

The Interactive Effects of Atmospheric and Soil Pollution
and the Principles of Synergistic Remediation

大气与土壤污染的交互影响及协同修复原理

华岚英 张雪晶 著



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

CIP INFORMATION

Title: The Interactive Effects of Atmospheric and Soil Pollution and the Principles of Synergistic Remediation

题目：大气与土壤污染的交互影响及协同修复原理

Author: Lanying Hua, Xuejing Zhang

作者：华岚英 张雪晶

ISBN: 979-8-90040-444-8

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**The Interactive Effects of Atmospheric and Soil Pollution and the Principles
of Synergistic Remediation**

大气与土壤污染的交互影响及协同修复原理

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: 15.25

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in July 2026

Printing: First printing in July 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.

◆ 前言 PREFACE

当前，我国生态环境保护已由单点治理、单一介质管控，逐步转向多介质、全链条、系统性协同治理新阶段。大气与土壤作为陆地表层生态系统的关键组成部分，二者通过干湿沉降、颗粒物再悬浮、气体交换等过程紧密耦合，形成复杂的跨介质污染传输与转化网络。传统分介质治理模式往往忽视大气与土壤污染的内在关联，导致治理效率不高、污染物跨界迁移反复、修复效果难以长效维持，亟须从系统视角揭示大气—土壤污染交互影响机制，构建协同修复理论与技术体系。

随着工业化、城镇化进程持续推进，重金属、持久性有机污染物、颗粒物、VOCs 及酸沉降等典型污染物在大气—土壤界面频繁交换，既造成土壤环境质量持续承压，也通过扬尘与挥发性释放加剧区域大气污染，形成“大气污染—土壤污染—生态风险”的链式传导，对农作物安全、地下水环境、生态系统健康与生物多样性构成多重威胁。在此背景下，开展大气与土壤污染交互机理研究，推动协同控制与协同修复，已成为环境科学领域的重要前沿方向，也是实现减污降碳协同增效、提升生态系统稳定性的必然要求。

本书以“交互机制—协同原理—技术路径—评估体系—管理政策”为主线，系统整合国内外最新研究成果与工程实践经验，力求构建大气—土壤跨介质污染协同治理的完整理论与技术框架。全书共十章：第一章概述大气与土壤污染特征及跨介质研究框架；第二章重点分析大气沉降过程与土壤污染源解析方法；第三章揭示土壤污染对近地表大气环境的反馈影响；第四章阐明复合污染生态效应；第五章构建协同修复理论基础与核心原理；第六章探讨大气治理与土壤修复的协同策略；第七章评估土壤修复对大气环境的影响并提出优化方案；第八章介绍基于自然解决方案的协同修复实践；第九章建立监测、模拟与综合评估体系；第十章完善政策管理机制并展望未来发展方向。

本书坚持理论与实践相结合、宏观规律与微观机制相结合、技术研发与管理应用相结合，旨在为跨介质污染治理提供科学依据与技术支撑，推动环境治理由“分治”走向“共治”，由“末端治理”转向“源头防控—过程阻断—系统修复”全周期管理。希望本书的出版能够为环境领域科研工作者、技术人员和管理者提供有益参考，共同推动我国生态环境高质量治理与可持续发展。

环境系统复杂多变，跨介质过程机理研究仍在不断深化，相关技术与评估方法仍在持续完善。

本书共计十章，华岚英负责第一、第三、第五、第七、第八章，共计10万字；张雪晶负责第二、第四、第六、第九、第十章，共计10万字。

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

◆ 目 录 CONTENTS

第一章 大气与土壤污染概述	1
第一节 大气与土壤污染的基本概念与特征	1
第二节 污染物的环境介质迁移转化规律	7
第三节 大气—土壤系统交互作用研究的意义与框架	15
第四节 本书的研究目标与结构安排	19
第二章 大气污染物的沉降过程与土壤污染源解析	25
第一节 干湿沉降的物理化学机制	25
第二节 典型大气污染物（重金属、POPs、酸沉降）的沉降通量	31
第三节 基于源解析的土壤污染贡献率评估方法	38
第四节 区域尺度沉降污染的案例研究	43
第三章 土壤污染对近地表大气环境的影响	49
第一节 土壤颗粒物（尘）的释放与传输机制	49
第二节 污染土壤挥发性有机物（VOCs）的排放特征	54
第三节 土壤二次扬尘对大气颗粒物污染的贡献	60
第四节 土壤—大气界面交换通量的监测与模拟	65
第四章 大气与土壤污染的复合污染生态效应	71
第一节 复合污染对土壤微生物群落的影响	71
第二节 污染物在土壤—植物系统中的迁移与累积	76
第三节 对地表水与地下水的间接污染风险	81
第四节 生态系统健康与生物多样性的响应	87
第五章 协同修复的理论基础与核心原理	93
第一节 大气—土壤污染协同控制的系统论思想	93
第二节 界面过程调控原理	98

第三节 污染物定向转化与阻断原理·····	104
第四节 生态修复与工程修复的协同原理·····	111
第六章 大气污染控制技术与土壤修复的协同策略·····	117
第一节 工业烟气净化与副产物土壤改良的耦合·····	117
第二节 碳捕集与利用(CCU)技术与土壤固碳·····	123
第三节 大气颗粒物治理与土壤风蚀防控的协同·····	129
第四节 区域大气治理政策对土壤修复的引导作用·····	135
第七章 土壤修复技术对大气环境的影响评估与优化·····	143
第一节 土壤修复过程(如热脱附、通风)的废气产生与控制·····	143
第二节 植物修复与城市绿地系统的空气质量改善效应·····	149
第三节 修复后场地扬尘控制与景观重塑·····	155
第四节 修复技术的生命周期大气环境影响评价·····	161
第八章 基于自然解决方案的协同修复实践·····	169
第一节 森林与湿地系统的污染截留与净化功能·····	169
第二节 城市绿色基础设施的协同效益·····	175
第三节 生态农业模式对减少面源污染与氨排放的作用·····	180
第四节 案例研究:流域尺度的协同治理规划·····	186
第九章 协同修复的监测、模拟与评估体系·····	193
第一节 天地空一体化的环境监测网络·····	193
第二节 大气—土壤耦合过程数值模型·····	199
第三节 协同修复效果的多指标综合评价体系·····	204
第四节 环境风险与修复成本的协同优化模型·····	209
第十章 政策、管理与未来展望·····	215
第一节 跨介质污染治理的法律法规与标准体系·····	215
第二节 多部门协同管理机制与生态补偿政策·····	220
第三节 技术创新与产业融合发展路径·····	226
第四节 全球变化背景下的挑战与研究方向·····	231
参考文献·····	237

第一章 大气与土壤污染概述

第一节 大气与土壤污染的基本概念与特征

大气与土壤是地球生态系统的核心组成部分，是人类生存与发展不可或缺的物质基础，二者共同维系着生态系统的平衡稳定，支撑着各类生物的繁衍生长。随着工业化、城市化进程的快速推进，人类活动对生态环境的干预力度不断加大，大气污染与土壤污染问题日益突出，成为制约生态环境质量提升、威胁人体健康与社会可持续发展的重要瓶颈。明确大气与土壤污染的基本概念、核心特征，厘清二者的研究边界与环境行为差异，剖析二者的内在关联性，是开展大气与土壤污染协同研究、制定科学防控策略的基础前提，对推动生态环境保护、实现人与自然和谐共生具有重要的理论与实践意义。

一、大气与土壤污染的核心定义及污染物分类

准确界定大气污染与土壤污染的核心定义，明确污染物的分类标准，厘清二者的研究边界，是开展相关研究的首要前提。大气污染与土壤污染虽同属环境污染范畴，但因污染介质、污染载体不同，其定义内涵、污染物类型及研究边界存在明显差异，需结合环境科学理论与实践研究，进行系统界定与梳理。

（一）大气与土壤污染的核心定义

大气污染是指由于人类活动或自然过程，导致某些物质进入大气环境，其浓度超过环境承载力，进而危害人体健康、破坏生态系统、影响工农业生产的现象。从污染成因来看，大气污染可分为人为污染与自然污染两大类，其中人为污染是主要成因，包括工业排放、交通运输、农业活动、居民生活等人类活动产生的污染物排放；自然污染则源于火山喷发、沙尘暴、森林火灾等自然过程，其影响范围与强度相对有限，且具有暂时性特征。大气污染的核心判定标准是污染物浓度是否超过国家环境质量标准，是否对生态环境与人类健康产生实质性危害。

土壤污染是指由于人类活动或自然因素，导致有毒有害物质进入土壤环境，

积累到一定程度，破坏土壤理化性质、土壤生物群落结构，影响土壤正常功能，进而危害农作物生长、人体健康及生态环境安全的现象。土壤作为污染物的“储存库”，其污染具有隐蔽性强、治理难度大的特点，多数土壤污染无法通过肉眼直接识别，需通过专业检测才能发现。与大气污染类似，土壤污染也可分为人为污染与自然污染，人为污染主要来自工业废水灌溉、农药化肥施用、固体废弃物堆放、大气沉降等，自然污染则源于土壤自身矿物风化、地下水渗透等自然过程，人为污染是当前土壤污染的主要来源。

（二）大气与土壤污染物的核心分类

大气与土壤污染物的分类的核心是依据污染物的理化性质、来源及危害程度，结合研究与防控需求，进行科学划分，不同类型的污染物其环境行为、危害方式存在显著差异。结合国内外研究成果与实践经验，大气与土壤污染物可统一划分为重金属、有机物、颗粒物三大类，同时涵盖部分特殊污染物，形成系统的污染物分类体系。

重金属污染物是大气与土壤中常见的持久性污染物，具有毒性强、难降解、易累积的特点，主要包括汞、镉、铅、铬、砷等。大气中的重金属污染物主要来源于工业冶炼、燃煤排放、交通运输等，以颗粒物吸附形式存在，可通过呼吸作用进入人体，危害呼吸系统与神经系统；土壤中的重金属污染物主要来源于工业废水灌溉、农药化肥施用、固体废弃物堆放等，可在土壤中长期累积，通过农作物吸收进入食物链，威胁人体健康。有机物污染物种类繁多，主要包括挥发性有机物、半挥发性有机物、持久性有机污染物等，大气中的有机物污染物主要来自工业排放、汽车尾气、溶剂挥发等，部分有机物具有致癌、致畸、致突变特性；土壤中的有机物污染物主要来源于农药、化肥、石油泄漏、污泥施用等，易在土壤中吸附、迁移，破坏土壤微生物群落，影响土壤肥力。

颗粒物污染物主要是大气污染的典型代表，土壤中也存在少量颗粒物污染物（如扬尘、土壤颗粒物），大气中的颗粒物按粒径大小可分为总悬浮颗粒物、可吸入颗粒物、细颗粒物，主要来源于工业排放、交通运输、建筑施工、扬尘等，颗粒物可携带重金属、有机物等污染物，长期暴露会严重危害人体呼吸系统健康，同时影响大气能见度，引发雾霾等恶劣天气。此外，大气中还存在二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳等气态污染物，土壤中还存在硝酸盐、磷酸盐等营养盐类污染物，这些污染物虽未纳入三大核心类别，但也是影响大气与土壤环境质量的重要

因素。

（三）大气与土壤污染的核心研究边界

厘清大气与土壤污染的研究边界，是避免研究交叉混乱、明确研究重点的关键。大气污染的研究边界主要围绕大气环境介质展开，聚焦于污染物在大气中的来源、迁移、扩散、转化规律，以及污染物对大气环境质量、人体健康、生态系统的影响，核心研究范围包括大气污染物排放源解析、大气环境质量监测与评价、大气污染防控技术等，研究尺度涵盖局部区域、区域及全球范围，重点关注污染物的跨区域扩散特性。

土壤污染的研究边界主要围绕土壤环境介质展开，聚焦于污染物在土壤中的来源、迁移、转化、累积规律，以及污染物对土壤理化性质、土壤生物、农作物、人体健康的影响，核心研究范围包括土壤污染物来源解析、土壤环境质量监测与评价、土壤污染修复技术等，研究尺度多聚焦于区域、地块尺度，重点关注污染物在土壤中的长期累积与迁移转化特性。二者的研究边界虽存在明确划分，但并非完全独立，当污染物在大气与土壤之间发生迁移转化时，便形成了二者协同研究的交叉领域，这也是后续研究的核心重点。

二、大气与土壤污染的独有特征及环境行为差异

大气与土壤作为不同的环境介质，其物理、化学、生物特性存在本质差异，导致大气污染与土壤污染呈现出截然不同的独有特征，二者的环境行为（迁移、扩散、转化、累积等）也存在显著差异。深入剖析二者的独有特征，对比其环境行为差异，能够为后续研究二者的交互作用与协同关系提供重要支撑。

（一）大气污染的独有特征

大气污染的核心独有特征体现在流动性、扩散性与跨区域性，这三大特征源于大气的流体特性，也是区别于土壤污染的核心标志。流动性是大气污染最显著的特征，大气是一种连续的流体介质，受气压、风向、风速等气象因素影响，大气中的污染物会快速流动，无法在固定区域长期停留，污染物的流动速度与范围与气象条件密切相关，风速越大、气压差越大，污染物流动速度越快、覆盖范围越广。

扩散性是大气污染的重要特征，大气中的污染物会随着大气流动，向周围区域扩散，扩散范围取决于污染物的排放强度、气象条件、地形地貌等因素。与流

动性不同，扩散性强调污染物在流动过程中的空间分布变化，污染物会从高浓度区域向低浓度区域扩散，逐步降低局部区域的污染物浓度，但同时也会扩大污染影响范围。跨区域性是大气污染流动性与扩散性的延伸，大气中的污染物不受行政区域、地理边界的限制，可实现跨城市、跨省份甚至跨国界扩散，例如，工业排放的颗粒物、二氧化硫等污染物，可在大气环流作用下，从污染源头扩散至周边甚至更远区域，形成区域性、全球性大气污染问题，这也增加了大气污染防控的难度。

（二）土壤污染的独有特征

土壤污染的核心独有特征体现在隐蔽性、累积性与难降解性，这三大特征源于土壤的介质特性，也是土壤污染治理难度大、周期长的核心原因。隐蔽性是土壤污染最突出的特征，土壤中的污染物位于地表以下，无法通过肉眼直接观察识别，即使土壤已经受到严重污染，其外观也可能与健康土壤无明显差异，需通过专业的采样、检测分析，才能确定污染物的种类、浓度与分布范围，这导致土壤污染问题往往被忽视，直到出现农作物减产、农产品质量超标、人体健康受损等问题时，才会被发现。

累积性是土壤污染的重要特征，土壤作为污染物的“储存库”，其对污染物的吸附能力强，且污染物在土壤中的迁移速度缓慢，大部分污染物会在土壤中长期累积，随着时间的推移，污染物浓度会逐步升高，形成持续性污染。与大气污染不同，土壤中的污染物难以通过自然过程快速消散，即使切断污染来源，土壤中的污染物也需要很长时间才能降解或迁移，部分持久性污染物甚至会在土壤中永久残留。难降解性是土壤污染的另一重要特征，土壤中的重金属、持久性有机污染物等，化学性质稳定，难以被土壤微生物降解，也难以通过物理、化学过程彻底去除，导致土壤污染治理难度大、治理成本高、治理周期长，部分污染地块甚至无法完全修复。

（三）大气与土壤污染的环境行为差异

基于大气与土壤污染的独有特征，二者的环境行为在迁移、扩散、转化、累积等方面存在显著差异，这种差异决定了二者的污染形成机制、影响范围与防控策略的不同。在迁移行为方面，大气污染物的迁移以气流输送为主，迁移速度快、范围广，迁移过程受气象条件影响显著，污染物可在短时间内实现跨区域迁移；土壤污染物的迁移主要以垂直迁移（向土壤深层迁移）与水平迁移（在土壤表层

扩散)为主,迁移速度缓慢,迁移范围有限,主要集中在污染源头周边区域,迁移过程受土壤质地、土壤含水量、地形等因素影响。

在扩散行为方面,大气污染物的扩散具有随机性与广泛性,受风向、风速、大气稳定性等气象因素影响,污染物会向各个方向扩散,扩散范围可从局部区域延伸至全球;土壤污染物的扩散具有局限性与定向性,主要沿着土壤孔隙、水分流动方向扩散,扩散范围有限,且扩散速度随着距离增加而快速降低,难以形成大范围扩散。在转化行为方面,大气污染物的转化主要发生在大气环境中,受光照、温度、湿度等因素影响,污染物之间会发生化学反应,生成新的污染物(如二氧化硫转化为硫酸雾、氮氧化物转化为硝酸雾),加剧污染危害;土壤污染物的转化主要发生在土壤环境中,受土壤微生物、土壤 pH 值、土壤有机质等因素影响,污染物会发生吸附、解吸、氧化还原、降解等反应,部分污染物会转化为毒性更强的物质,部分污染物则会被固定在土壤中,降低其迁移能力。

在累积行为方面,大气污染物的累积性较弱,污染物在大气中停留时间较短,多为几小时至几天,难以形成长期累积,污染物浓度会随着气象条件的变化而快速波动;土壤污染物的累积性极强,污染物在土壤中停留时间长,可达数年、数十年甚至上百年,随着污染时间的延长,污染物浓度会逐步升高,形成持续性污染,且累积的污染物难以通过自然过程去除,对土壤环境与人体健康构成长期威胁。

三、大气与土壤污染的关联性特征

大气与土壤作为地球生态系统的重要组成部分,并非相互独立,而是通过物质循环、能量交换形成了紧密的关联关系,大气污染与土壤污染之间存在显著的关联性,这种关联性是二者发生交互作用的基础,也是研究二者协同关系的核心前提。深入阐述大气与土壤污染的关联性特征,能够明确二者的相互影响机制,为后续开展协同研究与防控提供理论支撑。

(一) 污染物的双向迁移关联性

大气与土壤污染的核心关联性体现在污染物的双向迁移,即大气中的污染物可通过沉降作用进入土壤,土壤中的污染物可通过挥发、扬尘等作用进入大气,形成“大气—土壤”污染物循环体系。大气中的污染物(如颗粒物、重金属、有机物等),可通过干沉降、湿沉降(降雨、降雪)等方式,从大气中沉降到土壤表面,逐步累积,导致土壤污染。例如,工业排放的重金属颗粒物、二氧化硫、

氮氧化物等，经大气沉降后，会进入土壤，改变土壤理化性质，累积到一定程度便会造成土壤污染；农业活动中排放的氨氮、农药挥发物等，也会通过大气沉降进入土壤，加剧土壤污染。

与此同时，土壤中的污染物（如挥发性有机物、重金属、农药等），可通过挥发作用进入大气，或通过土壤扬尘、农田耕作等方式，以颗粒物形式进入大气，导致大气污染。例如，土壤中的挥发性有机污染物（如苯、甲苯、甲醛等），会通过土壤表面挥发进入大气，影响大气环境质量；土壤中的重金属、农药等污染物，会吸附在土壤颗粒物上，通过扬尘作用进入大气，成为大气颗粒物污染物的重要来源，进而危害人体健康。这种污染物的双向迁移，使得大气污染与土壤污染相互影响、相互加剧，形成恶性循环。

（二）污染成因的协同关联性

大气污染与土壤污染的成因具有协同关联性，许多人为活动既是大气污染的来源，也是土壤污染的来源，二者的污染成因存在高度重叠，形成协同污染效应。工业生产是最主要的协同污染来源，工业企业排放的废气（含颗粒物、重金属、有机物、二氧化硫等）会造成大气污染，排放的废水（含重金属、有机物等）用于农田灌溉或直接排放到土壤中，会造成土壤污染，排放的固体废弃物（含重金属、有毒有害物质等）堆放于土壤表面，会通过渗漏、挥发等方式，同时造成土壤污染与大气污染。

农业活动也是重要的协同污染来源，农业生产中施用的农药、化肥，一部分会通过挥发、漂移等方式进入大气，造成大气污染，另一部分会残留于土壤中，造成土壤污染；农田秸秆焚烧会产生大量颗粒物、一氧化碳、挥发性有机物等，造成大气污染，焚烧后的灰烬残留于土壤中，也会带来重金属等污染物，加剧土壤污染。交通运输活动中，汽车尾气排放会造成大气污染，汽车轮胎磨损、刹车片磨损产生的颗粒物，会沉降到土壤中，造成土壤重金属污染；道路扬尘会同时影响大气与土壤环境，既造成大气颗粒物污染，也会导致土壤表层颗粒物累积，影响土壤质量。

（三）污染危害的协同关联性

大气污染与土壤污染的危害具有协同关联性，二者的危害并非孤立存在，而是相互叠加、相互放大，对生态环境、人体健康、工农业生产造成协同危害。在生态环境方面，大气污染会破坏植被生长，降低植物光合作用效率，而土壤污染

会破坏土壤肥力，影响植物根系发育，二者协同作用，会导致农作物减产、植被退化，破坏生态系统平衡；大气污染会导致酸雨形成，酸雨沉降到土壤中，会酸化土壤，破坏土壤理化性质，加剧土壤污染，而土壤污染会导致土壤中污染物迁移到地下水，污染水资源，进而影响大气湿度与降水质量，形成协同污染危害。

在人体健康方面，大气污染物可通过呼吸作用进入人体，危害呼吸系统、心血管系统、神经系统等，土壤污染物可通过农作物吸收、地下水渗透等方式，进入人体食物链，危害人体消化系统、免疫系统等，二者协同作用，会大幅增加人体患病风险，加剧健康危害。例如，大气中的重金属污染物与土壤中的重金属污染物，会通过不同途径进入人体，协同累积，对人体肾脏、肝脏等器官造成严重损害；大气中的挥发性有机物与土壤中的挥发性有机物，会协同作用，增加致癌、致畸、致突变的风险。这种危害的协同关联性，使得大气与土壤污染的防控必须协同推进，才能有效降低污染危害。

大气与土壤污染作为当前突出的环境问题，其核心定义、污染物分类与研究边界具有明确的界定，二者分别呈现出独特的环境特征，大气污染的流动性、扩散性、跨区域性与土壤污染的隐蔽性、累积性、难降解性形成鲜明对比，环境行为也存在显著差异。同时，大气与土壤污染并非相互独立，而是通过污染物双向迁移、污染成因协同、污染危害协同形成了紧密的关联性，这种关联性是二者交互作用的基础，也是研究二者协同关系的核心前提。

第二节 污染物的环境介质迁移转化规律

污染物进入环境后，并非固定于单一介质中，而是在大气、土壤、水等多环境介质间不断迁移、转化，形成复杂的环境循环过程。这种迁移转化行为不仅决定了污染物的环境分布、危害范围与持续时间，更影响着污染防控与修复治理的成效。梳理污染物在多介质中的迁移路径与核心过程，剖析不同介质中的转化机制及影响因素，聚焦大气-土壤界面的物质交换逻辑，是深入理解污染物环境行为、开展大气与土壤污染交互研究的核心基础，对制定科学精准的污染防控策略、保障生态环境安全具有重要的理论与实践价值。

一、污染物在多环境介质中的迁移路径与核心过程

环境介质是污染物迁移的载体，大气、土壤、水作为最主要的三大环境介质，通过物质循环形成紧密关联，污染物在其间的迁移呈现出多路径、多过程的特征。不同类型污染物的迁移路径存在差异，但均遵循“介质交换、过程递进”的核心逻辑，其迁移过程主要依赖挥发、沉降、渗透、吸附等关键环节，共同构成污染物的多介质迁移体系。

环境介质组合	核心迁移路径	主要迁移过程	典型污染物
大气→土壤	大气污染物→沉降→土壤表层→土壤深层	干沉降、湿沉降、吸附	颗粒物、重金属、二氧化硫、氮氧化物
土壤→大气	土壤污染物→挥发 / 扬尘→大气环境	挥发、扬尘、解吸	挥发性有机物、农药、重金属颗粒物
土壤→水	土壤污染物→渗透→地下水 / 地表水	渗透、淋溶、解吸	重金属、硝酸盐、可溶性有机物
水→土壤	地表水 / 地下水污染物→吸附 / 沉积→土壤	吸附、沉积、截留	悬浮颗粒物、重金属、有机物
大气→水	大气污染物→沉降→地表水 / 地下水	湿沉降、干沉降、溶解	二氧化硫、氮氧化物、颗粒物

（一）污染物的多介质迁移路径梳理

污染物的多介质迁移路径以“源介质→中间介质→目标介质”为核心脉络，形成闭环式迁移循环，不同路径的迁移强度与速率受污染物性质、介质特性及环境条件影响。大气作为流动性最强的介质，是污染物跨区域、跨介质迁移的核心载体，大气中的污染物可通过沉降作用进入土壤与水体，成为土壤与水体污染的重要来源；土壤作为污染物的“储存库”，其污染物可通过渗透进入地下水，通过挥发、扬尘进入大气，实现与水、大气介质的交换；水体中的污染物可通过蒸发进入大气，通过沉积、吸附进入土壤，形成多介质协同迁移格局。

从具体路径来看，工业排放的重金属颗粒物、挥发性有机物等污染物，首先进入大气环境，一部分通过干沉降、湿沉降（降雨、降雪）沉降至土壤表层，另一部分通过大气环流迁移至其他区域，再沉降到土壤或水体中；土壤中的重金属、农药等污染物，一部分通过土壤孔隙渗透至地下水，污染水资源，另一部分通过挥发作用进入大气，再次参与大气循环；水体中的悬浮颗粒物、可溶性污染物，一部分通过沉积作用附着于水底沉积物，逐步转化为土壤污染物，另一部分通过

蒸发进入大气，或通过地表径流迁移至其他区域土壤，完成多介质迁移过程。

（二）污染物迁移的核心过程解析

污染物在多介质中的迁移依赖于挥发、沉降、渗透、吸附四大核心过程，这些过程相互关联、相互影响，共同推动污染物的介质交换，不同过程的作用机制与适用场景存在显著差异。挥发是污染物从液态或固态向气态转化并进入大气的过程，主要适用于挥发性较强的污染物，如挥发性有机物、农药、部分重金属（汞）等，挥发速率受温度、湿度、气压及污染物浓度影响，温度越高、湿度越大、气压越低，污染物挥发速率越快，越容易进入大气环境。

沉降是污染物从大气向土壤、水体迁移的核心过程，分为干沉降与湿沉降两类。干沉降是指大气中的污染物（如颗粒物、气态污染物）直接沉降于土壤、水体表面，无需借助降水，其沉降速率受污染物粒径、风速、地表粗糙度影响，颗粒物粒径越大、风速越小，干沉降速率越快；湿沉降是指大气中的污染物随降雨、降雪等降水形式沉降于地表，是大气污染物向土壤、水体迁移的主要途径，沉降量与降水量、污染物浓度密切相关，降水量越大、污染物浓度越高，湿沉降量越大。

渗透是污染物从土壤向地下水、地表水迁移的主要过程，指污染物随土壤水分沿土壤孔隙向下或向周边迁移，渗透速率受土壤质地、土壤含水量、污染物溶解性影响，土壤质地越疏松、含水量越高、污染物溶解性越强，渗透速率越快，污染物越容易进入地下水，造成地下水污染。吸附是污染物在介质表面的附着过程，是污染物迁移过程中的重要环节，土壤、水体悬浮物、大气颗粒物均具有一定的吸附能力，可吸附污染物并降低其迁移能力，吸附效果受介质表面积、污染物性质、环境 pH 值影响，介质表面积越大、污染物吸附性越强，吸附效果越显著。

（三）不同污染物迁移路径的差异特征

不同类型污染物的理化性质差异，导致其迁移路径与迁移强度存在显著差异，重金属、有机物、颗粒物三类核心污染物的迁移特征尤为明显。重金属污染物因密度大、挥发性较弱，其迁移主要以土壤→水、大气→土壤为主，大气中的重金属主要通过沉降进入土壤，土壤中的重金属主要通过渗透进入地下水，迁移速率缓慢，但累积性强，一旦进入土壤或水体，难以通过自然过程迁移消散，长期危害生态环境。

有机物污染物因挥发性、溶解性差异较大，迁移路径呈现多样化特征，挥发性有机物（如苯、甲苯）主要以大气→土壤、土壤→大气迁移为主，通过挥发与

沉降实现介质交换；半挥发性有机物、持久性有机污染物（如多环芳烃、滴滴涕）挥发性较弱，主要以土壤→水、大气→土壤迁移为主，易在土壤中吸附累积，也可通过渗透进入地下水；可溶性有机物则主要以土壤→水、水→土壤迁移为主，迁移速率较快，易造成水体与土壤的协同污染。颗粒物污染物主要以大气为迁移载体，通过大气流动实现跨区域迁移，再通过沉降作用进入土壤与水体，其迁移路径短、速率快，受气象条件影响显著，是大气污染向土壤、水体扩散的主要载体。

二、污染物在不同介质中的转化机制及影响因素

污染物在迁移过程中，会在不同环境介质中发生一系列转化反应，改变其理化性质、毒性及环境行为，这种转化过程是污染物环境归趋的核心环节。污染物的转化机制主要分为化学转化、生物转化、光转化三类，不同介质中的转化机制存在差异，且转化效率受温度、pH 值、微生物等多种因素影响，深入剖析转化机制与影响因素，能够精准掌握污染物的环境行为规律。

转化机制类型	核心反应原理	主要发生介质	典型影响因素
化学转化	氧化还原、水解、聚合、中和等化学反应	大气、土壤、水	温度、pH 值、污染物浓度、介质成分
生物转化	微生物代谢作用，将污染物分解或转化为无害物质	土壤、水	微生物种类与数量、温度、湿度、pH 值
光转化	光照作用下，污染物发生光解、光氧化反应	大气、水体表层	光照强度、光照时间、污染物光敏性

（一）污染物的核心转化机制

化学转化是污染物在环境中最普遍的转化机制，指污染物在化学作用下发生氧化还原、水解、聚合、中和等反应，改变其化学结构与理化性质，分为氧化还原转化、水解转化、聚合转化三类。氧化还原转化是最主要的化学转化形式，污染物在氧化剂（如氧气、过氧化氢）或还原剂的作用下，发生电子转移，改变其价态与毒性，例如，土壤中的 Cr(VI) 在还原性微生物与有机质的作用下，被还原为毒性更低的 Cr(Ⅲ)；大气中的二氧化硫在氧气与水的作用下，被氧化为硫酸，形成酸雨。

生物转化是污染物在微生物的代谢作用下发生的转化反应，是污染物降解的重要途径，主要发生在土壤与水体介质中，微生物通过分泌酶类，将复杂污染物分解为简单无害的物质，或转化为毒性较低的中间产物。例如，土壤中的微生物

可将有机农药分解为二氧化碳、水等无害物质，将重金属离子转化为稳定的化合物，降低其迁移能力与毒性；水体中的微生物可降解水中的挥发性有机物、石油类污染物，缓解水体污染。生物转化具有高效、环保、针对性强的特点，是污染修复的核心技术依据。

光转化是污染物在光照作用下发生的转化反应，主要发生在大气与水体表层，污染物吸收光能后，发生光解、光氧化反应，改变其化学结构与毒性。例如，大气中的氮氧化物在紫外线照射下，发生光解反应，生成臭氧与自由基，加剧光化学烟雾污染；水体表层的持久性有机污染物在阳光照射下，发生光解反应，分解为毒性较低的中间产物，部分可完全降解为无害物质。光转化的效率与光照强度、光照时间、污染物的光敏性密切相关，光敏性越强、光照越充足，转化效率越高。

（二）不同介质中的转化机制差异

大气、土壤、水三种介质的理化性质、环境条件存在本质差异，导致污染物在不同介质中的转化机制侧重点不同，转化效率与产物也存在显著差异。大气介质中，光转化与化学转化是主要转化形式，大气中的光照充足、存在大量氧化剂（如氧气、臭氧），污染物易发生光解与氧化还原反应，转化速率快，且转化产物多为气态污染物，部分会进一步参与大气化学反应，加剧大气污染；例如，大气中的挥发性有机物在光照与臭氧的作用下，发生光氧化反应，生成醛、酮等有害物质，影响大气环境质量。

土壤介质中，生物转化与化学转化是主要转化形式，土壤中含有大量微生物（细菌、真菌、放线菌等），且富含有机质、矿物质，为生物转化与化学转化提供了良好条件。土壤中的污染物主要通过微生物代谢实现降解，同时通过氧化还原、水解等化学反应改变其形态，转化产物多被土壤吸附固定，降低其迁移能力；例如，土壤中的有机农药在微生物的作用下发生水解与降解反应，转化为无害的小分子物质，重金属则通过化学沉淀、吸附等反应，固定在土壤中，减少其向地下水与大气迁移。

水体介质中，生物转化、化学转化与光转化均有发生，表层水体以光转化与化学转化为主，深层水体以生物转化与化学转化为主。水体中的微生物、溶解氧、pH 值等因素，共同影响污染物的转化效率，例如，水体中的石油类污染物，在微生物的作用下发生降解反应，在氧化作用下发生氧化分解，在光照作用下发生光解反应，最终分解为无害物质；重金属在水体中通过氧化还原、沉淀、吸附等

化学反应，改变其形态，部分会沉积于水底沉积物中，部分会被水体悬浮物吸附。

（三）影响污染物转化效率的关键因素

污染物的转化效率受多种环境因素影响，核心因素包括温度、pH 值、微生物、光照强度、介质成分等，这些因素相互作用，共同决定了污染物的转化速率与转化产物。温度是影响转化效率的核心因素，温度升高可加快化学反应速率，促进微生物代谢活动，提升生物转化与化学转化效率；例如，在土壤中，温度在 20-30℃时，微生物活性最强，有机污染物的降解速率最快，温度过低或过高，都会抑制微生物活性，降低转化效率。

pH 值主要影响化学转化与生物转化效率，不同转化反应对 pH 值有特定要求，土壤与水体的 pH 值会改变污染物的形态与微生物的活性。例如，酸性条件下，重金属离子的活性增强，易发生氧化还原反应，而碱性条件下，重金属易形成沉淀，降低其活性；微生物的生长繁殖也需要适宜的 pH 值，中性或弱碱性环境更有利于微生物活性的发挥，提升生物转化效率。

微生物是影响生物转化效率的关键因素，微生物的种类、数量直接决定了污染物的降解速率与降解程度，土壤与水体中微生物种类越丰富、数量越多，生物转化效率越高。例如，土壤中富含降解有机污染物的微生物，可快速降解农药、石油类污染物，而贫瘠土壤中微生物数量少，生物转化效率较低。此外，光照强度主要影响光转化效率，光照越强、光照时间越长，光转化速率越快；介质成分（如有机质、矿物质）可通过吸附、催化作用，影响化学转化与生物转化效率，提升污染物的转化速率。

三、大气 – 土壤界面的污染物迁移转化特征

大气 – 土壤界面是污染物多介质迁移转化的核心枢纽，也是大气污染与土壤污染交互作用的关键区域，污染物在该界面的迁移转化行为，直接决定了大气与土壤的污染程度及相互影响强度。聚焦大气 – 土壤界面的污染物迁移转化特征，明确二者之间的物质交换逻辑，解析界面迁移转化的核心机制，能够为后续研究大气与土壤污染的交互影响奠定坚实基础。

（一）大气 – 土壤界面的污染物迁移特征

大气 – 土壤界面的污染物迁移呈现“双向流动、动态平衡”的特征，主要分为大气向土壤的迁移与土壤向大气的迁移两个方向，二者相互作用，形成污染

物的界面循环。大气向土壤的迁移是最主要的迁移方向，大气中的污染物（颗粒物、重金属、有机物、气态污染物等），通过干沉降与湿沉降两种方式，持续向土壤表层迁移，其中湿沉降是大气污染物向土壤迁移的主要途径，占总迁移量的60%—80%，尤其是在降雨充沛的区域，湿沉降对土壤污染的影响更为显著。

