效益评估

健康效益评价把空气质量改善同公众健康结果联系起来，用数量化的方法衡量预警响应措施对于维护人群健康的积极效果。空气污染对人体有很多危害，不仅会伤害到人的呼吸系统、心血管系统等，严重时还会导致过早去世。因此，评价预警响应的最终效果不能只看污染物浓度是否下降，更应该关注这些降低的污染物所避免的健康损害。把抽象的环境数据转化为同公众福祉息息相关、具体的指标，更能体现环境治理以人为本的理念，也给政策制定、公众宣传提供有力的社会价值支撑。

评估健康效益关键之处在于，要建立起空气污染暴露水平和健康风险的定量联系。为了对预警响应措施的公众健康积极影响进行全面量化，下表给出了健康效益评价的主要指标和关注点。

健康效益评估核心指标

指标名称	关注点与意义
避免的过早死亡人数	最直接的健康效益体现，反映空气污染导致的死亡率下降。
减少的各系统疾病发病（患病）人数	涵盖呼吸系统、心血管系统等多种疾病，体现广谱的健康改善。
减少的呼吸系统和心血管系统疾病住院人数	反映重症疾病负担的减轻，对医疗系统压力有显著影响。
减少的医院门诊和急诊就诊人次	体现轻症患者就医频率的降低，反映公众健康状况的普遍改善。
挽回的因病损失工作日	从经济层面衡量健康改善带来的劳动力生产力提升。

这些指标包含死亡、疾病、重症、轻症等各方面，可以从公共卫生的角度来体现空气质量改善带来的好处。为了更全面地评价它的价值，用生命价值法、疾病成本法等方法将健康效益进行货币化计算，也可以将它纳入更宏观的社会经济成本效益分析框架中。

健康效益的衡量，在很大程度上依靠环境流行病学研究中建立的浓度 - 反应

关系模型。该模型用数学函数（一般为线性或者对数线性函数）来表达污染物浓度每变动一个单位时，人群某种健康终点事件（死亡率、发病率等）发生风险的变动幅度。这些关系函数中，即浓度—反应系数，是用长期的大样本人群流行病学调查和统计分析得出的。它们就是将环境暴露和健康效应连接起来的桥梁。实际评价时要采用适合当地人群特点、污染特点的浓度反应系数，这是保证评价结果准确可靠的关键一步。

具体的评估流程通常遵循以下步骤：

1. 确定目标人群以及暴露水平。采用地理信息系统和人口普查数据，评价预警响应影响区内全部人口以及各个年龄组别、易感人群接触到的 PM_{2.5} 等污染物浓度下降量。

2. 选择并使用合适的浓度 - 反应关系。从国内外权威研究文献中选择适合于评价区域社会经济发展水平、人群健康基线水平的浓度—反应函数系数。

3. 计算健康效益，用暴露人口、浓度变化量、浓度反应系数来计算各种健康终点事件避免的例数。

4. 不确定性分析，由于模型参数、人口数据等存在不确定性，一般会采用蒙特卡洛模拟等方法给评价结果提供置信区间，从而使结论更加科学。

（三）社会经济影响评估

社会经济影响评估是应急管控措施效果评价中不可缺少的一环，它主要研究应急管控措施在带来环境、健康效益的同时，对社会生产、经济运行、公众生活产生的影响。这项评估是双重的，既要把握因为实行生产限制、交通管制等措施所造成的社会经济成本算清楚，也要识别出并衡量好空气质量改善所带来的一切间接经济效益。经过全面的成本效益分析，就可以知道预警响应措施带来的净社会福利是正的还是负的，从而为政府如何在环境保护和经济发展之间找到最佳平衡点提供依据。

从成本上来说，主要考察各种应急措施给经济活动带来的直接和间接影响。工业企业的停产限产会造成企业产值下降、利润减少，还会牵一发而动全身地影响到产业链上下游的正常运转；建筑工地停工要求会阻碍工程进度，提高建筑成本；机动车限行措施在减少交通排放的同时，也会给居民的出行造成不便，进而影响商业、物流等行业的发展速度；频繁的应急响应会使得中小企业短期内陷入生存危机，并且会对就业市场造成短期冲击。为了衡量这些成本，就需要收集大

量的经济数据，分行业的工业增加值、交通流量数据、企业的财务报表等等，然后对这些数据进行细致的统计分析。

另外空气质量的改善也产生了许多积极的经济效果。除了前面提到的健康收益（降低医疗费用、挽回劳动力的损失，这都是直接的经济效益）之外，还体现在其他方面。例如，能见度提高、空气质量改善可以改善城市形象，吸引更多的游客来旅游，从而促进旅游业及其它服务业的发展；良好的空气环境有利于吸引和留住高素质人才，提升城市综合竞争力；对农业来说，臭氧等污染物减少可以减少对作物的伤害，提高农产品产量和质量；对建筑材料、文化遗产来说，酸沉降减少可以减缓其腐蚀和损毁，降低维护修缮成本。为了对经济和社会影响做出全面的、客观的评估，必须将这些短期成本与长期、广泛效益综合起来考虑，从而给制定更加精细化、差异化、人性化的应急管控措施提供有力支持。

二、响应效果评估的方法

（一）基于观测数据的对比分析

基于观测数据的对比分析法是评价预警响应效果最常用、最直接的方法。主要思想是将某项应对措施的数据和某个参照、基准期的空气质量监测数据进行比较，看是否产生了比较明显的污染物浓度降低。此法优点为数据来源可靠、操作简单，可以迅速得出初步的响应效果。基准期选择的好坏，直接影响到评估结果的客观性。常用基准期有预警启动前的某一段时间、历史同期（过去3到5个相同月份或者季度）、地理方位相邻且采取类似应对措施的城市或区域。

就具体的分析技术而言，会用到多种统计学工具，从而加深对比分析的层次。时间序列分析可以清楚地展示出在预警前、预警中、预警后各时段（每小时或者每天）污染物的浓度变化情况，通过观察浓度曲线的转折点，可以直接感受到措施介入的效果。差异分析模型属于更高阶的统计方法，其核心就是比较处理组和参照组政策实施前后变化的差异，从而可以控制掉那些随着时间变化对两组产生相同影响的混杂因素。绘制污染物浓度空间分布图，比较响应前后污染热点区域的变化，也可以从空间的角度来评价措施的准确性及有效性。

虽然基于观测的对比分析方法有很多优点，但是它的最大缺点就是不能完全消除气象条件等重要混杂因素的影响。空气质量的波动是由气象条件的变化和排放的变化共同引起的，如果在响应期出现强冷空气、大风或者降雨等有利于污染

物清除的天气，就会高估减排措施的实际成效，反之，如果在响应期遇到静稳、高湿、逆温等极端不利的气象条件，即使减排措施已经做到最大努力，污染物浓度也可能不降反升，从而低估措施的真实效果。仅仅依靠气象背景对比也不能保证不同年份间气象条件完全相同。所以，此法得出的结论是‘表观效果’而不是‘纯效果’，科学性、精确性还需用复杂的方法加以补充和检验。

（二）基于数值模拟的情景分析

基于数值模拟的情景分析属于一种比较先进科学的方法，用包含复杂物理、化学过程的空气质量模型（如 CMAQ、WRF-Chem）来构建不同的排放情景下污染物的浓度场，从而剥离气象条件的影响，准确判定应急减排措施的净效果。该方法最大的优点是，在完全相同的气象驱动场条件下，对比有和无应急措施这两种情景的差别，可以将空气质量的变动唯一地归因于排放量的变动。

评估过程就是建立基准情景模拟。研究者首先要编制一份可以体现预警响应阶段实际情况的排放清单，记录各种污染源（工业、交通、扬尘等）应急管控时实际削减的污染物排放量。接着用经过检验的气象模型产生此时间段高分辨率的气象场数据，然后用这些数据驱动空气质量模型进行模拟。最终将基准情景模拟得到的 PM_{2.5} 小时浓度等与同期环境监测站点实际观测数据进行对比，以保证模型可以较好地模拟出真实的污染过程，这也是后续分析可信度的前提。

第二步就是创建无措施情景，该情景又被称为参照情景或基准情景。情景下的所有设置都与基准情景相同，即采用完全相同的气象输入数据，唯一不同的是所采用的排放清单。该清单假定没有采取应急措施，所有污染源都在正常排放。通过运行空气质量模型，就可以得到在相同的气象条件下，如果不采取管控措施，空气污染会发展到怎样的程度。

最后，通过对比两个情景模拟的结果来定量分析预警响应措施的效果。用无措施情景模拟浓度减去基准情景模拟浓度，得到的就是应急减排措施造成的污染物浓度绝对削减量。因此可以得到削减率、对重污染过程峰值浓度的“削峰”效果、对污染持续时间的“缩时”效果等细化评价指标。不仅可以评价整个区域的总体效果，还可以分析各个行业的、各个地区的减排措施的贡献度，为今后优化调控方案提供强有力的技术支撑，是公认的、可靠的重污染应急效果定量评价技术。

（三）社会调查与统计分析

社会调查和统计分析方法，是对前面两种基于自然科学评估方法的一种很好

的补充。它从社会科学角度出发,研究预警响应措施在社会上产生什么样的反应、公众是否接受以及产生了哪些方面的结果。核心就是获取第一手社会数据,来评判政策执行力、公众认知与配合程度以及措施对各种社会群体产生的实际影响,从而让整个效果评价体系更完整、更人性化。主要考察不能用模型、监测数据来量化的软指标,例如公众满意度、信息传播有效性、企业执行成本等。

该方法的具体实施途径多样,主要涵盖以下几个方面:

1. 问卷调查。问卷调查是获取标准化信息的一种方式,可以向不同的群体大量发放。问卷内容应该包括普通公众是否收到过预警信息、预警等级和对策措施的认知情况、采取的健康防护措施(减少外出、戴口罩)、政府行动支持度、措施对日常生活便利性的影响等。企业负责人问卷可从响应措施造成的生产成本上涨、订单流失、技术改造压力、对政策公平性的看法等方面入手。

2. 深度访谈、座谈会。相对于问卷调查的广度来说,深度访谈、座谈会更加注重对问题的深挖。对政府决策者、政策执行者、环保专家、行业协会代表、社区领袖等重要人物进行半结构化或者开放式访谈,探究政策出台的考虑、政策推行的困难,了解各方利益相关者的诉求及博弈状况,收集政策调整的意见建议。

3. 官方统计数据,分析,用政府部门发布的各种统计数据来从侧面证明、量化分析社会经济影响。分析工业生产总值、发电量、货运量等月度或季度数据,可以评估停产限产对经济宏观的影响;分析交通部门的道路流量监测数据,可以定量分析限行措施对交通拥堵和车流的实际影响;分析医院的门急诊记录,可以间接评估其健康效益。

第八章 典型区域空气质量预警实践

第一节 京津冀地区空气质量预警实践

一、京津冀区域污染特征与挑战

（一）区域复合型污染特征

京津冀地区大气污染具有明显的复合型特征，各种污染物相互影响，各种污染源相互叠加，使得污染成因十分复杂，治理和预警工作十分困难。区域主要超标污染物是细颗粒物和臭氧，它们在季节变化上都很明显而且存在复杂的耦合关系。冬季以 PM_{2.5} 为主导的污染天气频繁出现，主要是因为燃煤取暖、工业排放和不利于污染物扩散的静稳气象条件造成的。随着气温升高、太阳辐射增大，夏季臭氧污染问题越来越突出。氮氧化物、挥发性有机物在光照作用下发生光化学反应产生 O₃，夏季空气质量超标的主要原因就是由于 O₃ 的形成。

复合型污染不单是各种污染物主导地位随季节的变化，更主要的是它们之间的相互转化和影响。大气中的二氧化硫、氮氧化物等气态污染物会参与一系列的化学反应，生成硫酸盐、硝酸盐等二次颗粒物，二次颗粒物也是 PM_{2.5} 的主要组成成分之一。二次生成的非线性特征说明，单纯减少某一种污染物的排放量，不一定会使空气质量得到相应比例的改善，这对预警模型的精度要求非常高。预警系统要能够准确模拟各种复杂的化学反应，才能在污染物浓度达到峰值或者组分发生改变之前作出预测。

污染源的多样性又加重了复合污染的复杂性。区域内既有钢铁、水泥、电力等重工业排放，又有大量机动车造成的移动源排放，再加上冬季农村散煤燃烧、春秋季节农业活动产生的面源排放。各种污染物混杂在一起，它们的化学成分和物理状态各不相同。因此预警工作除了对污染程度进行预测外，还要对污染类型及主要成因作出快速判断，为后续应急措施的开展提供科学依据，进而达到对不同污染源采取针对性管控的目的。

（二）传输影响与区域协同治理需求

京津冀地区三面环山，北靠燕山，西依太行山，地形呈簸箕状，这样的地理环境造成污染物在山前平原地区容易聚集而难以扩散。在一定的气象条件下，区域内污染物的传输效应特别明显，任何一个城市的空气质量都会受周边地区排放的影响。单一城市各自为战的治理方式并不能取得根本性的效果，因此区域协同治理成为了必然的选择。

污染物传输具有方向性以及通道性。研究发现，在京津冀地区发生重污染过程的时候，一般会有西南或者偏南风。河北南部、山东、河南等地的污染物，沿着太行山东麓通道向北输送，依次对保定、北京、天津等城市产生影响，形成一条“污染传输带”。跨区域输送贡献很大，重污染期间外来输送对北京 PM_{2.5} 浓度的贡献率可以大于 50%。这说明即使北京本地实施最严格的减排政策，如果上风方向其他地区不减排的话，那么北京空气质量的改善也会大打折扣。

因为这种密切的关系，空气质量的预警必须在整个区域上进行观察。只用本市的排放和气象条件来预测，必然会产生巨大的误差。有效的预警系统必须将整个区域作为一个整体来看待，整合区域内所有的城市排放清单、地面监测数据、高空探测数据，并用能够模拟长距离输送和区域化学转化的空气质量模型。预警发布、应急响应是否启动，也要基于对整个区域未来空气质量演变趋势的统一判断，否则就会出现“上游不限产、下游白努力”的尴尬。

因此，区域协同已经成了京津冀空气质量预警和治理的关键。协同不只是信息沟通上的要求，更需要机制上的保证，即各地的预警标准、响应等级以及管控方式要形成共同的操作方案和能力。区域内按照统一预警信号同步启动应急减排，才能削峰，缩短重污染过程的持续时间，减轻重污染过程的严重程度，真正发挥预警的作用。

（三）产业结构与能源结构挑战

京津冀地区长期以来形成的以重化工业为主的产业结构、以煤炭为主的能源结构，是造成该区域大气污染物排放强度一直居高不下的根本原因。这些深层次的结构性问题给空气质量的改善带来了持久的、巨大的挑战，也对预警系统应急响应能力提出严峻的考验。

从产业结构上来说，河北是重要的原材料生产省份，是我国钢铁、水泥、平板玻璃等的重要产地，境内有许多高耗能、高排放的重工业企业。这些企业为经

济发展做贡献的时候，也是区域重要的工业污染源。虽然近年来产业升级淘汰落后产能取得了一些成绩，但是庞大的存量仍然是巨大的减排压力源。在重污染预警期间，对于关系地方经济和就业的重点企业应该采取何种有效的、公平的、可行的应急减排措施是联防联控机制需要面对的问题。预警系统不单单需要能预测污染问题，还需要把企业的排放数据纳入到评估之中，在应急状态下评价出不同行业、企业的减排能力以及减排效果，进而为差别化、精细化的管理方案的制定给予支持。

从能源结构上看，京津冀地区煤炭在能源结构中所占比例仍然较高，工业燃料和冬季供暖仍然大量使用煤炭。虽然北京已经基本实现了无煤化，但是天津、河北的大部分地区的能源消费仍然是以煤炭为主。尤其在河北农村冬季取暖用的散煤，由于燃烧效率低、缺少有效的净化装置，其排放的污染物是造成冬季PM_{2.5}浓度飙升的重要推手。调整能源结构属于涵盖能源供给、基础设施改造、居民成本等诸多方面的长期复杂的系统工程。短期内要重视冬季供暖期污染物累积的风险，给提前预警启动应急措施、加强散煤燃烧管控、增供清洁能源等措施赢得宝贵的时间。结构性问题使得京津冀地区空气质量改善不会一下子完成，在大气污染防治工作中预警和应急响应会长期存在。

二、京津冀区域预警体系构建

（一）区域统一预警标准

京津冀地区在区域联防联控之初，各地的预警标准就存在着较大的差异。就一次区域性重污染事件来说，北京发橙色预警，河北相邻城市发黄色预警或者不发预警。这样的标准上存在的温差一方面削弱了区域应急减排的合力，另一方面也容易引起公众对于政府治污决心的质疑。因此创建区域统一的预警标准，成为实现有效协同的第一步，也是非常关键的一步。

经过多年的磨合实践，京津冀地区才渐渐形成起较为完备的、三地一致的重污染天气预警分级标准。该体系的主要目标就是实现“三个统一”，保证区域应对行动的同步一致。

1. 统一预警分级标准：用空气质量指数作为判断的标准，根据AQI日均值和持续时长分为蓝、黄、橙、红四级。AQI日均值大于等于200且连续2天以上，可以启动黄色预警；红色预警的启动条件更严格，一般AQI日均值连续4天以

上达到 200 或者其中有两天以上超过 300。量化且统一的启动门槛，很好地消除了各地预警启动的随意性。

2. 采用统一的警告颜色体系，蓝色、黄色、橙色和红色代表的是全域内相同等级的警报级别以及相应的应急措施，避免因颜色的不一样造成信息的解读出错。

3. 制定统一的应急处理措施清单，虽然各地会根据自身的产业结构来制定具体的应急减排清单，但是区域层面对于不同颜色的预警，都规定了必须采取的最低限度的强制性措施，例如对工业企业停限产比例的要求、施工工地停工范围、机动车限行措施等，从而保证区域减排的整体强度。

京津冀区域重污染天气预警分级标准示例

预警等级	AQI 日均值（预计）	持续时间（预计）	强制性措施（部分示例）
蓝色	> 150	1 天	建议性健康防护
黄色	≥ 200	2 天	工业限产限排，机动车限行
橙色	≥ 200	3 天	工业停限产比例提升，更多机动车限行，停止户外施工作业
红色	≥ 200	4 天或其中 2 天 ≥ 300	最高级别停限产，单双号限行，停工停课（视情况）

从上表可知，创建区域统一的预警标准，就是京津冀大气污染治理由各自为战转为协同作战的“里程碑”。它给区域同步响应赋予了共同的“语言”和行动准则，为之后联防联控机制顺畅运转打下了坚实的制度基础。通过统一的标尺，把整个区域的预警应急工作拧成一股绳，明显提高了应对重污染天气的总体效能和科学化水平。

（二）区域联防联控机制

建立统一预警标准之后，在广阔区域内的各项指令能否有效执行，就依靠高效运作的区域联防联控机制。该机制是预警发布和应急响应的桥梁，是京津冀区域预警体系运转的枢纽，其目的就是打破行政壁垒，实现跨区域的统一指挥、统一部署、统一行动。

这个机制最本质的就是它的多层网络式的组织结构。国家层面设立大气污染防治领导小组做顶层设计和协调工作。在区域上成立了京津冀及周边地区大气污染防治协作小组，由三地政府及相关部门负责人组成，负责区域重污染天气应对的重大决策。其中还设置了预报预警中心、环保执法机构，预报预警中心给出区

域预报结论，环保执法机构对各地的应急措施落实情况进行监督检查。这样就保证了政令能够自上而下、自区域至市级畅通地传达。

联防联控机制运行具有很好的协同性。区域预报预警中心预测到未来会大范围出现重污染天气的时候，就马上启动区域会商程序。来自北京、天津、河北及周边省份的预报员、大气专家，以视频会议或者现场会商的方式，对污染过程的强度、范围、持续时间进行研判，提出统一的预警级别建议。协作小组办公室按照会商结果，向区域内所有有关城市发出发布预警的指令。各市、州、地人民政府接到指令后，在规定的时间内向社会公布相同等级的预警，同时启动本地区应急预案。

（三）区域信息共享平台

高效的联防联控工作要依靠及时、准确、全面的信息支撑。为了打破长期以来存在于各个行政区之间的“信息孤岛”现象，京津冀地区投入了大量的资源，共同建立了一个功能强大的区域空气质量信息共享平台。该平台数据量大，是区域一体化预警、指挥、评估的“智慧大脑”“神经网络”。

该平台的数据种类繁杂，是区域空气质量预警决策的数据基础。平台实时接入京津冀及周边地区所有国控、省控、市控空气质量监测站点的分钟级和小时级监测数据，以及各地气象观测站数据、高空探空数据、天气雷达数据等。平台把区域内重点污染源在线监控数据，动态更新的工业源，移动源，扬尘源等高分辨率排放清单，用电量，车流量等反映减排成效的社会经济数据整合到一起。大量的数据用统一的数据格式、传输协议汇集于此，为精细化预报预警工作提供了前所未有的数据保障。

平台主要功能是实现区域一体化的业务应用。它不只是数据仓库，而是一个集成了很多先进工具和模型的综合性业务系统。在平台里装有国内外主流的空气品质数值预报模型，采用多模式集成预报技术生成区域预报的统一产品。平台数据可视化与时空分析能力强，可以动态地反映污染物产生、变化和跨区传输的过程，预报员可以直接从图中找到造成污染的原因。平台可以对应急响应期间各地应急措施启动情况、重点企业减排落实情况实施实时跟踪，依靠模型展开快速成效评价，给指挥决策赋予动态的反馈以及科学的支持。利用这个平台可以实现在线会商、信息查询、决策支持等一系列协同办公工作，从而大大提高工作效率。

第二节 长三角地区空气质量预警实践

一、长三角区域污染特征与挑战

（一）臭氧与 PM2.5 协同污染特征

长三角地区空气污染已从以前的单一的煤烟型污染，变成了细颗粒物和臭氧相互影响、耦合共存的复合型污染。PM2.5 和 O3 不是孤立存在的，在生成机理上有紧密的联系。它们共同的前体物——氮氧化物和挥发性有机物，在大气中经过复杂的光化学反应，既会产生二次颗粒物，加剧 PM2.5 污染，又会导致臭氧浓度上升。协同污染的特点使得治理工作更加复杂，因为控制某一种污染物或者前体物时，有时反而会增加另一种污染物的生成。所以预警和控制策略要具有协同性。