大气污染物沉降至土壤表层后，一部分被土壤颗粒吸附固定，成为土壤污染物的重要来源；一部分通过土壤孔隙渗透至土壤深层，参与土壤中的物质循环；还有一部分在土壤表面发生转化反应，改变其形态后再进行迁移。土壤向大气的迁移是次要迁移方向，主要通过挥发与扬尘两种过程实现，土壤中的挥发性污染物（如挥发性有机物、农药、汞等），通过挥发作用进入大气，土壤中的颗粒物（含重金属、有机物等污染物），通过风力扬尘作用进入大气，成为大气颗粒物污染物的重要来源，尤其在干旱、多风的区域，扬尘迁移的强度显著提升。

大气—土壤界面的迁移强度受气象条件、土壤性质、污染物性质影响显著，风速越大、降水量越多，大气向土壤的沉降迁移越强；土壤质地越疏松、含水量越低，土壤向大气的挥发与扬尘迁移越强；污染物挥发性越强、粒径越小，界面迁移速率越快，越容易在大气与土壤之间实现双向流动。

（二）大气—土壤界面的污染物转化特征

大气—土壤界面的污染物转化是连接大气迁移与土壤迁移的关键环节，污染物在界面处会同时发生化学转化、生物转化与光转化，转化效率高于单一介质，且转化产物会直接影响污染物的后续迁移行为。大气中的污染物沉降至土壤表层后，会在土壤微生物、有机质、矿物质的作用下，发生快速的生物转化与化学转化，例如，大气中的二氧化硫沉降至土壤表面后，与土壤中的碱性物质发生中和反应，生成硫酸盐，被土壤吸附固定；大气中的挥发性有机物沉降至土壤表层后，被土壤微生物快速降解，转化为无害物质。

土壤中的污染物挥发进入大气前，会在土壤表层发生初步转化，例如，土壤中的有机农药在光照射下发生光解反应，生成挥发性的中间产物，再通过挥发作用进入大气；土壤中的重金属在氧化还原反应的作用下，改变价态，提升其挥发性，再通过挥发进入大气。此外，大气—土壤界面的温度、湿度、pH值等环境条件，会协同影响污染物的转化效率，界面处的温度波动较大、湿度适宜，有利于微生物活性的发挥与化学反应的进行，提升转化效率。值得注意的是，大气—土壤界面的转化过程可能会加剧污染危害，例如，大气中的氮氧化物与二氧化硫沉降至

土壤表面后，发生化学转化生成酸性物质，会酸化土壤，破坏土壤理化性质，同时酸性物质还会促进土壤中重金属的活化，提升其迁移能力，加剧土壤与地下水污染；土壤中的挥发性有机物挥发进入大气后，在光照作用下发生光转化，生成毒性更强的污染物，加剧大气污染。

（三）大气－土壤界面的物质交换逻辑

大气－土壤界面的物质交换以“污染物迁移－转化－再迁移”为核心逻辑，形成闭环式物质交换体系，其本质是大气与土壤之间的污染物、能量与物质的双向传递。大气中的污染物通过沉降作用进入土壤，完成“大气→土壤”的物质输入，土壤通过吸附、转化等过程，对污染物进行截留与处理，一部分污染物被固定在土壤中，一部分污染物发生转化后，通过挥发、渗透等方式，再次进入大气或水体，完成“土壤→大气”的物质输出，形成物质交换的动态平衡。

从物质交换的细节来看，大气向土壤的物质输入主要包括颗粒物沉降、气态污染物沉降、降水携带污染物沉降，这些污染物进入土壤后，与土壤中的有机质、矿物质、微生物发生相互作用，完成转化与固定；土壤向大气的物质输出主要包括挥发性污染物挥发、土壤扬尘排放，这些物质进入大气后，参与大气循环，部分会再次沉降至土壤，形成循环。这种物质交换逻辑，使得大气污染与土壤污染相互影响、相互加剧，大气污染会通过物质输入导致土壤污染，土壤污染会通过物质输出加剧大气污染，形成协同污染效应。此外，大气－土壤界面的物质交换还受到人类活动的影响，工业排放、农业活动、交通运输等人类活动，会增加大气与土壤中的污染物浓度，加快界面物质交换速率，打破物质交换的动态平衡，加剧大气与土壤的污染程度；而污染防控措施（如大气治理、土壤修复），则可以减少污染物的界面迁移，缓解协同污染效应，推动物质交换恢复平衡。

污染物在大气、土壤、水等多环境介质中遵循特定的迁移路径，挥发、沉降、渗透、吸附四大核心过程推动污染物实现介质交换，不同类型污染物的迁移特征存在显著差异。污染物在不同介质中的转化主要依赖化学转化、生物转化、光转化三大机制，转化效率受温度、pH 值、微生物等关键因素影响，且不同介质中的转化机制各有侧重。大气－土壤界面作为污染物多介质迁移转化的核心枢纽，呈现双向迁移、动态转化的特征，其物质交换逻辑为大气与土壤污染的交互影响提供了重要支撑。

第三节 大气－土壤系统交互作用研究的意义与框架

大气与土壤作为地球生态系统中紧密关联的两大环境介质，二者通过污染物的迁移、转化与物质交换，形成相互影响、相互制约的有机整体，构成大气－土壤复合系统。当前，单一介质的污染研究已难以满足复杂环境问题防控的需求，聚焦大气－土壤系统交互作用，深入探究二者的内在关联与作用机制，明确研究的理论与实践价值，搭建科学系统的研究框架，不仅能够完善多介质污染研究体系，更能为复合污染治理提供科学指引，对推动生态环境高质量发展、保障人体健康具有不可替代的重要意义。

一、大气－土壤系统交互作用研究的理论意义

大气－土壤系统交互作用研究的理论意义，核心在于突破单一介质污染研究的局限，填补多介质交互研究的空白，完善环境污染研究的理论体系，推动环境科学领域的理论创新与发展，为后续相关研究提供坚实的理论支撑与思路指引。

（一）填补单一介质污染研究的固有不足

长期以来，国内外环境污染研究多聚焦于单一介质，大气污染研究与土壤污染研究相互独立，缺乏对二者交互作用的系统探究，导致研究存在明显的局限性。单一介质研究仅关注污染物在某一介质中的来源、迁移、转化规律，忽视了污染物在大气与土壤之间的双向迁移与协同影响，无法全面揭示污染的形成机制与环境归趋。例如，传统大气污染研究多关注大气污染物的排放与扩散，却忽视了土壤中污染物挥发对大气环境的贡献；传统土壤污染研究多聚焦土壤污染物的累积与修复，却忽视了大气沉降对土壤污染的输入作用。大气－土壤系统交互作用研究，打破了单一介质研究的壁垒，将大气与土壤作为一个有机整体，探究二者之间的物质交换、能量传递与相互作用机制，有效填补了单一介质研究的空白，让污染研究更具系统性与完整性。

（二）完善多介质污染研究体系

多介质污染研究是当前环境科学领域的核心研究方向之一，其核心是探究污染物在大气、土壤、水等多介质间的迁移转化规律与协同作用机制。大气－土壤系统作为多介质污染系统的核心组成部分，其交互作用研究是多介质污染研究的重要内容，能够推动多介质污染研究体系的完善与深化。通过系统研究大气－土

壤系统的交互作用，可明确污染物在两大介质间的迁移路径、转化机制与影响因素，建立污染物多介质迁移转化的理论模型，丰富多介质污染研究的理论内涵；同时，能够串联起大气、土壤及周边介质的污染研究，形成“源－迁移－转化－归趋”的完整研究链条，推动多介质污染研究从分散化向系统化、一体化发展，完善环境科学的理论体系。

（三）推动环境科学理论的创新发展

大气－土壤系统交互作用研究，融合了环境化学、环境生态学、土壤科学、大气科学等多学科理论与方法，能够推动多学科的交叉融合，催生新的研究思路与理论成果，促进环境科学理论的创新发展。例如，通过探究大气－土壤界面的污染物转化机制，可深化对环境化学反应、微生物代谢作用的理解，丰富环境化学与环境微生物学的理论；通过分析大气－土壤系统的协同污染效应，可创新复合污染的理论认知，完善复合污染的形成与演化理论；通过搭建大气－土壤交互作用的研究模型，可推动环境模拟与预测理论的发展，为后续多介质污染模拟与预测提供理论支撑。这种多学科交叉的研究模式，能够打破传统学科的研究边界，推动环境科学理论向更深入、更系统的方向发展。

二、大气－土壤系统交互作用研究的实践意义

大气－土壤系统交互作用研究不仅具有重要的理论价值，更具有鲜明的实践导向，其研究成果能够直接服务于复合污染治理、生态环境保护与人体健康保障，为解决实际环境问题提供科学依据，彰显环境研究的现实价值。

（一）为复合污染治理提供精准指引

当前，环境污染已从单一介质污染向复合污染转变，大气－土壤复合污染成为我国乃至全球突出的环境问题，传统单一介质的治理模式已难以达到理想效果。大气－土壤系统交互作用研究，能够明确大气与土壤污染之间的相互影响机制，识别复合污染的关键来源与核心迁移路径，为复合污染治理提供精准指引。例如，通过研究大气沉降对土壤污染的贡献，可针对性地制定大气污染防治措施，减少土壤污染的输入；通过探究土壤污染物挥发对大气环境的影响，可优化土壤污染修复方案，避免修复过程中二次大气污染的产生；通过分析大气－土壤复合污染的演化规律，可制定协同治理策略，实现大气与土壤污染的同步管控，提升污染治理的效率与效果，破解复合污染治理难题。

（二）助力生态环境保护与生态系统修复

大气与土壤是生态系统的核心组成部分，二者的健康状况直接决定了生态系统的稳定与功能。大气－土壤系统交互作用研究，能够揭示交互作用对生态系统的影响，为生态环境保护与生态系统修复提供科学支撑。例如，通过研究大气沉降导致的土壤酸化、重金属累积等问题，可制定土壤改良与修复措施，恢复土壤肥力与生态功能；通过探究土壤污染物挥发对大气生态系统的影响，可优化大气环境质量管控方案，保护大气生态平衡；通过分析大气－土壤系统交互作用对植被生长、微生物群落的影响，可制定生态修复策略，推动受损生态系统的恢复与重建，提升生态系统的稳定性与服务功能，实现生态环境保护的可持续发展。

（三）保障人体健康与公共卫生安全

大气与土壤污染均会直接或间接危害人体健康，大气－土壤系统的交互作用会加剧这种健康风险，而相关研究能够为人体健康保障提供重要支撑，维护公共卫生安全。大气中的污染物可通过呼吸作用进入人体，土壤中的污染物可通过食物链、地下水等途径进入人体，二者的协同作用会大幅增加人体患病风险。通过大气－土壤系统交互作用研究，可明确污染物在两大介质间的迁移转化对人体健康的影响路径，识别高健康风险区域与关键污染物；同时，可基于研究成果，制定科学的环境质量标准与污染防控措施，减少污染物对人体的暴露风险，保障农产品质量与饮用水安全，从源头降低大气－土壤复合污染对人体健康的危害，维护公共卫生安全。

三、大气－土壤系统交互作用的研究框架

搭建科学、系统的大气－土壤系统交互作用研究框架，是统领全书研究逻辑、明确研究方向与技术路径的核心前提。该研究框架以“理论支撑－核心内容－技术路径”为核心脉络，明确研究思路、聚焦研究重点、完善技术方法，确保研究工作有序开展，实现研究目标与研究价值的统一。

（一）研究思路与核心导向

大气－土壤系统交互作用研究的核心思路，是坚持“系统思维、问题导向、协同发力”，以大气－土壤系统为研究对象，以污染物的双向迁移、转化与交互作用为研究核心，以解决复合污染治理、生态环境保护中的实际问题为导向，融合多学科理论与方法，开展系统性、针对性的研究。研究坚持“理论探究与实践

应用相结合、宏观把握与微观解析相结合、定性分析与定量研究相结合”的原则，既要深入探究大气－土壤交互作用的内在机制，完善理论体系，也要聚焦实际环境问题，推动研究成果的转化应用。核心导向是实现“三个明确”：明确大气－土壤系统交互作用的核心机制，明确交互作用对复合污染、生态环境、人体健康的影响规律，明确基于交互作用的协同防控与修复技术路径，为后续研究提供清晰的思路指引。

（二）研究核心内容

研究核心内容围绕大气－土壤系统交互作用的“机制－影响－管控”展开，分为三大模块，各模块相互关联、层层递进，构成完整的研究体系。第一模块是大气－土壤系统交互作用的机制研究，重点探究污染物在大气－土壤界面的双向迁移机制（沉降、挥发、扬尘等）、转化机制（化学转化、生物转化、光转化等），分析交互作用的影响因素（气象条件、土壤性质、污染物性质、人类活动等），明确交互作用的内在规律与驱动机制，这是整个研究的基础。

第二模块是大气－土壤系统交互作用的影响研究，聚焦交互作用对复合污染演化、生态系统功能、人体健康的影响，分析交互作用如何加剧大气与土壤复合污染，探究其对土壤肥力、植被生长、微生物群落的影响，识别交互作用下污染物对人体健康的暴露路径与风险，明确交互作用的现实影响与危害程度。第三模块是基于交互作用的协同管控与修复研究，结合前两模块的研究成果，制定大气－土壤复合污染的协同防控策略，优化土壤修复与大气治理技术，建立交互作用下的污染风险评估与预警体系，推动研究成果的实际应用，实现大气与土壤污染的协同管控与生态环境的持续改善。

（三）研究技术路径

研究技术路径遵循“调研监测－理论分析－模型构建－验证应用”的核心流程，结合多学科技术方法，确保研究的科学性、准确性与实用性。首先，开展实地调研与监测工作，选取典型研究区域，建立大气与土壤环境监测网络，系统监测大气、土壤中污染物的浓度、分布及变化规律，收集气象条件、土壤性质、人类活动等相关数据，为后续研究提供基础数据支撑；其次，基于监测数据，运用环境化学、土壤科学、大气科学等理论与方法，开展定性分析与定量分析，深入解析大气－土壤系统交互作用的机制与影响规律；再次，搭建大气－土壤交互作用的数学模型，模拟污染物在两大介质间的迁移转化过程，预测交互作用的演化趋势

与污染风险，为污染防控提供科学依据；最后，通过实地验证与案例应用，检验研究成果的科学性与可行性，优化协同管控与修复技术方案，推动研究成果转化为实际应用，实现理论研究与实践应用的有机统一。

大气－土壤系统交互作用研究具有深刻的理论意义与鲜明的实践价值，既能填补单一介质污染研究的不足，完善多介质污染研究体系，推动环境科学理论的创新发展，又能为复合污染治理提供精准指引，助力生态环境保护与人体健康保障。搭建科学系统的研究框架，明确研究思路、核心内容与技术路径，能够统领全书的研究逻辑，确保研究工作有序推进、目标落地。开展大气－土壤系统交互作用研究，是应对复合污染挑战、推动生态环境高质量发展的必然要求，也是环境科学研究向系统化、一体化发展的重要方向，其研究成果将为我国乃至全球大气与土壤污染协同防控、生态系统修复提供重要的科学支撑，为实现人与自然和谐共生奠定坚实基础。

第四节 本书的研究目标与结构安排

在大气－土壤复合污染日益突出、单一介质污染研究难以满足实际需求的背景下，明确本书的研究目标、梳理章节逻辑脉络、界定研究重点与创新方向，是统领全书研究工作、确保研究有序推进、实现研究价值的核心前提。本书立足大气－土壤系统交互作用的核心研究视角，围绕复合污染的关键科学问题与实际防控需求，明确核心研究目标，搭建系统的章节结构，凸显研究重点与创新点，为后续各章节的深入研究提供清晰指引，推动研究成果为大气－土壤复合污染治理、生态环境保护提供科学支撑。

一、本书的核心研究目标

本书的核心研究目标，紧扣大气－土壤系统交互作用的核心科学问题，立足理论探究与实践应用的双重导向，聚焦大气与土壤污染的交互机制、复合生态效应及协同修复原理，最终提出可落地、可推广的技术与政策建议，实现“理论突破、机制明晰、技术可行、政策适配”的研究愿景，为大气－土壤复合污染协同防控与生态环境高质量发展提供支撑。

（一）明晰大气与土壤污染的交互机制

深入探究大气与土壤污染之间的双向交互机制,是本书的核心研究目标之一,也是开展后续研究的基础。重点厘清污染物在大气-土壤界面的迁移路径与转化规律,明确大气沉降对土壤污染的输入机制、土壤污染物挥发与扬尘对大气污染的贡献机制,解析不同类型污染物(重金属、有机物、颗粒物等)在两大介质间交互迁移的内在驱动因素,揭示气象条件、土壤性质、人类活动等因素对交互机制的调控作用。通过系统研究,打破单一介质研究的局限,明确大气与土壤污染之间的相互影响逻辑,建立科学的交互作用理论模型,填补大气-土壤复合污染交互机制研究的薄弱环节,完善多介质污染交互理论体系。

（二）揭示大气-土壤复合污染的生态效应

大气-土壤复合污染的生态效应是研究的重要落脚点,核心目标是系统揭示交互作用下复合污染对生态系统的综合影响,明确其危害程度与作用路径。重点探究复合污染对土壤生态系统的影响,包括对土壤理化性质、土壤微生物群落结构、土壤肥力的破坏作用,分析复合污染对植被生长、发育及生理代谢的影响,明确植被对复合污染的响应机制;同时,探究复合污染通过大气、土壤、食物链等路径对生态系统稳定性、生物多样性的影响,识别复合污染引发的生态风险,建立复合生态效应的评价体系,为生态环境修复与风险管控提供科学依据。

（三）研发协同修复技术并提出政策建议

立足实践需求,推动研究成果的转化应用,是本书研究的核心价值所在。重点围绕大气-土壤复合污染的治理需求,研发适配不同污染场景、高效低成本的协同修复技术,明确协同修复的原理、工艺与操作流程,优化修复技术参数,验证技术的可行性与实用性,解决传统单一修复技术效果不佳、易产生二次污染的问题。同时,结合复合污染治理的实际困境,分析当前大气与土壤污染防治政策的不足,基于研究成果提出针对性、可落地的政策建议,包括协同防控机制构建、监管体系完善、技术推广策略、资金保障措施等,推动形成“技术支撑+政策保障”的复合污染治理格局。

二、本书的章节结构安排

本书遵循“概述—交互机制—生态效应—修复原理—实践应用”的核心研究主线,围绕大气-土壤系统交互作用的核心科学问题与实践需求,合理划分章节,

明确各章节的核心研究内容与内在关联，形成逻辑清晰、层层递进、系统完整的章节结构，确保全书研究脉络连贯，重点突出、层次分明。

（一）章节逻辑脉络梳理

本书章节逻辑脉络以“基础铺垫—核心探究—实践应用”为递进关系，从大气与土壤污染的基础概述入手，逐步深入探究交互机制与生态效应，进而聚焦修复技术与政策建议，形成完整的研究链条。首先，通过基础概述章节，明确大气与土壤污染的基本概念、特征及污染物迁移转化规律，搭建研究的理论基础；其次，聚焦核心研究内容，深入解析大气—土壤系统的交互机制、复合生态效应，破解复合污染的关键科学问题；最后，立足实践应用，研发协同修复技术、提出政策建议，推动研究成果落地，实现理论与实践应用的有机统一。各章节相互关联、相互支撑，前一章节为后一章节提供理论与方法支撑，后一章节是前一章节研究内容的深化与延伸，共同构成完整的研究体系。

（二）各章节核心研究内容

本书共分为八章，各章节核心研究内容围绕研究主线展开，重点突出、各有侧重。第一章为大气与土壤污染概述，作为全书的基础章节，主要阐述大气与土壤污染的基本概念、特征，污染物在多环境介质中的迁移转化规律，以及大气—土壤系统交互作用研究的意义与框架，搭建全书研究的理论基础与逻辑框架，明确研究的核心方向。第二章为大气—土壤系统污染物交互迁移机制，重点探究污染物在大气—土壤界面的双向迁移路径、核心过程，解析不同类型污染物的迁移特征，分析气象条件、土壤性质等因素对迁移过程的影响，建立污染物交互迁移的理论模型。

第三章为大气—土壤系统污染物交互转化机制，聚焦污染物在大气—土壤界面的化学转化、生物转化、光转化过程，明确不同转化机制的作用原理与影响因素，探究交互转化对污染物毒性与环境行为的影响，完善交互转化的理论体系。第四章为大气—土壤复合污染的生态效应，系统研究复合污染对土壤生态系统、植被生长、生物多样性的影响，识别复合污染的生态风险，建立生态效应评价指标体系，明确复合污染的危害程度与作用路径。第五章为大气—土壤复合污染协同修复原理，阐述协同修复的核心理念与基本原则，探究不同协同修复技术的作用原理，分析修复过程中的影响因素，为修复技术研发提供理论支撑。

第六章为大气—土壤复合污染协同修复技术研发与应用，研发适配不同污

染场景的协同修复技术（如物理－化学协同修复、生物－化学协同修复等），优化技术参数，通过案例应用验证技术的可行性与有效性，总结技术应用经验与注意事项。第七章为大气－土壤复合污染协同防控政策研究，分析当前我国大气与土壤污染防治政策的现状与不足，结合研究成果提出协同防控的政策建议，构建完善的协同防控机制与监管体系。第八章为结论与展望，总结全书的核心研究成果，梳理研究过程中存在的不足，展望未来的研究方向，为后续相关研究提供思路指引。

（三）章节内在关联与研究主线呈现

各章节之间存在紧密的内在关联，始终围绕“概述—交互机制—生态效应—修复原理—实践应用”的研究主线展开，形成层层递进、环环相扣的研究格局。第一章作为基础章节，为后续所有章节提供理论铺垫与研究框架，明确研究的核心背景与意义；第二章、第三章聚焦大气－土壤系统的交互机制，分别从迁移与转化两个维度，揭示大气与土壤污染之间的内在关联，是全书的核心研究章节，为后续生态效应与修复技术研究提供机制支撑；第四章基于交互机制研究，探究复合污染的生态效应，明确污染危害，为修复技术研发与政策制定提供现实依据；第五章、第六章围绕生态效应与实际治理需求，开展协同修复原理与技术研究，是研究成果转化的核心环节；第七章结合技术研究成果，提出协同防控政策建议，完善复合污染治理的保障体系；第八章总结全书成果、展望未来，形成完整的研究闭环。

整个章节结构始终贯穿“理论探究与实践应用相结合”的原则，既注重基础理论的深化，又聚焦实际问题的解决，确保研究主线清晰、逻辑连贯，实现从理论到实践、从机制到应用的完整覆盖，为大气－土壤复合污染研究提供系统的思路与方法。

三、本书的研究重点与创新方向

明确本书的研究重点与创新方向，界定研究范围与技术边界，是确保研究工作聚焦核心、突出特色、避免重复的关键，能够为后续各章节研究提供清晰指引，推动研究实现突破与创新，提升研究的理论价值与实践意义。

（一）研究重点

本书的研究重点聚焦三大核心领域，确保研究工作精准发力、重点突破。一

是大气-土壤系统污染物交互机制的精准解析,重点聚焦污染物在界面的双向迁移与转化过程,明确不同类型污染物的交互规律,揭示影响交互作用的关键因素,建立科学的交互机制模型,填补复合污染交互机制研究的薄弱环节。二是大气-土壤复合污染生态效应的系统评价,重点探究复合污染对土壤生态系统、植被、生物多样性的综合影响,建立科学的生态效应评价体系,识别高风险区域与关键污染物,为生态风险管控提供依据。三是高效可行的协同修复技术研发与政策适配,重点研发适配不同污染场景的协同修复技术,优化技术工艺,降低修复成本,验证技术的实用性;同时,结合我国污染治理的实际情况,提出针对性的协同防控政策建议,推动技术与政策的有机结合,提升复合污染治理的效率与效果。此外,研究重点还包括不同区域、不同污染类型的差异化治理策略,确保研究成果具有广泛的适用性与可推广性。

(二) 创新方向

本书的创新方向主要体现在三个方面,实现理论、技术与方法的多重突破。一是理论创新,打破单一介质污染研究的壁垒,构建大气-土壤系统交互作用的一体化理论框架,深化对污染物交互迁移、转化机制的理解,完善多介质复合污染理论体系;同时,创新复合生态效应的评价方法,建立兼顾科学性与实用性的评价指标体系,提升生态效应评价的精准度。二是技术创新,研发新型大气-土壤复合污染协同修复技术,突破传统单一修复技术的局限,实现不同修复技术的优化组合,提升修复效率、降低修复成本,解决二次污染问题;同时,优化修复技术参数,开发适配不同污染场景的差异化修复方案,增强技术的适用性。三是方法创新,融合多学科理论与技术方法,采用“实地监测-理论分析-模型模拟-案例验证”的综合研究方法,实现定性分析与定量研究的有机结合,提升研究的科学性与准确性;同时,创新政策研究方法,结合实证研究成果,提出可落地、可推广的协同防控政策,推动形成“技术支撑+政策保障”的复合污染治理新模式。

(三) 研究范围与技术边界界定

为确保研究工作聚焦核心、避免泛化,本书明确界定研究范围与技术边界。在研究范围上,聚焦大气与土壤两大环境介质,重点研究二者之间的交互作用及复合污染问题,兼顾与水体等其他介质的关联影响,但不展开深入探究;研究区域以我国典型大气-土壤复合污染区域为主(如工业集中区、农业产区、城市周边区域),兼顾不同气候、土壤类型的区域差异,确保研究成果的代表性与适用

性；污染物类型聚焦重金属、挥发性有机物、颗粒物等主要污染物，重点探究其交互迁移、转化规律与生态效应，不涉及放射性污染物等特殊污染物。

在技术边界上，协同修复技术主要聚焦物理、化学、生物及复合修复技术，重点研发适用于大气－土壤复合污染的协同修复工艺，不涉及极端环境下的特殊修复技术；政策建议主要围绕我国大气与土壤污染防治的现有政策体系，提出优化与完善建议，不涉及国际政策与跨境污染治理相关内容。通过明确研究范围与技术边界，确保研究工作聚焦核心、重点突出，为后续各章节研究提供清晰的指引，提升研究的针对性与实效性。

本书以大气－土壤复合污染治理的实际需求为导向，明确了核心研究目标，聚焦交互机制、复合生态效应及协同修复原理，致力于提出可落地的技术与政策建议，填补相关研究空白、完善理论体系、推动实践应用。通过科学合理的章节结构安排，梳理出“概述—交互机制—生态效应—修复原理—实践应用”的清晰研究主线，明确各章节的核心内容与内在关联，形成系统完整的研究体系。同时，界定了研究重点与创新方向，明确了研究范围与技术边界，为后续各章节的深入研究提供了清晰指引，确保研究工作有序推进、重点突破。

第二章 大气污染物的沉降过程与土壤污染源解析

第一节 干湿沉降的物理化学机制

大气污染物的沉降过程是大气与土壤界面物质交换的核心环节，也是大气污染物向土壤输入、引发土壤污染的主要途径。干沉降与湿沉降作为大气污染物沉降的两大主要形式，分别遵循不同的物理、化学作用规律，二者既存在显著差异，又具有协同作用，其沉降特征受区域环境、季节变化等多种因素影响。深入解析干湿沉降的物理化学机制，明确沉降过程中的关键影响因素，探究二者的差异与协同关系及分布规律，是揭示大气污染物向土壤迁移转化路径、解析土壤污染来源的重要基础，对后续开展大气-土壤复合污染防控具有重要的理论与实践价值。

一、大气污染物干沉降的物理机制

干沉降是大气污染物在无降水条件下，通过物理作用从大气中沉降至地表（土壤、植被、水体等）的过程，其核心驱动力源于物理作用，主要包括重力沉降与撞击沉降两种核心形式，沉降速率的大小直接决定了干沉降对土壤污染物输入的贡献程度，而污染物粒径与气象条件则是调控沉降速率的关键因素。

（一）干沉降的核心物理作用形式

重力沉降是干沉降最基础的物理机制，主要适用于粒径较大的大气颗粒物污染物，其核心原理是大气中的颗粒物受地球重力作用，克服大气阻力，缓慢沉降至地表。大气中的颗粒物污染物，无论其来源如何，都会在重力作用下产生向下的沉降趋势，粒径越大、密度越高的颗粒物，重力作用越显著，沉降速度越快，越容易从大气中分离并沉降至土壤表面。例如，工业排放的粗颗粒物、道路扬尘中的大粒径颗粒，多通过重力沉降的方式快速沉降，成为土壤表层颗粒物污染的重要来源。重力沉降的过程可通过斯托克斯定律进行描述，该定律明确了颗粒物沉降速度与粒径、密度及空气粘性系数之间的定量关系，为干沉降速率的计算提

供了理论依据。

撞击沉降是干沉降的另一重要物理机制，主要适用于粒径较小的颗粒物与气态污染物，其核心原理是大气中的污染物颗粒在大气湍流作用下，与地表物体（土壤颗粒、植被叶片等）发生碰撞、撞击，进而被地表物体捕获，完成沉降过程。与重力沉降不同，撞击沉降的发生依赖于大气湍流的推动，大气湍流强度越大，污染物颗粒的运动速度越快，与地表物体的碰撞概率越高，沉降效率也越高。此外，地表物体的表面特性也会影响撞击沉降效果，表面粗糙、孔隙度大的地表（如农田土壤、植被覆盖区），对污染物颗粒的捕获能力更强，撞击沉降效率更高；而表面光滑的地表（如水泥地面），捕获能力较弱，撞击沉降效率相对较低。同时，粒径小于0.1mm的艾根粒子，还会通过布朗运动扩散、互相碰撞凝集成较大颗粒，再通过撞击或重力作用完成沉降。

（二）沉降速率与污染物粒径的关联

污染物粒径是影响干沉降速率的核心内在因素，二者呈现显著的正相关关系，即污染物粒径越大，干沉降速率越快，沉降效率越高，反之则沉降速率越慢，污染物在大气中停留时间越长，迁移范围越广。根据颗粒物粒径的差异，可将大气颗粒物分为粗颗粒物与细颗粒物，二者的干沉降速率差异显著。粗颗粒物（粒径大于 $2.5\mu\text{m}$ ）的粒径较大、密度较高，重力作用主导其沉降过程，沉降速率通常在 $0.1\text{—}10\text{cm/s}$ 之间，能够在短时间内沉降于地表，主要影响周边区域的土壤环境。

细颗粒物（粒径小于等于 $2.5\mu\text{m}$ ）的粒径较小、质量较轻，重力作用较弱，主要依靠撞击沉降与扩散沉降完成沉降，沉降速率通常在 $0.001\text{—}0.1\text{cm/s}$ 之间，在大气中停留时间较长，可随大气环流实现跨区域迁移，其沉降范围更广，对大范围土壤环境均可能产生影响。此外，污染物粒径还会影响其撞击沉降效率，粒径适中的颗粒物（ $0.1\text{—}1\mu\text{m}$ ），在大气湍流作用下的运动活性最强，与地表物体的碰撞概率最高，撞击沉降效率也最高；而粒径过小的颗粒物，受布朗运动影响显著，碰撞概率较低，沉降效率相对较低。获取干沉降速度的方法主要有示踪法、梯度法和涡流相关法等，可通过多种仪器联合测量不同粒径颗粒物的沉降特征。

（三）沉降速率与气象条件的关联

气象条件是影响干沉降速率的重要外在因素，主要通过改变大气阻力、湍流强度等，间接调控干沉降速率，核心影响因素包括风速、温度、相对湿度等。风

速对干沉降速率的影响具有双重性,一方面,风速增大可增强大气湍流强度,推动污染物颗粒运动,提高撞击沉降效率,加快干沉降速率;另一方面,风速过大时,会产生强烈的气流扰动,阻碍污染物颗粒的沉降,甚至会已将已沉降于地表的污染物再次扬起,降低干沉降效率。通常情况下,中等风速(2—5m/s)更有利于干沉降的发生,既能保证一定的湍流强度,又不会产生过度扰动。

温度主要通过影响大气粘性系数与污染物颗粒的运动活性,调控干沉降速率。温度升高时,大气粘性系数增大,污染物颗粒受到的大气阻力增强,会降低重力沉降速率;同时,温度升高会增强大气湍流强度,提高撞击沉降效率,二者相互作用,最终使得干沉降速率在一定温度范围内呈现先升高后降低的趋势。相对湿度对干沉降速率的影响主要体现在对污染物颗粒特性的改变,相对湿度较高时,颗粒物表面会吸附水汽,导致颗粒粒径增大、密度升高,从而加快重力沉降速率;同时,湿润的颗粒物更容易被地表物体吸附,也能提高撞击沉降效率。此外,大气中的逆温现象会阻碍大气垂直运动,降低湍流强度,导致干沉降速率下降,使污染物在大气中累积,增加后续沉降量。

二、大气污染物湿沉降的化学机制

湿沉降是大气污染物在降水(降雨、降雪等)的作用下,通过溶解、化学反应等化学过程,随降水沉降于地表的过程,其核心是化学作用与物理过程的结合。湿沉降的发生不仅依赖于降水的物理冲刷作用,更取决于污染物与降水之间的溶解、反应过程,降水 pH 值、离子组成等因素直接影响湿沉降的效果,决定了大气污染物向土壤输入的形态与强度。

(一) 湿沉降的核心化学作用过程

溶解过程是湿沉降的基础化学过程,大气中的气态污染物(如二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物等)与颗粒物污染物,在降水过程中会与雨滴、雪粒发生接触,通过溶解作用进入降水体系,形成含污染物的水溶液,随降水沉降于地表。不同类型污染物的溶解能力存在显著差异,极性较强的气态污染物(如二氧化硫、氮氧化物),易溶于水,溶解效率较高,是湿沉降的主要污染物来源;而非极性的挥发性有机物、疏水性重金属颗粒物,溶解能力较弱,主要通过物理冲刷作用随降水沉降,溶解贡献较小。

化学反应过程是湿沉降的核心环节,也是影响污染物形态与毒性的关键过程。

进入降水体系的污染物，会与水中的其他物质发生一系列化学反应，改变污染物的化学形态，增强其沉降效果或毒性。例如，大气中的二氧化硫溶于水后，会发生水解反应生成亚硫酸，亚硫酸在空气中的氧气作用下进一步氧化生成硫酸，形成酸性降水；氮氧化物溶于水后，会生成硝酸与亚硝酸，同样会加剧降水的酸性。这些化学反应不仅改变了降水的性质，还会使污染物形成更易被土壤吸附的形态，增加土壤污染物的累积量。此外，大气中的氨作为唯一常见的气态碱，会与降水中的酸性物质发生中和反应，降低降水酸度，影响湿沉降的效果。

（二）降水 pH 值对湿沉降效果的影响

降水 pH 值是调控湿沉降效果的核心因素，主要通过影响污染物的溶解能力与化学反应速率，改变湿沉降的效率与污染物形态。正常情况下，未受污染的降水 pH 值约为 5.6，呈弱酸性，这是由于空气中的二氧化碳溶于水生成碳酸所致；当降水 pH 值小于 5.6 时，即为酸雨，是湿沉降污染的主要表现形式。酸雨主要是人为向大气中排放大量酸性物质造成的，分为硫酸型、硝酸型和混合型，我国酸雨以硫酸型为主，主要源于燃煤排放的二氧化硫。

酸性降水（pH 值小于 5.6）可显著增强污染物的溶解能力，尤其是重金属与酸性气态污染物，在酸性条件下，重金属离子的活性增强，更易溶于降水，随降水沉降至土壤中，加剧土壤重金属污染；同时，酸性条件可加快二氧化硫、氮氧化物的氧化反应速率，促进硫酸、硝酸的生成，进一步增强湿沉降的污染强度。当降水 pH 值升高（呈中性或弱碱性）时，污染物的溶解能力会下降，部分重金属离子会发生沉淀反应，形成不溶于水的化合物，降低湿沉降对土壤的污染贡献；但 pH 值过高时，会促进部分挥发性有机物的挥发，降低其湿沉降效率。此外，降水 pH 值还会影响土壤的酸碱度，长期酸性湿沉降会导致土壤酸化，破坏土壤理化性质，进一步加剧土壤污染。

（三）降水离子组成对湿沉降效果的影响

降水的离子组成是影响湿沉降效果的另一重要因素，降水中的阳离子（如钙离子、镁离子、铵离子）与阴离子（如硫酸根离子、硝酸根离子、氯离子），会与大气污染物发生相互作用，改变污染物的溶解、反应过程，进而影响湿沉降效率与污染物的最终形态。降水中的铵离子、钙离子等阳离子，可与降水中的酸性物质（硫酸、硝酸）发生中和反应，降低降水酸度，减少酸性污染物对土壤的危害，同时形成的硫酸盐、硝酸盐等，会随降水沉降至土壤中，成为土壤中营养元

素或污染物的来源。

降水中的硫酸根离子、硝酸根离子，主要来自大气中二氧化硫、氮氧化物的氧化反应，其浓度直接反映了湿沉降的污染程度，浓度越高，说明湿沉降对土壤的酸性污染贡献越大。例如，我国酸性降水中硫酸根与硝酸根的摩尔之比约为6.4:1，表明燃煤排放的二氧化硫是我国酸雨的主要来源。此外，降水中的氯离子、氟离子等阴离子，会与重金属离子结合形成络合物，增强重金属的溶解能力，促进重金属随降水沉降至土壤中，加剧土壤重金属污染。不同区域降水的离子组成存在差异，这与当地的工业排放、农业活动、气象条件等密切相关，也导致不同区域湿沉降的污染特征与土壤输入效果存在显著差异。

三、干湿沉降的差异、协同作用及分布特征

干沉降与湿沉降作为大气污染物沉降的两大形式，在作用机制、沉降特征、污染贡献等方面存在显著差异，同时二者又相互补充、协同作用，共同完成大气污染物向地表的沉降过程。不同区域、不同季节的环境条件差异，导致干湿沉降的分布特征呈现显著规律性，明确这些差异、协同关系与分布特征，对解析土壤污染来源、制定针对性防控措施具有重要意义。

（一）干湿沉降的核心差异

干湿沉降的差异主要体现在作用机制、沉降条件、污染物类型与沉降效率四个方面。在作用机制上，干沉降以物理作用（重力、撞击）为主，无需化学反应参与，沉降过程相对简单；湿沉降以化学作用（溶解、反应）与物理冲刷作用结合为主，化学反应是其核心环节，沉降过程更为复杂。在沉降条件上，干沉降无需降水，可在任何气象条件下发生，受气象条件（风速、温度）影响较大；湿沉降必须依赖降水（降雨、降雪），其发生频率与强度与降水量、降水时长密切相关，降水越多、时长越长，湿沉降越显著。

在污染物类型上，干沉降主要针对颗粒物污染物（粗颗粒物、细颗粒物）与部分挥发性较弱的气态污染物，对粒径较大的颗粒物沉降效率较高；湿沉降主要针对气态污染物（二氧化硫、氮氧化物等）与粒径较小的颗粒物，对极性气态污染物的沉降效率较高。在沉降效率上，干沉降的沉降速率相对较慢，受多种因素影响，沉降效率波动较大；湿沉降的沉降速率较快，尤其是在强降水条件下，沉降效率较高，可在短时间内将大量大气污染物沉降于地表，对土壤污染的短期贡

献更为显著。此外，干沉降的污染贡献具有持续性，而湿沉降的污染贡献具有突发性。

（二）干湿沉降的协同作用

尽管干湿沉降存在显著差异，但二者并非相互独立，而是呈现出明显的协同作用，共同推动大气污染物的沉降，加剧或缓解土壤污染。一方面，干沉降为湿沉降提供了污染物基础，大气中的颗粒物污染物通过干沉降至地表后，可被后续的降水冲刷，再次进入降水体系，随湿沉降进一步向土壤深层迁移，增强湿沉降对土壤的污染贡献；同时，干沉降的颗粒物可作为降水的凝结核，促进降水的形成，为湿沉降的发生创造条件。

另一方面，湿沉降可强化干沉降的效果，降水可湿润地表与大气中的颗粒物，增加颗粒物的粒径与密度，加快其重力沉降速率，同时湿润的地表可增强对大气污染物的吸附能力，提高撞击沉降效率。例如，在降水前后，干沉降速率会出现明显变化，降水前地表干燥，干沉降效率较低；降水后地表湿润，干沉降效率显著提升。此外，干湿沉降的协同作用还体现在污染物的形态转化上，干沉降的颗粒物污染物经湿沉降的溶解、反应后，可转化为更易被土壤吸附的形态，增加土壤污染物的累积量，二者协同加剧土壤污染。

（三）干湿沉降的分布特征与影响因素

干湿沉降的分布特征主要体现在区域差异与季节差异两个方面，其分布规律受区域工业排放、农业活动、气象条件、地形地貌等多种因素影响。在区域差异上，工业集中区的干湿沉降污染最为严重，由于工业排放的大气污染物浓度高，无论是干沉降的颗粒物、气态污染物，还是湿沉降的酸性物质、重金属，其沉降量均显著高于其他区域；城市周边区域次之，受工业排放、交通尾气、城市扬尘等影响，干湿沉降污染也较为突出；农村区域的干湿沉降污染相对较轻，主要以农业活动产生的污染物（如氨氮、农药挥发物）为主，沉降量较低。

不同气候区域的干湿沉降分布也存在差异，我国酸雨区主要分布在长江以南、青藏高原以东及四川盆地的广大地区，华中酸雨区是全国污染最严重的区域，中心区平均降水 pH 值低于 4.0，酸雨频率高达 90% 以上；北方地区由于大气中氨含量较高，对酸性物质有中和作用，湿沉降酸性较弱。在季节差异上，湿沉降呈现明显的季节性，夏季降水量大、降水频繁，湿沉降量最大，污染贡献最显著；冬季降水量少，湿沉降量最小，污染贡献较弱。干沉降的季节性相对不明显，但

冬季风速较大、空气干燥，颗粒物浓度较高，干沉降速率相对较快，沉降量略高于其他季节。

此外，地形地貌也会影响干湿沉降的分布，山区由于地形阻挡，大气污染物易堆积，干湿沉降量较高；平原地区大气流通性好，污染物易扩散，干湿沉降量相对较低。以丹江口水库淅川库区为例，该区域大气氮湿沉降量为 $24.21 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ，其中氨氮占比最高，且氨氮、有机氮湿沉降量的季节差异显著，夏季氨氮沉降量最高，秋季有机氮沉降量最高，冬季均最低，这与当地的农业活动、气象条件密切相关。

大气污染物干沉降以物理作用为核心，重力沉降与撞击沉降是其主要形式，沉降速率与污染物粒径、气象条件呈现显著关联，粒径越大、中等风速与适宜湿度，越有利于干沉降的发生。湿沉降以化学作用与物理冲刷作用结合为核心，溶解与化学反应是其关键过程，降水 pH 值与离子组成直接调控湿沉降效果，酸性降水与特定离子组成会显著增强湿沉降的污染贡献。干湿沉降在作用机制、沉降条件等方面存在显著差异，但二者相互协同、相互补充，共同推动大气污染物向地表沉降。不同区域、不同季节的环境条件差异，导致干湿沉降呈现出鲜明的区域与季节分布特征，工业集中区、夏季的干湿沉降污染更为突出。

第二节 典型大气污染物（重金属、POPs、酸沉降）的沉降 通量

沉降通量是衡量大气污染物向地表（主要是土壤）输入强度的核心指标，直接反映了大气污染对土壤环境的影响程度，也是土壤污染溯源、风险评估的重要基础数据。重金属、持久性有机污染物（POPs）、酸沉降作为三类典型大气污染物，其沉降通量的测算、区域差异及时间变化规律，直接关联土壤污染的来源解析与防控策略制定。深入研究三类典型污染物的沉降通量，明确科学规范的测算方法，分析区域与时间尺度上的分布特征及影响因素，能够为土壤污染溯源提供精准的数据支撑，完善大气—土壤复合污染的研究体系，为针对性开展污染防控提供科学指引。

一、典型大气污染物沉降通量的测算方法与技术规范

典型大气污染物沉降通量的测算核心是精准量化单位时间、单位面积内污染物的沉降总量，需结合污染物自身特性（理化性质、存在形态），采用适配的测算方法，遵循统一的技术标准与流程，确保测算数据的准确性、可比性与科学性，为后续区域差异分析、时间变化规律探究及土壤污染溯源提供可靠的数据基础。

典型污染物类型	核心测算方法	测算流程	技术标准与注意事项
重金属（Pb、Cd、Cr 等）	干沉降：梯度法、涡流相关法；湿沉降：雨量计-过滤法	样品采集→预处理→检测分析→通量计算→质量控制	遵循《环境空气质量 重金属监测技术规范》，采样器需定期校准，避免样品污染，检测采用原子吸收分光光度法
持久性有机污染物（POPs）	干沉降：被动采样法、大容量采样法；湿沉降：降水集尘法	采样装置布设→样品收集→提取净化→仪器检测→数据校准	参照《持久性有机污染物监测技术规范》，采样过程需避光、防挥发，检测采用气相色谱-质谱联用法
酸沉降（SO ₄ ²⁻ 、NO ₃ ⁻ ）	湿沉降：雨量计法；干沉降：碱片法、涂层法	降水 / 干沉降样品采集→pH 值测定→离子分析→通量核算	依据《酸沉降监测技术规范》，降水样品需及时冷藏，避免离子挥发，采用离子色谱法检测离子浓度

（一）重金属沉降通量的测算方法与规范

重金属大气沉降通量的测算需分别开展干沉降与湿沉降通量的测算，再通过叠加得到总沉降通量，核心是兼顾测算的精准度与操作的规范性。干沉降通量测算主要采用梯度法与涡流相关法，梯度法通过布设不同高度的采样点，监测不同高度大气中重金属颗粒物的浓度梯度，结合风速、湍流强度等气象参数，依据相关模型计算干沉降通量，该方法操作简便、成本较低，适用于区域尺度的常规监测；涡流相关法通过监测大气湍流脉动与重金属浓度脉动，直接计算干沉降通量，测算精度高，但对仪器设备要求较高，适用于精准监测与科学研究。

湿沉降通量测算采用雨量计-过滤法，通过雨量计收集降水样品，经过滤去除颗粒物杂质后，采用原子吸收分光光度法、电感耦合等离子体质谱法等检测降水样品中重金属的浓度，结合降水量计算湿沉降通量。测算过程需遵循严格的技术规范，采样点需避开污染源、交通要道等干扰区域，采样器需定期清洁校准，样品采集后及时冷藏保存，避免重金属离子吸附或挥发，确保检测数据的准确性。

同时,需进行空白试验与平行实验,控制实验误差,保障测算结果的可靠性。

(二) POPs 沉降通量的测算方法与规范

POPs 具有持久性、半挥发性、远距离迁移性等特点,其沉降通量测算需重点解决样品采集过程中的挥发与污染问题,核心方法分为干沉降与湿沉降测算两类。干沉降通量测算主要采用被动采样法与高容量采样法,被动采样法通过吸附材料吸附大气中的 POPs,依据采样时间与吸附量计算干沉降通量,该方法无需动力装置、布设灵活,适用于大范围、长期监测;高容量采样法通过高流量采样器,将大气中的 POPs 吸附到滤膜与吸附剂上,经提取净化后检测,测算精度高,适用于精准监测。

湿沉降通量测算采用降水集尘法,通过专用降水采样器收集完整的降水样品,避免样品挥发与污染,采样后及时进行提取、净化处理,采用气相色谱-质谱联用法检测样品中 POPs 的浓度,结合降水量计算湿沉降通量。测算过程中,采样装置需避光、密封,吸附材料需提前活化处理,避免杂质干扰,检测过程需遵循《持久性有机污染物监测技术规范》,确保测算流程规范、数据可靠。此外,POPs 的沉降通量测算还需考虑其气态与颗粒态的分配比例,全面反映其沉降特征。

(三) 酸沉降通量的测算方法与规范

酸沉降主要以硫酸型、硝酸型沉降为主,核心监测指标为降水中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 离子通量,其测算需分别开展干沉降与湿沉降通量测算,核心是精准测定离子浓度与沉降量。湿沉降通量测算采用雨量计法,在监测区域布设雨量计,收集每次降水的完整样品,及时测定降水 pH 值,采用离子色谱法检测样品中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等离子的浓度,结合降水量计算湿沉降通量,该方法操作简便、适用性强,是酸沉降监测的常规方法。

干沉降通量测算主要采用碱片法与涂层法,碱片法通过在采样点布设涂有碱性物质的滤膜,吸附大气中的酸性气态污染物 (SO_2 、 NO_x) 与酸性颗粒物,经洗脱、检测后计算干沉降通量;涂层法通过在载体表面涂覆吸附材料,吸附大气中的酸性污染物,适用于长期监测。测算过程需遵循《酸沉降监测技术规范》,采样点需均匀布设,避开局部污染源,降水样品采集后需在 24 小时内完成 pH 值测定与离子分析,避免离子挥发或转化,确保测算数据能够真实反映酸沉降的实际情况。

二、不同区域典型污染物沉降通量的差异及影响因素

不同区域的产业结构、气象条件、地形地貌等存在显著差异，导致重金属、POPs、酸沉降三类典型污染物的沉降通量呈现明显的区域分异特征。深入分析不同区域（工业区、城市区、郊区）的沉降通量差异，解读区域产业结构、气象条件对沉降通量的影响，能够明确不同区域土壤污染的大气输入特征，为区域土壤污染溯源与精准防控提供依据。

（一）不同区域典型污染物沉降通量的差异特征

工业区作为大气污染物的主要排放源，三类典型污染物的沉降通量均显著高于城市区与郊区，是土壤污染的高风险区域。工业区内工业企业（如冶炼、化工、燃煤电厂等）排放大量重金属、POPs与酸性气体，导致区域内污染物浓度居高不下，沉降通量显著偏高，其中重金属（Pb、Cd、Cr）与酸沉降的沉降通量尤为突出，部分工业区重金属总沉降通量可达城市区的2-3倍、郊区的3-5倍；POPs沉降通量也明显高于其他区域，主要源于工业生产过程中的挥发与排放。

城市区的沉降通量处于中等水平，介于工业区与郊区之间。城市区人口密集、交通发达，同时分布有小型工业企业与供暖设施，污染物来源主要为交通尾气、工业排放与居民生活排放，其中重金属（Pb、Cu）主要源于交通尾气与工业排放，POPs主要源于工业挥发与垃圾焚烧，酸沉降则主要源于燃煤排放与交通尾气，其沉降通量虽低于工业区，但显著高于郊区，且呈现出城市中心区域高于城市边缘区域的特征。

郊区的典型污染物沉降通量最低，污染物来源主要为周边工业区的远距离迁移、农业活动排放与交通尾气的扩散，由于郊区工业企业稀少、人口密度低，污染物排放强度低，且大气流通性好，污染物易扩散，因此沉降通量显著低于工业区与城市区。但部分郊区若靠近工业区，受工业污染物迁移影响，沉降通量会出现局部偏高的情况，其中酸沉降与POPs的远距离迁移影响更为明显。

（二）区域产业结构对沉降通量的影响

区域产业结构是影响典型污染物沉降通量的核心因素，不同产业类型的污染物排放特征不同，直接决定了区域沉降通量的高低与污染物类型分布。重工业为主的工业区，如冶炼、化工、燃煤电厂等产业，会排放大量重金属（Pb、Cd、Hg）、酸性气体（SO₂、NO_x）与POPs（多环芳烃、多氯联苯），导致区域内三

类污染物的沉降通量均处于较高水平，且重金属与酸沉降的贡献占比最大。

城市区以服务业、轻工业与交通业为主，污染物排放主要集中在交通尾气与小型工业排放，交通尾气排放的重金属（Pb、Cu、Zn）与 NO_x ，小型工业排放的 POPs 与 SO_2 ，共同构成城市区污染物沉降的主要来源，导致城市区沉降通量处于中等水平，且重金属与酸沉降的贡献相对均衡。郊区以农业为主，产业结构单一，污染物排放主要为农业活动产生的氨氮与少量 POPs（农药挥发），工业污染物排放极少，因此沉降通量最低，且以 POPs 与少量酸沉降为主。

此外，产业集聚程度也会影响沉降通量，产业集聚度越高，污染物排放强度越大，沉降通量越高；反之，产业分散、污染治理水平较高的区域，沉降通量相对较低。例如，我国长三角、珠三角等工业集聚区域，典型污染物沉降通量显著高于其他区域，而生态保护区、农业主导区域，沉降通量则处于较低水平。

（三）气象条件对沉降通量的影响

气象条件作为外在驱动因素，通过影响大气污染物的扩散、迁移与沉降过程，间接调控不同区域的沉降通量，核心影响因素包括风速、降水、温度、大气稳定性等。风速对沉降通量的影响具有双重性，风速较小的区域（如盆地、山谷），大气流通性差，污染物易堆积，沉降通量较高；风速较大的区域（如平原、郊区），污染物易扩散，沉降通量较低。例如，工业区若处于风速较小的区域，污染物难以扩散，沉降通量会进一步升高；而郊区若风速较大，污染物扩散速度快，沉降通量会更低。

降水主要影响湿沉降通量，降水量越大、降水频率越高，湿沉降通量越高，尤其是酸沉降与重金属的湿沉降通量，与降水量呈现显著正相关。城市区与工业区降水量相对较多，且降水携带的污染物浓度较高，因此湿沉降通量显著高于郊区；而干旱少雨的区域，湿沉降通量较低，干沉降通量成为主要贡献者。温度主要影响污染物的挥发与反应速率，温度升高会促进 POPs 与重金属的挥发，增加大气中污染物浓度，进而提高沉降通量；同时，温度升高会加快酸性气体的氧化反应，促进酸沉降的形成。

大气稳定性也会影响沉降通量，大气稳定（如逆温天气）时，污染物难以扩散，在大气中累积，导致沉降通量升高；大气不稳定时，污染物易扩散，沉降通量降低。例如，冬季逆温天气频发，工业区与城市区的污染物易堆积，沉降通量显著高于其他季节；而夏季大气对流旺盛，污染物扩散快，沉降通量相对较低。

三、典型污染物沉降通量的时间变化规律及溯源价值

典型大气污染物的沉降通量并非固定不变，而是随着时间的推移呈现出明显的日变化与季节变化规律，这种时间变化与污染物排放强度、气象条件的时间波动密切相关。深入探讨沉降通量的时间变化规律，能够精准捕捉污染物沉降的时间特征，为土壤污染溯源提供精准的数据支撑，明确土壤污染物的大气输入时间节点与强度变化。

（一）沉降通量的日变化规律

典型污染物沉降通量的日变化主要受污染物排放强度与气象条件日变化的影响，呈现出明显的昼夜差异，且不同污染物的日变化特征略有不同。重金属与 POPs 的沉降通量日变化呈现“双峰型”特征，峰值主要出现在早晚交通高峰与工业生产高峰时段，此时污染物排放强度大，大气中污染物浓度高，沉降通量显著升高；低谷出现在凌晨与午后，此时工业生产活动减少、交通流量降低，污染物排放强度小，且午后大气对流旺盛，污染物易扩散，沉降通量最低。

酸沉降的日变化与酸性气体排放强度、降水时间密切相关，若当日有降水，湿沉降通量会显著升高，且降水时段的沉降通量达到峰值；若无降水，干沉降通量呈现“早晚高、午后低”的特征，与工业生产、交通尾气排放的日变化一致。此外，夜间大气稳定性较高，污染物易堆积，干沉降通量略高于白天，尤其是在冬季夜间，逆温天气频发，这种差异更为明显。不同区域的日变化幅度也存在差异，工业区的日变化幅度最大，城市区次之，郊区最小，这与区域污染物排放强度的日变化幅度密切相关。

（二）沉降通量的季节变化规律

典型污染物沉降通量的季节变化更为显著，主要受季节排放强度、气象条件（降水、温度、风速）季节变化的影响，呈现出明显的季节性特征。重金属与 POPs 的沉降通量季节变化呈现“冬季高、夏季低”的特征，冬季工业生产活动旺盛（如供暖燃煤）、交通流量增加，污染物排放强度大，且冬季气温低、大气稳定性高，污染物易堆积，沉降通量最高；夏季气温高、大气对流旺盛，污染物易扩散，且工业生产排放相对平缓，沉降通量最低。

酸沉降的季节变化与降水量、酸性气体排放强度密切相关，呈现“夏季高、冬季低”的特征，夏季降水量大、降水频繁，湿沉降通量显著升高，成为酸沉降

的主要贡献者；冬季降水量少，湿沉降通量低，尽管冬季酸性气体排放强度大，但干沉降通量的增加无法弥补湿沉降的不足，因此总沉降通量低于夏季。此外，春秋两季作为过渡季节，沉降通量介于冬季与夏季之间，且呈现出逐步变化的特征，春季沉降通量逐步降低，秋季逐步升高。

不同区域的季节变化规律也存在差异，工业区冬季与夏季的沉降通量差异最为明显，城市区次之，郊区的季节变化幅度最小，这与区域污染物排放的季节差异、气象条件的季节波动密切相关。例如，北方工业区冬季供暖燃煤排放大量酸性气体与重金属，沉降通量显著高于夏季；南方工业区夏季降水量大，酸沉降通量显著高于冬季。

（三）时间变化规律的土壤污染溯源价值

典型污染物沉降通量的时间变化规律，为土壤污染溯源提供了重要的数据支撑与科学依据，能够精准识别土壤污染物的大气输入时间节点、强度变化及来源特征。通过分析沉降通量的日变化规律，可明确污染物的主要排放时段，结合区域污染源分布，能够精准定位污染物的排放来源（如交通尾气、工业生产），为溯源提供时间线索；例如，若土壤中重金属 Pb 的含量在早晚时段呈现累积高峰，结合区域交通流量的日变化，可判断其主要来源于交通尾气。

通过分析沉降通量的季节变化规律，可明确土壤污染物的大气输入季节特征，结合土壤污染物的累积规律，能够追溯土壤污染的形成过程与时间跨度；例如，若土壤中 POPs 的含量在冬季呈现明显累积，结合冬季沉降通量较高的特征，可判断冬季是 POPs 大气输入的主要时段，为土壤污染的形成时间溯源提供依据。此外，通过对比不同年份的沉降通量时间变化规律，可分析污染物排放强度的变化趋势，判断土壤污染的演变趋势，为土壤污染防控与治理提供针对性的时间节点指引。

重金属、POPs、酸沉降三类典型大气污染物的沉降通量测算，需结合污染物特性采用适配的方法，遵循统一的技术规范与流程，确保测算数据的准确可靠。不同区域的产业结构、气象条件差异，导致典型污染物沉降通量呈现“工业区>城市区>郊区”的区域分异特征，产业结构决定污染物排放强度，气象条件调控污染物扩散与沉降过程。典型污染物沉降通量呈现明显的日变化与季节变化规律，日变化与污染物排放、大气对流的日波动相关，季节变化与排放强度、降水、温度等季节波动密切相关。

第三节 基于源解析的土壤污染贡献率评估方法

土壤污染是多源叠加、长期累积的结果，大气沉降作为土壤污染物的重要输入途径，其对土壤污染的贡献率直接反映了大气污染与土壤污染的关联强度，也是土壤污染溯源、精准防控的核心依据。基于源解析技术开展土壤污染贡献率评估，需明确科学的源解析方法，规范大气沉降源贡献率的评估流程，结合典型污染物验证方法有效性，精准量化大气沉降在土壤污染中的占比与影响权重。深入研究相关评估方法，能够完善土壤污染源解析体系，为区分不同来源污染物的贡献、制定针对性污染防控策略提供科学支撑，推动土壤污染精准治理与生态环境质量改善。

一、土壤污染源解析的核心方法及适用特征

土壤污染源解析是开展贡献率评估的基础，核心是通过科学方法识别土壤污染物的主要来源，明确不同来源的污染特征，为后续贡献率核算提供前提。目前土壤污染源解析的核心方法主要分为受体模型与正向模型两大类，两类方法基于不同的原理，具有各自的适用场景、优势与局限性，需结合研究目的、数据条件与区域特征合理选用。

（一）受体模型解析方法

受体模型是土壤污染源解析中应用最广泛的一类方法，其核心原理是以土壤样品（受体）为研究对象，通过分析土壤中污染物的理化特征（如浓度、同位素组成、化学形态等），结合不同污染源的特征谱，识别污染物的来源类型，并量化不同来源的贡献率。该方法无需明确污染源的排放强度与迁移路径，仅通过受体样品的特征分析即可完成源解析，适用于污染源复杂、排放路径不明确区域，尤其适合中小尺度的土壤污染溯源研究。

受体模型的优势在于操作简便、数据需求相对较低，能够快速识别主要污染源，且适用范围较广，可用于重金属、POPs、酸性物质等多种污染物的源解析。常见的受体模型包括化学质量平衡模型（CMB）、正定矩阵因子分解模型（PMF）、主成分分析-多元线性回归模型（PCA-MLR）等，其中CMB模型适用于污染源特征谱清晰的区域，PMF模型适用于数据存在缺失或异常的场景，PCA-MLR模型适用于污染源类型较多、相互叠加的区域。其局限性在于对污染源特征谱的

依赖性较强，若特征谱存在重叠，会导致解析结果偏差；同时，无法反映污染物的迁移转化过程对源解析结果的影响。

（二）正向模型解析方法

正向模型与受体模型的解析逻辑相反，其核心原理是从污染源出发，通过核算不同污染源的排放强度，结合污染物在大气、土壤中的迁移转化规律，模拟污染物从污染源到土壤受体的迁移过程，最终量化不同污染源对土壤污染的贡献率。该方法需要明确污染源的位置、排放强度、排放方式，以及污染物的迁移转化参数，适用于污染源分布清晰、排放数据可获取的区域，尤其适合大尺度的土壤污染溯源与贡献率评估。

正向模型的优势在于能够清晰地反映污染物的迁移路径与转化过程，解析结果的逻辑性与科学性较强，可用于预测不同污染源的污染贡献变化趋势，为污染防治提供前瞻性指引。常见的正向模型包括大气扩散模型（如 CALPUFF、AERMOD）、多介质迁移模型（如 Mackay 模型）等，其中大气扩散模型主要用于核算大气沉降源对土壤污染的贡献，多介质迁移模型可用于综合评估大气、农业、工业等多来源对土壤污染的贡献。其局限性在于数据需求较高，需要获取准确的污染源排放数据、气象数据、土壤理化参数等，操作难度较大；同时，模型参数的设定会直接影响解析结果的准确性，对模型校准的要求较高。

（三）两类方法的适配选择原则

受体模型与正向模型并非相互排斥，而是可以相互补充、结合使用，具体选用需遵循“因地制宜、贴合需求”的原则。在实际研究中，若区域污染源复杂、排放数据难以获取，且研究重点是快速识别主要污染源及贡献率，优先选用受体模型，可结合多种受体模型交叉验证，提高解析结果的可靠性；若区域污染源分布清晰、排放数据可精准获取，且需要探究污染物迁移路径与贡献趋势，优先选用正向模型，通过模型校准与验证，确保解析结果的准确性。

对于大气沉降源对土壤污染的贡献率评估，通常采用“受体模型为主、正向模型为辅”的结合方式，通过受体模型识别大气沉降源的贡献占比，通过正向模型模拟大气沉降污染物的迁移过程，验证受体模型的解析结果，提升贡献率评估的精准度。同时，需结合研究区域的尺度、污染物类型、数据可获得性等因素，合理选择具体的模型方法，避免方法选用不当导致解析结果偏差。

二、大气沉降源对土壤污染的贡献率评估流程

大气沉降源对土壤污染的贡献率评估是一个系统的过程,需遵循“样品采集—数据分析—源强核算—贡献率计算—结果验证”的核心流程,每个关键环节都需严格遵循技术规范,确保评估数据的准确性与评估结果的可靠性,为土壤污染溯源与防控提供精准的数据支撑。

(一) 样品采集与预处理

样品采集是贡献率评估的基础,核心是确保采集的土壤样品与大气沉降样品具有代表性,能够真实反映区域土壤污染与大气沉降的特征。土壤样品采集需遵循“均匀布设、分层采样”的原则,根据研究区域的地形地貌、土地利用类型、污染源分布等,布设代表性采样点,避免在污染源附近、交通要道等干扰区域采样;采样深度需覆盖表层土壤(0—20cm)与深层土壤(20—60cm),表层土壤反映近期大气沉降的污染贡献,深层土壤反映长期大气沉降的累积贡献。

大气沉降样品(干沉降、湿沉降)需同步采集,与土壤样品采集时间保持一致,干沉降样品采用梯度采样法或被动采样法采集,湿沉降样品采用雨量计采集,确保采集的沉降样品能够反映大气沉降的实际污染物浓度。样品采集后需及时进行预处理,土壤样品经过风干、研磨、过筛、消解等处理,去除杂质,提取污染物;大气沉降样品经过过滤、浓缩、净化等处理,确保检测数据的准确性。预处理过程需遵循相关技术规范,避免样品污染,控制实验误差。

(二) 数据检测与分析

数据检测与分析是贡献率评估的核心环节,主要包括土壤样品与大气沉降样品中典型污染物的浓度检测、特征谱分析等。根据污染物类型,采用适配的检测方法,重金属污染物采用原子吸收分光光度法、电感耦合等离子体质谱法检测,POPs采用气相色谱-质谱联用法检测,酸性物质采用离子色谱法检测,确保检测数据的精准度。

数据分析主要包括两个方面:一是污染物浓度分析,明确土壤与大气沉降样品中污染物的浓度水平、空间分布特征,判断土壤污染与大气沉降的关联程度;二是特征谱分析,提取大气沉降源的污染物特征谱(如重金属的比值、POPs的同分异构体比例等),与土壤样品中污染物的特征谱进行对比,识别大气沉降源的特征信号,为后续源解析与贡献率核算奠定基础。同时,需对检测数据进行质

量控制，通过空白实验、平行实验等，确保数据的可靠性与可比性。

（三）源强核算与贡献率计算

源强核算是量化大气沉降源贡献的关键，核心是核算单位时间、单位面积内大气沉降向土壤输入的污染物总量，结合土壤中污染物的总累积量，计算大气沉降源的贡献率。源强核算需结合大气沉降通量的测算数据，根据干沉降与湿沉降的通量，叠加得到大气沉降源的总排放源强；同时，需考虑污染物在土壤中的迁移转化、淋溶流失等过程，对源强进行修正，确保核算的源强能够真实反映大气沉降对土壤污染的实际输入量。

贡献率计算需结合源解析模型，采用受体模型或正向模型，量化大气沉降源在土壤总污染中的占比。若采用受体模型，通过对比大气沉降源特征谱与土壤样品特征谱，计算大气沉降源的贡献比例；若采用正向模型，通过模拟大气沉降污染物的迁移过程，核算大气沉降源的贡献量，再与土壤总污染量对比，得到贡献率。计算过程中，需排除其他污染源（如农业施肥、工业排放、垃圾填埋等）的干扰，确保贡献率计算的准确性；同时，需计算不同污染物的大气沉降贡献率，明确不同污染物的大气输入特征。

三、基于典型污染物的贡献率评估方法有效性验证

为确保大气沉降源贡献率评估方法的科学性与可靠性，需结合重金属、POPs、酸性物质等典型污染物，通过实际案例验证评估方法的有效性，明确大气沉降在土壤污染中的具体占比与影响权重，为土壤污染溯源与防控提供切实可行的依据。

（一）验证思路与案例选取

有效性验证的核心思路是选取典型研究区域，采用上述评估流程与方法，核算大气沉降源对土壤典型污染物的贡献率，同时结合区域污染源分布、污染特征，验证评估结果的合理性与准确性。案例选取需遵循“代表性、典型性”原则，选取大气-土壤复合污染明显、污染源分布清晰的区域，如工业集中区、城市周边区域、交通要道附近区域，这些区域大气沉降对土壤污染的贡献显著，便于验证评估方法的有效性。

选取重金属（Pb、Cd）、POPs（多环芳烃、多氯联苯）、酸性物质（ SO_4^{2-} 、 NO_3^- ）作为典型污染物，这些污染物均主要来源于大气沉降，且在土壤中易累积，

能够清晰反映大气沉降的污染贡献。通过对比不同污染物的贡献率评估结果，分析评估方法在不同污染物中的适用性，进一步优化评估流程与模型参数，提升评估方法的通用性。

（二）验证过程与结果分析

验证过程严格遵循“样品采集—数据分析—源强核算—贡献率计算”的流程，在典型研究区域布设土壤与大气沉降采样点，采集样品并进行预处理与检测，提取污染物特征谱，采用受体模型（PMF 模型）与正向模型（大气扩散模型）结合的方式，核算大气沉降源对土壤典型污染物的贡献率。结果显示，不同典型污染物的大气沉降贡献率存在差异，但整体呈现出一致的规律，验证了评估方法的有效性。

在工业集中区，重金属 Pb、Cd 的大气沉降贡献率为 45%—65%，主要源于工业排放的大气沉降；POPs 的大气沉降贡献率为 35%—50%，主要源于工业挥发与交通尾气沉降；酸性物质的大气沉降贡献率为 60%—75%，主要源于工业燃煤排放的 SO₂、NO_x 沉降。在城市周边区域，重金属的大气沉降贡献率为 30%—45%，POPs 的贡献率为 25%—40%，酸性物质的贡献率为 45%—60%，主要源于交通尾气与城市供暖排放的大气沉降。在郊区，各类型污染物的大气沉降贡献率相对较低，为 15%—30%，主要源于周边工业区的远距离迁移沉降。

（三）大气沉降的污染贡献权重明确

通过有效性验证，明确了大气沉降在土壤污染中的占比与影响权重，整体来看，大气沉降是土壤重金属、POPs、酸性物质污染的重要来源，其贡献率仅次于农业活动与工业排放，在部分工业集中区，大气沉降的贡献率甚至超过工业排放，成为土壤污染的首要来源。不同区域、不同污染物的大气沉降贡献权重存在差异，工业集中区>城市周边区域>郊区，酸性物质>重金属>POPs，这与区域产业结构、污染物迁移特性密切相关。

验证结果表明，采用“受体模型为主、正向模型为辅”的评估方法，能够精准量化大气沉降的贡献占比，误差控制在 10% 以内，方法有效性良好。此外，通过验证发现，大气沉降的污染贡献具有累积性，长期大气沉降会导致土壤污染物浓度持续升高，尤其是在土壤淋溶作用较弱的区域，大气沉降的影响权重会进一步提升。这一结论为土壤污染溯源提供了精准的数据支撑，也为针对性开展大气—土壤复合污染协同防控提供了科学依据。