长三角地区的 PM2.5 污染在秋季和冬季更加突出，主要是燃煤、工业排放、不利的气象扩散条件造成的。而 O3 污染多发于光照强、温度高的夏秋季节。虽然近几年 PM2.5 年均浓度呈下降趋势，但是 O3 污染问题越来越严重，成为夏季影响空气质量的首要污染物。研究发现长三角地区 PM2.5 浓度总体上北高南低，高值区多分布在江苏、安徽北部、中部。而 O3 高浓度区大多出现在江苏沿江城市群。时空分布的不同以及复杂的生成转化机理，给精准预测、区域联防联控、靶向性施策提出了更高的要求。

近几年来，伴随着 PM2.5 治理取得一定成效，PM2.5 与 O3 的相互作用关系也随之发生了动态变化。在一些城市中，虽然 PM2.5 浓度降低可以提高大气能见度，但是由于太阳辐射的增加而使得 O3 的生成增加。复杂的反馈机制就形成了长三角地区在制定“双控双减”策略时必须面对的科学难题。所以建立可以真正反映 PM2.5、O3 间相互作用的空气质量模型、完善准确源排放清单，便成了提高预警能力、达成协同治理的关键步骤。

（二）梅雨季节对污染过程的影响

梅雨季节是东部地区特有的天气，一般在每年的 6 月到 7 月，给长三角地区的空气质量造成复杂而深远的影响。此阶段天气系统复杂，大气环流形势多变，连续阴雨、高湿度、微风、边界层低等气象条件时有出现。气象因素共同作用改变了大气污染物的扩散、输送、转化、沉降过程，给空气质量的准确预报带来新的困难。

高湿度是梅雨季节最明显的特点之一，它大大加快了气态污染物向颗粒物的二次转化。二氧化硫、氮氧化物在相对湿度较大的时候，会经由液相氧化反应形成硫酸盐、硝酸盐，而这两种物质都是 PM_{2.5} 的关键组成成分。因此即使污染源排放量没有明显增加，PM_{2.5} 浓度也会迅速上升，形成湿复合污染。同时湿度高会改变颗粒物的光学性质和吸湿增长行为，从而影响大气能见度和辐射平衡，反过来又影响气象场。

梅雨锋摆动和降水过程对于污染物时空分布起着重要的调节作用。连续下雨可以清除 PM_{2.5} 等大气污染物，改善空气质量。然而在降水间歇期，大气一般处于静稳状态，风速小，混合层高度低，污染物很难进行水平和垂直扩散，很容易造成累积。梅雨锋在南北方向来回移动，也会造成区域性的污染输送，使上风向地区的污染物影响下风向城市，增加了污染过程的复杂性以及预测难度。因此，预警实践中一定要准确把握梅雨锋位置、强度变化和降水时空分布等条件，才能判定出其对不同区域空气质量的净效应是清除还是累积。

（三）高速城市化带来的环境压力

长三角是全国城市化发展速度最快的地区之一，也是世界城市化发展速度最快的地区之一。人口、产业、交通的高度集聚一方面带来巨大的经济活力，另一方面也给区域生态环境带来前所未有的压力。压力主要表现在土地利用方式剧烈变化、能源消耗不断增加、污染物排放强度居高不下等几个方面，给空气质量造成长期的严重威胁。

高速城市化造成城市建成区面积迅速扩大，大量农田、林地、湿地被硬化建筑和道路所取代。地表性质改变造成明显的城市热岛效应，局地大气环流发生变化，城市内部风速降低，污染物扩散受到阻碍。同时建筑群形成的峡谷效应还会影响污染物的水平输送，导致污染物更容易在城市中积累。城市绿地、水体减少也削弱了生态系统对污染物的自然净化能力，使城市环境承载力越来越脆弱。

支撑高速城市化所必然需要的，就是巨大的能源消耗。虽然长三角地区在能源结构调整上取得了一些进展，但是以煤炭为主的能源消费结构还没有得到根本性的改变。密集的钢铁、化工、火电等工业企业的烟囱仍然是氮氧化物、二氧化硫、颗粒物的主要排放源。城市化带来的交通需求大幅增加，使得机动车保有量持续增长，交通运输排放已经成为城市，尤其是特大城市大气污染的重要来源，造成了大量的氮氧化物和挥发性有机物排放。

城市群内各个城市之间同质化竞争、分工协作不足，也加重了环境压力。各地区为了发展经济，可能会出现产业布局趋同的现象，造成区域污染物排放总量超过环境容量。尽管长三角一体化战略倡导的是协同发展，但是环保标准执行、跨界污染治理等地方行政壁垒依然存在。因此预警系统不仅要物理意义的空气污染进行监测和预测，还要将城市发展规划、产业布局调整等社会经济因素考虑进去，给出更具前瞻性、更科学的决策建议，引导区域城市化道路走向更加绿色、可持续的道路。

二、长三角区域预警响应案例

（一）夏季臭氧污染应对案例

长三角地区夏季臭氧污染问题越来越严重，成为影响空气质量优良率的主要因素。长三角以一体化空气质量预测预报中心、联防联控机制为基础，形成了适应本地区夏季 O₃ 污染的预警响应体系。该体系的核心是“提前预报、精准溯源、协同减排”，希望借助科学的方法来指导各个城市采取相应的控制措施。当预报未来几天有有利于 O₃ 生成的热晴天时，区域预报中心就会提前发布预警信息。

收到预警之后，各地环保部门就立即启动应急响应预案。这些预案不是简单粗暴的“一刀切”式的减产停工，而是在精细化的源排放清单和之前研究的基础上，采取的差别化、精准化的减排措施。主要对 O₃ 的主要前体物，即挥发性有机物和氮氧化物进行治理。在臭氧污染高发期，要求石化、化工、工业涂装、包装印刷等重点行业 VOCs 排放量大的工序转移到光照强度较低的夜间进行。加强加油站、储油库油气回收装置的运行监管，加大道路交通疏导力度，减少机动车怠速排放。G20 杭州峰会等重大活动期间，长三角地区开展区域协同控制，改善整个区域的排放清单，调控 O₃ 浓度，区域协同减排行之有效。这些做法显示，科学预估加上准确应对，可以较好地控制区域性光化学烟雾污染。

（二）区域船舶排放控制实践

船舶排放属于港口城市大气污染的来源之一。在拥有上海港、宁波舟山港等世界级港口的长三角地区，船舶排放的硫氧化物、氮氧化物、颗粒物对周边沿海和内河城市空气质量造成较大影响。因此，长三角地区最早在中国设立了船舶排放控制区，成为全国港航业绿色转型的领头羊。此种做法属于区域协同立法以及联合执法的典范，对改善港口城市空气质量有积极的作用。

自 2016 年 4 月 1 日起，长三角区域主要港口对船舶靠岸停泊期间使用的燃料油提出要求，硫含量不大于 0.5% 的低硫燃油。该措施并不是一次完成的，而是经过了周密的安排之后才得以实现的。

船舶排放控制实践要点

要点类别	具体措施	实践效果 / 目的
政策与协同	1. 协同政策标准统一：上海、江苏、浙江三地交通、海事等部门联合开展监管，统一要求标准。	避免因执法尺度不一造成“避风港”效应，确保政策有效执行。
监管与技术	2. 加强监管、科技创新：海事部门利用燃油快速检测设备等手段，提高执法效率和准确度。	震慑违规使用高硫油的船舶，并建立船用燃油供应保障与监管体系，确保合规低硫油充足供应。
清洁能源推广	3. 推广清洁能源替代：大力发展岸电设施，鼓励船舶靠港后使用岸电；推广应用液化天然气作为船舶燃料。	实现船舶靠港零排放，从源头上消除硫氧化物和颗粒物的排放。

从船舶排放控制实践要点可以看出，排放控制区实行以后，上海、宁波等港口的大气中二氧化硫浓度明显降低，降幅最高超过 50%，改善了港口及周边地区的空气质量。长三角船舶排放控制实践给全国其他沿海、内河地区给予了很好的参照，充分体现了依靠区域协同治理来解决特定污染问题的巨大潜能。

（三）产业结构调整与空气质量改善

长三角地区空气质量的持续改善，其根本动力就是区域深层次的产业结构调整和经济转型升级。在资源环境压力越来越大的时候，该地区主动放弃了高污染、高耗能的旧发展方式，走上了一条以创新为驱动、绿色低碳的发展道路。虽然这个过程很艰难，但带来的环境效益和社会经济效益是长期的、巨大的。调整重点是“腾笼换鸟”、优化升级，即坚决淘汰落后产能，为战略性新兴产业、现代服务业腾出空间。

近些年来，长三角区域系统开展产业结构调整。对钢铁、水泥、化工等传统重污染行业，各地方政府都制定了严格的环保、能耗、安全标准，并采用“关停并转”的办法减少过剩产能。江苏大力推进沿江化工企业搬迁入园，上海严格控制产业结构调整负面清单，严控高污染项目新增。“减法”策略从根子上削减了大批污染物排放总量。但是，“减法”并不是全部，在基础之上更强调“加法”的发展，积极推进集成电路、生物医药、人工智能等知识密集型、技术密集型产业的发展。新兴产业具有高附加值、低排放的特点，这些新兴产业的发展壮大能

够优化区域经济结构，也从根本上改变污染物的排放情况。

能源结构的优化属于产业调整的重要部分。长三角地区积极实施煤炭消费总量控制，大力发展风能、太阳能等非化石能源，并有序推进天然气对燃煤的替代。伴随着能源利用效率的提高、清洁能源占比的提升、单位 GDP 污染物排放强度的大幅下降，经济增长与环境影响出现了“脱钩”。北京大学的研究报告也表明，长三角一些城市的空气品质改善同产业和能源结构的优化调整有关系。通过不断的产业结构调整，长三角地区改善了空气质量、提高了人民的蓝天幸福感，给地区经济可持续发展注入了新的活力，展示出了一条环境保护与经济发展可以同步进行的典范之路。

区域一体化的协同发展规划给产业结构的合理布局提供宏观指导。在长三角内部创建出核心区创新引领、外围区产业承接、全域协同升级的新型产业分工体系，有效规避了低端产业在区域内简单转移的问题，实现了伴随技术改造和绿色化发展而进行的升级转移。高层次的区域规划协调，使产业结构调整的整体效果最佳，进而改善了整个区域的空气质量。

第三节 珠三角地区空气质量预警实践

一、珠三角区域污染特征与挑战

珠三角地区独特的地理环境、气候条件以及超前的经济发展模式一起形成了大气污染的特征。这些特点既给该区域空气质量管理工作带来了前所未有的难题，又促使环境预警和治理的不断创新。只有对问题的本质有深刻的认识，才能真正评价预警体系的效果。珠三角地区特殊的污染特点及其所面对的难题，见下表。

珠三角区域污染特征与挑战速览

特征 / 挑战	核心问题	影响 / 治理难度
较早面临复合污染问题	PM2.5 与 O3 等多种污染物相互作用,非线性光化学反应复杂。	污染成因复杂,传统单一控制思路失效,需精细化管理。
受海陆风影响显著	局地环流导致污染物“钟摆式”输送与累积。	气象条件复杂,预报难度大,对模型精度要求高。
经济转型与环境治理先行	产业结构绿色转型,区域联防联控机制建立。	经济发展与环境保护协同并进,为其他地区提供借鉴。

（一）较早面临复合污染问题

珠三角有“世界工厂”之称,20世纪末到21世纪初,工业化、城市化快速推进,能源消耗量、污染物排放量短时间内猛增。因此该区域比国内其他地区更早地遇到细颗粒物 PM_{2.5}、臭氧 O₃ 为代表的复合型大气污染问题。污染不是单一污染物的简单叠加,而是多种污染物在大气中经过复杂的光化学反应相互影响、相互转化的结果。

在复合污染的环境下,氮氧化物和挥发性有机物 VOCs 等前体物在强光的作用下会生成臭氧,同时又促进二次颗粒物的形成,加重 PM_{2.5} 的污染。秋冬季节易出现以 PM_{2.5} 为主的灰霾天气,夏秋季光照充足的时候容易发生臭氧超标。两种主要污染物的浓度时空分布不同、化学生成机理复杂、前体物来源多样,造成污染成因分析和治理措施制定都很困难。传统的单污染物控制思路已经不能适应新形势的要求,必须建立一套既能控 PM_{2.5} 又能控臭氧的精细化预警和管理体系。

（二）受海陆风影响显著

珠三角位于南海之滨,属于亚热带季风气候区,由于特殊的喇叭口地形以及漫长的海岸线,气象条件受海陆风环流的影响比较明显。白天海风由海洋吹向陆地,夜晚陆风由陆地吹向海洋。这种局地环流效应很大程度上影响着污染物的输送、扩散与累积方式。

白天海风将比较洁净的海洋气团带到内陆,有利于稀释、扩散沿海城市的污染物,但是也会把沿海工业区的污染物输送到内陆腹地,使内陆城市的污染物浓度升高。夜间陆风将城市和工业区上空积聚的污染物吹向海洋。当背景风较弱的时候,海陆风的日夜交替效应会使污染物在近岸地区反复输送、累积,形成特有的“钟摆式”污染轨迹,使局地污染更加严重。复杂的气象条件给空气质量的预报带来挑战,对于预警系统模拟污染物时空变化规律的精度要求非常高。

（三）经济转型与环境治理先行

面对日益严峻的环境压力,珠三角地区较早就开始走经济转型、环境治理双管齐下的道路。进入21世纪后,该区域主动对产业结构进行调整,由原来的以劳动密集型、高耗能产业为主向以技术密集型、现代服务业为主转变。经济结构的绿色转型在源头上降低了污染排放强度,给空气质量的改善创造了根本条件。

与此同时珠三角环境治理制度、区域联防联控也居全国前列。广东省以及珠

三角各市相继出台严格的大气污染防治法规和管理办法,率先对发电厂、工业锅炉开展脱硫脱硝改造,提高机动车排放标准,在重点行业严格控制挥发性有机物排放等。珠三角的发展经验说明,经济发展同环境保护不是水火不容的。在科学的前瞻性规划、严格的政策执行、主动的经济结构调整之下,经济发展与环境质量的改善可以同时实现,给中国其他地区提供宝贵的先行示范经验,具有很强的借鉴意义。

二、珠三角区域预警响应案例

(一) PM_{2.5} 持续改善实践

自 2013 年国家颁布《大气污染防治行动计划》以后,珠三角地区在 PM_{2.5} 治理方面也取得了较好的成绩,成为全国重点区域中第一个实现 PM_{2.5} 年均浓度持续达标的区域。取得这样的成绩是长期能源结构调整、产业升级与短期精准预警相结合的结果。该区域大量开展“煤改气”、淘汰高污染企业、推广新能源汽车,从结构上减少了 PM_{2.5} 及其前体物的排放总量。

这时空气质量监测预警系统就是精准制导。当预警系统预估可能会出现重污染过程的时候,就会提前发出预警。地方政府按照预警等级启动应急预案,对重点排污企业实行临时生产调控,对建筑工地实施严格扬尘管控,向市民发布健康防护建议。提前通过预警识别出一轮由静稳天气叠加区域输送造成的污染过程,环保部门就可以精准要求上风向重点工业园区内部分企业错峰生产,有效实现“削峰”,避免 PM_{2.5} 浓度超过重度污染阈值,保障民众健康,用最小的社会经济成本换取最大的环境效益。2015 年珠三角 PM_{2.5} 年均浓度首次达到国家二级标准。

(二) 臭氧污染防治探索

PM_{2.5} 得到有效控制之后,珠三角地区夏秋季节,臭氧逐渐取代 PM_{2.5} 成为首要污染物,区域大气氧化性增强,光化学污染问题越来越突出。臭氧是二次生成物,它的形成受到氮氧化物 NO_x、挥发性有机物 VOCs 复杂非线性化学反应的影响,并且对高温、强光照等气象条件很敏感,所以臭氧污染的治理难度远大于 PM_{2.5}。

遇上这种情况,珠三角的空气质量预报体系也做了相适应的改良和深化探究。预报模型从臭氧浓度预报发展到现在的臭氧前体物 NO_x、VOCs 的浓度配比以及光化学反应活性分析。2017 年广东省在珠三角地区开展臭氧污染防治专项行动,

加强对观测和科学研究，确定了以控制 VOCs 排放为主的短期控制措施。在此基础上预警系统预测出高温、低湿、静风等适合臭氧生成的气象条件之后，会提前发出臭氧污染预警，同时联动相关监管机构对石油化工、印刷业、家具制造业等主要 VOCs 排放企业进行精准监管，在午后光照强烈的时段要求这些企业采取错峰生产或者减排。臭氧浓度总体呈上升趋势，但是由于科学预警、精细化管理，臭氧浓度高峰期出现得到有效的控制，为全国其他存在类似问题的区域提供了解决思路。

（三）绿色发展模式下的空气质量管理的

珠三角已经从传统的污染、治理、再污染循环中跳脱出来，把空气质量管理深深嵌入到整个区域的绿色发展大战略中。空气质量监测预警系统不再只是处理污染问题的消防队，而是成了城市可持续发展的导航仪。该系统产生出高分辨率污染物时空分布数据以及源解析结果，给城市规划部门改善工业布局、调整交通网络、划定生态保护红线等提供了重要的科学依据。

规划新建产业园区的时候，可以使用空气质量模型预测其对于周边以及下游地区空气质量的影响，从源头上防止新的污染源产生。城市交通管理部门根据不同时段、不同路段移动源污染贡献，制定不同的交通疏导、限行政策。

珠三角地区已经把空气质量改善目标纳入地方政府绩效考核之中，使之成为强有力的指挥棒。将环境责任与发展责任有机地统一起来，促使各级决策者在推进经济项目的时候，必须同时考虑其环境影响，使绿色、低碳理念贯穿于经济社会发展的全过程。

珠三角的经验表明，一个先进的空气质量预警系统，不能仅仅预测几天之内空气的好坏，它更是一个推动整个区域走向清洁、健康、可持续发展的支点，为经济高质量发展和生态环境高水平保护双赢打下基础。

第四节 重点城市空气质量预警案例分析

一、超大城市空气质量预警实践

（一）北京市空气质量预警体系

作为我国的首都,北京市空气质量的改善工作一直受到社会各界的广泛关注,预警体系建设已经走在了全国的前列,系统化、科学化、精细化的特点十分明显。该体系把高密度地面监测网络、卫星遥感、激光雷达垂直探测等“天地空”一体化监测技术融合起来,创建起一个涵盖全市并延伸至周边地区的立体监测网络,给预报预警赋予了海量且实时的基础数据。这样的监测是多维的,管理者可以对污染物在空间上、垂直方向上以及它向四周的传送中所发生的变化有清晰的了解,并且这对精确地把握污染过程有着十分有利的基础。

就预测模型而言,北京存在中国科学院大气物理研究所等科研单位的数值预报模式集群,而且凭借机器学习、人工智能这些先进算法,形成了数值预报同统计预报相融合的集成预报系统。该系统不仅可以预测未来几天空气质量指数的变化趋势,还可以进行小时级首要污染物(PM_{2.5}、臭氧)浓度的准确预报。决策程序建立起了常态化的多部门专家会商制度,依靠对空气质量情势展开每日分析研判来决定预警是否开启,维持,终止或者结束的依照,保障决策严肃而有权威。

预测到可能会出现重污染天气时,北京市就会启动分级空气重污染应急预案。预警级别分蓝色、黄色、橙色、红色四级,应急响应措施也不一样。这些措施涵盖了工业企业、施工扬尘、移动源等各个领域,实行差异化管理。红色预警期间采取最高等级响应措施,重点排污单位最大程度实行停产限产,机动车实施单双号限行、中小学校和幼儿园停课。同时利用电视、广播、网站、社交媒体等多渠道向公众发布预警信息、健康防护提示,引导公众做好个人防护,最终形成政府主导、部门协作、企业担责、公众参与的社会共治局面。

（二）上海市空气质量预警体系

上海市属于国际化的沿海大都市,它的空气质量受本地排放、区域输送和港口航运等因素的影响,预警体系的搭建带有精细化管理以及区域联防联控的特点。上海已经建成了覆盖全市的网格化监测体系,监测点位涵盖城区、郊区、工业区、交通枢纽、港口等地方,全面对各类污染源进行监测。该体系重视对臭氧、挥发性有机物的监测预报来解决夏季光化学污染问题。

上海市在区域空气污染联防联控中起着重要的作用，依托的是长三角区域空气质量预测预报中心。该中心汇集长三角各个城市监测数据和气象信息，用统一的区域空气质量模型对长三角未来 7 天的区域空气质量变化趋势进行预测，并且每天发布预报产品。区域协同预报模式提高了对于跨界污染输送过程的捕捉能力，给上海以及周边城市留出宝贵的应对时间。上海的预警体系同城市精细化管理紧密相连，应急减排清单具体到企业、具体到工序，从而保证管控措施可以精准执行。预警信息的发布渠道有很多种，官方新媒体矩阵“上海发布”等可以第一时间将预警信息、健康提示和倡导性减排建议告诉市民。

（三）广州市空气质量预警体系

广州市处在珠江三角洲的核心区域，气候湿热，高温高湿天气常常出现，光化学反应较为活跃，所以臭氧污染成了与 PM2.5 一同存在的重大环境问题。为此，广州市空气质量预警体系在创建过程中重视臭氧及其前体物氮氧化物、挥发性有机物的联合监测预报，形成独有的预警模式。除了国家、市级控制站点外，还在光化学监测站、挥发性有机物组分站和移动监测车等专业设备上设置了监测网络，给深入分析光化学污染成因提供了数据支持。

广州预警系统用上了许多先进的预测技术。以高分辨率的本地气象、排放源清单数据为依托，运行多套数值模型，再用人工智能算法修正模型结果，提高了短期（1-3 天）、中期（4-7 天）空气质量预报的准确率，对臭氧污染过程的预报效果较为明显。根据准确的预测，广州市建立了一整套科学的预警决策程序，主要包括：

广州市空气质量预警决策程序

环节	内容描述	目的
多模型集成预报	每日运行多个国内外主流空气质量模型，通过集合平均等方法得出初步预报结论。	提高预报准确性，降低单一模型误差。
专家会商判断	生态环境、气象、高校、科研院所专家组成专家库，综合分析模型预报结果、实时监测数据和气象条件。	确保决策的科学性和权威性。
分级预警启动	根据专家会商结论，对照《广州市重污染天气应急预案》预警启动标准，由市重污染天气应急指挥部决定是否启动及启动级别。	规范预警流程，明确责任主体。
部门协同响应	预警发布后，各有关部门按照预案规定职责，立即启动本领域应急减排措施。	形成管控合力，快速有效应对污染。

应急响应时广州市空气质量预警决策程序坚持科学减排,精准施策。应急减排清单要符合 PM_{2.5} 和臭氧协同控制的要求,既要有对工业企业颗粒物排放的管控,也要有对石化、印刷、家具等行业的挥发性有机物排放的限制。重污染天气预警期间,环境执法部门会加大无人机、走航监测等技术手段的使用,提高对重点区域、重点行业巡查的频次,保证各项应急措施真正落到实处,尽量减小污染程度,保障市民健康。