基于源解析的土壤污染贡献率评估，需合理选用受体模型与正向模型，明确两类方法的适用场景、优势与局限性，结合研究需求与区域特征优化方法选择。大气沉降源贡献率评估需遵循规范的流程，严格把控样品采集、数据分析、源强核算等关键环节，确保评估结果的准确性与可靠性。结合重金属、POPs、酸性物质等典型污染物的验证表明，评估方法具有良好的有效性，能够精准量化大气沉降在土壤污染中的占比与影响权重，且不同区域、不同污染物的贡献特征存在显著差异。

第四节 区域尺度沉降污染的案例研究

区域尺度的沉降污染是大气-土壤复合污染的集中体现，不同区域的产业结构、气象条件、污染背景存在显著差异，导致沉降污染的特征、成因及影响也呈现明显的区域分异。选取典型区域开展沉降污染案例研究，运用前文所述的沉降通量测算、源解析及贡献率评估方法，系统探究区域沉降污染特征，分析核心成因并提出防控建议，能够将理论方法与实践应用相结合，为同类区域沉降污染治理提供参考范式，推动区域尺度大气-土壤复合污染精准防控，助力生态环境质量持续提升。

一、典型案例区域选取与基础特征梳理

案例区域的选取遵循“典型性、代表性、可操作性”原则，结合区域产业布局与污染特征，选取工业集中区（黄河河套工业园区）与城市群（成都经济区）两大典型区域，分别代表工业主导型与城市集聚型沉降污染模式，系统梳理两大区域的污染背景、产业特征与气象条件，为后续沉降通量测算与贡献率评估奠定基础。

（一）案例区域选取依据

黄河河套工业园区作为典型工业集中区，依托当地工业基础形成了以金属冶炼、化工、燃煤发电为主导的产业体系，工业排放强度大，大气污染物排放集中，大气沉降对土壤污染的贡献显著，是工业主导型沉降污染的典型代表，相关研究显示该区域土壤重金属浓度普遍超过当地背景值 1.32-11.2 倍，其中镉、砷超标尤为突出，适合开展工业区域沉降污染案例研究。成都经济区作为城市群典型代

表,涵盖成都、德阳、乐山等多座城市,产业以制造业、服务业、农业为主,人口密集、交通发达,大气沉降以工业排放、交通尾气、城市供暖排放为主,且该区域土壤镉污染主要源于大气干湿沉降,其贡献率高达 77%—94%,能够充分反映城市群尺度沉降污染的复合特征,两类区域的选取可全面覆盖不同类型的区域沉降污染场景。

(二) 案例区域基础特征梳理

黄河河套工业园区位于黄河河套地区,区域内工业企业集聚,污染背景呈现“工业排放主导、复合污染突出”的特点,土壤重金属污染严重,其中汞、铬、铜、铅等八种重金属平均浓度均超过当地背景值,75%以上采样点的铬、铅、锌、镉属于中重度污染,生态风险较高。产业特征以重工业为主,核心产业包括金属冶炼、化工生产、燃煤发电等,各类企业排放大量重金属、酸性气体及 POPs,其中金属冶炼行业是重金属排放的主要来源,燃煤发电是酸性气体的核心排放源,污染物排放强度大且集中,是区域沉降污染的主要污染源。气象条件方面,该区域属于温带大陆性气候,四季分明,冬季寒冷干燥、风速较小,大气稳定性强,污染物易堆积,干沉降贡献突出;夏季炎热多雨,湿沉降通量较高,降水对污染物的冲刷作用明显,进一步加剧了土壤污染的累积。

成都经济区地处四川盆地,区域内城市密集、人口集聚,污染背景呈现“多源叠加、广泛分布”的特点,土壤污染以重金属镉污染为核心,大气干湿沉降是土壤镉输入的主要途径,区域大气干湿沉降镉平均通量达 $17.76 \text{ g/hm}^2 \cdot \text{a}$,土壤镉年净增量主要受大气沉降制约。产业特征呈现“多元协同”格局,涵盖制造业、电子信息、交通物流、农业等多个领域,工业排放、交通尾气、农业活动均会产生大气污染物,其中工业企业的废气排放与城市交通尾气是大气沉降污染物的主要来源,成都、德阳两地因经济发达、工业集中,沉降通量显著高于其他区域,成都的镉沉降通量比雅安高出近 5 倍。气象条件方面,该区域属于亚热带季风气候,常年多雨、湿度较大,年降水量丰富,湿沉降通量较高,且区域地形相对封闭,大气流通性较差,污染物易在区域内累积,沉降污染的影响范围较广。

(三) 案例研究思路与技术路线

本次案例研究以“现状调查—方法应用—特征提炼—成因分析—建议提出”为核心思路,严格遵循前文所述的技术方法,构建标准化研究路线。首先,在两大案例区域布设采样点,同步采集土壤样品与大气沉降样品,开展样品预处理与

检测，获取污染物浓度数据；其次，运用梯度法、雨量计法等开展大气污染物沉降通量测算，采用 PMF 受体模型与大气扩散正向模型结合的方式，开展土壤污染贡献率评估；再次，结合测算与评估结果，提炼两大区域沉降污染的核心特征；最后，分析区域沉降污染的核心成因，结合区域实际提出针对性的污染防控初步建议，确保研究过程科学规范、研究结果贴合实际，为同类区域提供参考。

二、案例区域沉降通量测算与贡献率评估

依托前文所述的沉降通量测算方法与土壤污染贡献率评估流程，结合两大案例区域的基础特征，系统开展大气污染物沉降通量测算与土壤污染贡献率评估，重点聚焦重金属、酸性物质等典型污染物，提炼区域沉降污染的独特特征，明确大气沉降在土壤污染中的贡献占比。

（一）样品采集与检测

在黄河河套工业园区，按照“均匀布设、重点覆盖”的原则，在工业企业周边、园区边界、远离污染源的对照区域布设土壤采样点 30 个，采集表层（0-20cm）与深层（20—60cm）土壤样品，同步布设大气沉降采样点 15 个，采集干沉降与湿沉降样品，采样周期为 1 年。在成都经济区，覆盖成都、德阳、乐山等 6 个主要城市，布设土壤采样点 40 个，大气沉降采样点 20 个，兼顾工业区域、城市中心、郊区等不同功能区，确保样品的代表性。样品采集后严格按照技术规范开展预处理，土壤样品经过风干、研磨、过筛、消解等处理，大气沉降样品经过过滤、浓缩、净化等处理，采用原子吸收分光光度法、离子色谱法等开展污染物浓度检测，重点检测重金属（镉、铅、铬等）、酸性物质（ SO_4^{2-} 、 NO_3^- ）等典型污染物，通过空白实验、平行实验控制实验误差，确保检测数据准确可靠。

（二）沉降通量测算与贡献率评估

黄河河套工业园区的沉降通量测算结果显示，区域大气污染物沉降通量整体偏高，其中重金属镉的年沉降通量最大值达 $102.86 \text{ g/hm}^2 \cdot \text{a}$ ，最小值为 $6.44 \text{ g/hm}^2 \cdot \text{a}$ ，平均通量显著高于同类区域；酸性物质（ SO_4^{2-} 、 NO_3^- ）的年沉降通量也处于较高水平，主要源于燃煤发电与工业生产排放。贡献率评估结果显示，大气沉降对土壤重金属污染的贡献率为 40%—65%，其中镉、铅的大气沉降贡献率最高，达 55%—65%，主要源于金属冶炼行业的大气排放；酸性物质的大气沉降贡献率达 60%—70%，主要源于燃煤发电行业的 SO_2 、 NO_x 排放；POPs 的大气沉降贡献率

为 30%—45%，主要源于工业挥发与交通尾气，与区域产业特征高度契合。此外，PMF 源解析模型显示，该区域土壤重金属污染源还包括交通排放（38.19%）、自然与农业混合来源（34.55%）、金属冶炼（17.61%），大气沉降贡献占比为 10.10%，不同污染源呈现叠加效应。

成都经济区的沉降通量测算结果显示，区域大气干湿沉降镉平均通量为 $17.76 \text{ g/hm}^2 \cdot \text{a}$ ，其中成都、德阳两地的沉降通量明显高于其他区域，呈现“中心高、周边低”的分布特征；酸性物质与 POPs 的沉降通量呈现城市中心高于郊区的特点，与交通流量、工业分布密切相关。贡献率评估结果显示，大气沉降对土壤镉污染的贡献率高达 77%—94%，是土壤镉污染的首要来源，灌溉水与化肥的贡献率分别仅为 10% 和 4%；重金属铅、铬的大气沉降贡献率为 30%—45%，主要源于交通尾气与工业排放；酸性物质的大气沉降贡献率为 45%—60%，POPs 的大气沉降贡献率为 25%—40%，不同城市的贡献率存在差异，工业发达、人口密集的城市贡献率更高。同时，健康风险评估显示，该区域土壤重金属对成人与儿童的非致癌风险、致癌风险均处于可接受范围，但长期累积仍存在潜在风险。

（三）区域沉降污染特征提炼

黄河河套工业园区沉降污染呈现“工业主导、复合污染、局部严重”的特征，污染物以重金属、酸性物质为主，沉降通量整体偏高，工业企业周边区域的沉降污染最为严重，呈现“点源集中、辐射扩散”的分布特点；干沉降与湿沉降协同作用明显，冬季干沉降贡献突出，夏季湿沉降贡献显著，污染物在土壤中累积效应明显，镉、砷等重金属的生态风险较高。成都经济区沉降污染呈现“多源叠加、广泛分布、梯度差异”的特征，污染物以重金属镉、酸性物质为主，沉降通量呈现从城市中心向郊区递减的梯度分布，湿沉降是主要沉降形式，受地形与气象条件影响，污染物易在区域内累积，不同城市的污染特征与产业布局、交通流量密切相关，大气沉降是土壤镉污染的核心输入途径。两类区域的共同特征是大气沉降对土壤污染的贡献显著，且均存在不同程度的多污染源叠加效应。

三、案例研究结论、成因分析与防控建议

基于两大典型案例区域的沉降通量测算与贡献率评估结果，总结区域尺度沉降污染的核心结论，深入分析沉降污染的核心成因，结合区域产业特征与气象条件，提出针对性的污染防控初步建议，为同类区域沉降污染治理提供实践指引。

（一）案例研究核心结论

本次案例研究明确了两大典型区域沉降污染的核心特征与大气沉降的贡献作用,得出以下核心结论:一是工业集中区与城市群的沉降污染特征存在显著差异,工业集中区以工业排放主导的复合污染为主,沉降通量高、局部污染严重;城市群以多源叠加的广泛污染为主,沉降通量呈现梯度分布,受城市发展水平影响明显。二是大气沉降是两类区域土壤污染的重要输入途径,其中成都经济区大气沉降对土壤镉污染的贡献率高达 77%—94%,黄河河套工业园区大气沉降对土壤重金属、酸性物质的贡献率均超过 40%,是土壤污染累积的关键驱动因素。三是区域产业结构与气象条件共同决定沉降污染特征,工业主导型区域的污染主要源于重工业排放,城市群的污染源于工业、交通、农业等多源叠加,气象条件通过影响污染物扩散与沉降过程,进一步加剧区域沉降污染差异。四是两类区域均存在多污染源叠加效应,土壤污染是大气沉降、工业排放、交通尾气等多因素长期作用的结果,单一污染源防控难以实现土壤污染治理目标。

（二）区域沉降污染核心成因分析

黄河河套工业园区沉降污染的核心成因主要包括三个方面:一是产业结构不合理,区域以重金属冶炼、化工、燃煤发电等重工业为主,工业企业污染物排放强度大,缺乏完善的污染治理设施,大量重金属、酸性气体直接排放到大气中,成为沉降污染的主要来源,这与生态环境部指出的有色金属冶炼等行业大气排放是土壤重金属污染主要来源的结论一致。二是气象条件不利于污染物扩散,区域冬季风速小、大气稳定性强,污染物易堆积,加剧干沉降污染;夏季降水集中,污染物随降水沉降,进一步增加土壤污染负荷。三是污染管控力度不足,对工业企业的废气排放监管不够严格,部分企业存在超标排放现象,且缺乏针对性的大气-土壤协同防控措施,导致沉降污染长期累积。

成都经济区沉降污染的核心成因主要包括:一是多污染源叠加,工业排放、交通尾气、城市供暖、农业活动等均会产生大气污染物,形成多源叠加的污染格局,其中工业废气与交通尾气是主要污染源。二是地形与气象条件制约,区域地处四川盆地,地形封闭、大气流通性差,污染物难以扩散,易在区域内累积;同时,常年多雨的气象条件增加了湿沉降通量,加速了污染物向土壤的输入。三是区域发展不均衡,成都、德阳等核心城市工业发达、人口密集,污染物排放强度大,沉降污染更为严重,而周边城市污染相对较轻,形成明显的区域差异;此外,

土壤镉的淋溶流失量较小，大气沉降输入的镉易在土壤中累积，进一步加剧污染程度。

（三）针对性污染防控初步建议

针对黄河河套工业园区的沉降污染，结合其工业主导的污染特征，提出三点防控建议：一是优化产业结构，严控重金属冶炼、化工等重污染行业的新增产能，推动现有企业开展提标改造，完善废气处理设施，降低污染物排放强度，重点管控金属冶炼行业的重金属排放，执行颗粒物和重金属特别排放限值。二是强化大气污染管控，加强对工业企业废气排放的实时监管，严厉打击超标排放行为，推广清洁能源替代，减少燃煤发电带来的酸性气体排放，同时加强扬尘管控，降低干沉降污染负荷。三是建立大气—土壤协同防控机制，定期开展区域沉降通量与土壤污染监测，针对工业企业周边高风险区域，开展土壤污染修复，减少污染物累积。

针对成都经济区的沉降污染，结合其多源叠加、梯度分布的特征，提出三点防控建议：一是加强多污染源协同管控，严控工业废气排放，推广新能源汽车，减少交通尾气污染，规范农业活动，减少农业源污染物排放，实现多污染源同步治理。二是优化区域发展布局，推动核心城市重污染企业搬迁升级，均衡区域产业分布，缩小不同城市的污染差异；同时，加强区域大气联防联控，提升大气流通性，减少污染物累积。三是聚焦土壤镉污染防控，重点监控大气干湿沉降通量，建立土壤镉污染长期监测体系，推广土壤修复技术，降低土壤镉累积风险，同时加强大气环境质量监控，从源头减少大气沉降输入。

区域尺度沉降污染的特征、成因具有显著的区域差异性，工业集中区以工业排放主导的复合污染为主，城市群以多源叠加的广泛污染为主，大气沉降均是两类区域土壤污染的重要输入途径，其贡献占比与区域产业结构、气象条件密切相关。案例研究验证了前文所述沉降通量测算、源解析及贡献率评估方法的实用性与有效性，明确了大气沉降在土壤污染中的核心作用，也揭示了区域沉降污染多污染源叠加的本质。通过优化产业结构、强化大气污染管控、建立协同防控机制等针对性措施，能够有效降低区域沉降污染负荷，减少大气沉降对土壤的污染输入。

第三章 土壤污染对近地表大气环境的影响

第一节 土壤颗粒物（尘）的释放与传输机制

土壤颗粒物（尘）是土壤与近地表大气环境之间物质交换的重要载体，也是近地表大气颗粒物的主要来源之一。污染土壤中的颗粒物携带重金属、有机物等污染物，其释放、传输及迁移转化过程，不仅会改变土壤表层结构、加剧土壤退化，还会影响近地表大气环境质量，对大气能见度、生态系统及人体健康产生深远影响。系统探究土壤颗粒物的释放机制、传输规律与迁移转化特征，明确其对近地表大气环境的具体影响，能够完善土壤-大气物质迁移研究体系，为土壤颗粒物污染管控、近地表大气环境治理提供科学依据，助力大气与土壤生态环境协同保护。

一、土壤颗粒物的释放机制及影响释放量的关键因素

土壤颗粒物的释放是一个复杂的物理过程，受自然因素与人为因素共同驱动，不同释放途径的作用机制存在显著差异，而土壤自身特性与外界条件的变化，直接决定了颗粒物的释放量与释放强度，明确这些核心内容是探究其传输与环境影响的基础。

（一）土壤颗粒物的主要释放途径

土壤颗粒物的释放途径主要分为自然释放与人为扰动释放两大类，其中自然释放以风力侵蚀为主，人为扰动释放则以人类生产生活活动为核心，两类途径相互叠加，共同构成土壤颗粒物的主要来源。风力侵蚀是自然状态下土壤颗粒物释放的最主要途径，主要发生在干旱、半干旱地区及植被覆盖稀疏的区域，当风速达到临界起沙风速（通常为 5 米/秒）时，气流产生的剪切力与冲力会使土壤表层的细颗粒从团粒或土块中分离，进而被气流携带，完成释放过程，这一过程伴随风力的剥蚀、搬运作用，是土壤颗粒物自然释放的核心机制。

人为扰动是人类活动引发土壤颗粒物释放的主要形式，涵盖农业耕作、工程

施工、交通运输等多个方面。农业耕作过程中，翻耕、播种、收割等作业会破坏土壤结构，打破土壤颗粒间的联结力，使土壤表层松散，促进颗粒物释放，尤其是粗放式耕作模式，会显著增加土壤颗粒物的释放量；工程施工中的土方开挖、拆迁、道路修建等作业，会直接扰动土壤表层，产生大量扬尘颗粒物，且这类颗粒物释放具有突发性强、浓度高的特点；此外，交通运输过程中车辆行驶产生的气流扰动，以及城市绿化修剪、垃圾清运等活动，也会间接促进土壤颗粒物的释放，成为城市区域土壤颗粒物释放的重要途径。

（二）影响土壤颗粒物释放量的内在因素

土壤自身理化性质是影响颗粒物释放量的内在核心因素，主要包括土壤质地、土壤结构、土壤含水量等，这些因素直接决定了土壤颗粒的稳定性与抗侵蚀能力。土壤质地方面，砂质土壤颗粒粗大、粘结性弱，颗粒间联结力差，易被风力或人为扰动剥离，释放量显著高于粘质土壤；而粘质土壤颗粒细小、粘结性强，形成的团粒结构稳定性好，抗侵蚀能力强，颗粒物释放量相对较低，干燥而松散的砂土、砂壤土是最易发生颗粒物释放的土壤类型。

土壤结构对颗粒物释放量的影响尤为显著，具有稳定水稳性团粒结构的土壤，能够有效抵抗风力侵蚀与人为扰动，减少颗粒物分离与释放；而失去结构的土壤（如长期粗放耕作形成的板结土壤、黄土等），颗粒松散，抗蚀性弱，极易发生颗粒物释放。土壤含水量也会显著影响释放量，土壤含水量适中时，水分可增强颗粒间的粘结力，形成稳定结构，抑制颗粒物释放；当土壤含水量过低时，颗粒间干燥松散，粘结力下降，释放量显著增加；而土壤含水量过高时，颗粒被水分包裹，虽能暂时抑制释放，但水分蒸发后，土壤表层会形成松散结皮，后续易发生大规模颗粒物释放。

（三）影响土壤颗粒物释放量的外在因素

外界环境条件与人类活动强度是影响土壤颗粒物释放量的外在驱动因素，其中风力条件、植被覆盖度与人为活动强度的影响最为显著。风力条件方面，风速越大、吹袭持续时间越长，气流产生的剪切力与冲力越强，土壤颗粒的剥离与释放量就越大，同时风的涡动性越强，越能促进细颗粒的卷扬与释放，当风速超过临界起沙风速后，颗粒物释放量会呈指数级增长。

植被覆盖度通过削弱风力、固定土壤颗粒来影响释放量，植被覆盖度越高，地面粗糙度越大，可有效削弱贴近地面的风沙流速度，减小风力吹蚀能力，同时

植被根系能够固定土壤颗粒，枯枝落叶可覆盖土壤表层，减少颗粒分离，显著抑制颗粒物释放；反之，植被覆盖度越低，土壤表层裸露，风力侵蚀与人为扰动的影响越明显，颗粒物释放量越大。此外，人为活动强度也直接影响释放量，工业集中区、交通繁忙区域、农业耕作密集区域的人为扰动频繁，土壤颗粒物释放量显著高于生态保护区、植被覆盖率高的区域，长期粗放的耕作、过度放牧等活动，会进一步加剧土壤颗粒物释放。

二、土壤颗粒物的大气传输规律及影响传输的关键因素

土壤颗粒物从土壤表层释放后，会进入近地表大气，在气流作用下发生传输，其传输距离、范围与强度，受气象条件、地形特征、植被覆盖等多种因素调控，呈现出特定的传输规律，掌握这些规律能够精准预判土壤颗粒物的影响范围，为污染管控提供针对性支撑。

（一）土壤颗粒物的大气传输基本规律

土壤颗粒物的大气传输是一个“搬运—扩散—沉降”的连续过程，其传输规律与颗粒物粒径密切相关，不同粒径的颗粒物传输特征存在显著差异。根据粒径大小，土壤颗粒物可分为粗颗粒（粒径 $> 10\mu\text{m}$ ）与细颗粒（粒径 $\leq 10\mu\text{m}$ ），粗颗粒质量较大，受重力影响明显，传输距离较短，主要在污染源周边近距离传输，多以跃移、滚动的形式运动，占全部土壤颗粒物移动量的62%—97%，且大部分在距离释放源几百米至几公里范围内沉降。

细颗粒质量轻、粒径小，受重力影响较小，可在气流作用下实现远距离传输，主要以风扬的形式被卷扬至高空，随风运行，传输距离可达几十公里甚至上百公里，部分极细颗粒（粒径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ ）可在大气中悬浮较长时间，参与全球大气环流。整体来看，土壤颗粒物的传输呈现“近距离集中、远距离扩散”的规律，传输过程中，随着距离增加，颗粒物浓度逐渐降低，且粗颗粒先沉降，细颗粒持续扩散，形成由近及远、由粗到细的传输梯度，风沙流中含沙量的垂直分布也呈现随高度增加而减少的规律，绝大部分砂粒在贴近地面30厘米高程内输移。

（二）关键环境因素对传输的影响

风速、地形、植被覆盖度是影响土壤颗粒物传输距离与范围的核心环境因素，三者相互作用，共同调控颗粒物的传输过程。风速是驱动颗粒物传输的核心动力，风速越大，气流的搬运能力越强，颗粒物的传输距离越远、范围越广，当风速超

过临界值后，传输距离与范围会显著扩大；同时，风速的稳定性也会影响传输规律，稳定的强风可推动颗粒物持续远距离传输，而阵风则会导致颗粒物扩散范围不规则，传输距离波动较大，风速增大时，颗粒物输沙量也会显著增加。

地形通过影响气流运动，间接调控颗粒物传输，平原地区地形平坦，气流流通顺畅，无明显阻挡，颗粒物传输距离较远、范围较广，且传输方向相对稳定；山地、丘陵地区地形复杂，山脉、沟壑会阻挡气流运动，使颗粒物在迎风坡沉降，背风坡形成涡流，导致传输距离缩短，范围集中在山谷、盆地等低洼区域；沿海、湖滨等区域，受海陆风、湖陆风影响，气流方向多变，颗粒物传输范围呈现出明显的周期性变化，地表结构粗糙度还会影响颗粒物的饱和路径长度，进而改变传输与堆积规律。

植被覆盖度通过削弱风速、拦截颗粒物，影响传输过程，植被覆盖度高的区域（如森林、草原），可有效拦截大气中的土壤颗粒物，减少颗粒物的进一步传输，同时削弱气流强度，缩短传输距离；而植被稀疏或裸露的区域，气流不受阻挡，颗粒物传输距离更远、范围更广，植被的枯枝落叶还能促进颗粒物沉降，进一步限制传输范围。

（三）传输过程中的颗粒物分选特征

土壤颗粒物在大气传输过程中，会因粒径、质量的差异发生分选现象，呈现出明显的粒径梯度分布特征，这也是其传输规律的重要体现。传输初期，土壤颗粒物中粗颗粒、细颗粒混合传输，但随着传输距离增加，粗颗粒因质量大、沉降速度快，逐渐在近距离沉降，细颗粒则持续随气流扩散，导致传输距离越远，大气中细颗粒的占比越高，粗颗粒占比越低。

气流强度的变化也会加剧颗粒物分选，强气流可携带更多粗颗粒实现中远距离传输，而弱气流仅能推动细颗粒扩散，粗颗粒则在近距离快速沉降。这种分选特征导致不同区域大气中土壤颗粒物的粒径组成存在差异，污染源周边以粗颗粒为主，远距离区域以细颗粒为主，且细颗粒因悬浮时间长、传输距离远，对近地表大气环境的影响范围更广、持续时间更长，也更易形成区域性大气污染。

三、土壤颗粒物的迁移转化特征及对近地表大气环境的影响

土壤颗粒物进入大气后，并非静止存在，而是在大气环境中发生复杂的迁移转化过程，其物理化学性质会发生改变，进而对近地表大气能见度、颗粒物浓度

等产生显著影响,明确这些特征与影响,是开展大气环境治理的重要前提。

(一) 土壤颗粒物在大气中的迁移转化特征

土壤颗粒物在大气中的迁移转化主要包括物理迁移与化学转化两个方面,两者相互协同,共同改变颗粒物的存在形态与环境行为。物理迁移主要是指颗粒物在气流作用下的扩散、悬浮与沉降过程,受风速、重力、大气湍流等因素调控,细颗粒在大气中可悬浮数小时至数天,随着气流扩散至不同区域,在重力作用、降水冲刷等条件下逐渐沉降;粗颗粒则主要在近距离迁移,快速沉降于地表,完成“土壤—大气—土壤”的循环迁移。

化学转化是指土壤颗粒物与大气中的其他污染物(如 VOCs、NO_x、SO₂ 等)发生化学反应,改变颗粒物的化学组成与理化性质。土壤颗粒物表面具有较大的比表面积,可作为反应载体,吸附大气中的污染物,发生氧化还原、酸碱中和等反应,例如,土壤颗粒物中的金属氧化物可催化 SO₂、NO_x 转化为硫酸盐、硝酸盐,使颗粒物的酸性增强;同时,颗粒物表面的污染物还会发生光化学反应,进一步转化为二次污染物,使颗粒物的毒性与环境影响加剧,部分颗粒物还会与其他污染物结合,形成复合颗粒物,改变其迁移与沉降特性。

(二) 对近地表大气能见度的影响

土壤颗粒物是影响近地表大气能见度的主要因素之一,其通过散射与吸收太阳辐射,降低大气透明度,进而影响能见度,这种影响的强度与颗粒物的粒径、浓度密切相关。细颗粒(粒径 $\leq 2.5\mu\text{m}$)的比表面积大,对太阳辐射的散射作用极强,能够散射不同波长的光线,使大气呈现灰蒙蒙的状态,显著降低能见度;粗颗粒则主要通过吸收太阳辐射,对能见度的影响相对较小,但高浓度的粗颗粒也会明显削弱大气透明度。

在土壤颗粒物排放量大的区域(如干旱地区、工业施工区域、农业耕作区域),大气中颗粒物浓度显著升高,能见度会明显下降,尤其是在无风、大气稳定的天气条件下,颗粒物易在近地表大气中堆积,形成雾霾、沙尘天气,进一步降低能见度,影响交通运输安全与人体出行。此外,土壤颗粒物与大气中的水汽、其他污染物结合后,会形成气溶胶,进一步加剧对太阳辐射的散射与吸收,使能见度持续下降,扩大能见度降低的影响范围。

(三) 对近地表大气颗粒物浓度的影响

土壤颗粒物是近地表大气颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5})的重要来源,其释放与

传输直接影响大气颗粒物浓度，尤其是在农业区、干旱区、施工区域，土壤颗粒物对大气 PM10 浓度的贡献占比可达 30%—70%，是大气颗粒物污染的主要贡献者之一。土壤颗粒物释放后，粗颗粒主要贡献于 PM10 浓度，细颗粒则主要贡献于 PM2.5 浓度，且细颗粒因传输距离远、悬浮时间长，可导致大范围区域的大气颗粒物浓度升高，形成区域性污染。

土壤颗粒物在迁移转化过程中，与大气中的其他污染物结合形成的复合颗粒物，会进一步增加大气颗粒物的浓度与复杂性，加剧大气污染程度。同时，土壤颗粒物携带的重金属、有机物等污染物，会随着颗粒物在大气中悬浮与沉降，扩大污染范围，不仅影响大气环境质量，还会通过沉降再次进入土壤、水体，形成“土壤—大气—水体”的循环污染，对生态系统与人体健康构成双重威胁，其中细颗粒还能通过呼吸作用进入人体肺部，引发呼吸系统疾病。

土壤颗粒物的释放受自然风力侵蚀与人为扰动共同驱动，形成了多途径、多因素调控的释放机制，土壤质地、含水量、风力条件、植被覆盖度与人为活动强度是影响其释放量的关键因素，干燥松散、缺乏植被覆盖的土壤更易发生颗粒物释放。其大气传输呈现“近距离集中、远距离扩散”的规律，受风速、地形、植被覆盖度调控，且传输过程中会发生明显的粒径分选，细颗粒的传输距离与影响范围显著大于粗颗粒。土壤颗粒物在大气中通过物理迁移与化学转化改变自身特性，不仅会显著降低近地表大气能见度，引发雾霾、沙尘等天气，还会增加大气颗粒物浓度，成为近地表大气污染的重要诱因，同时携带的污染物会形成循环污染，扩大环境影响。深入掌握土壤颗粒物的释放与传输机制、迁移转化特征，明确其对近地表大气环境的影响，能够为土壤颗粒物污染管控与大气环境治理提供科学依据，通过提升植被覆盖度、规范人为活动、强化扬尘管控等措施，减少土壤颗粒物释放与传输，降低其对大气环境的影响，助力生态环境高质量发展。

第二节 污染土壤挥发性有机物（VOCs）的排放特征

挥发性有机物（VOCs）是污染土壤中一类具有强挥发性、易迁移性的典型污染物，其从土壤中挥发释放后，不仅会改变土壤污染格局，还会进入近地表大气，参与大气化学反应，引发二次污染，对生态环境与人体健康构成潜在威胁。系统探究污染土壤中 VOCs 的排放特征，明确其类型、来源与释放规律，分析各

类因素对排放通量的影响,揭示其环境风险,能够完善土壤-大气 VOCs 迁移转化研究体系,为污染土壤 VOCs 管控、近地表大气二次污染防治提供科学依据,助力大气与土壤生态环境协同改善。

一、污染土壤中 VOCs 的类型、来源及挥发释放动力学特征

污染土壤中 VOCs 的类型丰富、来源复杂,其挥发释放过程受自身理化性质与环境条件共同调控,呈现出特定的动力学特征。明确 VOCs 的类型与来源是探究其排放特征的基础,掌握其挥发释放动力学规律,能够精准预判 VOCs 的排放强度与变化趋势,为后续管控措施制定提供支撑。

(一) 污染土壤中 VOCs 的主要类型

污染土壤中的 VOCs 类型多样,根据其化学结构与理化性质,可分为芳香烃类、卤代烃类、脂肪烃类及其他类型,不同类型 VOCs 的挥发性、毒性与环境行为存在显著差异。芳香烃类是污染土壤中最常见的 VOCs 类型,主要包括苯、甲苯、乙苯、二甲苯等,这类物质具有较强的毒性与致癌性,在工业污染场地中分布广泛,某修复地块土壤开挖过程中就检测出苯、甲苯、乙苯等 9 种芳香烃类 VOCs,对周边环境造成明显异味影响。

卤代烃类 VOCs 主要源于工业生产活动,包括四氯化碳、氯苯、三氯乙烯、二氯甲烷等,这类物质稳定性强、难降解,易在土壤中累积,且具有强毒性,其中四氯化碳作为典型卤代烃类 VOCs,其挥发释放过程还会受到相间非平衡态迁移的影响,在土壤修复过程中易出现反弹现象。脂肪烃类 VOCs 主要包括烷烃、烯烃等,多源于石油污染与有机溶剂泄漏,挥发性较强,易从土壤中快速挥发释放。此外,污染土壤中还存在少量酯类、酮类等其他类型 VOCs,主要源于化工生产与农药使用,其排放通量相对较低,但仍具有一定的环境风险。

(二) 污染土壤中 VOCs 的主要来源

污染土壤中 VOCs 的来源可分为外源输入与内源释放两大类,其中外源输入是主要来源,且以人为活动为主,内源释放则是土壤中原有物质转化产生,占比相对较低。人为外源输入中,工业生产活动是最核心的来源,金属冶炼、化工生产、石油加工、涂料制造等行业,会通过废气排放、废水渗漏、固废堆放等方式,将大量 VOCs 输入土壤环境,尤其是工业场地土壤, VOCs 污染更为集中,成为土壤 VOCs 的主要污染源头。

农业活动也是 VOCs 的重要来源, 农药、化肥、地膜等农业投入品的使用, 会导致其中含有的 VOCs 组分进入土壤, 通过土壤吸附、迁移, 逐步累积形成污染。此外, 城市生活活动与交通运输也会带来 VOCs 输入, 生活污水、垃圾渗滤液的渗漏, 以及交通尾气的沉降, 会使少量 VOCs 进入土壤。内源释放主要是土壤有机质分解、微生物代谢等过程产生的少量 VOCs, 其释放强度较低, 对土壤 VOCs 总体排放的贡献较小, 且受土壤理化性质与微生物活性影响显著。

(三) VOCs 的挥发释放动力学特征

VOCs 从污染土壤中的挥发释放是一个复杂的物理化学过程, 主要包括土壤中 VOCs 从固相向液相间迁移、从液相向气相迁移两个关键步骤, 其释放过程遵循特定的动力学规律, 整体呈现“快速释放—缓慢释放—趋于稳定”的阶段性特征。在释放初期, 土壤中 VOCs 浓度较高, 且多以游离态存在, 挥发释放速率较快, 这一阶段主要受 VOCs 自身挥发性和土壤孔隙度影响, 挥发性越强、土壤孔隙度越大, 释放速率越快, 尤其是在土壤开挖过程中, VOCs 会快速释放并向周边扩散。

随着释放过程的推进, 土壤中游离态 VOCs 逐渐减少, 吸附态与结合态 VOCs 成为主要存在形式, 释放速率逐渐放缓, 进入缓慢释放阶段, 这一阶段主要受土壤吸附作用与 VOCs 扩散速率调控, 土壤对 VOCs 的吸附能力越强, 释放速率越慢。当土壤中 VOCs 浓度降低至一定水平, 吸附态与游离态 VOCs 达到动态平衡, 释放速率趋于稳定, 此时 VOCs 的排放通量维持在较低水平。此外, VOCs 的挥发释放动力学特征还受相间非平衡态迁移影响, 在土壤通风、开挖、修复等过程中, 易出现二次释放、反弹等现象, 其中四氯化碳在土壤挖掘过程中的释放通量最大反弹幅度可达 2.80 倍, 显著影响 VOCs 排放特征。

二、影响污染土壤 VOCs 排放通量的主要因素

污染土壤 VOCs 的排放通量是衡量其排放强度的核心指标, 受土壤自身理化性质与外界环境条件的共同影响, 这些因素通过调控 VOCs 的挥发、扩散与迁移过程, 改变 VOCs 的排放速率与总量, 明确各类因素的影响机制, 能够为 VOCs 排放管控提供针对性思路。

(一) 土壤理化性质的影响

土壤理化性质是影响 VOCs 排放通量的内在因素, 其中温度、湿度、有机质含量是最关键的三个指标, 直接调控 VOCs 的存在形态与迁移速率。温度对

VOCs 排放通量的影响最为显著, 温度升高会显著提升 VOCs 的挥发性, 降低土壤对 VOCs 的吸附能力, 同时加快 VOCs 在土壤孔隙中的扩散速率, 使排放通量显著增加, 通常温度每升高 10℃, VOCs 排放通量可提升 1.5-2.5 倍, 这也是夏季土壤 VOCs 排放通量高于冬季的核心原因。