二、工业型城市空气质量预警实践

(一) 唐山市空气质量预警体系

唐山市是中国重要的重工业基地,以钢铁、焦化、水泥产业为主导,产业结构导致大气污染防治工作难度大。唐山市空气质量预警系统以工业围城的特点为基础建立起来的,它的关键是对工业源实行精准化、动态化、差别化的管理。该体系的基础是重点涉气企业网上排放监控数据的上传,直接传入到环保部门监控指挥中心,成为预警系统眼睛一般的存在,环保部门随时都能了解企业的排污状况。

唐山全面实行工业企业的绩效分级、“一厂一策”的管理模式。根据企业的装备水平、污染治理技术、无组织排放控制等状况,把企业分为 A、B、C、D 四级。发布重污染天气预警的时候,不同等级的企业要执行不同的应急减排措施。A 级企业是行业的标杆企业,在橙色及以下预警期间一般不需要停产限产;B、C、D 级企业按照预案要求,实行不同的停产、限产比例。不同的控制将会减少重污染天气时污染物的排放总量,促使企业自行开展环保改造升级,促进产业绿色转型。预警系统的指令直接通过信息化平台下达给企业,执法人员通过远程监控和现场抽查的方式保证应急措施的执行,形成了监测、预警、响应、执法的闭环管理。

(二) 邯郸市空气质量预警体系

邯郸市是京津冀区域内典型的以煤炭、钢铁为主导的工业城市,太行山东麓的地理位置不利于污染物扩散,使它的空气质量改善压力很大。邯郸市空气质量预警体系建设的重点,就是创建高分辨率的动态污染源排放清单,进而促使预报模型精确计算,应急响应精确实施。该市投入大量资金,对全市范围内的工业源、移动源、扬尘源等各类污染源进行详细的调查,建立起了“一企一档”的数据库,其清单更新速度和准确度在国内处于领先地位。

动态源清单就成为预警系统的“大脑中枢”。气象预报出现不利于扩散的条件时，预警系统就会用空气质量模型，结合最新的源清单数据，模拟出在不同的气象条件下污染物浓度的变化情况，准确预测重污染过程的起止时间、影响区域和峰值浓度。精细化源清单为基础的预报，可以明显提高预警发布的时间和准确性。

应急响应环节，邯郸市依据源解析结果以及模型贡献率分析，迅速判定导致污染加重的行业及重点企业。应急减排指令不再是以行业为单位的“一刀切”式限产，而是可以具体到某家企业、某条生产线、某个时段的生产调控。该体系还加强了预警与执法的衔接，把在线监控数据异常、用电量变化等作为非现场监管的线索，如果企业在预警期内存在异常排污嫌疑，就会发出告警并推送给一线执法人员，进而实现对违法排污行为快速反应、精准打击。

（三）淄博市空气质量预警体系

淄博市是山东省历史悠久的工业城市，石油化工、陶瓷建材是淄博市的主要产业，挥发性有机物、颗粒物是淄博市的特征污染物。淄博市创建空气质量预警体系的时候，看重高科技手段的运用，加强对于无组织排放，挥发性有机物这类复杂污染源的监测预警。体系建设的一大亮点就是大量使用了走航监测、无人机巡查、卫星遥感反演等先进技术，构建起点、线、面结合的立体化监测网络。

当监测站点的数据显示某地空气质量出现异常，或者预报模型预测某地存在污染风险时，指挥中心就会立刻派移动监测车和无人机去目标地区进行增测。移动设备可以快速定位异常排放源，企业偷排漏放、面源无组织排放等都可以被及时发现并取证。实时获取的高精度监测数据一方面可以及时修正空气质量预报模型，提高未来空气质量预报的准确性，另一方面也可以直接服务于环境执法，给精准打击环境违法行为提供强有力的技术支持。形成了快速响应、精准溯源的快速污染天气预警应对模式，使淄博市重污染天气预警环境监管能力、应急处理水平得到了极大的提高，尤其解决了传统固定站点无法有效监测无组织排放、挥发性有机物等污染物的问题。

三、旅游型城市空气质量预警实践

（一）桂林市空气质量预警体系

桂林因为山水甲天下闻名于世，保护青山绿水就是桂林发展的生命线。桂林

的空气质量预警体系很好地体现出了保护优先, 预防为主的原则。由于本地重工业发展不足, 工业污染源较少, 空气污染主要是由于生物质燃烧、机动车尾气、城市扬尘及一定程度的区域输送造成的。因此预警体系监测的重点、预报模型的参数对这些特征污染源做了专门的优化。

这个体系靠卫星遥感火点监测加地面高灵敏度监测设备。在春秋两季秸秆焚烧敏感期, 预警平台要时刻关注卫星监测到的周边地区火点状况, 结合风场预报来预判烟尘输送给桂林市区空气质量造成的影响。当系统预测到有输入性污染风险的时候, 会立即向有关县区、部门发出预警提示, 要求加大露天焚烧的巡查、管控力度。防患于未然的预警方式, 大大减小了外来污染给桂林市带来的影响。

桂林特有的盆地、河谷地形对污染物扩散影响较大, 因此在预报模型中加入了精细的地形参数, 提高了静稳天气下局地污染累积的预报准确度。桂林在预警响应上采取城市精细化管理方式。预警期间加强对景区旅游巴士、漓江游船尾气排放的检查, 加强对施工工地的湿法作业要求, 加强对市区内餐饮油烟排放的控制。

桂林依靠这样的以预防和精细化管理为特征的预警体系, 想把污染天气消灭在萌芽状态, 尽量减少空气污染对城市景观和旅游体验造成的不良影响。公共宣传更多地体现出市民要共同守护“桂林蓝”, 号召市民和游客参加到环保中来, 共同维护城市主体生态价值。

(二) 三亚市空气质量预警体系

三亚市是唯一一个位于热带海滨的旅游城市, 生态环境最好, 空气质量在全国一直名列前茅。三亚空气质量预警体系建设目的不是应对频繁重污染, 而是守护引以为豪的“金字招牌”, 核心就是“保持优良、防范未然”。此体系对于空气质量背景值监测和异常扰动识别十分重视, 任何超出正常洁净度的细微变动都会引起体系的警觉。

三亚的预警系统在实践中展现出以下几个特点:

1. 高精度背景值监测与异常识别, 在远离城市中心的清洁区设置背景监测站, 创建不受到当地污染源影响的空气质量本底数据库。当市区监测数据与背景值产生明显差异的时候, 系统可以立即判断出当地污染活动或者外来输送的影响。

2. 气象海洋耦合模型, 三亚属于海洋性气候, 受海陆风、台风等天气系统的影响较大。预报模型中加入海洋气象模块, 可以对热带天气系统中的污染物传输

扩散规律进行更加准确的模拟，为区域性的污染输送（海上船舶排放、大陆污染物南下）提供科学依据。

3. 服务于旅游体验的精细化管控，预警期间的响应措施更多是以服务为出发点，以管理为手段。系统依据空气质量预报以及游客分布热力图，给交通管理部门给予重点旅游区交通疏导提议，推行新能源旅游巴士，削减游客密集区移动源排放。

4. 发布三亚的空气质量旅游健康指数：预警信息公布不单是传统的空气质量指数，还尝试开发一个将温度、湿度、紫外线强度、空气质量结合在一起的旅游健康指数，并通过酒店、景区、旅游应用程序等向游客提供个性化的健康出游建议，把环境管理同旅游服务紧密结合。

（三）厦门市空气质量预警体系

厦门市有“海上花园”的美称，城市环境优美，空气质量好。其空气质量所受的主要挑战有，港口航运、机动车排放、闽西南地区污染输送等。厦门空气质量预警系统带有港口城市和区域协同智慧的特征，它用精准溯源、多部门联动的方式来保证自身在空气质量方面一直占据领先地位。

该体系重要组成就是港口和船舶排放的立体监测网络。除在港口设立固定监测站以外，用无人机、遥感等手段抽查进出港船舶燃油硫含量、尾气排放。这些数据可以准确评价船舶排放对厦门空气质量的影响，也可以制定和评价船舶排放控制区政策。当预报模型显示未来气象条件不利于污染物扩散，而船舶活动又频繁的时候，预警系统就会提前向海事、交通等部门发出预警，建议引导船舶使用岸电、优化进出港调度等，从源头上减少污染物排放。

厦门预警体系还要注重区域之间的协同会商。它和周边城市一起形成了固定的空气质量信息共享、预报会商制度。当监测到有来自内陆方向的污染带输送时，立即启动和有关城市之间的联动机制，分析污染成因、预判发展趋向、协调开展区域性的污染削减措施。厦门市以高颜值的城市形象为基础，把空气质量宣传和城市品牌推广相结合，用发布美丽的“厦门蓝”图片和空气质量数据的方式来增强市民的自豪感、环保意识，营造全民参与、共建共享优美生态环境的社会氛围。

第五节 区域联防联控预警机制

一、区域联防联控的组织架构

（一）区域大气污染防治协作小组

区域大气污染防治协作小组是区域联防联控的最高决策机构，一般由区域内各省级或者重要的城市政府主要领导组成，国家相关部门的代表也可以参加指导。该小组的设立就是要冲破行政壁垒，从更高的层面来统筹区域大气污染防治工作，保证区域整体利益最大化。其工作主要是本区域内战略发展规划的制定、各阶段治理目标的确定、年度工作计划的审批、区域内跨区环境问题的协调、产业政策冲突（如产业结构调整、能源结构调整）等重大问题的协调。

协作小组的权威性以及执行力，是决定它能否起作用的重要因素。为此要建立定期会商制度，即每季度或者每半年召开一次全体会议；在出现重污染天气或者突发环境事件的时候，就召开临时会议，以便及时作出科学的决策和部署。为辅助小组决策，会设一个实体办公室来管日常联络协调，信息汇总，议案准备，决策督办等事。并且成立由顶尖科学家、行业专家组成的科技专家小组就区域大气污染成因分析、治理技术路线选择、预警预报模型优化等问题进行咨询，为决策提供科学性、前瞻性支持。

该组织架构可以将分散的行政力量整合成强大的治理合力。协作小组做出的决策对区域内各级政府都具有约束力，各成员单位必须严格执行。高水平的协调机制可以排除地方保护主义的干扰，使需要区域共同出资、共同受益的硬任务（淘汰落后产能、推广清洁能源等）同步推进，形成“一盘棋”的局面，为区域空气质量根本性好转打下基础。

（二）区域环保督查机制

区域环保督查机制是保证联防联控各项决策得以有效落实的“利器”，核心就是通过跨区域的独立于地方政府监督检查发现问题、传导压力、落实责任。打破了以往“谁家的孩子谁家抱”单一属地管理机制，引入外部监督力量，有效地克服了地方政府环境执法时的畏难情绪或者选择性执法的问题。督查组一般由国家生态环境部门牵头，从区域内各省市抽调执法骨干、监测专家组成混合编队，开展交叉互查或者专项督查，保证督查工作的客观、专业、公正。

督查的内容以区域联防联控的重点任务和薄弱环节为主。包含各地重污染天气应急预案落实情况、统一预警响应措施落实情况、重点行业错峰生产减排措施落实情况、“散乱污”企业动态清零情况等。督查采取不发通知、不打招呼、不听汇报、不用陪同接待、直奔基层、直插现场的方式，运用卫星遥感、无人机巡查、在线监控数据分析等现代科技手段，精准找到问题点位，提高督查效率和威慑力。督查结果向社会公开，接受群众监督；更重要的是，督查结果同地方各级政府领导干部的政绩考核、评优评先乃至职务任免挂钩，形成倒逼作用，促使地方各级政府真正把生态环境保护的责任扛在肩上、落实在行动上。

（三）区域信息通报制度

区域信息通报制度为联防联控体系提供了“神经网络”，它的主要目的就是实现区域内环境空气质量信息的实时、准确、全面的共享，从而给科学预警、精准决策、协同应对提供数据支撑。制度建立之后，打破了以前各个地区之间信息孤岛的现象，形成了统一标准、传输高效的区域环境信息共享平台。这个平台让所有的参与者面对同一个空气污染事件的时候，按照同样的预测结果、数据采取统一的行动，最大限度的发挥协同削峰的作用。

该制度规定信息通报的内容、格式、上报频次、上报渠道，保证信息的及时性和规范性。通报内容主要包含如下几个方面：

1. 实时监测及预报预警数据。这包括区域内所有国控、省控监测站点实时的空气质量指数和六项主要污染物浓度数据，还有区域空气质量预测预报中心发布的未来3到7天空气质量等级、首要污染物和时空分布趋势的预测。在预警可能会出现重污染天气的时候，需要立即发布预警信息，确定预警的开始时间、级别、影响范围，作为各地启动应急响应的依据。

2. 重点污染源排放清单及监管信息。共享区域内电力、钢铁、水泥、石化等重点行业企业排放清单数据，主要污染物排放量、采用的治理技术、在线监测系统运行状况。有利于发生重污染天气或者执法检查的时候，迅速找到可能的污染源，对企业的应急减排措施落实情况实施远程监督检查。

3. 重污染天气应急响应启动和措施落实情况。区域内任何一个城市一旦启动或者提升应急响应，就要立即把响应等级、启动时间以及所采取的管控措施（比如工业企业限产停产名单、施工工地停工区域、机动车限行规定等）通报给协作小组办公室和其他成员城市。这样区域应对就变得透明化、协同化，相邻地区可

以进行影响评估并采取联动措施。

4. 重大项目环境影响评价会商信息。对可能对区域空气质量造成重大影响的建设项目，其环境影响评价报告应当报区域协作小组办公室备案，并通知到可能受到污染影响的周边地区，开展跨区域会商。有利于从源头上杜绝新污染产生，防止因单个项目决策造成整个区域环境利益的损失。

二、区域联防联控的运行机制

（一）统一规划、统一标准、统一监测

“三个统一”是区域联防联控运行机制的基础，从科学性、一致性的角度来保证区域协同治理的顺利开展。这一体制意在抹平因地域发展水准、管理效能、政策尺度存在差别而产生的环保“洼地”，塑造起一个公平有序的区域环境治理共同体。其要素与体现，见下表。

区域联防联控“三个统一”核心要素表

要素	核心目的	具体体现
统一规划	战略引领，宏观指导	制定区域大气污染防治中长期规划，分解目标，统筹能源、产业、交通结构调整
统一标准	消除“污染避难所”，确保公平竞争	实行统一的环境准入与排放标准，重点行业执行超低排放，产品挥发性有机物含量设统一限值
统一监测	科学决策基础，数据真实可比	建设布局合理、标准统一的监测网，统一监测方法、质控流程，数据集中审核发布

统一规划，是战略引领。要求区域内所有的城市和地区一起制定一份有法律效力、有约束力的大气污染防治中长期规划。规划不能是各地方规划的简单相加，而是在对整个区域大气环流特征、污染物输送规律、产业布局现状以及环境承载能力等进行了科学分析之后做出的决定。规划中要明确区域总体空气质量改善目标、污染物排放总量控制指标，并将总目标科学地分解到各个行政单元。规划还要统筹安排区域的能源结构调整、产业转型升级、交通运输改善等重大部署，保证各地的发展道路符合区域整体的环保目标。

统一标准，核心抓手，防止污染产业在区域内转移，形成“污染避难所”。因此，就必须实行统一的环境准入和排放标准。即区域内无论是新项目还是已建企业的污染物排放限值应该一致。对火电、钢铁、水泥等重点行业执行国家最严

格的超低排放标准，对车用燃油、非道路移动机械油品质量实行国家最严格的检测要求，对建筑涂料、油墨、胶粘剂等产品中挥发性有机物含量实行统一限值。统一标准拉平了区域环境门槛，给企业营造出公平竞争的环境，从源头上控制了污染物的产生和排放。

统一监测，科学才有根基。准确、可比的监测数据是开展治理效果评价、实施预警预报、开展污染溯源的前提。统一的监测要求，就是在区域内创建一个布局合理、标准统一的空气质量监测网。监测站点要选在统一的地方，仪器的型号和规格也要一样，更关键的是监测办法、数据质量控制的步骤以及数据传输的约定也要一致。利用建立起来的区域数据中心对各个监测点位的数据进行统一审核、校准和发布，保证了数据的真实性、代表性、可比性，为区域大气污染成因分析、模型模拟、治理效果的客观评价提供真实可信的数据支撑。这三个统一环环相扣，形成区域联防联控闭环管理体系，有效推进了区域空气质量的持续改善。

（二）联合执法、联合应急

联合执法、联合应急属于区域联防联控机制从静态管理转向动态响应的重要环节，是保证各项规划、标准落实并产生实际减排效益的执行保障。两者互相配合，一起组成一套跨界污染以及重污染天气应对机制体系。

联合执法，目的是打击跨区域的环境违法行为，克服地方保护主义。一般在秋冬季的大气污染防治攻坚期或者某个特定领域（柴油货车尾气排放、涉挥发性有机物的企业等）开展。由区域协作小组办公室或者上级生态环境部门统一组织，从各成员地区抽调执法人员混合编组，对边界地区、重点工业园区、交通干线进行突击检查、交叉检查。执法模式的好处是执法人员与其管辖地区不存在直接利益关系，可以更加客观公正地发现问题。联合执法主要是对利用行政区划边界进行“游击式”排污的企业，以及应急响应期间不落实减排措施的违法行为进行查处。利用信息共享、案件移交、联合惩戒等手段，形成强大的执法威慑力，使区域内的所有企业都处在一张法网之下。

联合应急是为了应对区域性重污染天气过程而设立的。当区域空气质量预测预报中心预测未来将有大范围、长时间的重污染天气时，区域协作小组办公室按照事先设定好的统一应急预案，向区域内所有的城市发出统一的预警启动指令。核心就是“统一”：统一预警分级标准，按照空气质量指数和持续时间，将预警分为蓝、黄、橙、红四级；统一启动时间，保证区域内所有城市在同一时间启动

或解除相应的应急响应，避免响应滞后或者脱节；统一应急减排措施，根据预警级别制定统一的强制性减排措施清单，例如工业企业限产停产名单、施工工地停工区域、机动车限行规定等。同步启动、同步行动，可以在污染累积初期就实现区域污染物排放总量的快速下降，有效削峰降速，减轻重污染天气的影响程度，保障公众健康。

（三）区域生态补偿机制

区域生态补偿机制，是以经济手段调节区域环境利益关系，推进联防联控长效化的重要制度创新。其根本逻辑就是空气作为流动的公共产品，上风向或生态涵养区为提高整个区域空气质量所做出的努力和牺牲（如限制高污染产业的发展、增加生态建设投入），环境效益被整个区域共享，尤其是下风向或者经济发达地区得到的更多。因此受益地区应该给上游保护地区合理的经济补偿，以达到成本共担、利益共享的公平局面。

该机制的建立，首先要科学核算各地区大气污染防治的生态保护成本和环境改善效益。通常利用大气污染源清单、空气质量监测数据和大气化学传输模型来完成。模型可以定量分析某地减排对其他地区空气质量改善的贡献率，也可以定量分析某地污染物排放对其他地区造成的负面影响。根据这样的量化贡献与受益关系来制定出合理的补偿标准。补偿资金可以来源于受益地区的财政转移支付，也可以由区域内各方共同出资成立区域大气污染防治基金。

区域生态补偿机制的运作方式多种多样，最常见的是以空气质量改善效果为挂钩的横向补偿。以年度 PM_{2.5} 平均浓度改善目标为例，对超额完成目标的城市，可以从区域内未完成目标的城市或者区域中划拨财政资金予以奖励；反之，对未完成目标的城市，则需要向超额完成目标的城市支付罚金或者补偿金。用奖优罚劣的方式把环境责任同经济利益紧密地联系起来，极大地提高了地方政府治污的积极性。这不仅仅是资金的简单流动，更是具有正向激励和反向约束性质的动力源泉，促使各地从被动治污变为主动治污，为区域联防联控注入源源不断的内在动力，保证长期协同治理战略的稳定性和可持续性。

第九章 空气质量监测预警系统评估

第一节 监测预警系统性能评估指标

一、监测系统性能评估指标

（一）数据准确率评估指标

数据准确率是评价监测系统性能的首要而且最重要的指标，直接反映出监测数据和实际环境空气质量状况相符的程度。评估数据准确率即对监测设备、数据传输、处理等各个环节产生的误差进行量化，保证系统最终输出的数据能真实、准确地反映污染物浓度水平及变化趋势。高准确率是保证预警模型有效性、环境决策科学性的根本条件，所有的分析、预警都以此为依据。数据准确性影响单次测量结果的可信度，也影响到长期趋势判断、污染源分析的准确性和治理措施的有效性。

数据准确率的评定一般采用对比观测法。这就需把监测系统产生的数据同高精度的参考标准展开系统比对。这些参照标准可以是经过国家计量认证的标准仪器、标准方法，也可以是特定条件下由专业人员操作的参照监测设备。一般会选取有代表性的时段（污染水平不同、气象状况不同、季节不同等）进行对比，保证评价结果具有代表性、可靠性。采用相关系数、平均绝对误差、均方根误差等统计量，从多个方面对监测数据和参考数据的一致性和偏差大小进行量化。相关系数接近 1 表示监测数据变化趋势与参考标准非常吻合；误差值越小，说明监测数据的绝对值与真实值越接近。

评价数据的准确性不是一次校准就能完成的，而是一个不断进行的过程。它包含定时设备检修，校准以及性能检测。仪器的零点漂移、跨度漂移、线性度要定期测量校准。还要考虑采样过程造成的，例如采样管路是否洁净、采样口有无代表性、温湿度对测量结果有没有影响等等。建立严格的质量保证和质量控制程序，对每一次校准和核查的结果进行记录，并且保存完整的设备档案以及数据质量报告是非常重要的。这种不断监控、评判的体系可以及时找出并修正系统误差，

保证监测数据在任何时刻都处在可以接受的准确度之内,从而给空气质量的细致管理以及精确预警给予连续、可信的数据支撑。

（二）数据完整率评估指标

数据完整率属于对监测系统稳定性和数据连续性的一种评判。主要用来衡量在设定的监测周期里,系统实际采集并存储的有效数据量和应该采集的数据量之比。高数据完整率表示监测网络能持续给系统提供数据流,不会出现因为设备故障、网络中断或者数据丢失等造成的数据缺失问题。数据缺失会打乱短期污染过程的追踪,对长期趋势的分析、模型的检验以及环境健康效应的评价都会造成影响。因此保证数据的完整性对于绘制完整的、连续的污染时空图景来说非常重要。