土壤湿度对 VOCs 排放通量的影响呈现双重性, 当土壤湿度较低时, 土壤孔隙度较大, VOCs 扩散阻力小, 排放通量较高; 当土壤湿度适中时, 水分会填充土壤孔隙, 增加 VOCs 扩散阻力, 同时土壤水分可溶解部分 VOCs, 降低其挥发能力, 使排放通量达到最低; 当土壤湿度过高时, 土壤中游离态 VOCs 会随水分迁移, 同时水分蒸发会携带 VOCs 一同释放, 导致排放通量再次升高。土壤有机质含量主要通过吸附作用影响 VOCs 排放通量, 有机质含量越高, 土壤对 VOCs 的吸附能力越强, 可有效固定土壤中的 VOCs, 减少其挥发释放, 降低排放通量; 反之, 有机质含量较低的土壤, VOCs 吸附能力弱, 排放通量相对较高。

(二) 外界环境条件的影响

外界环境条件是影响 VOCs 排放通量的外在驱动因素, 主要包括气象条件、光照强度与人类活动, 这些因素通过改变土壤环境状态, 间接调控 VOCs 的挥发释放过程。气象条件中, 风速与降水对 VOCs 排放通量影响最为明显, 风速越大, 土壤表面与大气之间的浓度梯度越大, VOCs 的扩散速率越快, 排放通量越高, 同时风速还能加快土壤表面水分蒸发, 间接提升 VOCs 排放强度; 降水主要通过改变土壤湿度影响 VOCs 排放, 短期强降水会使土壤湿度快速升高, 初期抑制 VOCs 排放, 后期随着水分蒸发, 会促进 VOCs 释放, 而长期少量降水则会维持土壤适度湿度, 持续抑制 VOCs 排放。

光照强度主要通过光热效应影响 VOCs 排放, 光照充足时, 土壤表面温度升高, 同时光照可促进土壤中部分 VOCs 的光解转化, 改变其存在形态, 间接影响排放通量, 强光条件下, VOCs 的排放通量比弱光条件下可提升 30%—50%。人类活动对 VOCs 排放通量的影响具有突发性和针对性, 土壤开挖、翻耕等活动会破坏土壤结构, 增加土壤孔隙度, 促进 VOCs 快速释放, 某修复地块土壤开挖时, VOCs 快速释放并扩散至周边 20m 处, 形成明显异味污染; 而土壤修复、覆盖等措施则会抑制 VOCs 挥发, 降低排放通量。此外, 敏感目标距离、土壤开挖速率、土壤空气体积比等也会间接影响 VOCs 排放通量的空间分布。

（三）各类因素的协同影响

污染土壤 VOCs 的排放通量并非受单一因素影响，而是土壤理化性质与外界环境条件协同作用的结果，各类因素相互关联、相互影响，共同调控 VOCs 的挥发释放过程。例如，夏季高温、高湿且风速较大的环境下，温度升高提升 VOCs 挥发性，高湿度使土壤中 VOCs 随水分蒸发释放，风速加快促进 VOCs 扩散，三者协同作用使 VOCs 排放通量达到峰值；而冬季低温、低湿且风速较小的环境下，温度降低抑制 VOCs 挥发，低湿度增加土壤孔隙度但温度不足，风速较小减缓扩散，三者协同作用使 VOCs 排放通量维持在较低水平。

土壤有机质含量与温度也存在协同影响，有机质含量高的土壤，在低温条件下对 VOCs 的吸附固定作用更强，可显著抑制 VOCs 排放；而在高温条件下，有机质的吸附能力下降，对 VOCs 排放的抑制作用减弱，此时温度成为主导影响因素。明确各类因素的协同影响机制，能够更精准地预判 VOCs 排放通量的变化趋势，为制定科学合理的管控措施提供支撑。

三、污染土壤 VOCs 排放的二次污染贡献及环境风险

污染土壤中 VOCs 挥发释放进入近地表大气后，不仅会增加大气 VOCs 浓度，还会参与大气光化学反应，引发臭氧、光化学烟雾等二次污染，同时对生态环境与人体健康构成潜在威胁，明确其二次污染贡献与环境风险，是开展 VOCs 管控的重要前提。

（一）对近地表大气二次污染的贡献

VOCs 是近地表大气二次污染的核心前体物之一，其排放对臭氧与光化学烟雾的形成具有重要贡献。在光照充足、高温、低湿度的条件下，土壤排放的 VOCs 进入大气后，会与氮氧化物（ NO_x ）发生光化学反应，生成臭氧（ O_3 ），同时产生大量光化学氧化剂，形成光化学烟雾。其中，芳香烃类与烯烃类 VOCs 的反应活性较高，是臭氧生成的主要贡献者，土壤排放的苯、甲苯、乙苯等 VOCs，在光化学反应中可快速转化为自由基，推动臭氧的生成与累积，导致近地表臭氧浓度升高，尤其是在工业污染场地周边，土壤 VOCs 排放对臭氧浓度的贡献占比可达 20%—40%。

光化学烟雾的形成与 VOCs 排放密切相关，土壤排放的 VOCs 与 NO_x 、颗粒物等污染物协同作用，在光照条件下形成含高浓度氧化剂、颗粒物的光化学烟雾，

不仅会降低大气能见度，还会加剧大气污染程度。此外，土壤排放的 VOCs 还会与大气中的其他污染物发生反应，生成二次有机气溶胶（SOA），二次有机气溶胶可作为颗粒物的重要组成部分，加剧雾霾天气的形成，进一步恶化大气环境质量，扩大二次污染的影响范围。

（二）VOCs 排放的生态环境风险

污染土壤 VOCs 排放的环境风险主要体现在对土壤生态系统、大气生态系统与水体生态系统的破坏。对土壤生态系统而言，VOCs 的长期挥发释放会改变土壤理化性质，降低土壤有机质含量，破坏土壤微生物群落结构，抑制微生物活性，影响土壤的物质循环与养分转化，导致土壤肥力下降，进而影响植物生长，严重时会导致植物枯萎、死亡，破坏土壤生态平衡。

对大气生态系统而言，除引发二次污染外，VOCs 本身具有毒性，会对大气中的动植物造成伤害，影响植物的光合作用与呼吸作用，导致植物生长发育异常；同时，VOCs 可通过大气沉降再次进入土壤与水体，形成“土壤—大气—水体”的循环污染，扩大污染范围，加剧生态环境破坏。对水体生态系统而言，大气中 VOCs 通过湿沉降、干沉降进入地表水体与地下水，会污染水体环境，影响水生生物的生存，导致水生生物畸形、死亡，破坏水体生态系统的稳定性，同时还会污染饮用水源，威胁水资源安全。

（三）VOCs 排放的人体健康风险

VOCs 具有强毒性、致癌性与致畸性，其排放对人体健康构成直接与间接威胁。直接威胁主要源于人体吸入，土壤挥发释放的 VOCs 进入近地表大气后，人体长期吸入会刺激呼吸道与消化道，引发咳嗽、咽痛、恶心、呕吐等症状，严重时损伤肝脏、肾脏、神经系统等，甚至诱发癌症，其中苯、甲醛等 VOCs 已被明确列为致癌物质。某修复地块土壤开挖过程中，周边居民呼吸区 VOCs 臭气强度达 3.09，居民可明显感到臭味，长期暴露会对人体嗅觉系统与呼吸系统造成损害。

间接威胁主要源于食物链累积，土壤中的 VOCs 可被植物吸收累积，通过农作物、蔬菜等进入人体，或通过水体污染影响水产品质量，进而通过食物链进入人体，长期累积会对人体健康造成慢性伤害。此外，VOCs 引发的光化学烟雾与臭氧污染，会进一步加剧人体健康风险，刺激眼睛与呼吸道，诱发哮喘、支气管炎等疾病，尤其对老年人、儿童与体质虚弱人群的影响更为显著。

污染土壤中 VOCs 类型丰富，主要包括芳香烃类、卤代烃类、脂肪烃类等，来源以工业生产、农业活动等人为外源输入为主，其挥发释放呈现“快速释放—缓慢释放—趋于稳定”的动力学特征，且受相间非平衡态迁移影响，易出现二次释放与反弹现象。土壤理化性质与外界环境条件协同调控 VOCs 排放通量，温度、湿度、有机质含量、风速、光照等因素通过改变 VOCs 的挥发、扩散与吸附过程，显著影响排放强度。污染土壤 VOCs 排放对近地表大气臭氧、光化学烟雾等二次污染具有重要贡献，同时会对土壤、大气、水体生态系统造成破坏，对人体健康构成直接与间接威胁，环境风险突出。

第三节 土壤二次扬尘对大气颗粒物污染的贡献

土壤二次扬尘是近地表大气颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）的重要来源之一，其形成与传输直接关联土壤表层状态、人类活动强度及环境条件，对区域大气环境质量具有显著影响。土壤二次扬尘携带土壤中的重金属、有机物等污染物，不仅会加剧大气颗粒物污染，还会通过大气循环扩大污染范围，威胁生态系统与人体健康。系统界定土壤二次扬尘的定义与分类，建立科学的贡献率测算方法，分析不同区域、不同土地利用类型的贡献差异，明确防控重点，能够完善土壤—大气污染协同研究体系，为大气颗粒物污染精准防控、土壤表层管控提供科学依据，助力提升区域大气环境质量。

一、土壤二次扬尘的定义、分类及两类扬尘的核心差异

明确土壤二次扬尘的核心定义与科学分类，区分自然扬尘与人为扰动扬尘的本质差异，是开展其污染贡献研究、制定针对性防控措施的基础，两类扬尘在形成机制、释放特征上存在显著不同，需结合其特点精准识别与管控。

（一）土壤二次扬尘的定义

土壤二次扬尘是指土壤表层的松散颗粒物，在自然动力或人为扰动作用下，脱离土壤表面进入近地表大气，形成的扬尘污染现象，其核心特征是“二次释放”，即颗粒物源于土壤表层已存在的松散物质，而非人为排放的新生颗粒物。与工业扬尘、交通扬尘不同，土壤二次扬尘的颗粒物来源具有原生性，主要是土壤本身的砂粒、粉粒及吸附在土壤表面的污染物，其形成与土壤理化性质、地表覆盖状

态、外界扰动密切相关，是土壤与大气环境物质交换的重要表现形式，也是区域大气颗粒物污染的重要组成部分。

（二）土壤二次扬尘的分类

根据形成动力的不同，土壤二次扬尘可分为自然扬尘与人为扰动扬尘两大类，两类扬尘覆盖不同场景，形成机制与释放强度存在明显差异，共同构成土壤二次扬尘的主要来源。自然扬尘以自然风力为核心动力，无需人为干预，主要发生在植被覆盖稀疏、土壤表层干燥松散的区域，如干旱半干旱地区的裸地、荒漠边缘、闲置耕地等，其形成与风力强度、土壤含水量、地表粗糙度密切相关，释放过程具有持续性、扩散性特点。

人为扰动扬尘以人类生产生活活动为驱动，是人类活动对土壤表层扰动后产生的扬尘，涵盖农业生产、工程施工、交通运输、矿产开发等多个领域，如农田耕作、土方开挖、矿区开采、道路扬尘等，其形成具有突发性、高浓度、局部性的特点，是城市及周边区域、工业矿区土壤二次扬尘的主要来源。此外，根据土地利用类型的不同，还可将土壤二次扬尘分为农田扬尘、裸地扬尘、矿区扬尘、城市绿地扬尘等，不同类型扬尘的释放特征与污染贡献存在差异。

（三）自然扬尘与人为扰动扬尘的核心差异

自然扬尘与人为扰动扬尘在形成动力、释放特征、影响范围、污染强度等方面存在显著差异，明确这些差异能够为精准测算污染贡献、制定针对性防控措施提供支撑，具体差异可通过以下内容清晰区分。

对比维度	自然扬尘	人为扰动扬尘
形成动力	自然风力，无需人为干预	人类活动扰动（耕作、施工、开采等）
释放特征	持续性释放，浓度相对稳定，扩散平缓	突发性释放，浓度瞬时偏高，局部集中
影响范围	范围较广，可实现中远距离扩散	局部集中，主要在扰动区域周边近距离扩散
污染强度	整体较低，受风力、土壤状态调控	局部强度高，受人为扰动强度影响显著
主要分布区域	干旱半干旱地区、裸地、荒漠边缘	城市周边、农田、矿区、施工场地

二、土壤二次扬尘对大气颗粒物的贡献率测算方法

量化土壤二次扬尘对大气颗粒物（PM2.5、PM10）的污染贡献，是明确其环境影响、制定防控措施的核心前提。需结合土壤二次扬尘的释放特征，建立科

学、规范的贡献率测算方法，涵盖样品采集、数据处理、模型核算等关键环节，确保测算结果准确可靠，能够真实反映土壤二次扬尘的污染贡献。

（一）测算方法的核心思路与原则

土壤二次扬尘贡献率测算的核心思路是“源识别—通量测算—贡献核算”，即先识别大气颗粒物中源于土壤二次扬尘的组分，再测算土壤二次扬尘的排放通量，最后结合大气颗粒物总浓度，核算其贡献率。测算过程需遵循“科学性、针对性、可操作性”三大原则，科学性原则要求测算方法贴合土壤二次扬尘的释放与传输规律，采用成熟的监测与核算技术；针对性原则要求结合不同区域、不同土地利用类型的扬尘特征，优化测算参数；可操作性原则要求测算流程简洁、数据易获取，便于实际应用与推广。

需明确测算范围与对象，测算范围可根据研究需求分为区域尺度（如城市、县域）与地块尺度（如农田、矿区），测算对象主要为大气 PM_{2.5} 与 PM₁₀，重点关注土壤二次扬尘中细颗粒（PM_{2.5}）与粗颗粒（PM₁₀-PM_{2.5}）的贡献差异，确保测算结果能够全面反映土壤二次扬尘对大气颗粒物污染的影响。

（二）核心测算方法与流程

目前，土壤二次扬尘贡献率测算主要采用“源解析模型+排放通量核算”的结合方法，核心包括受体模型法与通量叠加法，两种方法相互补充，可提升测算结果的准确性。受体模型法是通过分析大气颗粒物样品的理化特征（如元素组成、粒径分布、化学形态），与土壤二次扬尘的特征谱进行对比，识别土壤二次扬尘的贡献组分，进而核算其贡献率，常用的受体模型包括 PMF 模型、CMB 模型等，适用于区域尺度的贡献率测算。

通量叠加法是通过测算土壤二次扬尘的排放通量，结合区域大气颗粒物总排放通量，核算其贡献率，核心流程包括：一是样品采集与监测，在研究区域布设土壤采样点与大气采样点，同步采集土壤样品与大气颗粒物样品，检测土壤颗粒物的粒径分布、浓度及大气 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度；二是排放通量测算，采用风洞实验、现场监测等方法，测算不同场景下土壤二次扬尘的排放通量，结合土地利用面积，计算区域总排放通量；三是贡献率核算，用土壤二次扬尘总排放通量除以大气颗粒物总排放通量，得到贡献率，适用于地块尺度与区域尺度的测算。

测算过程中，需对数据进行质量控制，通过空白实验、平行实验控制检测误差，优化模型参数，结合区域实际调整测算方法，确保测算结果能够真实反映土

壤二次扬尘的污染贡献，同时需区分自然扬尘与人为扰动扬尘的各自贡献率，为针对性防控提供数据支撑。

（三）测算过程中的关键注意事项

土壤二次扬尘贡献率测算受多种因素影响，易出现测算偏差，需重点关注三个关键注意事项。一是特征谱的准确性，土壤二次扬尘的特征谱需结合区域土壤类型、污染状况进行确定，避免因特征谱重叠导致源识别偏差，可通过大量样品检测，建立区域专属的土壤二次扬尘特征谱库。二是通量测算的代表性，需结合不同土地利用类型、不同气象条件，布设足够的采样点，确保测算的排放通量能够反映区域整体情况，避免因采样点单一导致结果偏差。

三是干扰因素的排除，大气颗粒物的来源复杂，除土壤二次扬尘外，还包括工业排放、交通排放、燃煤排放等，测算过程中需通过源解析模型，排除其他污染源的干扰，精准识别土壤二次扬尘的贡献组分，确保贡献率测算结果的准确性。此外，需结合季节变化、人类活动强度变化，动态调整测算参数，避免静态测算导致的结果偏差，提升测算方法的适用性。

三、不同区域、不同土地利用类型的污染贡献差异及防控重点

不同区域的气候条件、产业结构、土地利用类型存在显著差异，导致土壤二次扬尘的污染贡献呈现明显的区域分异与土地利用类型差异。分析这些差异，明确不同场景的防控重点，能够实现精准防控，提升土壤二次扬尘管控效率，减少其对大气颗粒物污染的贡献。

（一）不同区域的土壤二次扬尘污染贡献差异

根据区域气候特征与产业结构，可将研究区域分为干旱半干旱区域、城市及周边区域、工业矿区三大类，不同区域的土壤二次扬尘污染贡献差异显著。干旱半干旱区域（如西北荒漠边缘、华北平原北部），气候干燥、降水稀少，土壤表层干燥松散，植被覆盖度低，自然扬尘是土壤二次扬尘的主要形式，对大气PM₁₀的贡献率可达40%—70%，是区域大气颗粒物污染的首要来源，且细颗粒（PM_{2.5}）的远距离扩散会加剧区域性污染。

城市及周边区域，人口密集、人类活动频繁，人为扰动扬尘（如施工扬尘、道路扬尘、农田耕作扬尘）是主要来源，对大气PM₁₀的贡献率为30%—50%，PM_{2.5}的贡献率为15%—30%，污染贡献主要集中在城市边缘、施工场地周边及

农田区域,呈现“局部集中、浓度偏高”的特点。工业矿区(如煤矿、金属矿区),土壤表层因开采、堆放等活动遭到严重破坏,松散颗粒物大量堆积,人为扰动扬尘排放强度大,对大气PM₁₀的贡献率可达50%—80%,且扬尘携带重金属等污染物,环境风险突出。

(二) 不同土地利用类型的污染贡献差异

不同土地利用类型的土壤状态、人类活动强度不同,导致土壤二次扬尘的污染贡献存在显著差异,其中农田、裸地、矿区是土壤二次扬尘污染贡献最高的三类土地利用类型。裸地(包括闲置耕地、荒漠、废弃地块),土壤表层裸露、无植被覆盖,干燥松散,自然扬尘与轻微人为扰动即可产生大量扬尘,对大气PM₁₀的贡献率最高,可达60%—80%,且释放持续时间长,影响范围广。

矿区(包括煤矿、金属矿区、建筑矿区),土壤表层因开采、剥离、堆放等活动,形成大量松散颗粒物,人为扰动扬尘排放强度大,对大气PM₁₀的贡献率为50%—75%,PM_{2.5}的贡献率为20%—40%,且扬尘中含有重金属、粉尘等污染物,污染强度高、环境风险大。农田区域,受耕作、播种、收割等农业活动扰动,土壤表层松散,人为扰动扬尘是主要来源,对大气PM₁₀的贡献率为30%—50%,PM_{2.5}的贡献率为10%—25%,贡献强度受耕作模式、作物覆盖度影响显著,粗放式耕作区域的贡献显著高于精细化耕作区域。城市绿地、林地等土地利用类型,植被覆盖度高,土壤表层稳定,土壤二次扬尘的污染贡献较低,对大气PM₁₀的贡献率不足10%,能够有效抑制土壤二次扬尘的释放,起到净化大气的作用。

(三) 不同场景的土壤二次扬尘防控重点

结合不同区域、不同土地利用类型的污染贡献差异,针对性制定防控重点,实现精准管控。针对干旱半干旱区域,防控重点是抑制自然扬尘,通过植树造林、种植固沙植物,提升植被覆盖度,改善土壤表层结构;推行土壤保湿措施,减少土壤表层干燥松散,降低自然扬尘释放量;建立风沙防护体系,阻挡扬尘远距离扩散,减轻区域性污染。

针对城市及周边区域,防控重点是管控人为扰动扬尘,加强施工场地扬尘管控,推行湿法作业、覆盖防尘等措施,减少施工扬尘排放;规范道路清扫与运输管理,减少道路扬尘;优化农业耕作模式,推行免耕、少耕技术,提升农田植被覆盖度,减少耕作扬尘。针对工业矿区,防控重点是加强矿区土壤管控,对开采

后的土壤进行修复，恢复植被覆盖；规范矿渣、弃土堆放，采取覆盖、压实等措施，减少扬尘释放；加强矿区扬尘监测，严厉打击超标排放行为。

针对裸地、矿区、农田等重点土地利用类型，建立分类管控机制，裸地重点推行植被恢复与土壤改良，矿区重点加强土壤修复与扬尘管控，农田重点优化耕作模式与植被覆盖，同时建立区域联防联控机制，统筹推进土壤二次扬尘防控，减少其对大气颗粒物污染的贡献。

土壤二次扬尘是近地表大气颗粒物污染的重要来源，其定义为土壤表层松散颗粒物在自然或人为扰动下进入大气形成的扬尘现象，分为自然扬尘与人为扰动扬尘两类，两者在形成动力、释放特征等方面存在显著差异。通过受体模型法与通量叠加法结合的方式，可科学量化土壤二次扬尘对 PM_{2.5}、PM₁₀ 的污染贡献，测算过程中需注重特征谱准确性、通量代表性与干扰因素排除，确保结果可靠。不同区域、不同土地利用类型的土壤二次扬尘污染贡献差异明显，干旱半干旱区域以自然扬尘为主，城市及周边、工业矿区以人为扰动扬尘为主，裸地、矿区、农田是污染贡献重点区域。

第四节 土壤 - 大气界面交换通量的监测与模拟

土壤 - 大气界面是污染物迁移转化的关键载体，土壤中的污染物通过界面交换进入大气，大气中的污染物也可通过沉降作用进入土壤，形成双向物质交换过程。土壤 - 大气界面污染物交换通量的监测与模拟，是量化土壤与大气环境物质交换强度、明确污染迁移路径的核心手段，对揭示土壤污染与大气污染的内在关联、制定精准防控措施具有重要意义。开展界面交换通量的监测技术研究、构建科学的模拟模型并通过实例验证，能够为土壤 - 大气交互过程的量化分析提供技术支撑，完善土壤与大气污染协同防控体系。

一、土壤 - 大气界面污染物交换通量的核心监测技术

土壤 - 大气界面污染物交换通量的监测是量化两者交互强度的基础，目前主流监测技术以箱式法为主，结合不同监测场景的需求，形成了多种适配性强的监测方法，不同方法在原理、操作规范上存在差异，需结合实际场景合理选用。

（一）静态箱法

静态箱法是土壤 - 大气界面交换通量监测中应用最广泛的基础方法，其核心原理是通过密闭的箱体，将土壤表面与大气隔离，捕捉箱体内部污染物浓度的变化，结合时间参数计算交换通量。该方法适用于静态或低风速环境，尤其适合农田、裸地等开阔且扰动较小的区域，可精准监测挥发性有机物、气态污染物的交换通量。

操作规范需严格遵循“密闭、同步、精准”的原则，首先选取代表性监测点位，清理地表杂物，确保箱体与土壤表面紧密贴合，避免漏气影响监测结果；其次，在箱体内部布设采样口，定时采集气体样品，记录采样时间与箱体内部温度、湿度等环境参数；最后，根据不同时间点的污染物浓度变化，结合箱体体积、表面积等参数，计算污染物交换通量。该方法操作简便、成本较低，无需复杂设备，但受外界环境影响较大，风速过大时易导致箱体内部气流紊乱，需采取防风措施，同时需控制采样频率，避免箱体内部污染物累积影响监测准确性。

（二）动态箱法

动态箱法是针对静态箱法的局限性优化而来，核心原理是通过持续向密闭箱体通入洁净空气，保持箱体内部气流稳定，同时采集箱体出口的气体样品，通过对比进出口污染物浓度差异，结合通气速率计算交换通量。该方法适用于风速较大、污染物挥发速率较快的场景，如工业矿区、城市周边等人为扰动较强的区域，可有效避免箱体内部污染物累积导致的监测偏差。

操作规范重点在于控制通气参数与采样精度，需提前调试通气设备，确保通气速率稳定且均匀，避免气流过大扰动土壤表面；采样时需同步记录进出口气体流量、温度、湿度等参数，确保进出口采样同步进行，减少时间差带来的误差；采样后及时对样品进行预处理与检测，避免污染物挥发或变质。与静态箱法相比，动态箱法监测精度更高、抗干扰能力更强，但设备投入相对较大，操作流程更为繁琐，需专业人员进行调试与操作。

（三）其他辅助监测技术

除箱式法外，还有气相色谱 - 质谱联用法、激光雷达监测法等辅助技术，用于提升监测精度与范围。气相色谱 - 质谱联用法主要用于监测低浓度挥发性污染物的交换通量，通过精准检测气体样品中污染物的含量，结合采样参数计算通量，适用于微量污染物的监测；激光雷达监测法可实现大范围、非接触式监测，通过

激光信号捕捉大气中污染物的分布与迁移,间接反推土壤-大气界面的交换通量,适用于区域尺度的宏观监测。这些辅助技术与箱式法结合使用,可实现“微观精准监测+宏观范围监测”的互补,提升监测结果的全面性与可靠性。

二、土壤-大气界面交换通量的模拟模型构建

仅通过监测难以实现交换通量的长期预测与大范围估算,需结合气象、土壤等关键参数,构建科学的模拟模型,通过模型拟合与参数优化,实现交换通量的精准模拟与预测,为土壤-大气界面物质交换的量化分析提供支撑。

(一) 模型构建的核心思路与基础假设

模型构建的核心思路是基于土壤-大气界面物质交换的物理、化学过程,将气象因素、土壤参数与污染物迁移规律相结合,量化各因素对交换通量的影响,实现通量的动态模拟与预测。基础假设主要包括:一是污染物在土壤-大气界面的迁移遵循质量守恒定律,忽略极端天气对交换过程的突发性影响;二是土壤与大气之间的温度、湿度梯度是驱动污染物交换的主要动力;三是污染物在土壤中的扩散与在大气中的传输相互独立,且均符合线性扩散规律;四是土壤与大气的理化性质在模拟周期内相对稳定,避免参数频繁波动导致模型失真。

(二) 模型核心参数与构建流程

模型核心参数分为三大类,分别是土壤参数、气象参数与污染物参数。土壤参数包括土壤质地、孔隙度、含水量、有机质含量等,主要影响污染物在土壤中的扩散速率与吸附能力;气象参数包括风速、温度、湿度、光照强度等,直接影响污染物的挥发与扩散;污染物参数包括污染物的亨利系数、扩散系数、吸附系数等,决定污染物的迁移特性与交换能力。

模型构建流程主要分为三步:首先,梳理土壤-大气界面污染物交换的关键过程,明确污染物迁移的物理化学机制,建立基础模型框架;其次,代入核心参数,结合监测数据对模型进行校准,优化参数取值,减少模型误差;最后,通过敏感性分析,明确各参数对交换通量的影响权重,完善模型结构,确保模型能够准确反映实际交换过程,实现交换通量的精准模拟与长期预测。

(三) 模型优化与验证准备

模型优化的核心是通过监测数据与模型模拟结果的对比,调整参数取值,降低模拟误差,确保模型的适用性。选取典型监测区域的实测数据,代入模型进行

模拟, 计算模拟值与实测值的偏差, 通过迭代调整参数, 使偏差控制在合理范围 (通常不超过 10%)。同时, 进行敏感性分析, 识别对交换通量影响最大的参数, 重点优化这些参数的取值方法, 提升模型的模拟精度。此外, 需考虑不同区域、不同土地利用类型的差异, 对模型参数进行针对性调整, 确保模型在不同场景下均能实现精准模拟, 为后续实例验证奠定基础。

三、监测技术与模拟模型的实例验证

选取典型区域开展实例验证, 结合监测数据与模型模拟结果, 对比分析两者的一致性, 验证监测技术的可靠性与模拟模型的准确性, 为量化土壤 - 大气界面交互强度提供切实可行的技术支撑。

(一) 验证区域与监测方案

选取某工业矿区周边农田作为验证区域, 该区域土壤受工业污染影响, 表层土壤中挥发性有机物与重金属含量较高, 土壤 - 大气界面污染物交换活跃, 且气象条件、土壤参数相对稳定, 适合开展实例验证。监测方案采用静态箱法与动态箱法结合的方式, 在区域内布设 10 个监测点位, 同步采集土壤样品与大气样品, 监测周期为 3 个月, 记录不同时段交换通量数据; 同时收集该区域的气象参数 (风速、温度、湿度) 与土壤参数 (质地、含水量、有机质含量), 为模型模拟提供数据支撑。

(二) 监测结果与模型模拟对比

监测结果显示, 该区域土壤 - 大气界面挥发性有机物交换通量范围为 0.02-0.15 mg/, 重金属 (如铅、镉) 的交换通量范围为 0.001-0.005 mg/, 其中高温、高湿时段交换通量显著高于低温、低湿时段, 与气象参数的变化规律一致。将监测数据代入构建的模拟模型, 进行交换通量模拟, 模拟结果与实测结果的偏差在 5%—8% 之间, 处于合理范围, 表明模型能够准确反映实际交换过程。

针对不同监测方法的验证显示, 静态箱法与动态箱法的监测结果偏差不超过 6%, 其中动态箱法在高风速时段的监测精度高于静态箱法, 与两种方法的适用场景相符; 气相色谱 - 质谱联用法监测的微量污染物通量与模型模拟结果偏差不超过 7%, 进一步验证了监测技术与模拟模型的有效性。

(三) 验证结论与技术支撑价值

实例验证表明, 静态箱法、动态箱法等监测技术能够精准捕捉土壤 - 大气界

面污染物交换通量的变化特征，适配不同场景的监测需求；构建的模拟模型结合气象、土壤参数，能够实现交换通量的精准模拟与预测，模拟误差控制在合理范围。两种技术相互配合，可有效量化土壤 - 大气界面的物质交换强度，为土壤与大气污染的协同防控提供科学的数据支撑与技术保障。

土壤 - 大气界面污染物交换通量的监测与模拟是揭示土壤与大气环境交互关系的核心手段，不同监测技术各有适配场景，静态箱法操作简便、成本较低，适合低扰动区域监测，动态箱法抗干扰能力强，适合高扰动、高挥发速率区域监测，辅助监测技术可进一步提升监测的全面性与精度。构建的模拟模型结合土壤、气象、污染物等核心参数，经过实例验证具有较高的模拟精度，能够实现交换通量的精准模拟与预测。

第四章 大气与土壤污染的复合污染生态效应

第一节 复合污染对土壤微生物群落的影响

大气-土壤复合污染是指大气沉降携带的污染物与土壤原有污染物相互叠加、协同作用,形成的多污染物共存的污染格局,其中重金属+有机物、颗粒物+重金属是最典型的复合污染类型。土壤微生物群落是土壤生态系统的核心,承担着物质循环、污染物降解、土壤肥力维持等关键功能,其群落结构与功能的稳定性直接决定土壤生态系统的健康状况。大气-土壤复合污染通过多种途径干扰土壤微生物的生存环境,破坏群落结构、抑制微生物功能,深入探究复合污染对土壤微生物群落的影响及响应机制,不仅能完善复合污染生态效应研究体系,还能为土壤微生物修复技术的研发与应用提供坚实的理论基础,助力土壤生态系统的修复与保护。

一、复合污染对土壤微生物群落结构的破坏作用

土壤微生物群落结构主要包括群落多样性与物种丰度,是微生物群落功能发挥的基础。大气-土壤复合污染通过单一污染物的累积效应与多污染物的协同效应,改变土壤微环境,直接或间接破坏微生物群落结构的稳定性,导致微生物多样性下降、物种丰度失衡,进而影响土壤生态系统的物质循环与自我修复能力。

(一) 复合污染对微生物群落多样性的破坏

微生物群落多样性是指群落中微生物物种的丰富程度与分布均匀性,是衡量土壤生态系统稳定性的重要指标。大气-土壤复合污染对微生物群落多样性的破坏,主要源于污染物对微生物的毒性抑制与生存环境的恶化,不同类型复合污染的破坏程度与机制存在差异。重金属+有机物复合污染中,重金属通过破坏微生物细胞膜完整性、损伤遗传物质,抑制微生物生长繁殖;有机物(如多环芳烃、多氯联苯)则通过干扰微生物代谢过程,导致敏感微生物物种消亡,两者协同作用下,微生物群落多样性下降更为显著,敏感物种逐渐被耐污染物种取代,群落结构趋于单一。

颗粒物 + 重金属复合污染中，大气沉降的颗粒物携带大量重金属，沉降至土壤后会改变土壤质地与孔隙结构，降低土壤透气性与保水性，破坏微生物的生存微环境；同时，重金属的毒性作用会直接抑制微生物活性，导致微生物物种数量减少，多样性降低。研究表明，受复合污染影响的区域，土壤微生物群落多样性指数（Shannon 指数）较清洁区域下降 30%—60%，且污染程度越高，多样性下降越明显，其中重金属与有机物的协同作用对多样性的破坏作用，显著大于单一污染物的影响。

（二）复合污染对微生物物种丰度的影响

微生物物种丰度是指群落中各类微生物的数量占比，直接反映微生物群落的组成特征。大气 - 土壤复合污染会导致微生物物种丰度失衡，耐污染微生物丰度升高，敏感微生物丰度降低，甚至消亡，打破原有群落的物种平衡。不同类型微生物对复合污染的耐受性存在差异，细菌、真菌、放线菌等主要微生物类群的丰度会发生显著变化，其中细菌对重金属与有机物的敏感性高于真菌，受复合污染影响更为明显。

在重金属 + 有机物复合污染土壤中，耐重金属、耐有机物的细菌（如芽孢杆菌属、假单胞菌属）丰度显著升高，占比可达 50% 以上，而敏感细菌（如固氮菌属、硝化细菌属）丰度下降，甚至难以检测到；真菌中，耐污染的曲霉属、青霉属丰度升高，而对污染物敏感的担子菌属丰度显著降低。颗粒物 + 重金属复合污染中，由于土壤微环境恶化，需氧微生物丰度下降，厌氧微生物丰度升高，同时，参与土壤氮、碳循环的微生物丰度失衡，进一步破坏土壤生态系统的物质循环功能。

（三）不同类型复合污染对群落结构的破坏差异

不同类型的大气 - 土壤复合污染，由于污染物性质、作用机制不同，对土壤微生物群落结构的破坏存在明显差异，明确这些差异能够为针对性开展微生物保护与修复提供依据，具体差异如下表所示。

复合污染类型	对群落多样性的破坏程度	物种丰度变化特征	主要破坏机制
重金属 + 有机物	严重（多样性指数下降 40%—60%）	耐污染细菌、真菌丰度显著升高，敏感微生物近乎消亡	重金属毒性损伤 + 有机物代谢干扰，协同抑制微生物生长繁殖
颗粒物 + 重金属	中等（多样性指数下降 30%—45%）	厌氧微生物丰度升高，需氧微生物、功能微生物丰度下降	土壤微环境恶化 + 重金属毒性，破坏微生物生存条件

二、复合污染对土壤微生物功能的影响

土壤微生物功能是微生物群落对土壤生态系统的作用体现,主要包括微生物代谢活性、污染物降解能力、物质循环功能等,这些功能的正常发挥是土壤生态系统健康稳定的关键。大气-土壤复合污染通过破坏微生物群落结构,干扰微生物的生理代谢过程,导致微生物功能显著下降,进而影响土壤肥力维持、污染物净化等生态服务功能。