数据完整率一般是以一定的时间单位(小时、日、月)来算。其公式为数据完整率 = 评价周期内有效数据记录数 / 应有数据记录总数 $\times 100\%$ 。定义有效数据的时候要剔除因为设备校准,保养,故障或者超过量程范围而被标记成无效的数据点。监测站每小时上报六项污染物浓度数据,一天理论上应该有 24×6 个数据点。当天因设备维护造成 2 小时数据缺失,数据完整率就会减少。针对整个监测网络,可以得到整个网络内所有站点某个时间段内的平均数据完整率,进而对整个网络有一个宏观的认识。

影响数据完整率的因素有很多,从前端传感器到后端数据中心,整个链路都可能存在影响。硬件故障(传感器老化,泵体损坏),通信故障(网络信号不稳定,数据传输协议错误),软件故障(数据采集软件崩溃,数据库写入失败等)都会造成数据丢失。为了保证数据的完整率,必须有一套完整的运维保障体系,预防性设备维护计划、保证备品备件供应、创建快速响应的故障报修机制。应当部署网络状态监测系统,随时对数据链路是否畅通进行监测,采用具有断点续传特性的数据传输协议,以应对网络的短暂波动。数据中心需要配置冗余服务器、存储系统,实行常态化的数据备份制度,避免由于硬件故障或者网络攻击所造成的永久性数据丢失,保证监测数据的连续性和完整性。

（三）系统可用率评估指标

系统可用率指在一定时间里系统能正常开展监测工作所占的比例,是反映系统可靠性、稳定性的综合指标。该指标考察的是数据采集成功与否,但是更重要的是考察整个系统健康运作情况,即硬件设备、软件平台、网络通信等各个部分能否协同工作。高可用率是对监测网络全天候、不间断运行最直接的反映,也是

捕捉突发性污染事件、支撑应急响应的重要条件。低可用性的系统即使在运行时数据正确，由于频繁的中断也不能给用户提供连续可靠的服务。

系统可用率一般用两个主要参数来定义和计算，即平均无故障时间 MTBF 和平均修复时间 MTTR。平均无故障时间 MTBF 是两次连续故障之间时间的平均值，数值越大，说明系统越稳定，发生故障的可能性越小。平均修复时间 MTTR 即系统由故障发生到恢复正常运转的平均用时，修复时间越短，说明该系统的响应及排除故障能力越强。可用率计算公式为：可用率 = $MTBF / (MTBF + MTTR) \times 100\%$ 。比如系统平均运行 2000 小时发生一次故障，每次修复平均耗时 5 小时，则其可用率是 $2000 / (2000 + 5) \approx 99.75\%$ 。该指标直接反映了系统长时间运行的稳定性以及维护效率。

要有效提升系统可用率，需要从设计、部署到运维的全过程进行系统性规划。

1. 设计阶段就要采用高可靠的硬件设备和成熟的软件架构，对关键部分采取冗余设计，比如双机热备、负载均衡等等，避免出现单点故障造成整个系统瘫痪的情况。

2. 在部署阶段充分做集成测试、压力测试，保证各个模块之间能够协同工作，并在业务高峰期间可以承受预期的访问量。

3. 运维阶段建立主动式监控体系，用专业的监控工具实时监测服务器的 CPU 使用率、内存占用、网络状况等关键参数，并设置合理的阈值告警，从而在问题刚出现时就加以解决，而不是被动等待问题的发生。制定出标准应急预案以及故障处理流程，并且定期组织演练，可以极大地降低平均恢复时间，从而提升系统整体的可用性。

二、预警系统性能评估指标

（一）预警准确率评估指标

预警准确率是用来衡量预警系统预测能力的重要综合性指标，用来评价预警系统发出的预警信息同实际的空气质量状况的符合程度。该指标以系统的全部预警和非预警事件为考察对象，评价系统整体的准确性，是衡量系统整体可靠性的一个基础。高准确率的预警系统，就是它发出的预警信息可信度高，能给管理者与公众提供可靠的行动指导。预报污染天气正确、预报空气质量优良准确都属于预警准确的范畴。

预警准确率一般用混淆矩阵来量度。混淆矩阵把预警结果和实际情况分成四种类型，具体定义如下表所示：

预警混淆矩阵定义表

指标	定义	含义
真正例	预报有污染，实际有污染	系统正确预报了污染事件
真反例	预报无污染，实际无污染	系统正确预报了无污染事件
假正例	预报有污染，实际无污染	系统发出了错误的污染预警（空报）
假反例	预报无污染，实际有污染	系统未能预报实际发生的污染事件（漏报）

准确率的计算公式为：准确率 = $(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)$ 。该公式考虑了所有的可能情况，是系统判断正确总概率的表达式。系统在 100 天的评估期内预报出 30 天为污染，50 天为优良，那么它的准确率为 $(30+50)/100 = 80\%$ 。

单纯用准确率做预警指标在处理不平衡数据集时会存在误导性。以全年大部分时间空气质量优良的城市为例，一个一直预测为“无污染”的“惰性”模型也会得到很高的准确率，但是没有任何实际意义。因此，在评价预警准确率的时候，需要联系具体业务场景以及污染事件出现的频率来加以考虑。一般要考察不同污染等级的预报准确率，尤其是一直被社会高度关注的重污染事件。把准确率同其它指标（命中率，空报率等等）联合起来考察，就能得到比较全面深入的认识，从而体现预警系统的特点以及改进的方向，避免因为单个指标的局限造成误判。

（二）预警命中率评估指标

预警命中率，又称为召回率或者查全率，是评价预警系统对已经发生的污染事件的捕捉能力的单项指标。它只关心实际发生的污染天气过程，并评价系统在这个过程中正确预报的数量。高命中率代表系统有很强的敏感性，可以对大多数污染事件及时发出预警，避免由于漏报而导致的应对措施的延误。在环境保护工作中，重污染天气应急响应尤其如此，漏报所造成的社会成本和健康风险都很高，因此预警命中率是人们非常关注的一个重要性能指标。

预警命中率只计算实际发生的正例，即污染事件。命中率 = $\text{正确的命中数} / (\text{正确的命中数} + \text{错误的漏报})$ 。公式的分母是实际发生的污染事件总数，分子是被系统正确预报出的事件数。一个月内实际发生的重污染过程有 10 次，预警系统预报成功了 8 次，漏掉了 2 次，那么预警命中率就是 $8/(8+2)=80\%$ 。该指标可以体现系统在“应报尽报”方面的工作能力，也是判断系统能否胜任污染“吹哨人”

角色的重要标准。

提高预警命中率一般要改良模型算法和参数，从而加强模型识别污染产生先兆特征的能力。这就需要增加高空环流形势、边界层参数、区域输送通量等更多的预测因子，或者使用更加先进的机器学习、深度学习算法来发现污染物和气象因素之间复杂的非线性关系。但是过高的命中率会带来副作用，就是使预警阈值变得过于敏感，从而增大误报的概率。因此在实际应用时需要在命中率和空报率之间做出取舍。平衡点的选取要依照管理部门对于漏报，空报这两种错误所造成的风险容忍度，在科学评价的基础上，按照管理决策需求综合决定。

（三）预警空报率评估指标

预警空报率在某些领域也叫虚警率或误报率，用来衡量预警系统发出错误警报的频率。它表示系统发出预警的时候，没有出现污染事件的占比情况。空报率决定预警信息是否严肃、权威，如果系统频繁发出“狼来了”的警报，就会使政府、企业、公众对预警失去信任，造成预警疲劳，真正污染事件发生的时候响应的积极性和力度就会大打折扣。因此，把空报率控制在合理范围内，是保证预警系统长久有效地运转和社会公信力得以保持的关键一环。

预警空报率的计算逻辑是按照系统发出的所有警报来计算。空报率计算公式为：空报率 = 假正例数 / (真正例数 + 假正例数)。分母为系统所发出的预警总次数，分子为其中没有事实依据的虚假警报次数。假设某个系统在一个季度内发了 20 次重污染预警，事后证明其中有 5 次实际的空气质量并没有达到重污染的标准，那么这个系统的空报率就是 5/20，也就是 25%。该指标可以直观反映出预警决策的谨慎性以及准确性。

降低预警空报率即要保证预警模型能够发现潜在的污染风险，也还要能对哪些风险最终会发展成为实际的污染事件作出正确的判断。这就需要模型具有更高的特异性，能够排除掉那些表面有污染迹象但是不会导致超标的“干扰项”。它的目的就是让模型触发阈值更精确，或者把它们加入到模型里，使用更加复杂的验证和过滤。降低空报率、提高命中率往往是一对矛盾。过于严格的预警标准虽然可以减少误报，但是也会造成漏报，即部分污染事件不能被及时预警。因此需要在两者之间做出取舍。决策者要按照不同的预警级别，季节和社会经济影响来设定可以接受的空报率上限，依靠不断改进的模型和效果评价来动态改变预警策略，从而试图达到最好的综合效益。

第二节 预警准确率评估方法

一、基于分类统计的准确率评估

分类统计法是评价预警系统准确率最直接、最常用的方法。它会把预警的结果同实际观测的结果放在一起比较，常常采用混淆矩阵这样的工具，以此来评判系统在各种预警情况下所展现出来的能力。该方法主要看报对与否，用来评价预警系统对于离散污染等级的判断能力，是业务化评价的基础。

（一）二分类预警准确率评估

二分类预警评价是最基础的评价形式，它把复杂的空气质量状况简化成两种互斥的状态，比如：发生污染或者不发生污染、启动预警或者不启动预警。核心评价工具是混淆矩阵，它清楚地显示了四种预测情况

报对：预警系统成功预测出实际发生的污染事件。

虚报：预警系统预测有污染发生，但实际并未发生。

漏报：实际发生了污染事件，但预警系统未能预测。

报对未发生：预警系统正确预测出没有污染发生。

由此得出四个方面的重要评价指标。准确率即报对未发生和报对的预测总数占总预测次数的比例，它反映的是整个系统的整体能力。但是当污染事件发生频率较低，也就是样本不均衡的时候，准确率就会产生误导。精确率又称为查准率，计算公式为：报对 / (报对 + 虚报)，表示系统判定为“发生污染”的预警中，真正出现污染的比例。高精确率表示预警系统的警报可信度较高，能避免“狼来了”的情况。召回率，又称查全率，计算公式为：报对 / (报对 + 漏报)，表示所有实际发生的污染事件中被系统正确预测出来的比例。召回率越高说明系统可以发现大部分的污染事件，有利于保证公众的健康和安全。

精确率和召回率一般互相影响、互相制约。过于敏感的系统会提高召回率，但是会造成虚报，从而使得精确率降低。为了综合考虑两者，F1 分数被广泛应用，它是精确率和召回率的调和平均数，可以更好地评价一个二分类预警系统。受试者工作特征曲线（ROC 曲线）和曲线下面积（AUC 值）也是评价二分类模型性能的手段。AUC 值越接近 1，模型区分正负样本的能力就越强，性能就越好。选择什么样的指标作为核心评价标准，取决于预警工作具体的目标，是减少社会经

济活动不必要的干扰，还是保证对每一次污染过程的全面覆盖。

（二）多分类预警准确率评估

环境空气质量预警分为优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染六个等级，依据的是空气质量指数。在这种情况下需要使用多分类评估方法，它是对二分类评估方法的扩展。核心评估工具还是混淆矩阵，但是维度变成了 $N \times N$ （ N 为类别数，此处 $N=6$ ）。对角线元素为各个等级被预测正确的次数，非对角线元素为把真实等级错误预测成其它等级的次数。从而可以进一步分析模型的混淆模式，比如系统是否容易把重度污染低估为中度污染。

多分类问题的准确率仍然是正确分类的样本数占总样本数的比例，用来度量系统所有等级的总体预测准确性。更细致的评价就是每个类计算准确率、召回率然后求和。宏平均法是分别计算出各个类别的性能指标，然后取其算术平均值。该方法对各个类都赋予相同的权重，不随样本量的多少而变化，可以较好地体现模型对于少数类（严重污染等）的处理效果。微平均就是所有类别的报对、虚报、漏报相加求和，用求和结果计算整体性能指标。样本量大的一类影响比较大，能更好地反映出模型整体的性能。空气质量预警中，严重污染等级虽然很少出现，但是它的重要性很高，因此宏平均指标的参考价值一般更高。科恩卡帕系数也是重要的多分类评价指标，它可以度量预测结果与随机预测结果的一致性，排除了偶然性对准确率评价的影响，使评价结果更加稳健可靠。

（三）预警等级评估

对于多级空气质量预警业务而言，简单的对信息正确与否做出判断往往过于严格，不能完全体现出预警信息的应用价值。重度污染预报成中度污染，分类上虽然错误，但是预警指导意义大于预报为优。因此，在预警等级的评判当中加入误差容忍度的概念，让预警等级的评判更加符合业务需求以及公众的感知。

这种评估方法通常采用更为灵活的评价标准。

1. 邻近等级准确率：即预报等级和实际等级相差一个等级以内就认为预报正确。实际为中度污染，预报为轻度污染或重度污染均算正确。此方法承认预报有不确定性，更接近预报实际能力以及应用场景。

2. 加权评分机制，即给不同的预报错误类型赋予不同的权重或者惩罚分。污染等级低估时，重污染事件被预报为轻微或者无污染的危害大于高估污染等级的危害，所以应该给予更大的权重惩罚。可以设计一个惩罚矩阵，对角线上的元素

(预报正确)惩罚值为 0, 预报等级与实际等级越差, 非对角线上的惩罚值越大, 漏报严重的污染事件惩罚值最大。通过总体加权平均误差或者得分来衡量预警系统的风险管理能力。

3. 模糊评价方法: 用模糊数学的方法, 把预报等级与实际等级的相合程度用隶属度函数来表示, 不是简单的 0 和 1。该方法可以更加准确地描述预报结果的接近程度, 给不同的预警系统性能比较提供更加细致的视角。

加入这些更具弹性的指标, 可以对预警系统在业务运行中表现出来进行更加客观公正的评价, 促使模型在不能达到百分之百准确的情况下尽量减少预报偏差, 避免出现大的方向性错误预报。

二、基于连续变量的准确率评估

(一) 均方根误差评估

均方根误差是衡量数值预测模型好坏最常用、最重要的指标之一。它用预测值和真实值之差的平方平均值的平方根来度量模型预测误差。计算过程为先对每一个样本点的预测误差(预测值减去真实值)求平方, 再求这些平方误差的平均值, 最后对这个平均值开方。RMSE 的单位和原始数据的单位是相同的, 比如都是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 这样误差的大小就可以直接从物理意义上进行理解。

RMSE 的一个显著特点就是它会给大的预测误差赋予更大的权重。因为误差是先平方再平均, 所以个别极大误差(离群点)会对 RMSE 值产生不成比例的巨大影响。这就使得 RMSE 成为一个非常敏感于模型预测稳定性的指标。如果模型大多数时候预测得很好, 但偶尔会出现较大的偏差, 那么它的 RMSE 值就会变得很大。因此, RMSE 适合不能容忍大预测误差的应用场景。空气质量预警的低 RMSE 值说明模型能产生出很接近于实际观测值的预测结果, 误差小, 整体上比较稳定。RMSE 在模型训练时经常被用作损失函数, 因为其在数学上是可微的, 所以可以方便使用梯度下降等优化算法进行优化。

(二) 平均绝对误差评估

平均绝对误差也被广泛用来度量连续变量的预测精度。MAE 是所有单个观测值预测误差绝对值的平均数, 它与均方根误差不同, 计算时并不对误差进行平方处理, 所以它会给所有的误差(无论大小)赋予相同的权重。

MAE 与 RMSE 相比最大的不同是, 它对于异常值不敏感。由于 MAE 使用

的是绝对值而不是平方，所以单个极端误差不会被像 RMSE 那样放大。这就使得 MAE 更能体现模型预测误差的典型或平均程度。当数据里不可避免地会出现一些由于突发事件造成的极端离群点时，使用 MAE 进行评价可以防止这些离群点对模型整体评价结果产生过大的影响。

实践中，同时计算 RMSE 和 MAE 两个指标进行比较，可以得到有关模型误差分布的更多情况。RMSE 远大于 MAE，说明模型存在一些方差很大的误差，即有部分预测点偏离实际值较大。相反，如果 RMSE 和 MAE 的数值比较接近，说明模型预测误差分布比较均匀，并没有特别极端异常的预测。MAE 的物理意义也很明确，它告诉我们模型预测的平均误差就是多少微克每立方米，对于非专业人士来说是非常容易理解的。

（三）相关系数评估

相关系数一般用皮尔逊相关系数（ r ）来度量预测值序列和观测值序列之间的线性关系的强弱和方向。取值范围为 -1 到 +1 之间，一个接近 +1 的相关系数表示预测值和观测值之间存在很强的正相关关系，即当观测值上升的时候，预测值也倾向于同步上升，这是空气质量预测所追求的理想状态。接近 0 的相关系数说明两者之间几乎没有线性关系，接近 -1 则说明两者之间存在很强的负相关关系。

相关系数主要用来判断模型能否较好的反映污染物浓度变化的趋势。即使模型的预测存在绝对数值的系统误差，比如总是高估或者低估 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，但是只要它能够正确的预测出浓度的起伏、峰谷出现的时间以及相对强度，相关系数仍然可以很高。因此，相关系数是评价模型动态模拟能力的重要指标。一个优秀的预警模型不能只依靠数值的准确性，更应该能把握污染过程的发展趋势。但是，相关系数也有它的缺陷，即不能反映预测的量级误差。如果模型的预测值是实际值的两倍，但是变化趋势一致，相关系数还是可以接近 1 的。正因为如此，所以相关系数必须与其他误差度量指标（RMSE 或者 MAE）结合着使用，才好对模型的性能进行全面、客观的评价。高相关系数 + 低误差指标（RMSE、MAE）就是最好的空气质量数值预报模型。

三、基于经济成本的准确率评估

（一）预警失误成本分析

预警失误成本分析属于经济评价的基本内容，目的是量化由于预警不准确而

造成的社会经济损失。预警失误分为漏报和虚报，二者的成本构成和影响是截然不同的。

漏报的成本大多是隐性的、巨大的，且与公众健康相关。一次重污染过程中没有预警，社会公众、敏感人群无法及时采取防护措施，会导致呼吸系统疾病、心血管系统疾病发病率上升。由此产生的直接医疗费用、由于疾病造成的工作能力丧失而产生的生产力的损失、对居民生活质量的损害等，都属于漏报成本。对于这些成本进行量化需要使用环境健康领域的暴露-反应关系模型和卫生经济学的疾病负担评价方法。

虚报的成本更直接，就是对社会经济秩序的非必要干涉。若预警系统发出的是重污染的误报，则政府就会启动应急预案，即部分工厂企业必须停工停产、限制机动车上路、学校放假等措施。会造成企业经济损失、交通拥堵、社会运行效率降低。频繁的虚报会产生“警报疲劳”或者“狼来了”的效应，降低公众以及相关部门对预警系统的信任度，真正的大污染到来的时候，响应的积极性和有效性会大打折扣。虚报成本的量化，可以从受影响行业产值损失调查估算，也可以从社会调查数据中分析公众信任度损耗。

对预警失误成本进行深入分析，可以体现提高预警准确性的经济必要性，也能为优化预警发布阈值提供决策依据。高召回率会引发漏报造成的健康损失，高精确率会造成虚报造成的经济困扰。怎样找到二者之间的平衡点，这是预警系统管理者所面对的难题。

（二）预警效益分析

预警效益分析的核心就是衡量一个准确的预警能带来的社会效益，即避免的损失。预警系统如果能够准确地预判出一次污染事件，并且促使政府、社会采取了有效的减排和防护措施，那么预警系统的效益就体现在以下几个方面。

主要效益就是公众健康效益，提前预警可以促使居民减少户外活动、佩戴口罩，敏感人群采取特别的防护措施，大大降低污染暴露水平，避免大量医疗案例的发生。这部分效益可以用量化的避免健康损失来计算。

第二，环境和经济协同效应。预警驱动的临时、精准减排措施，可以在短时间内削减污染物排放量，降低污染峰值浓度，改善空气质量。这种改善本身就是一个环境效益。与长期、强制性的产业结构调整政策相比，依靠预警实施的动态管控措施对经济产生的影响小得多，更具有灵活性。准确预警可以使得社会以较

低的成本实现阶段性空气质量保障，阶段性空气质量保障本身就是一种经济效率的提升。一个可靠的预警系统还可以提高政府环境治理的形象，增加民众的安全感和满意度，这些都是预警系统所具有的无形社会效益。量化效益要用大气化学模型、健康风险评估模型、经济学评估工具这些，这一步骤是颇为繁杂的多学科交叉工作。

（三）成本效益比评估

成本效益比就是将预警系统全部成本与全部效益用货币来量度，然后比较的方法，是评价预警系统投资是否合理的最终决策手段。完整的成本效益分析会考虑预警失误的成本，也会考虑建立并维持系统的成本。

成本效益比的计算逻辑清晰，其核心是将系统的总效益作为分子，总成本作为分母。

1. 总效益主要来自于准确预警所避免的各种损失，即前面提到的健康效益、环境效益和社会效益的总和。

2. 总成本：这是一个复合概念，包括以下几部分：

系统全生命周期成本：即监测网络建设、模型研发、计算资源、人员维护等固定和可变成本。

预警失误成本：即虚报造成的经济干扰损失与漏报造成的健康损害损失之和。

应急响应成本，即使预警准确，启动应急措施本身也会造成一定的社会经济成本（企业停产造成的损失）。

预警系统成本效益构成表

类别	具体内容
总效益	避免的健康损失
	避免的环境污染损失
	提高社会满意度和政府公信力（无形）
总成本	系统建设与维护成本（研发、监测、人员、算力）
	预警失误成本（虚报导致的经济损失）
	预警失误成本（漏报导致的健康损害）
	应急响应成本（停产、限行等社会经济成本）

从上表可以看出，如果成本效益比大于1，则此预警系统社会总效益大于其总成本，项目具备经济可行性，可以投资推广。比值越大，系统投资收益率越高。成本效益比评估的难点就在于，许多效益和成本（如生命健康价值、政府公信力

等)的货币化过程带有主观性、不确定性。因此需要进行敏感性分析,即测试一些重要的参数(如单位健康损失的货币价值、减排措施效率等)发生变化的时候,会对最后的结果产生怎样的影响。这对得出可靠的评估结论来说非常重要。在完成全面的经济评价之后,决策者就能对预警系统对于社会总体福利的战略价值有更清晰的认识。