(一) 对微生物代谢活性的抑制作用

微生物代谢活性是微生物生命活动的核心,包括呼吸作用、酶活性、物质合成等,直接反映微生物的生存状态与功能发挥能力。大气-土壤复合污染对微生物代谢活性的抑制,主要源于污染物对微生物酶系统、能量代谢过程的干扰。重金属作为重金属+有机物复合污染的核心污染物,会与微生物体内的酶活性中心结合,破坏酶的空间结构,抑制酶活性,如脲酶、磷酸酶、脱氢酶等参与土壤物质循环的关键酶,其活性在复合污染土壤中可下降50%—80%,导致微生物代谢速率减慢。

有机物则通过干扰微生物的能量代谢过程,抑制微生物的呼吸作用,减少能量产生,进而影响微生物的生长繁殖与代谢活动;颗粒物+重金属复合污染中,土壤孔隙结构被破坏,透气性下降,导致微生物呼吸作用所需的氧气不足,同时重金属的毒性作用进一步抑制代谢酶活性,双重作用下,微生物代谢活性显著降低。微生物代谢活性的下降,会直接导致土壤中物质转化速率减慢,土壤肥力下降,影响植物生长。

(二) 对微生物污染物降解能力的影响

土壤微生物是污染物降解的核心力量,能够通过代谢作用将土壤中的有机物、重金属等污染物转化为无毒或低毒物质,实现土壤净化。大气-土壤复合污染会显著降低微生物的污染物降解能力,主要体现在两个方面:一是复合污染导致降解性微生物丰度下降,许多能够降解有机物、转化重金属的微生物(如降解菌、固氮菌)因污染物毒性抑制而消亡,导致降解菌群数量减少;二是污染物的协同作用会干扰微生物的降解代谢过程,抑制降解酶的活性,降低降解效率。

在重金属+有机物复合污染中,重金属会抑制降解菌的生长繁殖,同时有机物的存在会增加重金属的生物有效性,进一步增强毒性,导致微生物对有机物的

降解率下降 30%—70%；对于颗粒物 + 重金属复合污染，颗粒物会吸附污染物，降低污染物的生物可利用性，同时重金属的毒性抑制微生物降解活性，导致污染物在土壤中持续累积，难以被降解。此外，复合污染还会改变微生物的降解途径，导致降解产物的毒性增加，进一步加剧土壤污染。

（三）对土壤物质循环功能的间接影响

土壤微生物参与土壤碳、氮、磷等元素的循环过程，是物质循环的核心驱动者，复合污染通过抑制微生物功能，间接破坏土壤物质循环的稳定性。在碳循环中，微生物通过分解土壤有机质，将有机碳转化为无机碳，释放到大气中，复合污染抑制微生物的分解代谢活性，导致土壤有机质分解速率减慢，有机碳累积，影响碳循环平衡；在氮循环中，硝化细菌、反硝化细菌等功能微生物的丰度与活性下降，导致土壤硝化、反硝化过程受阻，氮素转化效率降低，土壤氮素流失加剧，影响土壤肥力与植物生长。

在磷循环中，微生物通过分泌磷酸酶，将土壤中难溶性磷转化为可溶性磷，供植物吸收利用，复合污染抑制磷酸酶活性，导致土壤中难溶性磷累积，可溶性磷含量下降，影响植物的磷吸收。同时，复合污染导致微生物群落结构失衡，不同功能微生物的协同作用被破坏，进一步加剧土壤物质循环的紊乱，影响土壤生态系统的健康稳定。

三、复合污染下土壤微生物群落的响应机制

面对大气 - 土壤复合污染的胁迫，土壤微生物群落会通过自身的生理调节、群落调整等方式，产生适应性响应，以抵御污染物的毒性影响，维持自身生存与部分功能发挥。揭示这些响应机制，能够明确微生物对复合污染的适应规律，为土壤微生物修复技术的研发、修复菌株的筛选提供理论支撑，推动土壤复合污染的精准修复。

（一）微生物自身的生理适应机制

微生物自身的生理适应是抵御复合污染毒性的基础，主要通过细胞结构调整、代谢途径优化、解毒机制激活等方式，降低污染物对自身的损伤。在重金属 + 有机物复合污染胁迫下，微生物会通过增厚细胞膜、合成胞外聚合物（EPS），将重金属离子吸附在细胞表面，减少重金属进入细胞内部，同时激活细胞内的解毒酶系统，将重金属离子转化为无毒或低毒形态，储存于细胞内或排出体外；对于

有机物，微生物会诱导合成降解酶，优化代谢途径，提高对有机物的降解效率，降低有机物的毒性影响。

在颗粒物 + 重金属复合污染中，微生物会通过调整呼吸方式，由需氧呼吸转为厌氧呼吸，适应土壤透气性下降的环境；同时，通过合成抗氧化酶（如超氧化物歧化酶、过氧化氢酶），清除污染物胁迫产生的活性氧，减少细胞损伤。此外，微生物还会通过调节细胞内渗透压、合成相容性溶质等方式，适应复合污染导致的土壤微环境变化，维持细胞的正常生理功能。

（二）微生物群落的结构调整机制

复合污染胁迫下，土壤微生物群落会通过结构调整，实现适应性响应，核心是通过物种竞争与筛选，保留耐污染物种，淘汰敏感物种，形成适应复合污染环境的优势群落。这种结构调整主要表现为三个方面：一是群落优势物种的更替，耐污染的细菌、真菌逐渐成为群落的优势物种，占据主导地位，敏感物种逐渐消亡，形成新的群落结构；二是群落多样性的适应性变化，虽然整体多样性下降，但耐污染物种的多样性会有所提升，以适应不同浓度、不同类型的污染物胁迫；三是群落间的协同作用增强，不同耐污染物种之间通过协同代谢、相互协作，提高对复合污染的抵御能力与降解效率。

例如，在重金属 + 有机物复合污染土壤中，芽孢杆菌属与曲霉属会形成协同作用，芽孢杆菌属通过解毒作用降低重金属毒性，曲霉属通过降解作用分解有机物，两者协同提升群落对复合污染的适应性；在颗粒物 + 重金属复合污染土壤中，厌氧微生物与耐重金属微生物协同作用，适应土壤缺氧与重金属胁迫的双重环境，维持群落的基本功能。

（三）响应机制的应用价值与实践意义

复合污染下土壤微生物群落的响应机制，为土壤微生物修复技术的应用提供了重要的理论依据，其核心应用价值在于为修复菌株的筛选、修复工艺的优化提供指导。通过揭示微生物的生理适应机制，可筛选出具有强解毒能力、高降解效率的耐污染微生物菌株，用于土壤复合污染的生物修复；通过明确群落结构调整规律，可优化微生物修复体系，构建人工复合微生物群落，提升修复效率。

微生物群落的响应机制能够反映土壤复合污染的程度，可作为土壤污染状况的生物指示指标，通过监测微生物群落的多样性、丰度及功能变化，精准评估土壤复合污染的严重程度，为污染防控与修复提供数据支撑。此外，深入研究微生物

物响应机制，能够完善复合污染生态效应的理论体系，明确微生物与复合污染的相互作用关系，为土壤生态系统的保护与修复提供科学依据。

大气－土壤复合污染对土壤微生物群落的影响是全方位、多层次的，不仅会破坏微生物群落结构，导致群落多样性下降、物种丰度失衡，不同类型复合污染的破坏程度与特征存在明显差异，其中重金属＋有机物复合污染的破坏作用显著大于颗粒物＋重金属复合污染；还会抑制微生物代谢活性，降低污染物降解能力，间接破坏土壤物质循环功能，影响土壤生态系统的健康稳定。面对复合污染胁迫，土壤微生物群落会通过自身生理适应与群落结构调整，产生适应性响应，抵御污染物毒性，维持自身生存与部分功能发挥。

第二节 污染物在土壤－植物系统中的迁移与累积

土壤－植物系统是污染物迁移转化的重要载体，大气沉降与土壤自身残留的污染物（如重金属、持久性有机污染物 POPs 等），会通过多种途径进入植物体内，经过迁移、转运与累积，不仅会影响植物自身的生长发育，还会通过食物链传递，对人体健康构成潜在威胁。梳理污染物在土壤－植物系统中的迁移路径，分析影响迁移累积效率的关键因素，探讨污染物累积带来的生态危害与健康风险，能够完善复合污染生态效应研究，为土壤－植物系统污染防控、农产品安全保障提供科学依据，助力生态环境与人体健康协同保护。

一、污染物在土壤－植物系统中的迁移路径

污染物在土壤－植物系统中的迁移是一个连续的动态过程，以土壤为起点、植物为载体，经历根系吸收、体内转运、地上部累积三个核心环节，不同类型污染物的迁移路径虽存在细微差异，但整体遵循“土壤－根系－植物体内－地上部”的核心规律，最终完成污染物的迁移与累积。

（一）根系吸收：污染物进入植物的首要环节

根系是污染物从土壤进入植物体内的首要通道，植物根系通过根系分泌物与土壤环境相互作用，选择性吸收土壤中的污染物，这一过程受污染物形态、土壤环境及根系特性的共同影响。对于重金属污染物而言，土壤中可溶态的重金属离子（如镉离子、铅离子），会通过根系细胞膜上的离子通道，主动或被动进入根

系细胞，而难溶态重金属则需通过根系分泌物的溶解作用，转化为可溶态后才能被吸收，部分重金属还可通过根系表面的吸附作用，附着在根系表皮，进而逐步渗透进入细胞内部。

对于 POPs 等持久性有机污染物，其自身具有疏水性强、难溶于水的特点，主要通过土壤颗粒的吸附作用附着在根系表面，再通过根系表皮的渗透作用进入根系细胞，部分 POPs 还可通过根系与土壤微生物的相互作用，被微生物降解为小分子物质后，再被根系吸收。研究表明，根系对污染物的吸收能力与根系表面积、根系分泌物含量密切相关，根系发达、分泌物丰富的植物，对污染物的吸收效率更高，是污染物进入植物体内的关键前提。

（二）体内转运：污染物在植物内部的传递过程

污染物被根系吸收后，需通过植物体内的输导组织，完成从根系到地上部的转运，这一过程是污染物在植物体内累积的核心环节，不同污染物的转运方式与速率存在明显差异。重金属污染物进入根系细胞后，一部分会被根系细胞的液泡储存，形成沉淀，不再参与转运；另一部分则会通过木质部的导管，随着植物蒸腾作用产生的水分流动，向上转运至茎、叶等地上部器官，转运过程中，部分重金属会与植物体内的有机酸、蛋白质等物质结合，形成稳定的络合物，降低其毒性，同时促进其在植物体内的转运。

POPs 等有机污染物进入根系后，由于其疏水性特点，主要通过植物体内的韧皮部筛管进行转运，随植物体内的养分运输，逐步传递至茎、叶、果实等部位，部分 POPs 还可在植物体内发生迁移转化，转化为毒性更强的衍生物，进一步加剧其危害。转运速率受植物蒸腾作用、输导组织发达程度影响，蒸腾作用越强、输导组织越发达，污染物的转运速率越快，在地上部的累积速度也越快，其中小麦等作物的不同部位对重金属的转运能力存在差异，根的吸收转运能力最强，叶片次之，茎和籽粒相对较弱。

（三）地上部累积：污染物的最终富集环节

污染物经过根系吸收、体内转运后，最终在植物地上部器官（茎、叶、果实、籽粒等）完成累积，累积量与污染物类型、植物种类、生长周期密切相关。重金属污染物在植物地上部的累积具有明显的器官差异性，通常情况下，叶片中的累积量最高，其次是茎，果实和籽粒中的累积量相对较低，但部分重金属（如镉）易在籽粒中累积，对农产品安全构成严重威胁，如“镉大米”就是镉在水稻籽粒

中过量累积的典型案例，对人体健康存在极大隐患。

POPs 等有机污染物则主要累积在植物的叶片和茎部，由于其难降解、易富集的特性，会在植物体内持续累积，且随着植物生长周期的延长，累积量逐渐增加，尤其是在植物生长后期，污染物会向果实、籽粒等可食用部位转移，进一步增加食品安全风险。此外，污染物在植物地上部的累积还会受到环境因素的影响，高温、强光等条件会促进污染物的累积，而适宜的水分、养分条件则会在一定程度上降低累积量。

二、影响污染物迁移累积效率的关键因素

污染物在土壤-植物系统中的迁移累积效率，并非固定不变，而是受植物种类、土壤理化性质、污染物形态等多种因素的综合影响，这些因素相互作用，共同决定污染物在系统中的迁移速率与累积量，明确这些因素的影响机制，能够为精准防控污染物累积提供针对性支撑。

（一）植物种类的影响：富集特征的物种差异性

不同植物种类对污染物的吸收、转运与累积能力存在显著差异，这是影响迁移累积效率的核心因素，主要体现在富集系数（植物体内污染物浓度与土壤中污染物浓度的比值）的差异上。根据富集系数的大小，可将植物分为富集植物、非富集植物与超富集植物，超富集植物对特定污染物的富集系数大于 10，能够大量吸收并累积土壤中的污染物，如蜈蚣草对砷的富集、东南景天对镉的富集，这类植物常被用于土壤污染的植物修复。

非富集植物的富集系数小于 1，对污染物的吸收与累积能力较弱，如小麦、玉米等粮食作物，对多数重金属的富集能力有限，但部分重金属仍会在其可食用部位少量累积，影响农产品安全；富集植物的富集系数介于 1-10 之间，对污染物具有一定的吸收累积能力，但累积量低于超富集植物。此外，同一植物的不同品种，对污染物的富集特征也存在差异，如不同品种的水稻，对镉的累积能力相差较大，这为筛选低累积品种、保障农产品安全提供了可能。

（二）土壤理化性质的影响：迁移环境的调控作用

土壤理化性质通过改变污染物在土壤中的形态与有效性，间接影响污染物的迁移累积效率，其中土壤 pH 值、有机质含量、土壤质地的影响最为显著。土壤 pH 值主要影响重金属的形态，酸性土壤中，重金属易转化为可溶态离子，增强

其生物有效性，促进植物根系吸收，进而提高迁移累积效率；碱性土壤中，重金属易形成沉淀，降低其生物有效性，减少植物吸收，迁移累积效率显著下降。

土壤有机质含量越高，对污染物的吸附能力越强，能够将土壤中的污染物吸附在有机质表面，降低其生物有效性，从而减少植物对污染物的吸收与累积；反之，土壤有机质含量过低，污染物易在土壤中游离，增加其被植物吸收的概率。土壤质地方面，砂质土壤透气性好、保肥保水能力弱，污染物在土壤中迁移速度快，易被植物吸收；粘质土壤透气性差、吸附能力强，污染物迁移速度慢，植物吸收量相对较少，而土壤板结等理化性质的改变，也会间接影响污染物的迁移与植物吸收。

（三）污染物形态的影响：生物有效性的核心决定因素

污染物的形态不同，其生物有效性与迁移能力存在显著差异，这是影响迁移累积效率的关键内在因素。对于重金属污染物而言，可分为可溶态、交换态、沉淀态、有机结合态“四种形态”，其中可溶态与交换态重金属的生物有效性最高，最易被植物根系吸收，是污染物迁移累积的主要形态；沉淀态与有机结合态重金属的生物有效性较低，难以被植物吸收，迁移累积能力较弱。

对于 POPs 等有机污染物，其形态主要分为游离态、吸附态与结合态，游离态 POPs 的生物有效性最高，易被植物吸收与转运，累积效率高；吸附态 POPs 主要附着在土壤颗粒或植物表面，生物有效性较低，迁移累积能力较弱；结合态 POPs 则与土壤有机质或植物组织紧密结合，难以被吸收，几乎不参与迁移累积过程。此外，污染物的浓度也会影响迁移累积效率，土壤中污染物浓度越高，植物吸收的污染物量越多，迁移累积效率也越高，但当浓度超过植物耐受阈值时，会抑制植物生长，反而降低迁移累积效率。

三、污染物累积的危害与人体健康风险

污染物在土壤-植物系统中迁移累积后，会产生双重危害：一方面会直接影响植物的生长发育与生理代谢，破坏土壤-植物生态系统的稳定性；另一方面会通过食物链传递，进入人体，对人体健康构成潜在威胁，深入探讨这些危害与风险，能够提升人们对污染物累积危害的认知，为防控工作提供重要支撑。

（一）对植物生长与生理代谢的直接危害

污染物在植物体内的过量累积，会直接干扰植物的正常生长发育，破坏其生

理代谢过程，不同污染物的危害表现存在差异，但整体呈现“低浓度抑制、高浓度致死”的规律。重金属污染物累积过量时，会破坏植物细胞膜的完整性，导致细胞膜通透性增加，细胞内的营养物质大量流失，同时抑制植物体内酶的活性，干扰光合作用、呼吸作用等核心生理过程，导致植物生长迟缓、叶片发黄、枯萎，严重时会导致植物死亡。

例如，汞污染可能导致植物根部发生扭曲变形并呈现褐色，而镉污染则可能使得植物叶子失去绿色，转为黄色，并产生褐色斑点，影响植物的正常生理功能。POPs 等有机污染物累积过量时，会干扰植物的激素代谢，导致植物开花结果异常，结实率下降，同时抑制植物的光合作用，减少有机物合成，影响植物的产量与品质。此外，污染物的累积还会降低植物的抗逆能力，使植物更易遭受病虫害的侵袭，进一步加剧对植物的危害。

（二）对植物生理代谢的深层干扰

除了直接影响植物生长外，污染物累积还会对植物生理代谢产生深层干扰，破坏植物的物质合成与转化过程。重金属会与植物体内的蛋白质、核酸等生物大分子结合，破坏其结构与功能，抑制蛋白质合成与 DNA 复制，导致植物细胞分裂受阻，生长发育迟缓；同时，重金属还会干扰植物体内的养分代谢，影响植物对氮、磷、钾等营养元素的吸收与利用，导致植物营养不良，进一步加剧生长抑制。

POPs 等有机污染物则会干扰植物的光合作用与呼吸作用，抑制叶绿素的合成，降低光合速率，同时影响呼吸酶的活性，减少能量产生，导致植物体内能量供应不足，影响各项生理活动的正常开展。此外，污染物累积还会导致植物体内活性氧大量产生，引发氧化应激反应，破坏植物细胞的正常结构，加速植物衰老，缩短植物生长周期。

（三）通过食物链传递的人体健康风险

污染物在植物体内累积后，会通过食物链逐级传递，最终进入人体，对人体健康构成长期潜在风险，这是污染物迁移累积最主要的间接危害。植物是食物链的基础环节，污染物在植物体内累积后，会被食草动物摄入，进而传递至食肉动物，最终通过农产品、畜禽产品等进入人体，且在传递过程中，污染物会发生生物放大效应，浓度逐级升高，对人体健康的危害也随之加剧。

重金属通过食物链进入人体后，会在人体组织器官中持续累积，难以排出，长期摄入会引发多种疾病，如镉会在人体的骨骼和肾脏等部位不断富集，引发骨

质疏松、肾功能衰竭、癌症及心血管疾病等，长期食用含镉过高的粮食还会引起骨痛病，表现为腰、手、脚等关节疼痛，严重时行动困难；汞对肝脏、肾和神经均具有毒性作用；砷有致癌和致畸作用；铅对神经系统具有毒性作用，长期食用含铅过高的粮食会导致贫血、神经系统损害、智力障碍和肾损害；铬对皮肤、黏膜有腐蚀作用。

POPs 等有机污染物进入人体后，会干扰人体的内分泌系统、免疫系统，影响生殖发育，甚至具有致癌、致畸、致突变的“三致”效应，长期摄入会显著增加人体患病风险。此外，农产品中污染物超标，还会影响农产品的质量安全，制约农业产业发展，同时对生态环境与人体健康构成双重威胁。

污染物在土壤-植物系统中的迁移遵循“根系吸收-体内转运-地上部累积”的核心路径，重金属与 POPs 等不同类型污染物的迁移特征存在差异，但均需经过三个核心环节完成累积。植物种类、土壤理化性质、污染物形态是影响迁移累积效率的关键因素，植物种类决定富集特征，土壤理化性质调控污染物生物有效性，污染物形态直接影响迁移能力，三者相互作用共同决定污染物的累积量。污染物在植物体内的过量累积，会直接危害植物生长与生理代谢，导致植物生长迟缓、生理紊乱，甚至死亡；同时会通过食物链传递，引发人体健康风险，重金属的长期累积会损害人体器官功能，POPs 则会干扰人体内分泌与免疫系统，带来“三致”风险。

第三节 对地表水与地下水的间接污染风险

大气-土壤复合污染不仅会破坏土壤生态系统、影响植物生长，还会通过地表径流、淋溶作用等途径，间接污染地表水与地下水，形成“大气-土壤-水体”的循环污染链条。地表水与地下水是重要的水资源，其水质安全直接关系到生态环境稳定与人类生产生活用水保障。分析复合污染对地表水、地下水的污染路径，评估其对水质与地下水环境的影响程度，探讨污染扩散规律与区域风险差异，能够完善复合污染生态效应研究体系，为水资源保护、污染风险防控提供科学依据，助力实现土壤、大气与水资源的协同保护。

一、大气－土壤复合污染对地表水与地下水的污染路径

大气－土壤复合污染对地表水与地下水的间接污染，核心是通过地表径流与淋溶作用两大途径，实现污染物从土壤向水体的迁移，不同途径的污染逻辑、迁移特征存在差异，但均遵循“污染物累积—动力驱动—水体迁移”的核心规律，最终导致地表水与地下水受到污染。

（一）地表径流驱动的地表水污染路径

地表径流是复合污染间接污染地表水的主要路径，其污染逻辑是大气沉降与土壤残留的污染物，在降水、灌溉等水分驱动下，随地表径流汇入周边地表水，完成污染物的迁移与扩散。大气中的污染物通过干湿沉降作用，沉降至土壤表层，与土壤中原有的重金属、POPs等污染物叠加，形成复合污染；当遇到降水、灌溉等情况时，地表水分达到饱和，形成地表径流，径流过程中会冲刷土壤表层，携带土壤中的可溶性污染物、吸附在土壤颗粒上的污染物，沿地表坡度流向沟渠、河流、湖泊等地表水水体。

这种污染路径具有突发性、扩散性的特点，暴雨天气时，地表径流流速快、冲刷力强，会携带大量土壤颗粒与污染物，短时间内导致地表水水质恶化；而日常降水或灌溉形成的地表径流，虽流速较慢，但会持续携带污染物进入地表水，导致地表水污染物浓度长期超标。此外，地表径流携带的污染物还会在地表水水体中进一步扩散，污染范围逐渐扩大，尤其在平原、流域等地势平坦区域，地表径流分布广泛，污染扩散速度更快，对地表水的影响更为显著。

（二）淋溶作用驱动的地下水污染路径

淋溶作用是复合污染间接污染地下水的核心路径，其污染逻辑是污染物在降水、灌溉水的渗透作用下，从土壤表层逐步向下淋溶，穿过土壤剖面，进入地下水含水层，导致地下水受到污染。大气－土壤复合污染中，土壤中的可溶性污染物（如可溶态重金属离子、游离态POPs），在水分渗透作用下，随着水分向土壤深层迁移，经过土壤颗粒的吸附、过滤作用后，部分污染物仍能突破土壤屏障，进入地下水含水层，与地下水混合，导致地下水污染物浓度升高。

淋溶作用导致的地下水污染具有隐蔽性、长期性的特点，地下水位于土壤深层，污染后不易被发现，且污染物在地下水中迁移速度较慢，一旦受到污染，治理难度大、周期长。同时，土壤质地、孔隙度等因素会影响淋溶效率，砂质土壤

孔隙度大、渗透性强，污染物淋溶速度快，易污染地下水；粘质土壤孔隙度小、渗透性弱，可在一定程度上阻挡污染物淋溶，降低地下水污染风险。此外，地下水补给量越大，淋溶进入地下水的污染物量越多，污染程度也越严重。

（三）污染迁移的核心逻辑与协同效应

复合污染对地表水与地下水的间接污染，核心迁移逻辑是“污染源累积—动力驱动迁移—水体接纳累积”，大气沉降为土壤补充污染物，土壤成为污染物的“储存库”，而地表径流与淋溶作用则是污染物从土壤向水体迁移的“载体”，最终实现污染物在地表水与地下水中的累积。同时，两种污染路径并非独立存在，而是存在协同效应，地表径流未携带的可溶性污染物，会通过淋溶作用进入地下水，而地下水与地表水之间存在水力联系，受污染的地下水会通过补给作用进入地表水，进一步加剧地表水污染，形成“地表水—地下水”的交叉污染。

复合污染中不同污染物的协同作用，会加剧污染迁移效率，如重金属与有机物结合形成的复合污染物，水溶性增强，更易被地表径流携带、被淋溶进入水体，同时会降低土壤对污染物的吸附能力，进一步促进污染物向水体迁移，扩大污染范围与危害程度。

二、复合污染对地表水与地下水环境的影响评估

大气—土壤复合污染通过地表径流、淋溶作用对地表水与地下水造成的影响，主要体现在地表水水质恶化、地下水含水层污染两个方面，通过量化评估污染程度与风险，能够明确水资源污染现状，为污染防控提供针对性支撑。

（一）对地表水水质的影响评估

复合污染对地表水水质的影响，主要体现在 pH 值异常、污染物浓度超标两个核心方面，同时会破坏地表水生态系统，影响水生生物生存。pH 值是地表水水质的重要指标，复合污染中，重金属离子、酸性污染物通过地表径流进入地表水，会导致地表水 pH 值降低，呈现酸性，当 pH 值低于 6.5 时，会破坏地表水的酸碱平衡，影响水生生物的生存环境；而部分碱性污染物的进入，则会导致地表水 pH 值升高，同样会影响水质稳定性。

污染物浓度超标是地表水污染的核心表现，复合污染携带的重金属、POPs 等污染物，会导致地表水重金属浓度、有机污染物浓度显著超过国家地表水水质标准，其中重金属（镉、铅、汞、砷等）浓度超标最为常见，部分污染严重区域，

地表水镉浓度可超过标准限值 5-10 倍，POPs 浓度可超过标准限值 3-8 倍。此外，污染物进入地表水后，会与水体中的悬浮物、沉积物结合，形成二次污染，长期累积会导致地表水透明度下降、水体富营养化，破坏水生生物群落结构，导致水生生物畸形、死亡，影响地表水生态系统的稳定性。

（二）对地下水环境的影响评估

复合污染对地下水环境的影响，主要集中在地下水含水层污染、地下水水质恶化，其影响程度具有隐蔽性、长期性的特点。地下水含水层是地下水的储存载体，复合污染通过淋溶作用，使污染物进入含水层，吸附在含水层介质表面，或溶解在地下水中，导致含水层受到污染，破坏含水层的蓄水能力与水质。对于浅层地下水含水层，由于埋藏较浅，易受淋溶作用影响，污染程度更为严重，而深层地下水含水层虽埋藏较深，但污染物长期淋溶也会逐步渗透，导致污染范围不断扩大。

地下水水质恶化主要表现为污染物浓度超标，可溶态重金属、POPs 等污染物进入地下水后，会导致地下水重金属浓度、有机污染物浓度超标，部分污染区域地下水镉、铅浓度超过饮用水标准限值 10-20 倍，严重威胁饮用水安全。同时，污染物会改变地下水的理化性质，导致地下水硬度升高、异味加重，进一步降低地下水水质，且地下水污染后，治理难度极大，需要长期的修复过程，其影响会持续数十年。

（三）污染风险的量化评估

复合污染对地表水与地下水的污染风险，可通过污染风险指数（RI）进行量化评估，结合污染物浓度、毒性、迁移能力等参数，划分风险等级。根据量化评估结果，污染风险可分为高风险、中风险、低风险三个等级，高风险区域主要集中在工业矿区、城市周边等复合污染严重区域，该区域地表水污染物浓度严重超标，地下水含水层受到明显污染，水资源无法正常利用，对生态环境与人体健康构成严重威胁；中风险区域主要为农业耕作区、平原灌区，地表水与地下水污染物浓度轻度至中度超标，水资源利用受到一定限制，存在潜在污染风险；低风险区域主要为生态保护区、植被覆盖率高的区域，复合污染程度较轻，地表水与地下水水质基本符合标准，污染风险较低。

量化评估结果显示，工业矿区周边的地表水污染风险指数可达 80 以上，属于高风险区域；农业耕作区污染风险指数为 40-80，属于中风险区域；生态保护

区污染风险指数低于 40, 属于低风险区域。此外, 污染风险还与区域水资源分布、水力条件密切相关, 水资源丰富、水力循环活跃的区域, 污染扩散速度快, 但自我净化能力也较强, 风险等级相对较低; 水资源匮乏、水力循环缓慢的区域, 污染易累积, 风险等级相对较高。

三、间接污染的扩散规律与区域风险差异

复合污染对地表水与地下水的间接污染, 其扩散规律受地形地貌、水力条件、土地利用类型等因素影响, 不同区域(平原、山区、流域)的污染扩散特征与风险差异显著, 明确这些差异, 能够为不同区域的水资源保护与污染防控提供针对性方案。

(一) 间接污染的核心扩散规律

复合污染间接污染的扩散规律, 主要遵循“从污染源向周边扩散、从表层向深层渗透、从高浓度向低浓度迁移”的核心原则。地表径流驱动的地表水污染, 扩散方向与地表径流流向一致, 从污染源头(如工业矿区、农业区)向周边沟渠、河流、湖泊扩散, 扩散速度受径流流速、降水强度影响, 暴雨天气会加速扩散, 使污染范围在短时间内扩大; 淋溶作用驱动的地下水污染, 扩散方向主要是垂直向下与水平扩散, 垂直方向上从土壤表层向深层含水层扩散, 水平方向上从污染源头向周边地下水扩散, 扩散速度受土壤渗透性、地下水补给量影响, 砂质土壤区域扩散速度快于粘质土壤区域。

污染扩散过程中存在污染物累积效应, 在地表水的河流交汇处、湖泊周边, 以及地下水的补给区、排泄区, 污染物易累积, 形成高浓度污染区域; 而在水力循环活跃的区域, 污染物会被稀释, 浓度逐渐降低, 扩散范围相对较小。此外, 复合污染中不同污染物的扩散速度存在差异, 可溶性污染物扩散速度快, 吸附在土壤颗粒上的污染物扩散速度慢, 且易在土壤与水体交界处累积。

(二) 不同区域的污染风险差异

平原区域地势平坦、地表径流分布广泛, 土壤多为砂质或壤质土壤, 渗透性较强, 是复合污染间接污染的高风险区域之一。该区域农业耕作密集、人类活动频繁, 复合污染程度较高, 地表径流能够快速携带污染物扩散至周边地表水, 淋溶作用也易导致污染物进入地下水, 且平原区域地下水含水层埋藏较浅, 易受污染, 同时地表水与地下水水力联系密切, 易形成交叉污染, 污染风险持续较高。

山区区域地势陡峭、地表径流流速快，土壤多为粘质土壤，渗透性较弱，复合污染间接污染风险相对较低。该区域地表径流冲刷力强，但停留时间短，污染物难以在地表累积，且粘质土壤能够阻挡污染物淋溶，减少地下水污染风险；但山区地表水多为溪流、小河，水量较小，自我净化能力弱，一旦受到污染，水质恶化速度快，且山区地下水补给量有限，污染后修复难度大，局部区域仍存在中高污染风险。

流域区域水资源丰富，地表径流与地下水水力循环活跃，复合污染间接污染风险呈现“流域上游低、下游高”的分布特征。流域上游多为山区，植被覆盖率高，复合污染程度较轻，污染风险较低；流域中游为平原灌区，农业活动与人类活动频繁，复合污染程度较高，地表径流与淋溶作用导致污染物向流域下游扩散；流域下游地势平坦、水体集中，污染物易累积，地表水与地下水污染程度最为严重，污染风险最高，且会影响流域周边的水资源利用。

（三）区域水资源保护的针对性依据

结合不同区域的污染风险差异，可为水资源保护提供针对性依据，实现精准防控。针对平原区域，重点加强地表径流管控，修建截污沟、沉淀池，减少地表径流携带的污染物进入地表水；同时改良土壤理化性质，增加土壤对污染物的吸附能力，减少淋溶作用对地下水的污染，加强地下水监测，建立污染预警机制。针对山区区域，重点加强污染源管控，减少工业污染与农业污染排放，保护植被覆盖，减少地表径流冲刷，同时加强山区地表水监测，及时发现并处理污染问题。

针对流域区域，建立流域联防联控机制，统筹上游、中游、下游的污染防控工作，上游加强生态保护，减少污染物输入；中游加强污染治理，控制地表径流与淋溶污染；下游加强水质净化，减少污染物累积，同时加强地表水与地下水的协同监测，实现水资源的全方位保护。此外，针对不同风险等级区域，采取差异化防控措施，高风险区域重点开展污染治理与修复，中风险区域加强污染管控与监测，低风险区域加强生态保护，防范污染扩散。

大气-土壤复合污染通过地表径流与淋溶作用，形成对地表水与地下水的间接污染，两条污染路径协同作用，构建“大气-土壤-水体”的循环污染链条，其核心迁移逻辑是污染物的累积、动力驱动与水体接纳。复合污染会导致地表水pH值异常、污染物浓度超标，破坏地表水生态系统，同时污染地下水含水层，导致地下水水质恶化，通过量化评估可将污染风险划分为高、中、低三个等级，

工业矿区、城市周边为高风险区域。间接污染的扩散遵循“从污染源向周边扩散、从表层向深层渗透”的规律，不同区域的污染风险差异显著，平原区域风险最高，山区区域风险较低，流域区域呈现“上游低、下游高”的特征。

第四节 生态系统健康与生物多样性的响应

大气-土壤复合污染作为全球性的环境问题，不仅会破坏土壤与水体环境，更会渗透到陆地生态系统的各个环节，对生态系统结构完整性、功能稳定性造成深远影响，进而引发生物多样性衰退，威胁生态系统健康。陆地生态系统（森林、农田、草地）是生物多样性的主要载体，其健康状况直接决定生态系统的自我调节能力与服务功能。深入分析复合污染对陆地生态系统结构与功能的破坏，探讨其对动植物多样性的影响，揭示生态系统的响应机制与恢复能力，明确长期生态风险，能够完善复合污染生态效应研究体系，为生态系统保护、生物多样性保育提供科学依据，助力实现生态环境的可持续发展。

一、大气-土壤复合污染对陆地生态系统结构与功能的破坏

陆地生态系统的结构与功能相互依存、相互制约，结构的完整性是功能正常发挥的基础，而大气-土壤复合污染通过干扰生态系统的物质循环、能量流动，破坏生态系统结构的稳定性，进而导致其功能退化，不同类型陆地生态系统的破坏特征存在显著差异。

（一）对森林生态系统结构与功能的破坏

森林生态系统结构复杂、生物多样性丰富，是陆地生态系统的核心组成部分，大气-土壤复合污染对其破坏主要体现在群落结构紊乱与生态功能衰退两个方面。大气中的污染物通过干湿沉降作用，沉降至森林土壤表层，与土壤中原有污染物叠加，导致土壤 pH 值下降、养分失衡，破坏树木根系的生长环境，导致根系腐烂、吸收能力下降，进而引发树木生长迟缓、叶片枯黄、枯萎甚至死亡。

结构上，复合污染会导致森林群落优势树种更替，敏感树种（如杉木、马尾松）逐渐衰退，耐污染树种（如侧柏、构树）成为优势树种，群落层次简化，林下植被覆盖率下降，苔藓、地衣等敏感植物大量消亡，破坏森林群落的垂直结构与水平结构。功能上，森林的固碳释氧、水土保持、净化空气等功能显著退化，复合

污染会抑制森林土壤呼吸作用，降低土壤碳库储量，研究表明，酸雨型复合污染会使森林土壤呼吸量降低 8.0%，同时减少土壤活性碳库含量，影响碳循环平衡；此外，树木生长衰退导致森林涵养水源、保持水土的能力下降，易引发水土流失、山体滑坡等生态灾害。

（二）对农田生态系统结构与功能的破坏

农田生态系统是人为干预较强的生态系统，以农作物种植为核心，其结构与功能直接关系到农业生产与粮食安全。大气－土壤复合污染对农田生态系统的破坏，主要体现在土壤质量下降、作物群落单一化与生产功能退化。复合污染导致农田土壤重金属、POPs 等污染物累积，破坏土壤微生物群落结构，抑制土壤酶活性，降低土壤肥力，同时导致土壤理化性质恶化，如土壤板结、透气性下降，影响农作物根系生长。结构上，复合污染会导致农作物品种单一化，耐污染作物品种被广泛种植，而敏感作物品种逐渐被淘汰，农田生态系统的生物多样性降低，群落结构趋于简单，农田周边的杂草、昆虫等伴生生物数量减少，破坏农田生态系统的平衡。功能上，农田的生产功能显著下降，污染物在农作物体内累积，不仅导致作物产量降低、品质变差，还会影响农田生态系统的物质循环与能量流动，复合污染引发的酸雨会使农田土壤呼吸量降低 14.7%，显著抑制土壤异养呼吸与自养呼吸，干扰土壤碳循环，同时导致农田的净化功能、养分循环功能退化，加剧土壤污染的恶性循环。

（三）对草地生态系统结构与功能的破坏

草地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分，具有保持水土、涵养水源、调节气候等重要功能，大气－土壤复合污染对其破坏主要体现在植被退化与生态功能丧失。复合污染导致草地土壤污染物累积，土壤肥力下降，加上污染物的毒性作用，导致草地优势草本植物（如羊草、针茅）生长衰退，覆盖率下降，而耐污染的杂草（如狗尾草、蒲公英）大量滋生，草地群落结构紊乱。不同陆地生态系统受复合污染的破坏程度与功能退化特征存在明显差异，具体如下表所示，可为针对性开展生态修复提供依据。

陆地生态系统类型	结构破坏特征	功能退化表现	污染破坏程度
森林生态系统	优势树种更替，群落层次简化，林下植被消亡	固碳释氧、水土保持功能下降，土壤呼吸抑制，碳循环紊乱	中度至重度
农田生态系统	作物品种单一化，伴生生物减少，群落结构简单	生产功能下降，土壤肥力衰退，物质循环受阻，土壤呼吸抑制显著	重度
草地生态系统	优势草本衰退，杂草滋生，植被覆盖率下降	水土保持、调节气候功能丧失，草地退化、沙化	中度

功能上，草地的水土保持功能下降，植被覆盖率降低导致土壤侵蚀加剧，易引发草地沙化；调节气候功能退化，草地固碳能力下降，无法有效缓解温室效应；同时，草地作为畜牧业的重要载体，植被退化会导致载畜量下降，影响畜牧业发展，此外，复合污染会使草地土壤呼吸量降低 10.8%，其中异养呼吸显著下降，进一步干扰土壤碳循环平衡。

二、大气－土壤复合污染对动植物多样性的影响

生物多样性是生态系统健康的重要标志，包括植物多样性与动物多样性，大气－土壤复合污染通过破坏动植物的生存环境、抑制生长繁殖，导致生物多样性下降，引发植物群落退化、动物栖息地破坏、生物数量减少等一系列生态问题，对生态系统的稳定性造成严重威胁。

（一）对植物多样性的影响：群落退化与物种消亡

植物是生态系统的生产者，其多样性是生物多样性的基础，大气－土壤复合污染对植物多样性的影响主要体现在植物群落退化与敏感物种消亡。复合污染导致土壤环境恶化、养分失衡，加上大气污染物的直接伤害，使得敏感植物物种难以生存，逐渐消亡，而耐污染植物物种逐渐占据主导地位，导致植物群落多样性下降、结构单一化。在森林生态系统中，苔藓、地衣等对污染物敏感的植物率先消亡，常绿阔叶林、落叶阔叶林等敏感树种生长衰退，导致森林植物多样性显著下降；在农田生态系统中，农作物品种单一化，杂草、野花等伴生植物数量减少，甚至消亡，植物多样性急剧降低；在草地生态系统中，优势草本植物覆盖率下降，耐污染杂草滋生，草地植物群落退化，物种丰富度显著降低。此外，复合污染还会导致植物基因突变，影响植物的繁殖能力，进一步加剧植物多样性的衰退，部分珍稀濒危植物因生存环境破坏，面临灭绝风险。

（二）对动物多样性的影响：栖息地破坏与数量减少

动物是生态系统的消费者，其多样性依赖于植物多样性与适宜的栖息地，大气-土壤复合污染通过破坏动物栖息地、减少食物来源，导致动物多样性下降，主要表现为动物栖息地破碎化、生物数量减少、珍稀物种濒危。复合污染导致植物群落退化，使得动物的食物来源减少，同时，土壤与大气污染会直接影响动物的生长繁殖，导致动物发病率升高、繁殖能力下降。森林生态系统中，鸟类、兽类等动物因栖息地破坏、食物减少，数量显著下降，部分依赖特定树种生存的动物（如啄木鸟、松鼠）面临栖息地丧失的威胁；农田生态系统中，益虫（如蜜蜂、青蛙）数量减少，害虫大量滋生，破坏农田生态平衡，同时，农田污染物通过食物链传递，导致鸟类、小型哺乳动物体内污染物累积，影响其生存与繁殖；草地生态系统中，草原鼠兔、黄羊等草食动物因植被退化、食物短缺，数量减少，同时，污染物导致草地生态环境恶化，使得猛禽等天敌动物的数量也随之下降。

（三）对生物多样性的协同危害与连锁反应

大气-土壤复合污染对动植物多样性的危害具有协同效应，植物多样性下降会导致动物食物来源减少、栖息地破坏，进而加剧动物多样性下降；而动物多样性下降会影响植物的传粉、传播种子等过程，进一步加剧植物群落退化，形成“植物多样性下降—动物多样性下降”的连锁反应，破坏生态系统的食物链与食物网，导致生态系统结构紊乱、功能退化。

复合污染的长期累积会导致生物多样性的不可逆损失，珍稀濒危物种的消亡会破坏生态系统的遗传多样性，降低生态系统的自我调节能力与抗干扰能力，使得生态系统更易遭受病虫害、极端天气等外界干扰，进一步加剧生态系统的退化，形成恶性循环。同时，大气氮沉降等复合污染组分还会通过改变土壤养分平衡，间接影响动植物多样性，如氮沉降与磷输入的交互作用会改变森林土壤呼吸，进而影响植物生长与动物栖息环境。

三、生态系统对复合污染的响应机制与长期生态风险

面对大气-土壤复合污染的胁迫，陆地生态系统会通过自身的调节作用，产生适应性响应，以抵御污染危害、维持自身稳定，但这种响应能力具有一定限度。揭示生态系统的响应机制与恢复能力，明确复合污染的长期生态风险，能够为生态系统保护与修复提供针对性支撑。

（一）生态系统对复合污染的响应机制

生态系统对复合污染的响应机制主要包括个体层面、群落层面与系统层面的适应性调节，是生态系统自我调节能力的体现。个体层面，动植物通过自身的生理调节抵御污染危害，如植物通过合成抗氧化酶、分泌解毒物质，降低污染物对自身的伤害，动物通过代谢作用排出体内污染物，调整觅食行为，寻找适宜的生存环境；同时，部分植物会通过改变根系形态、增加胞外聚合物分泌，减少污染物吸收，动物则会通过迁移行为，远离污染严重区域。

群落层面，生态系统通过群落结构调整，实现适应性响应，耐污染物种逐渐成为优势物种，敏感物种逐渐消亡，形成适应复合污染环境的群落结构，同时，群落内物种之间的协同作用增强，通过相互协作，提高群落的抗污染能力。系统层面，生态系统通过调整物质循环、能量流动，维持自身的基本功能，如土壤微生物通过降解污染物，减少污染物累积，缓解污染危害；同时，生态系统的自我净化能力会通过分解者的作用，逐步降解部分污染物，降低污染对生态系统的破坏。此外，大气氮沉降等污染组分还会通过调节土壤氮磷比、改变土壤碳库结构，间接影响生态系统的响应过程。

（二）生态系统的恢复能力与影响因素

生态系统的恢复能力是指生态系统受到污染破坏后，通过自身调节或人为干预，恢复到原有健康状态的能力，其恢复能力的强弱受污染程度、生态系统类型、人为干预等因素影响。轻度复合污染下，生态系统的自我调节能力能够发挥作用，通过微生物降解、植物吸收等过程，逐步减少污染物累积，恢复生态系统的结构与功能，恢复周期相对较短（3—5年）。中度至重度复合污染下，生态系统的结构与功能遭到严重破坏，自我调节能力丧失，仅依靠自身难以恢复，需要人为干预，如开展土壤修复、植被重建、物种引入等措施，恢复周期较长（10—20年），甚至部分严重污染区域，生态系统难以恢复到原有状态，形成永久性退化。不同类型生态系统的恢复能力存在差异，森林生态系统恢复能力较强，草地生态系统次之，农田生态系统因人为干预较强，恢复能力受人类活动影响较大，合理的农业管理措施能够提升其恢复能力，而过度种植、滥用化肥农药会进一步降低其恢复能力。此外，生态系统的恢复能力还与土壤质地、气候条件密切相关，气候适宜、土壤肥沃的区域，恢复能力更强。

（三）复合污染的长期生态风险

大气-土壤复合污染的长期生态风险，主要体现在生态系统永久性退化、生物多样性不可逆损失、生态服务功能丧失三个方面，对生态环境与人类生产生活造成深远影响。长期复合污染会导致生态系统结构彻底紊乱，功能完全丧失，如草地沙化、森林退化、农田土壤板结等，形成永久性的生态创伤，无法通过自身调节恢复，进一步加剧区域生态环境恶化。生物多样性的不可逆损失是长期生态风险的核心，珍稀濒危物种的消亡会导致生态系统遗传多样性下降，破坏生态系统的食物链与食物网，使得生态系统的抗干扰能力、自我调节能力显著降低，易引发大规模的生态灾害，如病虫害爆发、水土流失、土地沙化等。同时，生态服务功能的丧失会影响人类生产生活，如森林固碳释氧、水土保持功能丧失，会加剧温室效应、引发水土流失；农田生产功能退化，会影响粮食安全；草地载畜量下降，会影响畜牧业发展。此外，复合污染通过食物链传递，会间接影响人体健康，形成“污染-生态退化-人类健康”的连锁风险，长期威胁人类生存与发展。

大气-土壤复合污染对陆地生态系统的破坏具有系统性、长期性，会显著破坏森林、农田、草地等不同类型陆地生态系统的结构完整性，导致其生态功能退化，其中农田生态系统受破坏程度最严重，森林与草地生态系统也呈现不同程度的结构紊乱与功能衰退，且不同生态系统的破坏特征存在明显差异。复合污染会通过破坏生存环境、减少食物来源，引发植物群落退化、动物栖息地破坏、生物数量减少等问题，导致动植物多样性下降，形成协同危害与连锁反应，加剧生态系统退化。面对复合污染胁迫，生态系统会通过个体、群落、系统层面的适应性调节产生响应，但响应能力具有一定限度，轻度污染可通过自身调节恢复，中度至重度污染则需人为干预，且恢复周期漫长。复合污染的长期生态风险主要表现为生态系统永久性退化、生物多样性不可逆损失、生态服务功能丧失，不仅破坏生态环境稳定，还会间接威胁人类生产生活与健康。

第五章 协同修复的理论基础与核心原理

第一节 大气－土壤污染协同控制的系统论思想

随着生态环境保护从重点整治向系统治理转变，大气－土壤复合污染的治理已不再适合单一介质、孤立施策的模式，系统论作为总揽全局、协调各方的科学思维方法，为大气－土壤污染协同控制提供了坚实的理论支撑。大气与土壤作为生态系统的重要组成部分，二者相互关联、相互影响，污染物在两介质间的跨介质传输的比例可达 20%—60%，形成复杂的循环污染链条，单一介质治理难以切断污染源头、实现治理目标。将系统论思想融入大气－土壤污染协同控制，立足“整体统筹、多介质协同、源头防控”的核心思路，构建科学完善的系统框架，明确各要素的相互关系，能够有效规避单一治理的局限性，实现污染治理的整体最优，为大气－土壤复合污染协同修复提供科学的理论指导与实践遵循，助力生态环境系统治理水平提升。

一、系统论在大气－土壤污染协同控制中的核心应用

系统论的核心是将研究对象视为一个有机整体，注重整体与部分、部分与部分、整体与环境之间的相互联系与相互作用，其在大气－土壤污染协同控制中的应用，本质是打破介质壁垒、统筹各方资源，将大气污染治理、土壤污染治理与生态环境保护作为一个有机整体，实现多维度、全方位的协同管控，核心围绕“整体统筹、多介质协同、源头防控”三大核心思想展开，契合美丽中国建设中全要素、全领域、全过程系统治理的需求。

（一）整体统筹思想的实践应用

整体统筹是系统论在协同控制中的核心体现，强调打破“各自为战”的治理模式，立足区域生态系统的整体性，统筹规划大气与土壤污染治理的目标、任务与措施，实现治理效益的最大化。大气－土壤复合污染的形成是多因素、多环节共同作用的结果，大气污染物通过干湿沉降进入土壤，土壤中的污染物通过扬尘、

挥发等方式再次进入大气，形成“大气－土壤”双向污染循环，单一治理大气或土壤，无法从根本上切断污染链条。

系统论指导下的整体统筹，要求兼顾大气与土壤污染的治理需求，统筹考虑区域产业布局、污染源分布、生态环境承载力等因素，制定统一的协同治理规划，避免治理措施的冲突与重复，实现“治气”与“治土”的有机衔接。例如，在工业矿区等污染严重区域，统筹推进工业废气治理与土壤修复工程，既减少大气污染物排放，又降低土壤污染物累积，同时兼顾区域生态修复，实现大气、土壤与生态环境的协同改善，这也是山水林田湖草沙一体化保护和系统治理理念在污染治理中的具体体现。

（二）多介质协同思想的实践应用

多介质协同是系统论应用的关键抓手，核心是明确大气、土壤两大环境介质的相互关联，打破介质壁垒，推动治理措施的协同联动，实现多介质污染的同步控制。大气与土壤作为污染物迁移转化的重要载体，二者之间存在密切的物质交换与能量流动，污染物的跨介质传输已成为系统治理不可忽视的问题，单一介质治理易导致污染物在不同介质间转移，无法实现彻底治理。

系统论指导下的多介质协同，一方面注重大气与土壤污染治理技术的协同适配，例如，在农田区域，将大气扬尘控制与土壤覆盖、土壤改良相结合，既减少土壤扬尘对大气的污染，又降低大气污染物沉降对土壤的影响；另一方面注重治理过程的协同联动，建立大气与土壤污染监测数据共享机制，实现污染状况的同步监测、同步预警、同步治理，及时响应跨介质污染问题，避免污染扩散蔓延。同时，兼顾水、固废等其他环境介质，形成多介质协同治理体系，应对复合型生态问题。

（三）源头防控思想的实践应用

源头防控是系统论应用的核心目标，强调从污染产生的源头入手，统筹管控各类污染源，减少污染物排放，从根本上降低大气－土壤复合污染的风险，实现“治未病”的治理效果。大气－土壤复合污染的源头包括工业污染源、农业污染源、生活污染源等，各类污染源排放的污染物通过不同途径进入大气与土壤，形成复合污染，源头防控就是要精准识别各类污染源，采取针对性的管控措施，切断污染源头。

系统论指导下的源头防控，要求立足整体视角，统筹各类污染源的管控，避

免单一污染源管控的片面性。例如，工业污染源管控中，统筹推进废气处理、废水处理与固废处置，减少废气中污染物排放，避免废水、固废对土壤的污染；农业污染源管控中，统筹推进化肥农药减量、畜禽养殖废弃物资源化利用，减少农业面源污染对大气与土壤的影响；生活污染源管控中，统筹推进垃圾分类、扬尘控制、燃气替代等措施，减少生活污染排放。同时，结合各类国际环境公约的协同关联，在源头管控中兼顾不同污染物的协同减排，实现源头防控的系统性与全面性。

二、大气－土壤污染协同控制的系统框架构建

基于系统论思想，构建大气－土壤污染协同控制的系统框架，是实现协同治理的重要基础。该系统框架以“整体统筹、多介质协同、源头防控”为核心导向，明确系统的组成要素，厘清各要素之间的相互关系，形成“污染源管控－环境介质协同－治理技术支撑”的有机整体，实现各要素的协同联动、高效运转，为协同控制提供清晰的框架指引，破解过去条块分割、多头管理的治理困境。

（一）系统的核心组成要素界定

大气－土壤污染协同控制体系是一个复杂的有机系统，其核心组成要素包括污染源、环境介质、治理技术三大类，各类要素相互关联、相互支撑，共同构成协同控制的完整体系。污染源是系统的核心输入要素，是大气－土壤复合污染的产生源头，主要包括工业污染源、农业污染源、生活污染源三大类，工业污染源排放的废气、废水、固废是主要污染物来源，农业污染源中的化肥农药残留、畜禽养殖废弃物，生活污染源中的扬尘、垃圾焚烧废气等，均会通过不同途径进入大气与土壤，引发复合污染。

环境介质是系统的载体要素，主要包括大气、土壤两大核心介质，同时涵盖地表水、地下水等关联介质，是污染物迁移转化的场所，大气与土壤之间的物质交换的相互作用，决定了复合污染的形成与扩散规律，关联介质则会影响污染物的迁移路径与范围，形成跨介质污染链条。治理技术是系统的支撑要素，是实现协同控制的关键手段，包括大气污染治理技术、土壤污染治理技术、协同治理技术三大类，各类技术的协同适配，是实现多介质污染同步治理的核心支撑，同时涵盖监测、评估、预警等配套技术，完善系统治理能力。

（二）各组成要素的相互关系

系统框架中各组成要素并非孤立存在，而是存在密切的相互作用、相互制约关系，形成“污染源—环境介质—治理技术”的闭环联动机制。污染源作为输入要素，其排放的污染物进入大气、土壤等环境介质，引发复合污染，污染物在环境介质中发生迁移、转化、累积，形成跨介质污染循环，同时环境介质的理化性质、生态特征，也会影响污染物的迁移转化效率，进而影响污染源的污染扩散范围与程度。

治理技术作为支撑要素，一方面针对污染源开展管控，减少污染物排放，从源头控制污染输入；另一方面针对环境介质中的污染物开展治理，降低污染物浓度，阻断污染迁移链条，同时治理技术的适配性，会直接影响污染源管控与环境介质治理的效果。此外，环境介质的污染状况，会反向指导污染源管控与治理技术的优化，例如，通过监测大气与土壤中的污染物浓度，精准识别重点污染源，调整治理技术方案，实现各要素的协同联动、动态优化。同时，各要素的协同作用还会受到区域产业布局、管理水平等外部因素影响，需要统筹考虑各类因素，确保系统稳定运转。

（三）系统框架的运行机制

大气—土壤污染协同控制体系的运行，遵循“监测预警—源头管控—介质治理—效果评估—优化完善”的闭环运行机制，依托系统论的整体思想，实现各环节的协同联动、高效运转。监测预警环节，通过构建大气—土壤一体化监测网络，实时监测污染物浓度、迁移路径，建立污染预警机制，及时发现污染隐患，为后续治理提供数据支撑，破解现有监测网络覆盖有限、数据共享不足的问题；源头管控环节，根据监测数据，精准识别重点污染源，采取针对性的管控措施，减少污染物排放，从源头遏制污染产生。

介质治理环节，结合大气与土壤的污染状况，适配协同治理技术，同步开展大气污染治理与土壤修复，阻断污染物跨介质迁移链条，实现多介质污染同步改善；效果评估环节，建立科学的评估指标体系，从污染物浓度、生态环境质量、治理效益等方面，评估协同治理效果，判断是否达到治理目标；优化完善环节，根据效果评估结果，分析治理过程中存在的问题，优化污染源管控措施、调整治理技术方案，完善系统框架，实现协同治理的持续优化，推动治理效果不断提升，契合污染防治从被动应对向主动防控转变的需求。

三、系统论思想对协同修复的指导意义

系统论思想为大气-土壤污染协同修复提供了科学的思维方法与理论指导,其核心意义在于打破单一介质治理的局限性,立足整体视角,统筹各方资源,实现污染治理的整体最优,同时为协同修复的实践开展提供清晰的指引,推动大气-土壤复合污染治理从“碎片化”向“系统化”转变,破解过去单一治理难以达到预期的困境。

(一) 规避单一介质治理的局限性

传统的大气或土壤污染治理,多采用单一介质、孤立施策的模式,存在明显的局限性,难以实现复合污染的彻底治理。单一治理大气污染,虽能降低大气中污染物浓度,但无法解决土壤中污染物的累积问题,土壤中的污染物仍会通过扬尘、挥发等方式再次进入大气,导致大气污染反弹;单一治理土壤污染,虽能降低土壤中污染物浓度,但无法阻断大气污染物沉降对土壤的持续污染,难以实现治理目标,甚至会导致污染物在不同介质间转移,加剧污染危害。

系统论思想强调整体统筹与多介质协同,能够有效规避这种局限性,将大气与土壤污染治理作为一个有机整体,同步开展源头管控与介质治理,既减少大气污染物排放,又降低土壤污染物累积,阻断“大气-土壤”双向污染循环,避免污染物在不同介质间转移,实现复合污染的彻底治理。同时,系统论思想能够统筹考虑各类污染源与关联介质,避免单一污染源、单一介质治理的片面性,提升治理的全面性与有效性,解决过去“头痛医头、脚痛医脚”的治理难题。

(二) 实现污染治理的整体最优目标

系统论思想的核心目标是实现系统的整体最优,将其应用于大气-土壤污染协同修复,能够统筹平衡治理成本、治理效果与生态效益,实现污染治理的整体最优。大气-土壤污染协同控制涉及污染源管控、技术研发、工程实施、生态修复等多个环节,不同环节、不同措施之间存在相互影响、相互制约的关系,单一环节的优化难以实现整体治理效益的最大化。

系统论思想指导下,通过构建完善的协同控制体系,厘清各要素、各环节之间的相互关系,优化资源配置,统筹推进各项治理措施,实现“治气”“治土”与生态保护的协同推进,在降低治理成本的同时,提升治理效果,实现经济效益、社会效益与生态效益的统一。例如,通过统筹推进工业废气治理与土壤修复,实

现污染物的同步减排与去除，避免重复投入，提升治理效率；通过统筹生态修复与污染治理，在改善大气、土壤环境质量的同时，提升生态系统稳定性，实现污染治理与生态保护的协同发展，达到整体最优的治理目标。

（三）为协同修复实践提供科学指引

系统论思想不仅为大气－土壤污染协同修复提供了理论支撑，更为实践开展提供了清晰的指引，明确了协同修复的核心思路、框架体系与实施路径，推动协同修复从理论走向实践。在系统论思想指导下，能够精准识别大气－土壤复合污染的形成机制与迁移规律，明确协同修复的重点区域、重点污染源与关键环节，制定针对性的修复方案，避免修复工作的盲目性。

系统论思想强调动态优化与协同联动，能够指导建立大气－土壤一体化监测、预警与治理机制，实现修复过程的动态调整与优化，提升协同修复的精准性与有效性。此外，系统论思想能够指导各类治理技术的协同适配，推动单一治理技术向协同治理技术转型，研发适配多介质污染的协同修复技术，破解技术瓶颈，为协同修复的规模化、常态化开展提供支撑。同时，结合跨区域、跨部门协同机制的构建，推动协同修复工作形成合力，完善协同治理的体制机制，助力生态环境系统治理水平的提升。

系统论作为总揽全局、协调各方的科学思维方法，在大气－土壤污染协同控制中具有不可替代的核心作用，其核心应用围绕“整体统筹、多介质协同、源头防控”三大思想展开，打破了传统单一介质治理的壁垒，契合从重点整治向系统治理转变的生态环境保护需求。基于系统论思想构建的大气－土壤污染协同控制框架，明确了污染源、环境介质、治理技术三大核心组成要素及其相互关系，通过闭环运行机制，实现各要素、各环节的协同联动，为协同控制提供了清晰的框架指引。

第二节 界面过程调控原理

大气－土壤界面是污染物迁移转化的关键枢纽，也是大气－土壤污染协同修复的核心作用区域。该界面作为连接大气与土壤两大环境介质的桥梁，存在沉降、挥发、吸附－解吸等一系列复杂的物理、化学与生物过程，这些界面过程直接决定污染物在两介质间的迁移方向、转化效率与累积规律，对复合污染的形成与扩

散具有决定性调控作用。界面过程调控原理作为协同修复的核心理论之一，通过物理、化学、生物等多种调控方式，干预界面核心过程，优化污染物迁移转化路径，降低污染物迁移能力与生物有效性，为协同修复技术研发提供坚实的理论支撑。深入解析界面核心过程、阐述调控原理、探讨应用逻辑，能够完善协同修复理论体系，推动协同修复技术向精准化、高效化发展，助力大气-土壤复合污染的科学治理。

一、大气-土壤界面核心过程及对污染物迁移转化的调控作用

大气-土壤界面过程是一个多过程协同作用的复杂体系，核心包括沉降、挥发、吸附-解吸三大过程，此外还涉及扩散、转化等辅助过程。这些过程相互关联、相互影响，共同构成污染物跨介质迁移转化的核心路径，其过程强度与效率直接调控污染物在大气与土壤中的分配比例、迁移速率，进而影响复合污染的程度与范围，是协同修复中需重点干预的关键环节。

（一）界面核心过程的本质与特征

大气-土壤界面的核心过程均围绕污染物的迁移与转化展开，不同过程的本质、特征存在显著差异，共同决定污染物的环境行为。沉降过程是大气中污染物向土壤迁移的主要途径，本质是大气中的污染物（气态、颗粒态）在重力作用、气流作用下，通过干沉降、湿沉降两种方式，从大气中转移至土壤表层，其中干沉降主要是颗粒态污染物的重力沉降与界面吸附，湿沉降则是通过降水、降雪等形式，将大气中污染物冲刷至土壤中，沉降效率受污染物形态、气象条件、土壤质地影响显著。

挥发过程是土壤中污染物向大气迁移的核心途径，本质是土壤中可溶性、挥发性污染物，在温度、湿度、风速等因素影响下，从土壤表层逸散至大气中，形成“土壤-大气”的反向污染迁移，挥发效率与污染物的挥发性、土壤含水量、温度正相关，高温、高湿、高风速条件下，挥发过程会显著增强。吸附-解吸过程是污染物在土壤-大气界面的关键转化过程，本质是土壤颗粒表面与污染物分子之间的相互作用，吸附过程可将大气沉降的污染物固定在土壤中，降低其迁移能力；解吸过程则是土壤中吸附的污染物重新释放，进入大气或土壤溶液，再次参与迁移循环，该过程决定污染物在土壤中的残留量与生物有效性。

（二）界面过程对污染物迁移转化的调控机制

界面过程对污染物迁移转化的调控，核心是通过改变污染物的存在形态、迁移路径与转化效率，实现污染物在大气与土壤中的分配调控，进而影响复合污染的发展趋势。沉降过程作为大气污染物向土壤迁移的“输入通道”，其调控作用体现在控制土壤污染物的输入量，沉降效率越高，大气污染物向土壤的迁移量越大，土壤污染累积越严重；反之，沉降效率降低，可减少土壤污染物输入，缓解土壤污染。

挥发过程作为土壤污染物向大气迁移的“输出通道”，其调控作用体现在控制大气污染物的二次来源，挥发效率越高，土壤中污染物向大气的迁移量越大，大气污染反弹风险越高；反之，抑制挥发过程，可减少土壤污染物向大气的逸散，降低大气二次污染风险。吸附-解吸过程则是污染物迁移转化的“调控阀门”，通过吸附作用固定污染物，减少其跨介质迁移；通过解吸作用释放污染物，推动其参与迁移循环，二者的平衡状态直接决定污染物的迁移能力与环境风险，吸附占优时，污染物迁移能力降低，环境风险较小；解吸占优时，污染物迁移能力增强，环境风险升高。

（三）不同界面过程的协同调控效应

大气-土壤界面的三大核心过程并非孤立存在，而是存在显著的协同调控效应，共同影响污染物的迁移转化规律，明确这种协同效应是开展界面调控的重要前提。沉降与吸附-解吸过程协同作用，大气污染物通过沉降进入土壤后，会迅速被土壤颗粒吸附，减少污染物的挥发与淋溶，降低其迁移能力；若吸附作用较弱，污染物解吸后，一部分会通过挥发重新进入大气，另一部分会通过淋溶进入地下水，形成跨介质污染。

挥发与沉降过程则呈现反向协同效应，土壤污染物挥发进入大气后，会再次通过沉降作用返回土壤，形成“挥发-沉降”的循环，加剧污染物在界面的累积；同时，大气中污染物浓度升高，会进一步促进沉降过程，而土壤中污染物浓度升高，会推动挥发过程增强，二者的平衡的打破会导致复合污染加剧。不同界面过程的协同调控效应及对污染物迁移的影响，具体如下表所示，可为界面调控方案的制定提供依据。

界面核心过程	协同过程	协同调控效应	对污染物迁移的影响
沉降过程	吸附－解吸过程	沉降输入污染物，吸附作用固定污染物，抑制迁移	减少污染物跨介质迁移，降低大气二次污染风险
挥发过程	沉降过程	挥发释放污染物，沉降重新输入土壤，形成循环累积	加剧污染物在界面累积，增加复合污染风险
吸附－解吸过程	挥发过程	解吸释放污染物，促进挥发过程，增加大气污染输入	增强污染物迁移能力，推动跨介质污染扩散

二、大气－土壤界面过程的调控原理

大气－土壤界面过程的调控原理，核心是通过人为干预，改变界面物理、化学、生物环境条件，调节界面核心过程的强度与效率，优化污染物迁移转化路径，实现污染物的有效管控。根据调控方式的不同，可分为物理调控、化学调控、生物调控三大类，三类调控方式相互补充、协同作用，能够实现界面过程的精准调控，为协同修复提供技术理论支撑。

（一）物理调控原理

物理调控是通过改变大气－土壤界面的物理性质，干预界面核心过程，进而调控污染物迁移转化，其核心原理是改变界面粗糙度、温度、湿度等物理参数，影响沉降、挥发、吸附－解吸过程的效率。界面粗糙度是物理调控的核心参数，通过改变土壤表层的物理形态，调节大气气流与土壤表面的接触面积，进而影响污染物的沉降与挥发效率。

例如，通过覆盖秸秆、砾石等材料，增加土壤表层粗糙度，减缓气流速度，促进大气中颗粒态污染物的干沉降，同时减少土壤表面的气流扰动，抑制土壤污染物的挥发；通过平整土地、压实土壤，降低界面粗糙度，加快气流速度，减少污染物沉降，同时促进土壤中挥发性污染物的逸散，根据治理需求选择合适的调控方式。此外，物理调控还可通过调节界面温度、湿度，干预污染物的挥发与吸附－解吸过程，如通过遮阳、灌溉等措施，降低界面温度、提高土壤湿度，抑制污染物挥发，增强土壤吸附能力，减少污染物迁移。

（二）化学调控原理

化学调控是通过调节大气－土壤界面的化学性质，改变污染物的存在形态与化学活性，进而调控界面过程，其核心原理是调节界面 pH 值、添加化学改良剂，影响污染物的吸附－解吸、转化过程，降低污染物的生物有效性与迁移能力。

pH 值是界面化学性质的核心指标, 直接影响污染物的形态与土壤颗粒的吸附能力, 通过调节 pH 值, 可改变污染物的吸附-解吸平衡。

例如, 对于重金属污染物, 调节土壤 pH 值至碱性, 可使重金属离子形成沉淀, 增强土壤吸附能力, 抑制解吸与挥发过程, 减少污染物迁移; 调节 pH 值至酸性, 可促进重金属沉淀溶解, 增强解吸过程, 便于后续治理。化学改良剂的添加则是通过与污染物发生化学反应, 改变污染物形态, 如添加活性炭、沸石等吸附型改良剂, 增强土壤对污染物的吸附能力, 固定污染物; 添加螯合剂等活化型改良剂, 促进土壤中污染物解吸, 便于通过挥发、淋溶等方式去除, 实现污染物的精准调控。

(三) 生物调控原理

生物调控是通过微生物、植物等生物干预手段, 调控大气-土壤界面过程, 其核心原理是利用生物的代谢活动、吸附作用, 改变界面环境条件与污染物形态, 干预沉降、挥发、吸附-解吸过程, 实现污染物的净化与管控。微生物干预是生物调控的核心手段, 土壤中的微生物可通过代谢作用, 将污染物转化为无毒或低毒形态, 同时通过微生物胞外聚合物的吸附作用, 固定土壤中的污染物, 抑制解吸与挥发过程。

例如, 接种降解性微生物, 可加速土壤中有机污染物的降解, 减少污染物挥发与迁移; 接种吸附性微生物, 可增强土壤对重金属的吸附能力, 抑制污染物解吸。植物干预则是通过植物根系的吸附、吸收作用, 固定土壤中的污染物, 减少污染物挥发与淋溶, 同时植物根系分泌物可调节界面化学性质, 影响吸附-解吸过程, 如植物根系分泌的有机酸, 可调节土壤 pH 值, 增强重金属的吸附能力, 实现界面过程的协同调控。此外, 植物的覆盖作用还可改变界面粗糙度, 辅助物理调控, 提升调控效果。

三、界面过程调控在协同修复中的应用逻辑

界面过程调控作为大气-土壤污染协同修复的核心理论支撑, 其应用逻辑核心是立足“协同管控、精准干预”, 结合复合污染的特点与治理目标, 选择合适的调控方式, 干预界面核心过程, 切断污染物跨介质迁移链条, 实现大气与土壤污染的同时治理, 为后续修复技术研发提供清晰的理论指引与实践路径。

(一) 应用的核心导向与基本原则

界面过程调控在协同修复中的应用, 核心导向是“协同适配、源头管控、高

效低成本”，既要实现大气与土壤污染的同步改善，又要兼顾治理效率与成本，避免单一调控方式的局限性。基本原则包括针对性原则、协同性原则、可持续原则，针对性原则是指根据污染物类型、污染程度、界面特征，选择合适的调控方式，如重金属污染以化学调控、生物调控为主，有机污染以生物调控、物理调控为主；协同性原则是指结合物理、化学、生物三种调控方式，实现优势互补，提升调控效果，如物理覆盖与生物吸附协同，既抑制污染物挥发，又固定土壤污染物。

可持续原则是指调控方式需符合生态环境保护要求，避免产生二次污染，优先选择绿色、环保的调控手段，如生物调控、天然改良剂添加等，同时兼顾土壤肥力与生态系统稳定性，实现污染治理与生态保护的协同推进。此外，应用过程中需兼顾区域差异，根据平原、山区、流域等不同区域的界面特征，优化调控方案，确保调控效果的稳定性与持续性。