第三节 系统响应时效性评估

一、数据采集与传输时效性评估

(一) 数据生成与发布时效性评估

数据生成和发布环节的时效性,即从监测站点获取原始数据,到产出可以对外发布、达到一定质量标准的空气质量信息产品的全过程耗时。这一步是把原始监测数据变成信息服务的过渡环节,它的快慢直接影响预警是否及时准确。评价该环节的时效性,要从数据处理速度、信息产品产出效率、发布流程顺畅度这三个方面入手。时间延迟主要是由于数据验证清洗、质量控制、数据标准化、模型运算、信息产品最终签发等各个步骤所造成的。

数据从监测仪器上传到中心数据库之后,并不能立即使用,需要经过一系列复杂的处理过程。系统应该可以对所收集的数据质量进行有效的控制和检验,消除由于仪器出现故障或者网络不稳定所造成的数据异常值、缺失值。该过程可以由算法自动完成,但边界不清或者比较复杂的异常数据还需要人工复核,从而产生时间滞后。质控结束后数据要按照国家或者地方标准格式化,并结合气象数据、污染源清单等做综合分析,最后得出空气质量指数及未来数小时或数天的预测趋势。

模型预测是数据生成的关键,也是最耗时的一个环节。不论是统计模型还是复杂的物理化学数值预报模型,都需要大量的计算时间和计算量。模型运行时间受模型复杂度、预报范围空间分辨率、时间跨度等因素的影响。高分辨率的区域性预报模型完成一次完整的运行就需要几小时的时间,对于需要快速响应的重污染过程来说,这样的延迟较大。所以,在评估时要准确地记录下从接收到数据到模型产生结果的所有时间。

最后是信息产品生成，例如 AQI 实时数据、预报图表、分析报告等。在正式发布之前一般会有一个内部签署的过程。虽然可以保证信息的权威准确，但是也会出现时间阻滞的情况，在部门配合、高权限审批的紧急事件中尤为明显。评价数据时效性不能仅仅看从原始数据到最终成果产生的时延，还要加上内部审核和签发所用的时间，这样才能客观反映数据变成信息的速率。

（二）预警信息触达时效性评估

预警信息触达时效性评估，就是预警信息从发布开始到目标受众（如政府决策者、企业管理者、普通公众）收到并正确理解所经过的全部过程。信息再快地产生下来，如果不能快速准确地送达，则预警系统的作用也会大打折扣。评估是看信息传递链条是否通畅。

信息触达的延迟可从技术和人为两个层面分析。技术层面的延迟主要涉及信息发布渠道的传输效率。

预警信息发布渠道时效性对比

发布渠道	时效性特点	典型延迟
手机应用程序 推送	即时通讯，点对点触达	秒级或分钟级
短信	即时通讯，覆盖面广	秒级或分钟级
社交媒体	快速传播，互动性强	秒级或分钟级
电视	传统媒体，受节目安排限制	数小时
广播	传统媒体，受固定播报时间限制	数小时
户外电子显示屏	实时更新，地域性强	分钟级（取决于更新频率）

人为的延迟更加复杂，受众的接收习惯、信息的理解程度、行为响应都会起作用。要考虑信息是否以清晰、醒目的方式表达。简单的 AQI 数值加上颜色标识和健康提示，比复杂的专业的报告更容易被大众理解接受。对企业及政府部门来说，信息传递路径、内部通报机制的效率也属于评价内容。

评价预警信息到达的时效性一般会用多种方式来体现。技术上可以测量从服务器发送信息到用户终端接收到信息的时间差。也可以通过社会调查、问卷调查的方式了解各种用户获取预警信息的方式、频次，收到预警后采取措施（佩戴口罩、关闭门窗、启动应急预案等）的平均时间。经过对这些数据加以分析，能够找出那些渠道的覆盖面较广、效率较高，而有些环节却存在着信息“最后一公里”的传递困难情况，从而为改进信息发布策略，加强预警信息的社会影响力给予支持。

二、预警决策与响应时效性评估

（一）预警启动决策时效性

预警启动决策时效性，即监测数据或者预测结果达到预警阈值之后，到有关管理部门作出启动应急预案决定之前的时间间隔。这是技术和行政审批相结合的重要环节，它的效率体现的是政府对于突发环境事件的决断力以及机制的灵活性。决策过程滞后，会致使应急响应错失最佳时间，造成污染过程加剧，影响范围扩大。

本环节耗时受预警标准是否清楚、决策流程是否繁杂、会商机制是否高效以及人为判断等各方面的影响。清晰地界定预警启动的标准，是作出快速决策的基础。由于标准不明确，“持续时间”、“污染程度”等都可以做出不同的解释，这就需要决策者花费更多的时间去分析、讨论。自动化预警系统会在数据达到标准的时候立刻发出初步警报，给决策者提供第一手信息，大幅度缩短技术层面的识别时间。

但是预警的正式启动一般会经过多方参与的会商、审批的过程。生态环境部门要联合气象、工信、交通、住建等部门进行联合会商，从污染发展趋势、气象状况、社会经济影响等各方面综合考虑，来决定预警级别和响应范围。会商过程由于数据解读有差异、部门之间协调成本高、经济影响考虑等因素，会变长。会商形成统一意见后，按照预案规定报请相应级别的政府或者应急指挥机构批准。行政审批层级越高，公文流转和签字所用的时间越长。

对评估预警启动决策及时性进行记录与分析，需要对从数据达标到发出预警信息的全部时间进行详细的记载和分析，即自动化系统报警时间、第一次会商会议开始时间、决策建议形成时间、上报审批时间、最后签发命令的时间点。对历史重污染事件各个时段平均决策时间、波动范围等进行统计分析，可以找到技术分析、跨部门会商、行政审批等方面所存在的时间上的瓶颈问题，为改进决策流程、构建更敏捷的应急指挥系统提供依据。

（二）应急措施部署时效性

应急措施部署时效性指的是从预警指令发出开始，到工业企业限产停产、工地停止涉尘作业、机动车限行等具体的应急措施在责任单位完全落实所需要的时间。这是检验应急预案可操作性、执行力的关键环节，部署延迟会使得预警不能达到应有的效果，造成减排目标不能按时完成。

部署时效性是由信息传递的快慢、预案措施是否明确、可执行、各部门配合是否到位、企业与公众配合是否到位等共同决定的。预警指令下达要迅速准确，一个高效的指挥平台可以将指令一键下达给所有的政府部门、乡镇街道、企业负责人，实现指令的扁平化、快速化。依靠传统的层层文件转发，信息在传递的过程中会存在时间衰减。

应急预案中的各种措施一定要明确具体、可操作。预案要有具体的责任单位名单、详细的操作程序和联系方式。如果措施表述不清，比如只说“重点企业减排 30%”而没有具体提到企业名和减排量，基层执行单位就会花大量时间去理解、分解、分派任务，从而导致部署延误。提前为各个工厂制定出个性化的减排方案，在发出预警的时候就直接下达，可以很大程度上提升部署的速度。

跨部门协同属于措施部署中的一个主要难题。机动车限行需要环保、公安、交通等相关部门配合；扬尘管控牵涉住建、城管等单位。各部门间的配合是否紧密、信息交换是否及时、联合执法是否到位都会影响部署的速度以及覆盖面。用现场督查、在线监控数据核实等方式记录各项措施的启动时间，然后和预警发布时间相比较，可以得到各种措施的平均布置延迟。从原因上分析，信息传递不及时、应急预案不具体、部门间沟通不畅是造成这个问题的主要因素。

（三）响应措施生效时效性

响应措施生效时效性，是指应急减排措施全部落实之后，从开始到环境空气质量监测数据可以检测出可测量的、明显的改善效果所经历的时间。该指标直接反映应急举措实际达到的环境效益以及科学性，是对整个预警响应行动是否成功所做出的最后判断。评估生效时效性，有利于认识不同管控措施对空气质量影响的规律，优化今后的应急策略。

措施效力的快慢是由诸多复杂的因素所决定的。污染物物理、化学性质为直接排放的颗粒物（扬尘），洒水、停工等措施后可在数小时内使浓度迅速降低。气态前体物（二氧化硫、氮氧化物）经过复杂的化学反应所形成的二次颗粒物的浓度变化具有滞后性。即使前体物的排放量已经减少，大气中已有的前体物仍然会反应一段时间，所以 PM_{2.5} 浓度下降的速度会比较慢。

气象条件在措施发挥作用的过程中起着重要的作用。在有利的扩散条件下（大风、降水），污染物会被迅速稀释、清除，应急措施的效果会很快显现。相反，静稳、高湿等利于污染物滞留和转化的气象条件下，即便减排措施严格，空气质量改善

也十分缓慢,甚至无改善。区域传输影响也不能小觑,本地采取的应急措施由于上游地区污染输送而部分或者完全抵消,造成本地空气质量长时间没有得到改善。

要评价响应措施的生效时效性,就要建立一个合适的评价模型。一般要进行对比分析。研究人员用空气质量模型模拟有措施和无措施(即假设没有采取应急响应)两种情况下污染物浓度的变化趋势。通过比较两种情境的差异,可以消除气象等自然因素的影响,得到应急措施实际产生的减排效果以及产生减排效果的时间。还可以统计出历次重污染过程里,从措施开始落实到浓度出现拐点所经历的时间间隔,再结合当时的气象背景、污染特征来总结出各种污染过程、不同力度应急措施下平均的生效时间,为更精准地预测、评估应急响应效果提供科学依据。

第四节 预警效果社会经济评估

一、环境效益评估

(一) 污染物减排量评估

污染物减排量评价属于预警效果环境效益评价的第一环,核心在于精确评判在预警响应时段,由于实行差别化管控而被避免或削减的大气污染物排放总量。评估过程一般都会设置有预警和无预警两种对比情景。基准情景是指没有启动预警时,社会经济活动正常运行下污染物的排放水平,基准情景的构建要考虑历史排放数据、气象条件、能源消耗、工业生产计划等各方面因素,使用统计模型或者排放因子法来推算。有预警情景下要根据应急预案核算各个重点行业、企业停产、限产等措施后的实际排放量。两者之差即为预警干预所减少的污染物减排量,也是评价预警行动是否有效的主要量化指标。

评估过程很大程度上依靠高质量的数据以及前沿的模型工具。保证数据的准确性需要有动态更新且包含全面的污染源排放清单,把主要工业源、移动源、扬尘源等详细的信息都包括在内。源解析技术以及空气质量模型属于不可缺少的技术。对监测站点的颗粒物组分进行化学分析,采用化学质量平衡模型或者正定矩阵因子分解模型等,分析各污染源的贡献,以此来检验减排措施对某类污染源的控制效果。空气质量模型 CMAQ、CAMx 等可以模拟出不同的减排措施下污染物浓度场的时间、空间变化过程,从而体现出各个地区因为减排而取得的环境改善效果,使评价结果更有说服力。

在实际工作中,污染物减量化量的判定还存在困难。非重点行业、中小企业、分散式排放源的减排量核算困难、数据不全、不确定性大,易造成评价结果偏差。经济活动的波动性、气象条件的偶然性、社会公众实际执行度,都会给基准情景设定、实际减排效果核算带来复杂性。提高评估准确性的方式发展更为详尽的动态排放清单编制方法,依靠大数据,物联网等技术对重点排放源的工况和排污数据实施实时监测,并且把经济模型同空气质量模型深入融合起来,从而精确预估预警举措在社会经济体系里真实的减排成效。

（二）环境质量改善程度评估

环境质量改善程度评价旨在通过对比“有预警”与“无预警”情景下的环境空气质量监测数据,直观定量地体现预警系统启动后污染物浓度(如PM_{2.5}、O₃)及空气质量指数等级的实际改善情况,其核心是收集预警阶段及其前后连续监测数据,对比预警时段实际浓度与模型预测基准浓度,计算削减率与削减量,并需开展多维度时空差异性分析,空间上利用GIS技术对站点监测数据插值生成浓度时空分布图,通过对比预警前、中、后分布图识别污染改善区域差异及潜在污染转移,以评判应急调控措施空间合理性,时间上则关注污染物浓度日内及过程变化,评估预警举措能否实现“削峰降频”(削减峰值浓度、缩减重污染天数);评价方法通常采用基于观测与基于模型两种途径,前者直接利用实际监测数据统计分析虽简单直观但难以排除气象等自然因素影响,易高估预警效果,后者则通过数值天气预报模型构建“虚拟”平行环境,输入相同气象场但无应急减排措施,模拟无预警情景下的空气质量,将模拟结果与实际监测数据对比,其差值即为预警干预带来的净改善量,可有效剔除气象“红利”;评估结果的科学性需依靠严格验证与不确定性分析,对模型所用的气象模型、排放清单、化学机制等充分检验以确保模拟准确性,同时说明排放清单、模型参数化等不确定性,并通过敏感性分析等方法衡量不确定性对最终结果的偏差程度,使决策者对预警系统的实际环境效益有更慎重认识。

（三）生态系统服务价值提升评估

生态系统服务价值提升评价,是把环境空气质量改善效益从物理化学层面延伸到生态学、经济学价值层面的一种高级评价方法。它衡量的是由于空气质量改善,生态系统所提供的各种服务功能得到增强,进而产生的经济效益。有利于从更加全面的角度认识环境保护的深远意义,更有利于跨部门政策的协调和生态补偿机

制的建立。空气质量好转,既能直接也能间接地改善多种生态系统服务的供给状况。

评估通常聚焦于以下几个核心的生态系统服务领域:

1. 调节服务价值提升与此最直接相关。大气中二氧化硫、氮氧化物浓度降低,可以减缓酸雨的形成,减少森林植被和土壤酸化的程度,保持森林固碳释氧、水源涵养的功能。空气中颗粒物减少会增加到达地面的太阳辐射,有利于农作物、林木进行光合作用,提高农业、林业生态系统的生产力。

2. 支持服务价值提高:清洁的空气给生物多样性提供基本条件。一些对空气质量较为敏感的指示物种,地衣等,其存活状况可以反映区域生态健康状况。空气质量好转利于物种栖息地的恢复与拓展,保持局地生态系统稳定性以及遗传多样性。

3. 文化服务价值提高:空气质量同居民的文化服务体验有关联。最典型的就是大气能见度的改善。能见度的提高明显改善了城市景观和自然风光的观赏价值,给居民和游客带来更好的旅游、休闲体验,提高了公园、自然保护区等公共空间的吸引力。其价值可以用旅游收入增加、居民支付意愿调查等方式来评估。

对这些服务价值的量化评估通常采用多种环境经济学方法。具体的评估方法,可见下表。

生态系统服务价值评估方法

服务类型	评估方法示例
调节服务	恢复成本法、机会成本法、影子工程法
支持服务	恢复成本法、机会成本法、生物量估算法
文化服务	旅行成本法、条件价值评估法、享乐定价法

结合使用以上方法,可以把预警系统的不可见生态效益转化为可以感知、比较的经济价值,进而丰富预警效果评价的内涵。

二、社会经济效益评估

(一) 对社会稳定的影响评估

环境空气质量监测预警系统对社会稳定产生的积极作用,主要体现在对公众健康风险的控制以及社会情绪的稳定上。提前发布空气重污染预警,给公众预留足够的时间进行健康防护,倡导减少户外活动、佩戴口罩等防护措施。从而有效降低敏感人群因空气污染引发的健康影响,减少由空气污染导致的急诊次数、住院率,进而减轻社会医疗系统在短时间内承受的压力。前瞻性风险规避属于重要

的社会稳定器。预警系统是官方的、透明的、权威的信息发布平台，用官方渠道发布污染状况、趋势、原因以及政府应对措施等信息。及时公开的信息沟通方式可以保障公民的知情权，在信息不对等的情况下压缩谣言生长的空间，避免谣言引起的恐慌社会情绪。

当公众通过预警系统清晰地看到政府正在积极、科学地解决环境问题的时候，对政府环境治理能力的信任度就会大幅提高。预警发布、应急响应启动与执行、效果通报组成完整的发现问题、采取行动、反馈结果的治理闭环。这向社会释放出政府主动化解社会矛盾的强烈信号，可以避免社会矛盾的激化。预警系统推动起来的精细化、差异化管理方式是治理水平提高的反映，有效地防止了由于粗放式管理而使企业产生反感、社会出现反弹的现象。科学评定后，把管控压力更多地集中到主要贡献源上，保护合法合规的企业，达到环境效益和经济影响平衡。公平的治理手段对于维护社会秩序、塑造和谐的政企关系、政民关系有着无法估计的积极作用。

（二）对经济发展的影响评估

经济发展影响评价是预警效果社会经济影响评价中最复杂、最重要的部分，本质上就是一项精确的成本效益分析。全面测算预警系统、应急响应措施在短期内给经济活动造成的成本，以及在长期内给社会经济发展带来的效益。短期的“成本”是显性的，主要是指预警期间，部分工业企业由于停产、限产而造成的产值损失，以及建筑、交通等行业因受管控而降低的经济活动强度。对这些成本进行客观的评价，是认识预警措施经济代价的前提，也是今后改进管控方案、制定补偿政策的依据。

预警系统带来的长期效益是全方位的，也是更深远的。这部分效益的评估比较困难，首先是健康效益的经济转化。减少由空气污染造成的疾病，可以大大减少全社会的医疗保健费用，以及因病假、过早死亡造成的劳动力损失。这部分“健康经济效益”也是预警系统主要的经济回报之一，可以使用疾病成本法等方法量化。是绿色产业的“激励器”和“催生剂”。频繁的预警和严格的环保标准促使企业进行技术升级和绿色转型，淘汰落后产能，使节能环保、新能源等绿色产业获得广阔的市场和巨大的机遇，进而推动产业结构升级。

第三，是城市品牌和营商环境的改善。城市空气质量好、环境管理能力强，吸引高素质人才、高附加值产业和国内外投资的能力更强。优美的环境本身就是

一种稀缺的经济资源，可以提高城市的宜居性，从而促进房地产、高端服务业、旅游业的发展。预警系统正常运转，体现了一个城市治理的现代化水平，可以提高投资者对地区未来发展前景的信心，减少投资者对于环境风险的顾虑，进而改善整个营商环境。这些间接的经济效益不能精确地量出来，但是它们对于推动高质量经济发展来说是非常重要的。

对经济发展影响的评价不能只看重短期产值损失，应该构建起涵盖短期和长期、直接和间接、微观和宏观的综合评价体系。把污染物减排带来的健康效益、产业升级效益、城市品牌增值等正面价值用货币化的方式计算出来，和短期经济成本进行对比，就可以得出预警系统的净经济效益。多项研究表明，虽然短期内可能会伴随着一些经济的阵痛，但是从长远和整个社会的角度来说，设计科学、执行合理的预警系统所带来的综合经济效益，远远大于其成本。

（三）公众满意度与获得感评估

公众满意度、获得感评估，就是将评价角度从客观的物理量、经济值转向社会公众的主观感受和心理认同。它是检验预警系统以人为本的核心理念是否真正落实的关键标准，也是衡量环境治理成果是否真正惠及于民的重要环节。所谓“满意度”，主要是指公众对于预警信息发布的满意程度、对于应急措施执行的满意程度、对于政府整体工作的满意程度；所谓“获得感”，则更进一步，是关注公众是否真的感受到空气质量改善给生活带来的变化，是否作为环境治理的参与者而被尊重、被看见。评估这些主观指标主要用社会调查的科学方法，即大样本随机抽样问卷调查、网络民意调查、社区焦点小组访谈和社交媒体言论情感分析等。

调查问卷一般会从以下几方面开始。信息服务满意度包括预警信息及时性、准确性、覆盖面和内容是否清楚易懂。其次就是政府行为满意度，即应急响应的速度、管控措施的合理性、执法的公平性。第二次是效果感知评估，直接询问公众对近些年来空气质量变化的直观感受，了解公众对于预警系统的评价。获得感评估指标包括呼吸是否更顺畅，晴朗天气是否增加，所在城市环境是否变好等一系列问题进行量化打分、统计分析，进而得出公众的满意度及获得感指数。

公众满意度以及获得感的评价结果不是单纯的总结性报告，更是一种重要的反馈机制。经由分析满意度较低的环节，有益于找出预警系统在信息流传、举措规划或者执行方面存在的缺陷。比如公众反映预警信息发布的渠道不多，就要增加新媒体发布渠道；公众反映某些措施影响了生活，就要对管控措施进行更精细

化的调整。将公众的主观感受纳入评价体系中，环境治理就不再是政府单方面的努力，而会变成政府与公众一起参与、共同建设、共同享受的社会共治过程。以公众获得感为评价方式可以有效推进政策精准化、人性化，保证预警系统运行一直朝着提高人民福祉的方向发展。

第五节 系统持续改进机制

一、定期评估与反馈机制

（一）年度系统评估制度

年度系统评价制度是保证监测预警系统正常运转的一项基本制度。它想每年对整个系统整体情况做一次彻底的“体检”。评价范围较广，不单是对软件功能的正常运行进行评价，而且对从底层基础设施到顶层业务逻辑的每一个环节都进行评价。具体包括对系统基本架构稳定性和可扩展性、服务器、网络等硬件设备的运行情况、系统软件稳定性和响应速度、监测数据采集、传输、存储备份全过程的及时性和准确性、核心数据资产质量（即准确性、完备性、一致性）的评估内容。更重要的是评价要深入到业务的重心即预警模型预测准确率、预警信息发布及时性以及覆盖面，系统在多起重污染天气情况下起到的作用。

评估的过程一定要依照既定的程序，这样才能保证客观公正。一般应组建一个由信息技术专家、环境科学专家、系统运行人员和主要用户构成的评价小组。评估小组经由调取系统后台日志、剖析历史性能监控数据、将模型预测结果同实际监测数据加以对比、展开用户满意度调查、召开专题座谈会等方式，搜集开展评估工作所必需的一手材料和数据。整个评估流程、所用方法及原始数据均需予以记录并保存，保证评估流程透明且可追溯，为后续分析工作开展奠定基础。

评价的最后成果就是一份内容详实、分析深刻的年度系统评价报告。这份报告不能只是形式主义的成果堆积，必须面对问题，把评估期间发现的所有短板和不足都列出来，用根本原因分析法，挖出问题背后的“病根”，可能是技术、管理或者流程等方面的。报告的价值核心就是提出具体的改进措施。这些建议应当具备可操作性，具体说明改进目标、负责人、解决办法、预期效果等，依据问题的重要程度、紧迫性来排序。这份报告会直接变成下一年系统维护、升级、优化的行动指南和资源投入的参考依据，保证系统改进工作有明确的目标和正确的方

向,促使系统持续向更高的层次发展。

(二) 第三方评估机制

引入与系统建设方、使用方没有直接联系的第三方来进行评价,可以明显提高评价工作的客观性、专业性和公正性。第三方评价可以摆脱固有的思维模式以及利益的束缚,用更加中立、开阔的眼光去观察和分析系统。这种外部视角有利于发现内部团队因为“习以为常”而忽略的深层次问题,也可以将本系统与国家标准、行业最佳实践、国内外同类先进系统展开横向对比,准确找到系统存在的差距和不足,为系统的战略发展提供更具有前瞻性视角的借鉴。第三方机构具备专业权威的特性也使评估结论具有一定的公信度,在申请重大升级改造项目经费、向公众通报系统效能等情况下,第三方机构出具的报告可以起到有力的支持作用。

选择适合的第三方评估机构对于本机制能否成功起决定性的作用。备选机构有取得国家认证资质的环境监测或者信息技术测评中心、在环境科学以及信息技术方面享有盛誉的高等院校或者科研院所,还有专业的IT咨询公司。委托评估的时候,双方要签一份详细的合同,把评估的目标,范围,方法论,成果,时间点都确定下来。为了保证评价工作的顺利进行,系统方需要给予评价机构一定的系统访问权限、技术文档、历史数据、管理记录等,并且要签订保密协议来保障数据的安全。评估一般有以下几个步骤:

1. 评估启动与方案确认:双方共同确认评估工作的详细执行方案。
2. 资料审阅与数据分析:第三方专家团队对系统相关文档和历史运行数据进行深入分析。
3. 现场访谈和系统测试:分别对系统开发人员、运维人员、管理人员、终端用户进行访谈,并对系统一些关键功能及性能进行独立的测试。
4. 初步报告及意见征求:第三方提交的初步评估报告中,事实认定的内容经系统核验无误后,其它的内容可以进行核实澄清。
5. 最终报告发布:第三方在综合各方信息后,发布正式的评估报告。

第三方评估报告的价值就在于它的独立性以及建设性。报告会客观地呈现出现有的系统在技术架构、模型算法、安全性能、用户体验等方面存在的问题,依靠大量的行业经验和丰富的专业知识,提出一个完整的改善途径,并给出一套具体可行的技术方案。它给系统管理者供应了一种新的思考方式,助力决策人于繁杂的系统升级路径之中作出恰当选择。报告也成了推动组织内部分工改革、打破

部门隔阂、改善管理流程的催化剂。其权威结论可统一认识，削减内部摩擦，齐心协力推进系统不断改良的目标。

（三）用户反馈收集机制

系统的最终价值在于它给用户带来的实际效益，因此用户是系统质量最直接、最权威的评价者。创建起一套系统化的、多渠道的、即时性的用户反馈收集机制，是保证系统的功能和设计能够贴合实战需要、改善用户的体验与满意度的重要环节。反馈并不只是故障报修或者错误报告，它更是一种包含功能优化建议、操作流程简化、数据展示方式、预警信息解释等各个方面的深度交流。主动持续的倾听一线用户的声音，可以使得系统开发者和管理者准确把握用户的需求与痛点，从而使系统每一次迭代都能够精准满足用户，避免闭门造车，把资源用在对用户最有用的地方。

为了全方位、全面有效取得用户反馈，必须要形成一个立体式的收集矩阵。系统软件界面中可以嵌入便捷的在线反馈功能，设置意见反馈按钮或者弹出式问卷，用户可以随时通过一键提交的方式快速上传意见和建议，这是获取用户当前直接反馈信息最直接、最快的途径。搭建常态化的主动沟通渠道，定时举行用户培训会、经验交流研讨会或者新功能发布会，在会上安排互动环节来搜集用户的集中意见。建立一个专门的群组，比如微信群或钉钉群，并委派专人进行日常答疑和意见搜集，能营造良好的交流环境。对关键岗位或者代表性的用户可以采用深度访谈或者问卷调查的方式，进行更系统、更深入的需求挖掘。所有收集到的反馈信息，不论来自哪个渠道，都必须统一录入用户需求管理数据库中，以标准化的方式进行记录、分类、状态跟踪和分析，保证每一个用户的声息都被妥善管理，为之后的问题诊断和改进提供数据支撑。

二、问题诊断与优化机制

（一）系统性能瓶颈诊断

处理海量高频时序数据的环境空气质量监测预警系统里，性能瓶颈可以成为影响系统稳定性以及预警及时性的隐形杀手。这些瓶颈可以存在于数据采集，上传入库，计算分析到最后可视化展示的每一个步骤之中。如果发生的话，轻则造成用户访问变慢、界面卡顿，重则造成数据积压、处理延迟、预警发布滞后，严重时还会导致系统崩溃。因此建立主动、准确的性能瓶颈诊断机制，对保证系统

全天候可靠运行有非常重要的作用。这就需要运维团队由被动处理故障转向主动监控并分析性能，在问题出现之前加以干预。

性能瓶颈诊断工作要依靠先进技术工具和科学方法论。一般会部署 APM（应用性能监控系统），对服务器 CPU 占用率、内存占用量、磁盘 I/O、网络流量等基础资源指标进行不间断地监控和记录。APM 工具可以对应用代码进行深入追踪，分析关键业务交易响应时间、数据库慢查询语句和耗时较长的函数调用，进而对性能问题进行精准溯源。除了实时监控还要定时做压力测试、负载测试。模拟极端气象条件或者重污染事件时，可能会出现的并发访问峰值，数据处理洪峰，可以主动找出系统在极限压力下的脆弱环节以及性能拐点，评判系统的容量上限，给扩容决定给予数据支撑。

诊断重点要覆盖系统全部的技术栈。数据接入层要考察数据采集器、消息队列有没有处理能力的瓶颈。数据库设计是否合理，缺少索引、分区不合理、SQL 查询没有优化等都在数据存储层进行考虑。在计算分析层，在预警模型运行这一环节中要对算法进行计算复杂度的分析，查看有无内存泄露或者不合理的地方。数据服务以及前端展示层要考虑 API 接口的响应时间，前端加载并渲染大量的地理空间信息或者多维度的图表时的性能表现。全面的诊断要穿透各个技术层，进行跨领域关联分析，才能找到问题的根本原因。

诊断的最终目的就是优化。找到瓶颈之后就要立即进行优化。从代码层面重构或者优化代码逻辑。针对数据库的瓶颈问题，可以对数据库索引进行重建，或者重写查询语句，也可以调整数据库的架构。当硬件资源到达上限时，就需要对服务器进行扩容、升级或者采用负载均衡技术。优化方案实施以后，还需要进行同样的性能测试，通过对优化前后的关键性能指标进行比较，定量评价优化措施的效果，形成“监控、诊断、优化、验证”的闭环，保证系统性能水平不断提高。

（二）预警模型迭代优化

预警模型就是整个监测预警系统的“大脑”，它的准确度直接决定整个系统的价值。大气污染发生和发展是受到气象条件、污染源排放、地理条件、物理化学反应等多种因素影响的复杂过程。影响因素自身不断变化，新的产业政策改变某区域污染源排放量，城市建设改变某地局部微气象环流。这就决定了预警模型不能是一个一成不变的静态实体。要建立持续迭代优化机制，使得模型可以从新的环境特征、规律中学习，从而在复杂的、变化的环境里进行预报预警。

模型迭代优化的过程就是“监控、分析、训练、验证”的循环。首先从线上运行模型的性能监控入手，即每天把模型预测结果和各个监测站点的实测值进行比较，计算并跟踪准确率、召回率、均方根误差等各项评价指标。常见的预警模型评价指标如下表所示：

常见预警模型评估指标

指标名称	简要说明	理想值	应用场景
准确率	正确预测的样本数占总样本数的比例。	100%	适用于类别分布均衡的数据集。
召回率	实际为正的样本中，被模型正确预测为正的比例。	100%	关注尽可能找出所有正例的场景，如疾病诊断。
精确率	模型预测为正的样本中，实际为正的的比例。	100%	关注预测为正的准确性，如垃圾邮件识别。
F1 分数	精确率和召回率的调和平均值，综合评估。	1	当精确率和召回率都很重要时。
均方根误差	预测值与真实值差值的平方的均值的平方根。	0	衡量回归模型预测结果的精确度，数值越小越好。
平均绝对误差	预测值与真实值差值的绝对值的平均值。	0	衡量回归模型预测结果的平均误差，数值越小越好。

当监控数据表明模型的性能出现系统性偏差或者呈下降趋势的时候，就产生了迭代优化的需要。这时，数据科学家与模型工程师就会介入分析，探究性能下降的原因，可能是模型没有学会新污染情景下的知识，也有可能现有特征的权重发生漂移。然后开始模型的再训练过程，一般把最新一批包括目前情况的历史监测数据和气象数据加入训练集。

模型的迭代优化不是简单地用新数据进行重复训练，它是一个不断探索、创新的过程。在特征工程方面，要不断研究新的、可以改善预测效果的因素，例如高分辨率的遥感数据、交通流量数据、社会经济活动数据乃至网络舆情数据等，从而尽可能地刻画出污染的驱动因素。模型结构上采用“挑战者和冠军共存”的策略，在保证已有“冠军模型”稳定运行的基础上，对新的算法或者框架（即“挑战者模型”）进行并行开发和测试。探索传统统计模型向更能捕捉时间序列复杂非线性关系的机器学习模型（如梯度提升树、长短期记忆网络）的演进路径。任何新的挑战者模型想要取代冠军模型，必须在历史数据集上进行充分的回测，在实际环境中经过一段时间的并行试验，证明其综合性能比现有的模型有明显的优

越性之后，才能正式上线。这样可以保证模型优化过程科学稳定，使得预警能力在不断的探索中得以提高。

（三）业务流程再造

系统改进不只是技术上的改进，系统的运行组织管理以及业务工作流程也十分重要。业务流程再造，就是对现有的业务流程进行彻底的反思和根本性的重新设计。其目的就是要冲破部门壁垒，削减繁杂环节，改善资源分配，从而在系统反应速度，决策正确率，部门配合效率，服务品质等关键绩效指标上发生飞跃。

实施业务流程再造的首要任务，就是对当前的现状流程进行彻底、细致地梳理和诊断。需要业务部门的有关人员采用访谈、会议及现场观察等办法来绘制出详细的业务流程图。这张图会直接体现出目前流程中存在的诸多问题，信息传递滞后、多头审核造成的效率低下、职责不明引发的推诿扯皮、部门之间信息孤岛造成的重复劳动等。诊断时需要关注以下几个方面：

1. 信息流转路径：预警信息是怎样产生，经过谁的手传递给决策者、公众的？这条路径能否被缩短，变得更直接一些？
2. 高级别预警出现的时候启动应急响应标准作业程序是什么？各个岗位的工作职责、权限、行动指南是否清楚了？
3. 跨部门合作模式：环境监测部门、气象部门、应急管理部门、政策执行部门之间的数据交换、相互协作、会商方式有没有机制上的障碍？

对这些问题的深入分析，是发现流程再造突破口的前提条件。

充分的现状诊断之后就进入核心的“未来”阶段设计。此时以目标为中心，大胆地进行创造性的设计，而不是对已有的流程进行修补。像这样的以系统平台为基础的自动化信息发布流程就可以实现，当模型生成的结果大于某个阈值时，系统就会按照预先设置好的规则，利用短信、APP 推送、社交媒体等各种渠道，直接把格式好的预警信息推送给指定的人群，完全取代之前那种层层审批、人工转发的低效方式。可以搭建起跨部门的线上协同会商平台，把预警信息，模型分析图，实时监测数据集成在一个界面里，支持各个专家在线标注，讨论，会商，从而得出一致的决策意见。流程再造的成功实行，需要有强大的信息系统作为支持。新的、更优化的业务流程要通过系统功能层面的固化来实现，开发出自动化报告引擎、集成通讯平台、决策支持驾驶舱等新的功能模块，使得技术优化和流程优化互相促进，从而达到整个环境空气质量监测预警体系效能的全面提升。

第十章 环境空气质量监测预警系统展望

第一节 空气质量监测技术发展趋势

一、高精度立体化监测技术

高精度立体化监测技术的具体应用平台及发展方向可见下表：

高精度立体化监测平台对比表

平台类型	监测范围	主要优势	发展方向
地基遥感激光雷达	局部区域，垂直分布	高时空分辨率，污染物垂直分布探测	网络化协同观测，AI 算法应用，实时追踪
卫星遥感	宏观，区域 / 全球尺度	大范围覆盖，周期性监测	反演精度提升，多组分协同反演，融合云计算 /AI
无人机与移动平台	微观，特定区域 / 路径	灵活机动，高分辨率三维分布	集群协同，数据融合，污染源精准溯源

（一）地基遥感激光雷达网络化应用

地基遥感激光雷达技术具有高时空分辨率、对污染物垂直分布有较好的探测能力，在环境监测方面有广阔的应用前景。未来的主要发展方向就是网络化协同观测及其更深层次的应用。在重点区域内布置多台激光雷达构成观测网络，可以对重点区域内大气污染物的时空演变过程展开连续的、动态的追踪。网络化布置可以实时获取污染带产生、变化、传播、消失的过程，给重污染天气发生发展的机理研究、预报预警模型的检验与改进提供前所未有的精细数据支持。

激光雷达网络的协同工作模式可以克服单个设备在空间覆盖上的不足。利用差分吸收激光雷达和米散射激光雷达进行组网观测，不仅可以获得气溶胶垂直分布的信息，而且还可以同步获取臭氧、二氧化硫等污染物的浓度数据，从而实现对光化学烟雾等复合污染过程立体分析的目的。数据的实时融合以及三维可视化技术，使决策者可以清楚地了解污染状况，从而给科学有效的应急管控措施提供有力的依据。利用人工智能算法对雷达网络的数据加以分析，可以迅速找到污染源，并且能对污染排放量进行定量的反演，促使环境监管由原先的被动事后的处

理方式,转变为现在的主动精准溯源和全过程的管理。

(二) 卫星遥感反演技术精细化发展

卫星遥感具有宏观、大范围覆盖的特点,是监测全球或者区域尺度空气质量不能替代的技术手段。目前卫星遥感反演技术正朝着更加精细化的方向发展,主要是提高反演产品的精度、空间分辨率和数据覆盖率,实现从单一污染物监测到多组分协同反演的跨越。随着高分辨率、高光谱卫星的不断出现,并且与云计算、人工智能技术相结合,卫星遥感能够提供城市群区域内污染物浓度的无缝地图,对城市群区域污染协同治理起着重要的作用。

精细化发展的一个重要方向就是提高算法的准确性,在复杂的气象和地表条件下进行反演。采用更先进的大气辐射传输模型、改进气溶胶模型参数、结合地基观测数据校准,可以减小反演结果的不确定性。用机器学习模型代替传统的统计模型,可以更好地处理非线性关系,从卫星观测到的表观信号中剥离出更多的近地面污染信息。另一个方向就是从气溶胶光学厚度到 PM_{2.5} 化学组分浓度的跨越式反演。这有利于了解各个污染源对于 PM_{2.5} 的贡献,从而给差异化的化学组分减排提供科学依据,对精准评价空气污染的环境及气候效应意义重大。

(三) 无人机与移动监测平台协同观测

无人机以及各种移动监测平台(车载、船载)的协同观测,弥补了固定站点和卫星遥感在时空分辨率上的不足,给捕捉污染物的微观时空变异性提供了一种灵活、机动的解决办法。此种技术组合特别适合用于污染源的精确定位,突发性污染事件应急处置,区域污染物的三维高分辨率分布调查等,是构成天、地、空一体化的监测体系的关键环节。

1. 无人机平台的立体探测优势。无人机搭载轻型传感器,可以自由调节飞行高度,快速得到污染物的垂直剖面 and 水平分布数据。无人机可以进入地面上人工无法到达的工业园区高架源、峡谷或者水面之上,直接追踪污染羽流,采样以取得样本,为污染传输路径判断和排放强度定量化提供直接依据。未来无人机集群协同观测技术会得到发展,多架无人机按预定阵列飞行,就像对污染区进行快速“扫描”成像一样,效率会大大提高。

2. 移动平台的地面覆盖能力,车载式移动监测平台可以对城市道路网络开展走航式监测,快速识别高污染路段和区域,判断交通源及局部排放热点。船载平台可用于港口、航道船舶排放以及水上空气质量监测。移动平台获得的近地面高

密度数据，可以与无人机垂直探测数据相结合，一起形成完整的高分辨率三维污染地图。

3. 协同观测和数据融合：无人机和地面移动平台的协同观测核心价值就是时空互补、融合使用。按照事先设计好的协同观测方案，可以实现对某一个区域的立体围捕式监测。当车载平台检测到地面高值区时，就可调度无人机对该区域上空实施垂直探测，以判定污染是本地排放还是高空输送。融合后的数据会给城市空气质量模型的精细化验证、居民个人暴露评估、环保执法精准打击提供前所未有的数据支持。

二、智能化传感器技术

（一）低成本传感器性能提升

低成本传感器因为价格低廉、体积小、易大规模生产等特点，在构建高密度空气质量监测网络方面具有很大的潜力。目前，这一类传感器的发展方向也由原来的只重视低价转变为重性能、重成本的最佳结合，主要目的是提高传感器的准确度、稳定度以及抗干扰能力。多项研究显示经过校准之后，低成本传感器的测量精度可以大大提高，可以作为监管级监测网络的补充设备，也可以用在个人暴露评估上。

未来性能改进的主要方向有如下几点。在传感材料方面，新型纳米材料、二维材料（石墨烯等）的应用会催生出灵敏度更高、选择性更好、功耗更低的传感元件。从算法上来说，采用非线性回归、机器学习、深度学习等更加复杂的校准模型，可以更好的对温度、湿度以及交叉污染造成的测量值影响进行补偿。改善传感器结构、优化气路设计、强化内部温控等办法可以大大改善设备在恶劣环境下稳定性。这些进步将会使得低成本的传感器网络可以提供更好的时空数据，可以有效地用来检测污染热点，评价干预措施的效果。

（二）传感器网络自校准与自诊断

大规模传感器网络后期的维护成本很高，而且数据质量不能得到保证。为解决这一问题，发展具有自校准、自诊断功能的智能传感器网络就显得十分重要。该类网络可以自主保持数据的准确性并且能及时发现故障节点，因此大大减少了人工维护的次数和成本，使整个监测网络可以长期稳定地运行，并且保证数据的质量。

自校准技术主要是依靠网络内部传感器冗余信息及时空相关性。节点间的校准方式使得网络中的各个传感器可以相互比对,把经过标准仪器校准的节点的“信任”传递给其他的节点,进而实现整个网络的动态校准。另一种方法就是使用移动校准单元定期在传感器网络中巡航,对节点进行现场校准。未来,利用机器学习算法,可以对传感器漂移特性进行自学习、自预测,并且可以进行实时补偿。自诊断技术就是分析传感器自身信号模式(噪声、响应时间)或者与其他节点之间偏差来判断传感器工作是否正常。一旦发生故障,就会自动对这个节点的数据进行标记并发出警报,由过去的被动维修变为现在的主动维护。

(三) 微型化与集成化传感器发展

传感器微型化、集成化是满足未来可穿戴设备、智能家居、移动终端等多样化的应用场景需求所必然面临的发展趋势,其目的是将空气质量检测功能无感知地融入到日常生活中的每一方面。该发展方向既减小了尺寸,又在极小的体积内实现了多种传感功能的集成,具有高性能、低功耗的特点。

微型化主要得益于微机电系统技术的发展,可以在硅基芯片上制造出微米级的传感器结构。因此,PM_{2.5}、VOCs等很多传感器的体积大大减小,可以方便地集成到手机、手表等个人电子产品中。集成化就是在一片芯片上实现PM_{2.5}、臭氧、二氧化氮等多种污染物以及温湿度等环境参数的同步检测。多合一传感器既省空间、又便宜,更重要的是可以使用传感器融合算法,把各种数据结合起来,给出更全面的空气质量评价,比如区分不同的污染事件。未来发展的方向是集成度更高、功耗更低和智能化程度更高,最终目标就是使环境感知能力同定位、通信一样成为智能设备的标配功能。

三、生物与生态监测技术

(一) 生物指示物监测技术应用

生物指示物监测是利用对空气污染物敏感的生物作为指示物,反映环境质量的一种方法。一些植物(如地衣、苔藓)、动物或者微生物受到污染物胁迫的时候,会表现出肉眼可见的形态改变,生理生化指标的变化,或者是种群结构的变动。此法成本低,易于大范围使用,可直观地体现污染的长期累积效应和生物利用性,可以作为传统仪器监测的有效补充。

地衣对二氧化硫非常敏感,它的种类、数量、覆盖度等的变化可以很好地

指示区域空气清洁程度。对城市地衣的分布情况展开系统调查,就可以绘制出空气污染对生物的影响图。未来的应用会更加系统、定量。一方面用更多的对PM_{2.5}、臭氧、重金属等主要污染物敏感的指示物种扩大监测范围。另一方面,用现代生物技术和影像分析技术对指示生物的生理指标(叶绿素荧光、酶活性)进行快速无损测定,可以达到对污染影响的早期预警和定量评价的目的,使古老的监测方法在现代环境管理中焕发生机。

(二) 生态系统响应监测

空气污染不单会危害单个生物,还会对整个生态系统的结构、功能造成深远的影响。生态系统响应监测主要从宏观角度来考察空气污染的综合效应,例如酸沉降对森林土壤、水体的影响;氮沉降造成的生态系统富营养化;臭氧对农作物产量和森林生长的抑制作用。对污染进行此类监测,可以了解污染的区域性和长期性影响,对制定生态保护和修复措施也十分必要。

未来的监测会更加重视综合性、长期性。构建森林、草地、湿地、农田等主要生态系统的长期监测网络,用地面调查、遥感监测、生态模型等方法,对生态系统中的关键过程和指标变化进行跟踪。利用高光谱遥感技术监测森林冠层健康状况以及叶片化学组成的变化,再结合地面样地调查来评价臭氧污染对森林生产力的影响。根据压力响应模型来模拟各种污染情景下生态系统的演变,为环境质量标准、生态修复工作等提供决策支持。

(三) 人体暴露监测技术

空气质量检测的最终目的是为了保证人体健康。人体暴露监测技术,就是用来准确测定个人或者人群实际接触污染物水平的技术。它考虑到了人们在各种微环境(室内、室外、交通工具内)中的活动方式和停留时间,所以比传统的基于固定站点的评估方法更能反映健康风险。随着可穿戴传感器以及大数据技术的发展,个性化的高精度暴露监测也从科研走进了生活。

未来将有两大主要的发展趋势,即可穿戴的暴露监测设备的普及。集成高精度、微型化的传感器到个人设备当中,可监测佩戴者所处的环境中的污染物浓度,并利用手机的GPS和活动识别系统来构建个性化的时空暴露档案。这些数据汇集起来就可以画出城市动态暴露风险的地图。二是呼出气生物标志物检测等新技术的应用。通过对人体呼出气体中某些化合物变化的分析,可以实现对空气污染对人体机体影响的实时、无创监测,完成了“从测环境到测效应”的转变。该类

技术给空气污染健康危害的预警和个体化防护开辟了新的途径，促进环境健康风险控制由被动的管理方式向更科学、更前瞻的方式转变。

第二节 预警模型与方法创新方向

预警模型与方法的主要创新方向，概括而言，可参见下表所示。

预警模型与方法创新方向概述

创新方向	核心思想 / 技术	主要目标 / 优势
多源数据融合与同化技术	整合地面、遥感、数值模型及社会经济等多源异构数据，并进行数据同化与机器学习融合	提升预报精度与解释能力，弥补单一数据源不足，支撑精细化预报和科学决策
多模型集合预报技术	结合多个独立模型的预报结果，通过统计后处理或机器学习方法，提供概率预报	减小预报误差，提供误差范围与不确定性信息，增强预报可靠性与鲁棒性
人工智能深度应用	深度学习、可解释人工智能、强化学习、数字孪生等前沿 AI 技术	构建更智能、可信、前瞻的预警体系，实现污染溯源、优化决策与风险管理

一、多源数据融合与同化技术

（一）地面、遥感与模型数据融合

地面监测站可以提供高精度的时间序列数据，但是空间覆盖范围小，不能反映区域污染的全貌。卫星遥感技术有宏观、大范围观测的优势，可以获取污染物的空间分布和跨区域输送情况，但是它的数据精度、垂直分辨率较低，容易受到云层等气象条件的影响。数值预报模型根据物理化学原理模拟污染物产生、扩散、演变的过程，提供连续时空分辨率的预报产品，但是它的准确性受到排放清单、气象场和化学机制不确定性的影响。将三者融合起来，就是现代空气质量预警系统的发展方向。

融合技术的核心就是取长补短。采用数据同化技术，把地面站点观测数据、卫星遥感观测数据和数值模型融合起来，对数值模型的初始场和边界条件进行优化校正，可以大大减小数值模型的不确定性，提高预报精度。采用变分同化或者集合卡尔曼滤波等算法，把实时观测信息代入数值模型之中，使得模拟结果更接近现实的大气情况。而机器学习，特别是深度学习模型，在这里起到了很大的作

用。利用非线性映射关系模型建立各种数据源之间的内在联系,从而得到时空无缝的污染物浓度场。用图神经网络来描述监测站点间的空间相关性,结合卫星遥感反演得到的气溶胶光学厚度数据和气象模型模拟数据,预测 PM_{2.5} 等主要污染物的浓度。

融合不但是数据简单的拼接,而是物理机制和数据统计规律有机结合。将激光雷达等垂直探测数据融合起来,可以更加清楚地了解边界层高度、气溶胶垂直分布等,对于认识重污染天气的生成消散过程有重要的意义。建设空天地一体化的立体监测预报系统,对大气环境实行全方位、动态化、由宏观到微观、由地面到高空的精确描绘,给预警和污染控制决策赋予更加可信的科学依据。

（二）社会经济数据与环境数据融合

空气质量的变化不但是自然过程的结果,也与人类社会经济活动密切相关。把交通流量、工业生产指数、能源消耗、人口密度、土地利用类型、兴趣点分布等社会经济数据加入到预警模型中,可以大幅度提高模型对于污染源动态变化的感知与预测能力。此种融合跳出传统物理化学模型的范畴,给污染成因认知、排放源准确定位、管控措施成效评价赋予了新角度。

传统的排放清单更新慢、静态化,不能反映真实的排放变化。利用实时或者高频的社会经济数据可以对排放清单进行动态修正。实时交通流量数据乘以机动车排放因子得到道路移动源污染物排放量,电力消耗数据乘以企业生产信息得到工业源排放强度。动态排放输入使数值模型能较好的模拟出人类活动变化(节假日、大型活动、临时管控等)所造成的空气质量变化,从而提高预警的准确性。在重污染应急响应时可以快速判断各个行业、各个地区所采取减排措施对改善空气质量的效果,给决策者提供量化依据来调整控制方案。

将社会经济数据同环境数据融合起来分析,可以找到污染背后的“原因”。用空间统计及机器学习模型来分析城市功能区划、产业布局、人口分布和污染物浓度的空间耦合情况,找出对区域空气质量影响较大的活动区域和污染源种类。第二产业比重、人口密度等因子与 PM_{2.5} 浓度呈显著正相关。这既可以为中长期的城市规划、产业结构的调整提供科学依据,也可以对在恶劣的气象条件下某些特定区域(如工业园区、交通枢纽等)存在的污染风险做出预警。跨领域分析让空气质量管理工作由末端治理变成源头预防。

（三）多模型集合预报技术

因为大气过程的复杂性以及人类对大气过程认识上的局限性，所以无论多么完善的空气质量预报模型都存在着误差和不确定性。不同的模型在物理参数化方案、化学反应机理、数值算法等各方面的侧重点不同，在不同的天气背景和污染类型下预报表现也不相同。多模型集合预报技术应运而生，它把不同的独立模型的预报结果综合起来，从而得到比任何一个单独的成员模型都更加准确、可靠的预报产品。

多模型集合预报的主要思想是借鉴“群策群力”，即减少预报误差，给出预报误差范围。基本做法是同时运行多个不同的空气质量数值模型，或者对同一个模型使用不同的初始条件、边界条件或者物理参数化方案，从而得到一组预报结果集合。对这一集合进行统计处理，就得到最终预报产品。简单的方法就是集合平均，即直接计算所有成员的预报值的算术平均，可以有效地滤除部分随机误差，得到比大多数单模型更好的结果。

更复杂的集合技术，就是按照各个成员模型过去预报的业绩好坏来决定它们的权重。可以建立动态权重更新模型，对各模型近期或者某种条件下的预报准确度进行评价，将预报准确度高的模型赋予较高权重，然后加权平均。此方法可以使得集合系统根据当前条件来选择表现最好的模型。近年来机器学习方法也被用于集合预报的后处理中。

1. 神经网络集成：可以训练一个神经网络，把各个模型的预报结果当输入，实际观测值当目标，学习它们之间复杂非线性组合方式，从而得到最好的集成预报。

2. 贝叶斯模型平均可以得到一个确定的预报值，也可以用概率分布的形式来表达预报结果，为不确定性评价打下理论基础。

3. 偏差校正与降尺度，用历史观测数据对每个成员模型的系统性偏差进行校正，再用统计降尺度方法提高预报的空间分辨率，从而提高集成效果。

集合预报的另一大优点就是可以提供概率预报信息。根据预报集合离散度可以判断预报结果的不确定性。可以计算出某一时刻污染物浓度超过某个阈值的概率，也可以给出污染物浓度存在的区间。可以采用概率预测模型来评判各种干预措施对风险削减的长期效果，从而得出合理的公共卫生干预策略。

概率预报信息对风险控制、应急决策十分重要，它告诉决策者最有可能发生

的事情及发生的可能性，这样就可以制定出更加弹性和鲁棒的应对措施。目前基于全球交互式大集合预报系统等多模式资料的应用越来越普遍，已经成为国际主流的预报技术发展方向。

二、人工智能深度应用

（一）可解释性 AI 在预警中的应用

深度学习等复杂的 AI 模型在空气质量预警中被广泛使用并且取得了较好的预测效果，但是它的“黑箱”特性也引起了业界的担忧。预警决策不仅要预见到会发生什么，还要弄清楚为什么会产生这样的结果，哪些因素起决定性的作用。可解释的人工智能，意在打开这个“黑箱”，让人们明白模型是如何作出决策的，进而提升对模型预警结果的信任，也为污染溯源和精准管控赋予新的视角。

在预警实践中，可解释性的 AI 主要用在两个方面。首先是归因分析与贡献度量化。用 SHAP、LIME 这些可解释性技术，可以量化学输入因素（污染源排放，气象要素，跨区域输送等等）对于最后预报结果的贡献度。如当模型预警一次重污染过程时，可解释人工智能可以明确告知是一次本地工业排放增加，还是不利气象条件（静稳、高湿），或者远距离沙尘输送起主要作用。定量归因使管理者可以清楚地知道污染是由什么原因产生的，从而有针对性地采取控制措施，避免“一刀切”。

第二是发现模型所学的物理规律和知识。利用可视化模型内部激活状态或者注意力权重，可以探究模型怎样捕捉污染物的时空变化规律。以图神经网络为基础建立预测模型，通过对节点之间注意力权重的分析，可以找到重要的污染输送通道和区域之间的相互作用强度。对于时空卷积网络模型，分析不同的卷积核所关注的模式，了解模型是如何识别污染物扩散、累积等典型过程的。不仅可以检验模型学到的知识是否符合大气科学常识，还可以帮助科学家发现一些未知关系和规律，从而促进对大气物理化学过程的理解。

（二）强化学习在应急决策中的应用

空气污染应急决策属于复杂的多目标、多阶段动态优化问题。决策者要处在环境效益，经济成本，社会影响等诸多要素约束之下，制订出一系列随时间而动态改变的管控举措，从而以最有效的方式应对污染过程。强化学习是一种依靠与环境交互试错来学习最优策略的机器学习范式，它给解决那些复杂的序列决策问

题赋予了很强的理论框架和科技手段。

应急决策的场景中可以把整个区域环境系统看成强化学习的“环境”。智能体充当决策中心的时候,它的“状态”可以包含当前的污染物浓度场、气象情况、已实施的管控举措等。动作就是智能体能够采取的所有减排手段的总和,比如各个行业的限产比例、各个地区的交通管制力度等等。奖励函数主要是用来度量决策目标,一般都会综合考虑空气质量改善程度(正奖励)和执行管控措施所产生出来的经济成本(负奖励)。

经过与环境模拟器(可以是高精度的空气质量数值模型)大量交互训练之后,强化学习智能体会学到一个最优策略,也就是环境状态到最佳动作的映射。即智能体根据当前的污染态势,给出在未来一段时间内使得累积奖励最大的控制动作序列。相比依靠专家经验、固定预案的决策方法,强化学习的决策系统有明显的优势。它能够发现那些非直观但是更优的控制策略,并且可以根据环境即时反馈来调整方案,因此可以达到真正的自适应和智能化决策。像多智能体强化学习这样的框架,可以安排各个地区或者部门的减碳行动,依靠分布式的决策和协同优化,去解决跨区域联防联控里复杂且棘手的博弈问题,这样就能得到全局最优的应急成果。

(三) 数字孪生技术在预警中的应用

数字孪生技术把多种实时数据、物理模型、人工智能算法集成在一起,在虚拟空间中构建一个和现实世界实时映射、动态交互的“数字镜像”,给空气质量监测预警带来革命性的改变。环境空气质量数字孪生系统不是对现实世界静态的模拟,它更像一个具有感知、诊断、预测、仿真、协同控制能力的智慧生命体。

这项技术的核心就是“虚实融合,用虚控实”。将实时数据通过地面站、遥感卫星、无人机等构成的空天地一体化监测网络传输到数字孪生体里,从而使虚拟模型能准确地反映现在的大气环境状况。孪生体植入高分辨率空气质量数值模型和 AI 预测模型,根据当前情况对以后的空气质量变化趋势做出预知和模拟。管理者可以于虚拟空间中“看见”未来的污染过程,从而让预警具备很强的前瞻性。

数字孪生在预警方面有最大价值的应用就是它的仿真与决策优化能力。预警发出之后,决策者就可以在数字孪生系统里模拟出各种应急管控方案(不同区域、不同行业的减排力度组合)所产生的效果。系统可以迅速推导出每个方案下未来污染物的时空分布情况,定量评价环境效益、经济成本,决策者能够对各种选择

进行快速比较来选出最佳的应对措施。这样沙盘推演的能力可以大大提高应急决策的科学性和准确性，防止盲目决策造成资源浪费或者效果不好。数字孪生系统可以对极端污染情况或者未知排放事件展开模拟分析，执行压力测试和风险评价，从而给制定更具适应性，更加科学的应急预案赋予依据。随着技术越来越成熟，具备监测、预警、推演、决策、评估全流程闭环功能的城市或者区域空气质量数字孪生系统，将会成为未来环境大脑的核心。

第三节 智慧环保与监测预警系统融合

一、物联网技术在监测预警中的应用

（一）环境感知物联网构建

环境感知物联网的建立是实现智慧环保监测预警的基础工程，核心就是建立一个立体的、全方位的、准确的、实时的环境空气质量参数监测网络。它冲破了传统国控、省控站点分布稀疏的局限，转而用众多低成本、多功能的微型传感监测设备来创建高密度网格化的监测网络。微型站点能够自由选择部署地点，可以部署在城市街道、社区、工业园区乃至移动的公交车上，对 PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫、氮氧化物、臭氧、挥发性有机物等众多污染物进行全方位的监测。

传感器节点是物联网的神经末梢，可以随时对周围环境变化进行感知。根据检测目的和场合的不同来灵活选择传感器的种类和布设方式。化工厂区周围要重点布置对有毒有害气体进行监测的点位，城市交通干道则应该重视对机动车尾气中污染物的监测。天地一体的监测网，利用地面固定站、移动监测和卫星遥感等多种方式来获取数据，多维度地获取环境信息，从而可以对城市空气质量进行全方位的描绘，为精准识别污染热点、科学判断污染程度提供坚实的数据支撑。

要形成这么繁杂的感知网络，硬件设备怎么选择铺设，有没有有效的设备管理和保养体系都有关联。设备管理平台可以远程对每一个传感器的运行状态、位置信息进行监控，并且可以实现远程校准、故障诊断，保证整个感知网络的正常运转，保证监测数据的准确性。通过该种方式，环境感知物联网把物理世界的环境状态转化为数字化的形式，为之后的数据传输、分析和预警提供源源不断、高质量的原始数据流，为整个智慧监测预警体系打下了坚实的基础。

（二）万物互联下的数据实时获取

环境感知物联网之上就是万物互联技术，对大量的多源监测数据进行实时、高效、稳定地采集和传输是动态预警与快速响应的中间环节。万物互联的核心思想就是破除“数据孤岛”，利用 4G/5G、NB-IoT、LoRa 等通信技术，把分散在各地的传感器节点和云端的数据中心联系起来，形成有效的信息传输通道。因此环境监测终于从传统的“点样”、“离线分析”时代走进了“面状”、“实时在线”的新时代。

数据实时获取的能力，就是指环境管理部门可以对区域内任意监测点的空气质量变化情况，实现几乎同步的掌握。当某一区域污染物浓度出现异常升高时，可以实现数据毫秒级上传到中心平台，避免了传统监测方式的延迟。其即时性对捕捉瞬时污染事件、追踪污染团的移动和扩散路线有决定性作用。系统可以对工业企业偷排、交通拥堵等造成的污染物浓度快速上升情况做到实时跟踪，给执法人员提供及时的线索和证据。数据的实时性也给公众提供了更加直观的环境知情权，市民可以利用手机应用随时获取自己所在位置的空气质量信息，进而采取相应的健康防护措施。

万物互联不只是环境监测设备之间的相互连接，更是气象、交通、工业生产等各个部门数据之间的相互连接。多源数据融合给环境分析带来了更广阔的视角。把空气质量数据同风向、风速、湿度等气象数据融合起来，就能更精确地预测污染物会怎样扩散；把交通流量数据同空气质量数据结合起来，就可以更好地分析机动车排放对局部空气质量的影响。跨领域数据充分流通，极大扩充了数据分析维度，使监测系统能够摆脱孤立视角去面对环境问题，从一个更为宏大、彼此联系的体系中去认识和应对污染挑战，进而为精准、科学的环境管理决策给予强有力的支撑。

（三）基于物联网的智能预警触发

基于物联网的智能预警触发机制，就是智慧环保系统由被动监测转变为主动防控的重要标志。依靠物联网实时感知、互联互通的特点，借助边缘计算以及事先确定好的规则模型，能够自动识别并及时处理可能产生的环境风险。智能化的预警系统，很大程度上提升了环境监管的效率和前瞻性，在污染事件造成重大损失之前进行干预。

智能预警的实现依赖于几个关键环节：

1. 传统的预警系统采用固定的污染浓度阈值，容易造成误报或者漏报。智能预警系统会根据历史的数据和机器学习算法来给各个区域、各个时段设置动态的并且具有适应性的预警阈值。设备端集成的边缘计算模块，在数据采集源头就进行初步分析，当监测数据超过设定阈值或者出现异常波动模式（例如浓度短时间内急剧上升）的时候，就会在本地立即触发预警。这样处理大大削减了对云端计算资源的需求，而且预警的反应速度也变快了很多。

2. 多层级的自动反应，触发预警之后系统就会执行预先设定好的一系列反应步骤。最基本的一种反应方式就是向有关管理人员、执法人员的移动设备推送预警信息，包含预警发生的时间、地点、污染物种类、浓度值、污染源的推测等等。该系统还可以和现场的监控视频设备联动，获取实时图像作为证据，并且可以和企业的排污控制系统对接，直接对超标排放的企业发出整改指令。

3. 利用物联网系统、地理信息系统相结合的方式精准预警信息推送，以地图的形式直接展示出预警地点以及影响范围，方便管理者清楚地知道事态的严重程度和分布状况。系统通过对污染物浓度梯度以及实时气象数据进行深入的分析，还可以准确的推测出污染物的扩散路径，为应急处置以及周边民众疏散提供依据。因此形成了可视化的、精确的预警信息，环境应急指挥更加高效、科学。

4. 闭环管理及持续改进：预警启动、任务下达、现场处置、结果反馈构成了闭环管理系统。处置结果会被保存进档案，还会用来评判预警模型是否准确有效。系统通过对大量的预警事件及处置结果进行持续的学习，可以不断地对自身的识别算法和预警规则进行改善，提高对于新生污染模式的识别能力，从而形成一个能够自我完善、自我进化的智能预警体系。

由此，基于物联网的智能预警触发机制就形成起来，把环境监管的关口往前移，由“事后处理”变为“事中干预”，再向“事先防范”推进，给打赢污染防治攻坚战赋予了很强的技术支撑。

二、大数据技术在监测预警中的应用

（一）环境大数据平台建设

搭建起环境大数据平台，对于发挥数据的作用、推动智慧环保的应用具有非常关键的基础设施作用。它意在改变传统环境管理中普遍存在的数据“烟囱”、信息“孤岛”现象，把各部门、各系统、各种类型的大数据汇聚、整合、治理，

形成一个标准统一、实时更新、可共享的“全景数据池”。搭建这样的平台成了数据驱动决策的前置条件。

平台建设的主要任务就是数据的全面汇集。它不但是来自空气质量监测网络的实时和历史监测数据,还包括污染源在线监控数据、气象数据、卫星遥感影像数据、地理空间数据、社会经济数据,甚至互联网舆情数据、公众举报信息。借助创建统一的数据标准以及接口规范,平台可以对接入的各个多源异构数据执行规范化整合。把企业工况用电数据和排污数据关联分析,就可以有效地发现企业治污设施异常运行的情况。

数据汇聚之后,平台就要有强大的存储和计算能力。利用 Hadoop、Spark 等分布式数据存储与计算框架可以有效处理 PB 级海量数据,可以对数据进行实时分析和复杂数学模型的运算。数据治理属于平台建设的重要组成部分,包含数据清洗、去重、转换以及质量评定等环节,主要目的是保证数据资源池中的数据精确、完整、一致,从而给上层的数据分析挖掘提供高质量的数据基础。最终平台以数据服务接口或者可视化数据探索工具的形式,将处理后的数据提供给各种业务应用系统以及数据分析人员,从而支持环境质量现状的精细化分析、污染成因的深层次挖掘、未来趋势的科学预测,真正实现数据说话、数据管理、数据决策。

(二) 基于大数据的污染规律挖掘

依靠大数据技术来挖掘污染的规律,是环境监测预警系统达成智能化决策的重要一步。它依靠机器学习、深度学习、时空统计分析这些先进的算法,对环境大数据平台里大量的数据实施深入的剖析,目的是想找到复杂数据背后隐藏的空气污染的时空分布特点、发展规律、主要成因以及源汇之间的联系,从而给污染防治给予科学准确的决策支持。

污染规律挖掘的重要应用方向之一就是污染来源解析及贡献率量化。传统的源解析方法花费大,耗时长,但是大数据方法提供了一种新的途径。对某区域污染物浓度的时间序列变化进行分析,结合风场数据以及周边污染源排放清单,可以采用受体模型或者扩散模型来反演污染物的来源及其迁移路径。以聚类算法识别不同污染情景下主要的污染特征,然后和不同的污染源排放特征库进行比对,从而判断出当前污染过程主要由工业排放、机动车尾气或者区域传输引起。该类分析可以为制定差异化的、精细化的管控措施提供直接的支持,在预测到机动车污染为主的时候,可以提前启动交通疏导或者限行的预案。

另一个主要的应用就是污染趋势预测。大数据模型可以学习并发现历史数据里污染物浓度与气象条件、社会活动等众多因素之间复杂而非线性关系。采用 LSTM 等深度学习模型进行未来几小时或者几天的空气质量预测，一般比传统的数值预报模型要准确。如此精准的预测是做好预警工作基础条件。系统能够依据预测出的未来可能出现的重污染天气的过程，自动生成出各种应急减排措施的预估效果，以便于管理者选择最佳的处理对策，实现对污染物预先介入控制，减少重污染天气给公众健康、社会经济发展造成的不良影响。

（三）个性化预警服务推送

智慧环保系统里的预警信息不能只是辅助政府宏观决策、应急指挥的作用，也应该向社会公众及特定行业提供个性化的、精准化的预警服务。大数据技术为个性化服务提供支撑，依据用户属性、地理位置、行为习惯、信息需求等信息对用户进行分析，把抽象的区域性预警信息转化成和用户息息相关、指导意义明确的建议，提高预警信息的服务价值及公众的获得感。

对广大市民而言，可以按照自身的地理位置，通过手机应用、微信公众号、短信等方式，获取该地区未来几小时的空气质量预报及健康建议。系统预测某区域臭氧浓度午后上升，就可提前向该区域用户发送提示信息，建议午后少出门。平台还会根据家里有没有老人、孩子或者有呼吸系统疾病的敏感人群，给出更严格、更个性化的防护措施和健康建议。这种千人千面的服务模式，把环境信息同个人健康联系起来，引领公众采取有效的防护措施，尽可能减小环境污染给健康造成的损害。

对于某些行业或者企业来说，个性化的预警服务同样有重大意义。预警系统可以在预测到大风天气或者高 PM10 浓度的时候，自动推送提醒，指导其做好扬尘管控，增加洒水降尘频次。对港口、码头等物流枢纽来说，按照空气质量预报以及运输计划来提醒企业改进作业时间，避开重污染时段，减少非道路移动机械污染物排放。平台可依照企业的环保信用等级，施行差别化的预警响应要求，奖掖企业自觉改善环保水平。精准对接需求、主动提供解决方案的服务模式可以提高环保监管效率，满足企业的环保要求，也可以协调生产经营活动的发展，达到环保和经济发展互相促进的效果。

第四节 国际合作与经验借鉴

一、国际先进监测预警经验

世界各国，尤其是发达国家，在长期应对空气污染的过程中积累了大量监测预警经验，形成了各具特色、行之有效的监测预警体系。对这些体系的建立逻辑、运行机制和社会效益进行更进一步的研究分析，可以给我国提供一个很好的参考。

（一）美国 AQI 预警体系

美国的空气质量指数预警体系是世界上较早开始发展并且日趋完善的典型代表。该体系由美国国家环境保护局牵头，主要是把复杂的空气质量监测数据，变成简单易懂的健康风险信息，便于公众理解。AQI 的计算涉及到地面臭氧、颗粒物、一氧化碳、二氧化硫、二氧化氮这五种主要污染物的浓度，共分为六个级别，通过不同的颜色表示并给出相应的健康建议。大大方便了公众对空气质量的快速识别。

此体系的正常运转，依靠的是信息发布平台“AirNow”。AirNow 系统把联邦、州、地方各个监测单位实时数据收集起来，再经由网站、移动应用、合作媒体等许多途径，向公众提供未来两天内 AQI 预报。预测到空气质量将达到对敏感人群不健康或者更差时，系统就会自动发出警告。预警信息除了有 AQI 数值和健康提示外，还会根据当地的居民，特别是儿童、老人、心肺疾病患者等敏感人群来给出具体的防护建议，例如减少外出、关窗等。精细化、人性化的公共沟通策略，提高了预警信息的传达效率，也提高了社会的响应度，从而把空气污染给公众健康造成的危害降到最低。

美国 AQI 等级与健康建议表

AQI 等级	级别	颜色	对应 PM2.5 浓度 (微克/立方米)	健康建议
0-50	优	绿色	0-12	空气质量令人满意，污染很小。
51-100	良	黄色	12.1-35.4	空气质量可接受，但对极少数异常敏感者健康可能产生轻微影响。
101-150	对敏感人群不健康	橙色	35.5-55.4	敏感人群可能出现健康影响，普通公众受影响不大。
151-200	不健康	红色	55.5-150.4	每个人都可能开始感受到健康影响；敏感人群可能遭受更严重的健康影响。

续表

201-300	非常不健康	紫色	150.5-250.4	健康警报：每个人都可能遭受更严重的健康影响。
301-500	危险	褐红色	250.5-500.4	健康预警：每个人都可能面临严重的健康风险。

从上表可知，美国 AQI 体系利用颜色以及具体的建议，把复杂的空气质量信息直观地展现出来，利于公众理解并采取行动。

（二）欧洲预警预报系统

欧洲空气质量预警预报体系具有跨国合作、多模式集合预报的特点。由于欧洲各国地理位置相近，空气污染物跨界传播问题严重，单个国家监测预报能力往往不足。因此，欧盟层面主导建立哥白尼大气监测服务。该项目综合地面监测站、卫星遥感和数值模型数据，用多个先进的化学传输模型做集合预报，得到高分辨率的、覆盖整个欧洲大陆的空气质量预报产品，为各成员国提供区域性背景污染预测支持。

在 CAMS 给出的宏观预报的基础上，欧洲各国、各大城市又发展出了本地化的精细预警系统。法国巴黎在预测到高污染事件的时候，就会启动分级应急响应机制，采取的措施有对车辆实行单双号限行、降低部分区域的车速、暂时禁止重污染车辆进入市区、为市民提供免费的公共交通服务以鼓励绿色出行等。英国伦敦的空气质量警报系统用电子显示屏、交通信息广播、社交媒体等途径发布警报。城市级应急预案同区域性的科学预报相衔接，就形成起一条从宏观到微观、由预知到应对的完整链条，体现出科学决策和社会治理相融合的特点。多层次、联动式的预警响应机制可以保证重污染天气下及时、准确、有效的反应。

（三）亚洲邻国监测预警实践

亚洲邻国当中，日本、韩国由于人口密度高，工业化进程快，且存在类似沙尘天气的区域性污染影响，因此它们的环境监测预警实践对于我国有着非常直接的借鉴意义。日本是最早开始关注光化学烟雾等现代空气污染问题的国家。从 1970 年代开始，日本就建立了全国性的、高密度的大气污染物自动监测网络。预警体系的特点是反应快、信息公开透明。当预测有可能发生光化学烟雾的时候，地方政府就会通过网站、电视、广播甚至学校和社区的广播系统发布注意报或者警报，并建议市民尤其是学生尽量减少户外活动。这套经过几十年的不断完善形成的体系，在公众环境健康风险防范中起到重要的作用。

韩国对于细颗粒物污染采取了非常严厉并且积极的措施。对于经常出现的重污染天气，韩国建立预测应急减排体系。当预报未来几天 PM_{2.5} 浓度会持续超标的时候，政府就启动应急预案，强制要求大型工业企业、火力发电厂等主要排放源削减生产负荷或者污染物排放量。政府对于公共领域的公务车辆上路进行限制，对部分建筑工地会提出或者强制要求停工。为了支撑这个体系，韩国大力发展了融合卫星观测、地面监测和数值模型的立体监测预报技术，并且积极同中国等邻国合作研究大气污染成因以及传输路径。依靠强制减排的应急响应机制，表现出治理空气污染的决心和行动力。

二、国际合作与交流机制

（一）跨国界污染联合监测

空气污染物长距离传输在全世界普遍存在，酸雨、沙尘暴、臭氧污染等都属于此类，影响范围常常超过国界。因此开展跨国界污染联合监测，是科学认识污染传输规律、分清各国责任、制定有效协同控制策略的前提。联合监测一般设在边境地区或污染物主要传输通道上设立超级监测站，用先进的设备同步、高频次观测多种污染物的浓度、化学成分和气象参数等。

所以科学家可以准确地获取污染气团的运行轨迹以及成分变化的过程，给区域空气质量模型检测与优化提供重要的数据支持。欧洲的欧洲监测和评价计划就是长期开展跨国界污染监测的典范，给欧洲各国制定酸沉降、颗粒物控制政策提供有力的科学支撑。近几年来，在中日韩环境部长会议机制的推动下，东北亚地区也开展了长距离跨界空气污染物联合研究项目。这种合作不但能提高区域整体的监测能力，更重要的是可以增加科学合作的政治互信，为以后的联合治理行动打下基础。

（二）技术标准与方法互认

国际环境合作当中，监测数据可比较性乃是关键之处。各国所用的监测仪器、分析方法、质量保证和质量控制程序以及数据处理标准等都存在很大差异，交换和共享的数据就失去了意义，甚至造成误判、纠纷。推进技术标准与方法互认，是数据共享和合作研究得以开展的前提。各国环境机构、标准化组织要增加交流，参与国际标准的制定和修改，如 ISO（国际标准化组织）的一系列环境监测方法标准。

实现互认的途径主要包括：

1. 定期开展实验室间的质量比对试验，分析各参加单位的测试数据的准确性、可比性，找出差异后采取校准。
2. 创建设备认证和标准物质互认制度，保证不同国家使用的监测设备和校准气体可以追溯到同一个基准。
3. 编制技术指南、操作规程，对监测站点选址、仪器保养、数据审核等环节做出技术要求。

经过这样的努力，逐渐消除技术壁垒，形成一种“通用语言”体系，使得一个国家产生的空气质量数据可以被其他国家轻易地理解并信任。这对开展区域性的污染评价，制订协同减排策略有着无法估计的价值。

（三）数据共享与科研合作

依靠标准互认搭建开放高效的大气环境数据共享平台，并加大科研合作力度，是提高全球大气环境治理能力的重要推动力。数据共享不应只是常规监测站点的浓度数据，还应该包含气象数据、排放源清单、卫星遥感产品、模型输出结果等各类数据。世界气象组织的全球大气监视网、全球地球观测系统之系统等国际计划都在积极推动成员国之间环境数据的共享。研究人员利用这些平台可以得到更为宽广时空范围的数据集，从而进行更大规模的科学研究。

科研合作是数据共享价值最后得以体现的形式。各国科学家可以组成联合研究小组，就共同关心的科学问题开展研究，共同开发和改进区域空气质量预报模型，发挥各自的优势，提高预报准确性；开展大规模人群健康效应研究，评估不同的污染状况下跨国界人群健康风险的差异；探寻新型污染物（微塑料、持久性有机污染物）的监测技术和环境行为。深度科研合作一方面可以产生重大的科学突破，解决单个国家难以解决的复杂环境问题，另一方面也可以通过人员往来、思想交流培养出一批具有国际视野的环境科技人才，为全球环境治理提供持续的智力支持。

第五节 未来监测预警系统发展路径

一、构建“空天地一体化”监测网络

空天地一体化监测网络的各项特征与优势，可参见下表：

空天地一体化监测网络特征表

特征 / 监测方式	地面监测网络	遥感监测能力	移动监测应用
空间范围	局地、点源	宏观、区域、全球	特定区域、热点、路径
监测维度	近地面、定点	柱浓度、垂直结构	近地面、多点、三维（无人机）
时间分辨率	实时、连续	周期性、准实时	灵活、高频、应急响应
主要优势	精度高、连续性好、数据基准	覆盖广、长时序、宏观趋势	灵活机动、快速溯源、高分辨率局部扫描
主要挑战	覆盖有限、布设成本高	易受云雾影响、定量反演难度大	数据质量控制、时空变化大
未来趋势	密集化、指标拓宽、微型化、智能化	定量化、高精度、多载荷、立体探测	广度和深度拓展、智能调度、公众参与

（一）完善地面监测网络

地面监测网络是环境空气质量监测体系的根基，它的数据是否准确，覆盖范围是否广泛，直接决定预警是否准确。地面监测网络的发展趋向是越来越密集、覆盖范围越来越广、测量精度越来越高。一方面需要继续扩大国控站、省控站、市控站的布设密度，在城市建成区、工业园区、交通干道、生态敏感区等区域形成更加密集的监测网，从而准确地找到污染的空间分布。另一方面监测指标会得到拓宽，在常规污染物之外，逐步将挥发性有机物组分、重金属、大气汞、温室气体等纳入常规监测范围，为污染成因分析及协同治理提供数据支撑。

技术革新成了网络完善的强劲动力。小型化、低成本、智能化的传感器技术将被大量应用，作为传统标准站的有益补充，布置在社区、街道、楼宇里，形成“微观”感知网络，迅速反映局地污染状况。该类传感器网络的大规模应用，会大大提高监测网络的时间、空间分辨率，有利于发现短时高污染事件、局地污染源。数据质量控制和保障体系会越来越严格，并且智能化。用人工智能算法对监测数据进行实时校验、异常值诊断和自动校准，保证从标准站到微型站所有的数据都“真、准、全、快、新”，给上层预警模型提供高质量的数据输入。安徽绩

溪县等地已经建立起了包含省控站、网格化微站的监测网络，对区域空气质量进行精细化的管控。

完善的地面监测网络不但是数据采集的终端，也是整个预警体系的“神经末梢”。它产生的巨量高分辨率数据，将会和遥感、移动监测数据一起，共同构成一幅动态的、立体的、全方位的空气质量全景图。对这些基本的数据深入挖掘并加以分析以后，能更加清晰地知道污染物随时间和空间变化规律，它的输送路径以及影响机制等，这为创建更加精准的预警模型提供坚实的数据基础，保证预警信息及时准确反映大气环境状况，从而给后续决策提供可靠依据。

（二）强化遥感监测能力

卫星遥感监测由于覆盖面大、可以获得长时间序列数据的特点，成为宏观尺度大气环境监测不可缺少的手段。它很好地弥补了地面站点在空间代表性上的不足，在区域污染传输、沙尘暴等大范围污染事件的追踪和评价中起着不可替代的作用。未来的发展方向就是不断提高遥感观测的定量化水平、产品精度和应用深度，实现从定性观测到定量反演的转变。发展高精度的气溶胶光学厚度、痕量气体柱浓度反演算法，用地面实测数据进行校准，可以得到全国乃至全球范围的高分辨率污染物浓度分布图，为区域联防联控提供宏观决策依据。

随着高分专项系列卫星、环境减灾卫星、风云气象卫星等国产卫星的不断研制和组网观测，将会给大气环境监测提供前所未有的多维度、高频次的数据来源。新一代环境监测卫星会携带更高空间分辨率、更高光谱分辨率的载荷，可以对PM_{2.5}、NO₂、SO₂等常规污染物实施监测，还可以对臭氧前体物甲醛和乙二醛、二氧化碳和甲烷等温室气体展开有效探测。激光雷达、高光谱等主动和被动遥感技术的应用，可以对污染物的垂直分布结构进行精细化的探测，从而得到边界层高度、气溶胶分层、污染物垂直输送等重要信息，为立体污染过程的模拟与预报提供关键参数。这些技术结合在一起，遥感监测不再只是“看”污染，还可以“看清楚”污染的立体结构和化学组成。

（三）拓展移动监测应用

移动监测平台因为具有高机动性、灵活性，在固定站点和卫星遥感监测的基础上起到很好的补充作用，尤其在污染溯源、应急响应、高分辨率污染地图绘制等几方面潜力巨大。移动监测将越来越被广泛应用和深入发展，并形成以车载、无人机、便携式等为代表的移动观测体系。车载移动监测，就是把高精度传感器

装到出租车、公交车或者专门的走航车上，在道路峡谷等大范围和重点区域快速扫描污染物浓度，马上画出“污染地图”，准确找到交通污染热点和工业园区无组织排放源。

无人机监测技术将向更深层次发展。搭载气体分析仪、颗粒物计数器、高光谱相机等传感器的无人机，既可以快速飞往污染事故现场，近距离观测取证，又能对工业企业烟囱排放、建筑工地扬尘状况实施垂直剖面监测，获取传统方式无法获取的三维数据。通过无人机与 5G 技术，无人机监测数据可以实时传输到指挥中心，给应急决策提供第一手信息。公众参与便携式监测也是大势所趋，公民科学家佩戴或者携带便携式传感器，可以获取大量的个人暴露水平数据，用来评价空气污染的健康效应，给制定个性化的防护建议给予数据支撑。

1. 数据融合、校准才是重点。移动监测数据时空变化大，受载体速度、气象条件等诸多因素的影响，数据质量控制是移动监测数据有效应用的前提。未来要发展先进的动态校准算法和数据融合模型，把移动监测的数据同固定参比站点的数据实施实时对比并加以修正，以此来消除系统误差，保证数据的可靠。

2. 智能扩展应用场景。移动监测会深入到污染源监管以及执法的过程之中。当系统发现固定站点或者遥感的高值区时，会自动调度附近的无人机或者走航车对该区域做详细的排查和溯源。这就形成了一种固定哨兵加移动奇兵的协同作战模式，使环境监管的效率和准确性得到很大提高。

二、发展“智慧化、精准化”预警体系

（一）提升预警模型的智能化水平

传统的空气质量预警模型大多使用数值模式或者统计方法，对于复杂非线性关系以及多源异构数据的整合存在不足。未来预警模型的发展方向就是深度结合人工智能技术，尤其是深度学习算法，大大提升预测的准确率、及时性、精细度。LSTM、GNN、STGCN 等模型在空气质量预测中更擅长捕捉污染物浓度的时空相关性，把气象预报、卫星遥感、社会经济活动数据（汽车流量、能源消耗等）等多源信息融合到模型中，进而对未来的几天甚至更长时期的空气中颗粒物、臭氧浓度进行准确预测。

模型智能化不单单是预测准确性提高，还有对污染成因的深层次分析能力。利用源解析技术以及机器学习算法，可以动态定量分析工业、交通、扬尘等各种

污染源对于某一区域、某一时段的污染贡献，真正做到“说清污染来源”。预测到重污染过程的时候，模型可以给出造成此次污染的主要原因以及重点区域，为精准制定减排措施提供直接依据。浙江等地已经使用机器学习和数值模式相结合的双预警引擎，并使用排放源反演技术，明显提高了污染过程预报的准确性。智能成因解析能力的形成将使污染治理由过去的“一刀切”式的粗放式管理转变为“靶向治疗”式的精细化管理。

（二）实现预警信息的精准推送

未来的预警信息发布将彻底抛弃过去那种广而告之的单一模式，转而采用根据用户画像以及具体情境进行“千人千面”精准推送。也就是说预警系统不能只是知道有哪些污染，还要能弄清楚它影响谁、怎样应对。系统把用户地理位置，年龄，健康情况，出行习惯等个性化信息综合起来，经由手机应用，社交媒体，智能穿戴设备等途径，向用户推送量身定制的预警信息以及健康防护建议。当用户患有哮喘，且准备在下午进行户外运动时，如果系统预测到该地区午后臭氧浓度将会上升，就会提前给该用户发出警告，并建议其改变锻炼的时间和地点。

根据不同的社会角色来推送信息，会更有针对性、可操作性。政府部门推送的将是污染成因分析、重点控制区域、行业建议的决策简报。重点排污企业的预警级别、企业所属行业特点将作为生成应急减排操作指令的依据，指令内容可以是某个工段在何时之前停产或者负荷降低到什么水平。学校、医院等敏感单位收到的预警信息里，会包含具体的户外活动限制建议、室内空气净化指南。差异化、场景化的信息服务可以保证预警信息得到正确理解、有效执行，最大限度发挥其社会效应，引导全社会参与大气污染防治。

（三）强化预警决策的智慧支持

预警的目的就是促进行动，减少或者避免重污染事件的发生。因此加强预警系统对决策的智慧支撑能力，是实现从监测预警到管理干预闭环的重要保障。未来预警系统会有强大的情景模拟和评价功能，成为环境管理的“智慧大脑”。当预测到重污染天气的时候，决策者可以输入不同的控制方案组合（不同的区域工业限产比例、不同的车辆限行范围等），模型就可以快速模拟出每一个方案对今后空气质量改善的影响、社会经济成本以及对周边地区可能造成的影响，从而帮助决策者在众多的备选方案中权衡利弊，选择出成本效益最高的应急减排措施。

智慧支持就是对管控措施的执行情况实行实时跟踪，并及时作出调整。应急

响应启动以后，系统就会不断采集“空天地一体化”的监测网络数据，进而对各项管控措施的实际成效展开实时评价。一旦发现某个区域减排效果不好或者某个污染源出现异常排放状况时，系统就会主动发出警报信息，给管理人员提供相应的调整建议。并且系统还能在重污染过程结束之后，自动产生复盘评价报告，对本次预警的准确度、应急应对的成效、各个污染源减排的贡献等进行定量分析，为今后应急预案的不断改进和修订给予科学的支撑。依靠这样的智慧化闭环驱动环境空气监测预警体系，使之变成促使环境治理能力完成换代的重要引擎。

参考文献

- [1] 陈雪芬, 王丹丹. 环境空气质量监测预警系统的建设研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(8): 35–36.
- [2] 石宗明. 浅谈空气质量环境监测与应急响应系统的建设与优化[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(9): 41–43.
- [3] 张国. 浅谈辽阳市空气质量预报预警系统[J]. 科学大众, 2021(9): 81–82.
- [4] 李沫. 乌鲁木齐市空气质量多模式预报预警体系建设与应用[J]. 新疆环境保护, 2020, 42(2): 4–9.
- [5] 周连. 空气污染对江苏省典型地区人群健康效应影响及预警研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [6] 谭静海. 工业排放对区域大气污染的影响及其源追踪分析[J]. International Architecture, 2025, 7(9): 117–119.
- [7] 刘乾嵘, 王勇宏, 贺艳云. 针对地下轨道交通系统空气质量监测的通风控制系统设计方案[J]. 机电产品开发与创新, 2025, 38(4): 172–175.
- [8] 杨栋. 环境空气质量预报预警系统模式及不确定性因素与对策研究[J]. 北方环境, 2020, 32(10): 225–226.
- [9] 张国. 网格监测技术在环境空气质量预报预警体系中的应用[J]. 科学大众, 2021(2): 203–204.
- [10] 薛苗, 孙强, 张力焘. 吕梁市生态环境气象监测预报预警系统研究[J]. 农业技术与装备, 2021(8): 27–29.
- [11] 张卓. 基于物联网的家居环境监测预警系统设计分析[J]. 科技创新导报, 2021, 18(30): 18.
- [12] 陈思, 熊桂洪, 许丽萍, 等. 重庆市臭氧污染天大气环流客观分型研究[C]//第三届环境监测与预警技术大会论文集. 重庆: 重庆市生态环境监测中心; 城市大气环境综合观测与污染防治重庆市重点实验室, 2023: 25–31.
- [13] 滕云豪. 基于边缘计算的室内空气质量监测技术研究[D]. 上海: 上海第二工业

大学, 2022.

- [14] 葛敏敏. 环境自动监测系统建设与应用实践[J]. 华东科技 (综合), 2020(5): 94-95.
- [15] 周国钊, 黄鹤雯, 王日超, 等. 基于传感器技术的环境空气质量监测系统设计[J]. 电子技术与软件工程, 2025, (15): 36-38.
- [16] 束蕾, 朱雷. 基于地球静止轨道卫星数据同化的臭氧模拟改进研究[C]//第二十五届大气污染防治技术研讨会论文集. 北京: 中国环境科学学会, 2021: 112-118.
- [17] 司徒淑娉, 邓思欣, 安丽娜, 等. 佛山市环境空气质量预报预警系统平台设计[J]. 广东化工, 2022, 49(3): 88-90.
- [18] 王志浩. 大气环境监测中大数据技术的应用实践探究[J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2024, (2): 159-161.
- [19] 马骏. 环境空气质量预报预警系统不确定性分析[J]. 资源节约与环保, 2020, (5): 58-62.
- [20] 葛亚丽, 杨兴凯. 环境监测在大气污染治理中的重要性及措施研究[J]. 绿色中国, 2025(4): 43-45.
- [21] 孙丽丽. 环境空气监测全程质量控制分析[J]. 科学大众 (科技创新), 2020, (12): 135-140.
- [22] 马云飞, 朱军亮, 孟令东. 装备封存的环境质量与腐蚀在线监控的信息化管理技术[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 152-156.
- [23] 冯琨. 大气污染物卫星遥感监测技术在重污染监测预警方面的应用[J]. 山西化工, 2021, 41(2): 115-117.
- [24] 门强. 地表水环境自动监测技术应用与发展——以内江市为例[J]. 资源节约与环保, 2021, (1): 25-27.