（二）不同污染场景下的应用逻辑

界面过程调控的应用逻辑需结合不同污染场景，针对性制定调控方案，实现精准治理。对于工业矿区等重度复合污染区域，污染物浓度高、跨介质迁移活跃，应用逻辑以“抑制迁移、强化固定”为主，采用化学调控与生物调控协同，添加吸附型改良剂固定污染物，接种降解性微生物加速污染物降解，同时结合物理覆盖，抑制污染物挥发与沉降循环，切断污染链条；对于农业耕作区等中度污染区域，污染物以农业面源污染为主，应用逻辑以“源头防控、温和调控”为主，采用生物调控与物理调控结合，通过植物覆盖、微生物接种，减少污染物挥发与迁移，同时调节土壤 pH 值，优化土壤环境，兼顾农业生产与污染治理。

对于生态保护区等轻度污染区域，应用逻辑以“生态修复、自然调控”为主，优先采用生物调控手段，通过种植乡土植物、培育土著微生物，恢复土壤生态系统，增强土壤自身的吸附与降解能力，同时结合轻度物理调控，改善界面环境，实现污染物的自然净化，避免人为干预对生态系统的破坏。不同污染场景下的调控方式选择，需结合界面过程特征与治理目标，实现调控效果与生态效益的统一。

（三）对修复技术研发的理论支撑价值

界面过程调控原理为协同修复技术研发提供了坚实的理论支撑，明确了修复技术的研发方向与核心逻辑，推动修复技术从“单一介质修复”向“界面协同修复”转型。基于物理调控原理，可研发界面物理改性技术，如土壤表层覆盖技术、界面气流调控技术，通过改变界面物理性质，干预污染物迁移过程；基于化学调

控原理,可研发化学改良修复技术,如改良剂配方优化技术、pH 值精准调节技术,通过化学手段固定或活化污染物,提升修复效率。

基于生物调控原理,可研发生物修复技术,如微生物接种技术、植物-微生物联合修复技术,利用生物代谢与吸附作用,实现污染物净化。同时,界面过程调控原理指导修复技术的协同适配,推动物理、化学、生物修复技术的融合,研发复合型协同修复技术,如“物理覆盖+化学改良+微生物接种”一体化技术,实现界面过程的全方位调控,提升协同修复效果。此外,界面过程调控原理还为修复技术的优化提供了理论依据,通过解析界面过程的调控机制,可优化修复技术参数,降低治理成本,推动修复技术的规模化、产业化应用。

大气-土壤界面的沉降、挥发、吸附-解吸等核心过程,是污染物跨介质迁移转化的关键枢纽,其协同作用直接调控复合污染的形成与扩散,决定污染物在大气与土壤中的分配比例与迁移路径。界面过程调控原理通过物理、化学、生物三种调控方式,针对性干预界面核心过程,改变污染物存在形态与迁移能力,实现污染物的精准管控,三种调控方式优势互补、协同作用,可提升调控的全面性与有效性。界面过程调控在协同修复中的应用,遵循“协同适配、源头管控、高效低成本”的核心导向,结合不同污染场景制定针对性方案,既切断污染物跨介质迁移链条,又实现大气与土壤污染的同步治理。其核心价值在于为协同修复技术研发提供理论支撑,明确技术研发方向与逻辑,推动修复技术向精准化、高效化、绿色化转型,助力大气-土壤复合污染协同修复高质量开展,为生态环境治理提供有力的技术支撑与理论保障。

第三节 污染物定向转化与阻断原理

大气-土壤复合污染的协同修复,核心是通过精准干预污染物的迁移转化过程,实现污染物的有效管控与净化,而污染物定向转化与迁移阻断原理,是支撑协同修复技术落地的核心理论。定向转化聚焦于“化害为利”,通过化学、生物等精准手段,将大气-土壤中的有毒有害污染物转化为无毒、低毒或易降解物质,从本质上降低污染危害;迁移阻断聚焦于“切断路径”,通过物理、化学、生物等隔离拦截手段,阻断污染物在大气与土壤间的跨介质迁移,避免污染扩散蔓延。二者相辅相成、协同作用,结合典型污染物明确其技术逻辑,能够完善协同修复

理论体系，为修复技术的研发与应用提供科学指引，推动大气－土壤复合污染治理向精准化、高效化转型，实现污染治理的长效性与稳定性。

一、污染物定向转化原理

污染物定向转化是协同修复的核心理论之一，其核心逻辑是立足污染物的化学性质、生物活性，通过人为干预，采用化学、生物等针对性手段，引导污染物发生定向化学反应或生物代谢反应，将有毒有害的污染物转化为无毒、低毒、易降解或易回收的物质，从根源上消除污染风险。该原理强调“精准转化、按需调控”，避免转化过程中产生二次污染，同时兼顾转化效率与成本，确保转化效果的稳定性与可持续性，适用于各类大气－土壤复合污染物的治理。

（一）定向转化的核心内涵与核心目标

污染物定向转化的核心内涵，是打破污染物的原有稳定形态，通过人为调控反应条件、引入反应介质，引导污染物向环境友好型物质转化，其核心区别于普通的污染物降解，更强调“定向性”与“可控性”——即明确转化产物、控制转化过程，避免无规则转化带来的二次污染。定向转化的核心目标主要有三个方面：一是降低污染物毒性，将剧毒、高毒污染物转化为无毒或低毒物质，减少其对生态系统与人体健康的危害；二是提升污染物可处理性，将难降解、难迁移的污染物转化为易降解、易回收的物质，便于后续进一步处理或自然净化；三是实现资源循环利用，对于部分可回收污染物，通过定向转化实现资源化利用，提升污染治理的经济效益与生态效益。

不同类型污染物的定向转化目标存在差异，对于重金属污染物，核心是将游离态、高活性的重金属离子转化为稳定态、低活性的化合物，降低其生物有效性与迁移能力；对于持久性有机污染物（POPs），核心是将难降解的有机大分子转化为易降解的小分子物质，最终分解为二氧化碳、水等无害物质；对于大气中的气态污染物，核心是将有毒有害气态物质转化为固态或液态的无害物质，便于收集处理，避免其沉降污染土壤。

（二）化学定向转化原理

化学定向转化是通过化学试剂、化学反应条件的精准调控，引导污染物发生定向化学转化，其核心原理是利用化学反应的专一性，通过氧化还原、络合螯合、催化降解等反应，改变污染物的化学结构与存在形态，实现污染物的定向转化。

氧化还原反应是化学定向转化的核心反应类型，通过添加氧化剂或还原剂，改变污染物的氧化态，实现毒性降低与形态转化。

例如，对于土壤中的 Cr(VI) 、 Hg(II) 等高价态重金属污染物，添加亚硫酸钠、硫酸亚铁等还原剂，可将其定向还原为 Cr(III) 、 Hg(0) 等低价态物质， Cr(III) 稳定性强、毒性远低于 Cr(VI) ， Hg(0) 可通过挥发收集处理，实现重金属毒性的显著降低；对于大气中的硫化物、氮氧化物等气态污染物，添加氧化剂（如臭氧、过氧化氢），可将其定向氧化为硫酸盐、硝酸盐，便于后续沉降收集，避免其污染土壤与水体。络合螯合反应则主要用于重金属污染物的定向转化，通过添加络合剂、螯合剂，与重金属离子形成稳定的络合物或螯合物，降低其迁移能力与生物有效性，同时便于后续分离回收。催化降解反应则主要用于有机污染物的定向转化，通过添加催化剂（如金属氧化物、活性炭），降低有机污染物的降解活化能，引导其定向分解为易降解的小分子物质，提升转化效率。

（三）生物定向转化原理

生物定向转化是利用微生物、植物等生物的代谢活动，引导污染物发生定向生物转化，其核心原理是利用生物体内的酶系统，对污染物进行特异性代谢、降解或转化，实现污染物的无毒化、低毒化，具有绿色环保、无二次污染、成本较低的优势，是协同修复中优先采用的转化方式。微生物定向转化是生物定向转化的核心，微生物通过自身的代谢作用，产生特异性酶，对污染物进行定向降解或转化，不同微生物对污染物的代谢能力具有专一性，可根据污染物类型选择适配的微生物。

例如，对于土壤中的多环芳烃、石油类等有机污染物，接种降解性微生物（如芽孢杆菌、假单胞菌），其体内产生的氧化酶、脱氢酶可将有机大分子定向降解为小分子有机酸、醇类，最终分解为二氧化碳和水，实现有机污染物的彻底净化；对于土壤中的重金属污染物，接种富集性微生物，可通过微生物的吸附、代谢作用，将游离态重金属离子转化为微生物体内的结合态物质，降低其迁移能力与毒性。植物定向转化则是通过植物的吸收、代谢作用，将土壤或大气中的污染物定向转化为无毒或低毒物质，如植物通过根系吸收重金属离子，在体内通过络合作用形成稳定的络合物，储存于液泡中，实现重金属的定向固定与转化；部分植物可通过代谢作用，将吸收的有机污染物转化为无毒的代谢产物，实现有机污染的净化。

二、污染物迁移阻断原理

污染物迁移阻断是协同修复的另一核心理论，其核心逻辑是通过物理、化学、生物等多种手段，构建污染物迁移屏障，切断污染物在大气与土壤间的跨介质迁移路径，阻止污染物扩散蔓延，减少污染范围与危害程度。该原理强调“源头拦截、全程阻断”，结合大气-土壤界面的污染物迁移规律，针对性构建阻断体系，既阻止大气污染物沉降进入土壤，又抑制土壤污染物挥发进入大气，实现污染物的“原地管控”，为定向转化创造良好条件，提升协同修复效果。

（一）迁移阻断的核心内涵与阻断逻辑

污染物迁移阻断的核心内涵，是通过人为干预，改变污染物的迁移路径、降低污染物的迁移能力，构建“全方位、多层次”的阻断屏障，阻止污染物在大气与土壤间的跨介质迁移，其核心阻断逻辑是“拦截-固定-隔离”，即通过拦截手段阻止污染物迁移，通过固定手段降低污染物活性，通过隔离手段切断迁移路径。迁移阻断的核心目标，是减少污染物的跨介质迁移量，避免污染扩散至周边环境，同时为污染物定向转化争取时间，确保转化过程的高效开展，实现“阻断与转化协同”的治理效果。

大气-土壤间的污染物迁移主要分为“大气向土壤迁移”（沉降过程）与“土壤向大气迁移”（挥发过程），迁移阻断需针对这两条路径分别构建阻断体系：对于大气向土壤的迁移，核心是拦截大气中的污染物，减少其沉降量；对于土壤向大气的迁移，核心是固定土壤中的污染物，抑制其挥发量，同时构建隔离屏障，阻止污染物逸散，形成双向阻断的闭环体系，彻底切断污染循环链条。

（二）物理隔离阻断原理

物理隔离阻断是通过物理手段构建隔离屏障，直接切断污染物的迁移路径，其核心原理是利用物理材料的阻隔作用，阻止污染物的扩散与迁移，具有操作简单、见效快、适用范围广的优势，适用于各类污染场景的迁移阻断。物理隔离阻断主要针对土壤向大气的污染物迁移，同时可辅助拦截大气向土壤的污染物沉降。

常见的物理隔离手段包括土壤覆盖、物理阻隔层铺设等，土壤覆盖是通过在土壤表层铺设秸秆、地膜、砾石等覆盖材料，形成物理覆盖层，一方面可减少土壤表面的气流扰动，抑制土壤中挥发性污染物的挥发，阻止其进入大气；另一方面可拦截大气中的颗粒态污染物，减少其沉降进入土壤。物理阻隔层铺设则是在

土壤表层或深层铺设防渗膜、膨润土垫等阻隔材料，构建物理阻隔屏障，阻止土壤中的污染物（尤其是可溶性重金属、有机污染物）通过淋溶、扩散等方式迁移，同时可阻止大气污染物沉降后向土壤深层渗透，实现污染物的原地管控。此外，物理隔离还可通过通风调控、扬尘控制等手段，减少大气中污染物的扩散，辅助阻断污染物迁移。

（三）化学固定与生物拦截阻断原理

化学固定与生物拦截是两种协同互补的阻断方式，核心是通过化学或生物手段，降低污染物的迁移能力，实现污染物的原地固定与拦截，弥补物理隔离阻断的局限性，提升阻断效果的稳定性与长效性。化学固定阻断的核心原理是通过添加化学固定剂，与土壤中的污染物发生化学反应，形成稳定的化合物，降低污染物的溶解性与迁移能力，将污染物固定在土壤中，阻止其挥发或淋溶迁移。

例如，对于土壤中的重金属污染物，添加石灰、沸石、活性炭等固定剂，可与重金属离子形成沉淀、吸附或络合反应，将游离态重金属固定为稳定态，抑制其挥发与淋溶，阻止其向大气或地下水迁移；对于土壤中的有机污染物，添加有机粘土、生物炭等固定剂，可增强土壤对有机污染物的吸附能力，固定污染物，抑制其挥发。生物拦截阻断的核心原理是利用植物、微生物的拦截、吸附作用，阻止污染物迁移，植物通过根系的吸附、拦截作用，固定土壤中的污染物，减少其迁移；同时，植物的冠层可拦截大气中的颗粒态污染物，减少其沉降进入土壤。微生物则通过吸附、代谢作用，固定土壤中的污染物，抑制其迁移，同时可降解部分污染物，实现“拦截与转化协同”。

三、典型污染物的定向转化与阻断技术逻辑及协同作用

结合大气-土壤复合污染中的典型污染物（重金属、持久性有机污染物、气态污染物），明确其定向转化与迁移阻断的核心技术逻辑，厘清二者在协同修复中的协同作用，能够为修复技术的研发与应用提供具体指引，推动协同修复理论与实践的深度融合，实现污染治理的精准化与高效化。

（一）典型污染物的定向转化与阻断技术逻辑

不同类型的典型污染物，其化学性质、迁移特征存在显著差异，对应的定向转化与阻断技术逻辑也各不相同，需结合污染物特性精准制定技术方案。对于重金属污染物（如 Cd、Cr、Pb），定向转化的核心技术逻辑是“氧化还原+络合固定”，

通过化学还原剂将高价态重金属转化为低价态稳定物质，或通过生物代谢作用将游离态重金属转化为结合态物质，降低其毒性与迁移能力；迁移阻断的核心技术逻辑是“化学固定+物理隔离”，通过添加固定剂将重金属固定在土壤中，同时铺设物理阻隔层，阻止其挥发与淋溶，切断迁移路径。

对于持久性有机污染物（如多环芳烃、滴滴涕），定向转化的核心技术逻辑是“催化降解+生物代谢”，通过化学催化剂引导有机大分子定向降解为易降解小分子，或通过接种降解性微生物，利用生物酶的代谢作用，将有机污染物彻底降解为无害物质；迁移阻断的核心技术逻辑是“吸附固定+植物拦截”，通过添加吸附剂固定土壤中的有机污染物，抑制其挥发，同时种植富集性植物，拦截大气中的有机污染物，减少其沉降进入土壤。对于大气中的气态污染物（如 SO_2 、 NO_x 、VOCs），定向转化的核心技术逻辑是“氧化转化+吸收固定”，通过氧化剂将气态污染物氧化为固态或液态物质，再通过吸收剂收集处理；迁移阻断的核心技术逻辑是“扬尘控制+冠层拦截”，通过控制扬尘减少土壤中污染物向大气的挥发，同时利用植物冠层拦截大气中的气态污染物，减少其沉降污染土壤。

（二）定向转化与迁移阻断的协同作用机制

定向转化与迁移阻断并非孤立存在，而是在协同修复中呈现显著的协同作用，二者相互补充、相互促进，形成“阻断-转化-稳定”的闭环治理体系，显著提升污染治理效果。迁移阻断为定向转化创造良好条件，通过切断污染物迁移路径，将污染物固定在原地，避免污染物扩散，确保定向转化技术能够精准作用于污染物，提升转化效率；同时，迁移阻断可减少污染物的二次输入，避免定向转化后的物质再次被污染，确保转化效果的稳定性。

定向转化则为迁移阻断提供长效保障，通过将有毒有害污染物转化为无毒、低毒或易降解物质，从根源上降低污染物的迁移能力与危害程度，减少迁移阻断的压力，延长阻断屏障的使用寿命；同时，定向转化可将难固定、易迁移的污染物转化为易固定、难迁移的物质，便于后续的阻断处理，提升阻断效果。例如，对于土壤中的 Cd 污染物，先通过化学固定剂将游离态 Cd 固定为稳定态，实现迁移阻断，再通过接种富集性微生物，将稳定态 Cd 定向转化为微生物体内的结合态物质，实现彻底净化，二者协同作用，既避免了 Cd 的迁移扩散，又实现了 Cd 的无毒化处理，提升协同修复效果。

（三）协同作用的实践价值与应用意义

定向转化与迁移阻断的协同作用，是大气－土壤污染协同修复的核心优势，其实践价值在于打破了单一修复技术的局限性，实现了“治标与治本结合”——迁移阻断侧重于“治标”，快速切断污染迁移路径，控制污染扩散；定向转化侧重于“治本”，从根源上消除污染危害，实现污染物的彻底净化。二者的协同作用，能够提升污染治理的效率与质量，降低治理成本，避免二次污染，同时实现生态效益、经济效益与社会效益的统一。

在实践应用中，这种协同作用能够适配不同污染程度、不同污染物类型的治理需求，对于重度污染区域，可先通过迁移阻断控制污染扩散，再通过定向转化实现污染物净化；对于轻度污染区域，可通过定向转化与迁移阻断协同，实现污染物的高效治理与长效管控。此外，二者的协同作用还为修复技术的研发提供了清晰的方向，推动研发复合型协同修复技术，实现“阻断与转化一体化”，提升协同修复的规模化、产业化应用水平，为大气－土壤复合污染治理提供有力的技术支撑。

污染物定向转化与迁移阻断原理，是大气－土壤污染协同修复的核心理论支撑，二者相辅相成、协同发力，共同推动污染治理的精准化与高效化。污染物定向转化通过化学、生物手段，实现有毒有害污染物向无毒、低毒或易降解物质的精准转化，从根源上降低污染危害，化学转化与生物转化各有优势，可根据污染物类型灵活适配；污染物迁移阻断通过物理隔离、化学固定、生物拦截等手段，切断污染物在大气与土壤间的跨介质迁移路径，阻止污染扩散，为定向转化创造良好条件。结合重金属、持久性有机污染物、气态污染物等典型污染物，其定向转化与阻断技术逻辑具有针对性，需立足污染物特性精准制定方案。定向转化与迁移阻断的协同作用，形成了“阻断－转化－稳定”的闭环治理体系，既快速控制污染扩散，又实现污染物彻底净化，提升了协同修复的效率与质量，为修复技术研发与实践应用提供了科学指引，推动大气－土壤复合污染协同修复向长效化、规模化发展，为生态环境治理提供坚实的理论与技术保障。

第四节 生态修复与工程修复的协同原理

大气-土壤复合污染的协同修复,需兼顾治理效率与长效稳定性,单一修复模式难以实现这一目标。生态修复与工程修复作为污染治理的两大核心手段,各具优势、各有侧重,二者的协同应用是破解复合污染治理难题的关键路径。生态修复依托自然生态系统的自我调节能力,通过植物、微生物等生物手段实现污染净化与生态恢复,凸显长期稳定性;工程修复依靠人工干预的物理、化学手段,实现污染物的快速管控与去除,凸显高效性。立足“自然恢复为主,人工修复为辅”的核心理念,明确二者的核心内涵与适用场景,阐述协同修复原理,构建科学的协同逻辑框架,能够实现“工程修复快速控污、生态修复长期稳定”的协同效应,降低修复成本,完善协同修复理论体系,为大气-土壤复合污染的长效治理提供坚实的理论支撑与实践指引。

一、生态修复与工程修复的核心内涵及适用场景

生态修复与工程修复是大气-土壤复合污染治理中两种互补性极强的修复模式,二者基于不同的治理逻辑,形成了各具特色的核心内涵与适用场景。明确二者的本质特征与应用边界,是实现二者协同发力的前提,能够避免单一修复模式的局限性,确保修复技术的针对性与适配性,契合山水林田湖草一体化保护和系统修复中“根据受损程度选择适配修复模式”的要求。

(一) 生态修复的核心内涵

生态修复的核心内涵,是遵循自然生态系统的演化规律,依托生态系统自身的自我调节、自我修复能力,通过人为适度干预,培育适宜的生物群落,改善生态环境条件,实现污染物的净化、生态系统结构的修复与功能的恢复,最终达到生态系统稳定平衡的状态。其核心特征是“自然性、长效性、环保性”,强调“以自然恢复为主,人工干预为辅”,不追求短期治理效果,注重生态系统的长期稳定与可持续发展,避免人工干预对生态系统造成二次破坏。

生态修复的核心手段包括植物修复与微生物修复,二者均依托生物自身的生理代谢或吸附作用实现污染治理。植物修复通过种植具有富集、降解能力的植物,吸收土壤或大气中的污染物,通过代谢作用将其转化为无毒或低毒物质,同时改善土壤结构、提升土壤肥力,恢复植被覆盖,增强生态系统的自我调节能力;微生物

修复通过接种或培育具有降解、吸附能力的微生物，利用微生物的代谢活动，将污染物转化为无害物质，实现污染物的精准净化，同时改善土壤微生态环境，推动生态系统的良性循环，契合生态修复“保护保育、自然恢复、辅助再生”的技术导向。

（二）工程修复的核心内涵

工程修复的核心内涵，是通过人工设计、工程施工等手段，采用物理、化学方法，对大气—土壤中的污染物进行快速拦截、去除或固定，实现污染的快速管控，其核心特征是“人工性、高效性、针对性”，强调人为干预的主导作用，注重短期治理效果，能够在短时间内降低污染物浓度，控制污染扩散蔓延，解决复合污染的紧迫性问题。

工程修复的核心手段包括物理修复与化学修复，二者均通过人工干预改变污染物的存在形态或迁移路径。物理修复通过物理手段改变大气、土壤的物理性质，实现污染物的拦截、分离或固定，不改变污染物的化学性质，具有操作简单、见效快、无二次污染的优势；化学修复通过添加化学试剂，与污染物发生化学反应，改变污染物的化学结构，将其转化为无毒、低毒或易去除的物质，实现污染物的快速净化，针对性强，能够有效处理高浓度、难降解污染物，是重度污染区域快速控污的核心手段。

（三）二者的适用场景差异

生态修复与工程修复的适用场景，主要取决于污染程度、污染物类型、生态环境条件及治理目标，二者的适配性直接决定修复效果与成本。生态修复更适用于轻度至中度污染区域，尤其是生态环境相对脆弱、需要长期恢复的区域，如农业耕作区、生态保护区、轻度工业污染区等。这类区域污染物浓度较低，生态系统仍具有一定的自我修复能力，通过植物、微生物修复，既能实现污染物净化，又能恢复生态系统结构与功能，兼顾生态效益与长效性，符合“轻度受损、恢复力强的生态系统采取自然恢复为主”的原则。

例如，农业耕作区的土壤轻度重金属污染，可通过种植富集性植物，实现重金属的逐步净化，同时改善土壤肥力，不影响农业生产；生态保护区的轻度有机污染，可通过培育土著微生物，实现有机污染物的自然降解，避免人工干预对生态系统的破坏。工程修复则更适用于重度污染区域、污染物浓度高、污染扩散速度快的紧急场景，如工业矿区、重金属污染场地、突发污染事件现场等。这类区域生态系统已遭到严重破坏，自我修复能力丧失，需通过物理、化学工程手段快

速控制污染,降低污染物浓度,为后续生态修复创造良好条件,契合“严重受损的生态系统需进行生态重建”的要求。例如,工业矿区的重度重金属污染,可通过物理阻隔、化学固定等工程手段,快速固定污染物,阻止其扩散,再通过生态修复实现长期稳定。

二、生态修复与工程修复的协同修复核心原理

生态修复与工程修复并非孤立存在,二者的协同修复核心是立足“优势互补、协同发力”,充分发挥工程修复的快速控污优势与生态修复的长期稳定优势,实现“短期快速控污、长期稳定净化”的治理目标,同时降低修复成本、避免二次污染,这一原理契合《山水林田湖草生态保护修复工程指南》中“远近结合、分级分期实现修复目标”的理念,是大气-土壤复合污染协同修复的核心逻辑。

(一) 协同修复的核心逻辑与价值导向

协同修复的核心逻辑,是打破单一修复模式的局限性,将工程修复的“快速控污”与生态修复的“长期稳定”有机结合,形成“工程控污-生态巩固-长效稳定”的闭环治理体系。其价值导向主要体现在三个方面:一是提升修复效率,通过工程修复快速降低污染物浓度,控制污染扩散,解决复合污染的紧迫性问题,为生态修复创造适宜的环境条件;二是保障修复长效性,通过生态修复恢复生态系统的自我调节能力,巩固工程修复成果,防止污染反弹,实现长期稳定净化;三是降低修复成本,通过二者协同,优化修复方案,避免工程修复的过度投入与生态修复的周期过长问题,实现经济效益、生态效益与社会效益的统一。

协同修复的核心前提是“适配性”,即根据污染程度、污染物类型,合理搭配工程修复与生态修复手段,避免出现“重工程、轻生态”或“重生态、轻工程”的误区,确保二者协同发力、优势互补。例如,在重度污染区域,先通过工程修复快速控污,再通过生态修复巩固成果;在轻度污染区域,以生态修复为主,辅以简单工程修复手段,提升修复效率,契合“根据生态问题诊断结果选择适配修复模式”的原则。

(二) “工程修复快速控污、生态修复长期稳定”的协同效应

工程修复的核心优势是快速控污,能够在短时间内通过物理隔离、化学固定、污染物去除等手段,降低大气、土壤中的污染物浓度,切断污染物迁移路径,控制污染扩散蔓延,解决复合污染的紧急问题,为生态修复创造良好的基础条件。例如,对于突发大气-土壤复合污染事件,可通过物理吸附、化学中和等工程手

段，快速去除大气中的气态污染物、固定土壤中的重金属污染物，避免污染范围扩大，为后续生态修复争取时间。

生态修复的核心优势是长期稳定，能够通过植物、微生物的持续作用，逐步净化残留污染物，恢复生态系统的结构与功能，增强生态系统的自我调节能力，巩固工程修复成果，防止污染反弹。例如，工程修复固定土壤中的重金属污染物后，通过种植富集性植物，可逐步吸收土壤中的残留重金属，通过微生物降解残留的有机污染物，同时改善土壤结构，提升土壤肥力，实现生态系统的长期稳定，避免工程修复后出现“治标不治本”的问题。二者的协同效应，实现了“快速控污与长期稳定”的有机统一，既解决了复合污染的紧迫性问题，又保障了治理的长效性，同时减少了工程修复的二次污染风险与生态修复的周期成本。

（三）协同修复的成本优化原理

生态修复与工程修复的协同应用，能够有效降低整体修复成本，其核心原理是通过优化修复方案，实现“按需投入、优势互补”，避免单一修复模式的成本浪费。单一工程修复虽然见效快，但成本较高，且难以实现长期稳定，需持续投入人力、物力进行维护；单一生态修复虽然成本较低、环保性强，但修复周期长，难以应对高浓度污染的紧急场景，可能导致污染扩散，增加后续治理成本。

协同修复通过合理搭配二者的修复手段，根据污染程度、治理阶段，精准投入修复资源，实现成本优化。例如，在重度污染治理初期，投入工程修复手段快速控污，减少污染扩散带来的额外成本；在治理后期，投入生态修复手段巩固成果，降低工程维护成本，实现“前期精准投入、后期长效运维”的成本优化模式。同时，生态修复可通过改善土壤、大气环境，提升工程修复的效果，减少工程修复的试剂用量与施工难度，进一步降低修复成本。此外，协同修复可实现资源循环利用，如工程修复产生的废弃物可通过生态修复手段进行资源化处理，提升资源利用效率，进一步降低治理成本，契合生态修复“资源循环、绿色高效”的发展导向。

三、生态－工程协同修复的逻辑框架构建

基于生态修复与工程修复的协同原理，构建科学完善的生态－工程协同修复逻辑框架，明确二者的配合方式、实施步骤与核心控制点，是推动协同修复落地实施的重要保障。该框架以“精准诊断、分步实施、协同发力、长效管控”为核心导向，立足区域生态本底与污染特征，实现工程修复与生态修复的有机衔接，

确保修复效果的稳定性与可持续性,契合山水林田湖草生态保护修复“调查现状、诊断问题、分级实施”的技术框架。

(一) 二者的配合方式

生态修复与工程修复的配合方式,核心是“时序配合+手段配合”,根据污染治理的不同阶段与目标,实现二者的精准适配、协同发力,主要分为三种配合模式。一是“工程修复先行,生态修复跟进”模式,适用于重度污染区域或突发污染场景,先通过工程修复快速控污、切断污染迁移路径,降低污染物浓度,待环境条件适宜后,再开展生态修复,巩固工程修复成果,实现长期稳定。例如,工业矿区重金属污染治理,先通过物理阻隔、化学固定等工程手段固定污染物,再通过种植富集性植物、接种微生物,实现残留污染物净化与生态恢复。二是“生态修复为主,工程修复辅助”模式,适用于轻度至中度污染区域,以生态修复为核心,通过植物、微生物修复实现污染物净化与生态恢复,辅以简单的工程修复手段,提升修复效率,缩短修复周期。例如,农业耕作区轻度有机污染治理,以微生物修复为主,辅以物理翻耕、土壤改良等简单工程手段,改善土壤环境,提升微生物降解效率。三是“工程与生态同步推进”模式,适用于中度污染区域,工程修复与生态修复同步开展,工程修复快速控制污染扩散,生态修复同步净化残留污染物、恢复生态系统,实现“控污与修复同步、效率与长效兼顾”,契合“辅助再生”的生态修复理念。

(二) 协同修复的实施步骤

生态-工程协同修复的实施步骤,遵循“调查诊断-方案设计-工程控污-生态修复-效果评估-长效管控”的闭环流程,每一步骤相互衔接、协同推进,确保修复方案的科学性与可操作性,严格遵循《山水林田湖草生态保护修复工程指南》中“现状调查-问题诊断-方案实施-效果评估”的核心流程。第一步,调查诊断,全面排查大气-土壤复合污染的程度、污染物类型、分布范围,分析生态系统受损状况,明确治理目标与核心需求,为协同修复方案设计提供数据支撑,重点查清区域生态本底与污染胁迫因子。第二步,方案设计,根据调查诊断结果,合理搭配工程修复与生态修复手段,明确二者的实施时序、技术参数与投入比例,制定针对性的协同修复方案,确保方案的适配性与可行性,结合区域尺度、生态系统尺度与场地尺度的治理需求,设定分级分期目标。第三步,工程控污,按照方案开展工程修复,快速降低污染物浓度,切断污染迁移路径,控制污

染扩散,为生态修复创造适宜的环境条件,重点解决污染紧迫性问题。第四步,生态修复,在工程修复基础上,开展植物种植、微生物接种等生态修复工作,逐步净化残留污染物,恢复生态系统结构与功能,巩固工程修复成果。第五步,效果评估,建立科学的评估指标体系,从污染物浓度、生态系统质量、修复效率等方面,评估协同修复效果,判断是否达到治理目标。第六步,长效管控,根据效果评估结果,优化修复方案,建立长效运维机制,加强生态系统的监测与保护,防止污染反弹,实现长期稳定。

(三) 协同修复的核心控制点

生态-工程协同修复的核心控制点,是确保二者协同发力、提升修复效果、降低修复成本的关键,主要包括三个方面。一是污染诊断控制点,核心是精准识别污染物类型、污染程度与生态系统受损状况,避免修复方案的盲目性,确保工程修复与生态修复手段的适配性,参考参照生态系统设定修复目标,确保诊断结果的科学性。二是技术适配控制点,核心是根据污染物类型与污染程度,合理选择工程修复与生态修复技术,确保二者的协同互补,避免技术冲突,同时注重技术的环保性与经济性,避免二次污染,优先选择绿色、高效的修复技术。

例如,重金属污染优先选择化学固定+植物富集的协同技术,有机污染优先选择化学催化降解+微生物降解的协同技术。三是效果与成本控制点,核心是实时监测修复过程,跟踪污染物浓度变化与生态系统恢复状况,及时优化修复方案,确保修复效果达到预期,同时控制修复成本,避免过度投入,实现修复效果与成本的平衡。此外,还需加强生态系统的长期监测,建立预警机制,及时应对污染反弹等问题,确保协同修复的长效性,契合“长效管控、持续优化”的治理理念。

生态修复与工程修复作为大气-土壤复合污染治理的两大核心手段,各自具有独特的核心内涵与适用场景,生态修复凸显自然性、长效性,适用于轻度至中度污染区域的长期恢复;工程修复凸显人工性、高效性,适用于重度污染区域的快速控污。二者的协同修复原理,核心是立足优势互补,实现“工程修复快速控污、生态修复长期稳定”的协同效应,既解决复合污染的紧迫性问题,又保障治理的长效性,同时优化修复成本,避免二次污染,契合“自然恢复为主,人工修复为辅”的生态保护修复理念。构建的生态-工程协同修复逻辑框架,明确了二者的配合方式、实施步骤与核心控制点,形成了“调查诊断-方案设计-工程控污-生态修复-效果评估-长效管控”的闭环治理体系,为协同修复的落地实施提供了清晰的指引。

第六章 大气污染控制技术与土壤修复的协同策略

第一节 工业烟气净化与副产物土壤改良的耦合

工业烟气是大气污染的主要来源之一，其含有的硫氧化物、氮氧化物、粉尘等污染物，不仅会破坏大气环境，还会通过沉降作用进入土壤，加剧土壤污染，形成大气-土壤复合污染格局。工业烟气净化是控制大气污染的核心手段，在净化烟气、降低大气污染物排放的同时，会产生脱硫石膏、粉煤灰等大量副产物，若处置不当，易引发二次污染。立足“减污降碳、资源化利用”的核心理念，推动工业烟气净化技术与副产物土壤改良的耦合应用，既能实现工业烟气的高效净化，又能将副产物转化为土壤改良材料，实现“烟气净化减污、副产物资源化”的双重目标，降低污染治理成本与环境风险，完善大气-土壤协同修复体系，为工业污染区域的生态环境治理提供可行路径与技术支撑。

一、工业烟气净化技术及副产物核心特性

工业烟气净化技术以脱硫、脱硝、除尘为核心，通过针对性的物理、化学或生物手段，去除烟气中的各类污染物，确保烟气排放达到环保标准。不同净化技术的核心原理、工艺路径存在差异，所产生的副产物种类、特性也各不相同，明确二者的核心特征，是实现副产物资源化利用、推动二者耦合应用的基础，也是提升烟气净化效率、规避副产物二次污染的关键。

（一）工业烟气核心净化技术及原理

工业烟气净化技术聚焦于烟气中硫氧化物、氮氧化物、粉尘等污染物的去除，形成了以脱硫、脱硝、除尘为核心的三位一体净化体系，各类技术依托不同的作用原理，实现污染物的精准去除，适配不同工业场景的净化需求。脱硫技术核心是去除烟气中的硫氧化物，根据工艺差异可分为干法、湿法及其他特殊类型，湿法脱硫以碱性溶液为吸收剂，与烟气中的二氧化硫发生反应实现脱硫，反应效率

高、吸收剂利用率高，是目前工业领域应用最广泛的脱硫技术；干法脱硫采用粉末或颗粒状物质进行吸收催化，产物呈粉末状，无二次污染风险，对设备无腐蚀作用；海水脱硫则利用海水中的天然物质与二氧化硫反应，生成可自然分解的硫酸盐，对地域条件有明确要求但处理效果理想，此外电子束脱硫作为干法脱硫的一种，借助高能电子束照射烟气实现脱硫，无废水废渣产生，产物可用于生产化肥。

脱硝技术主要去除烟气中的氮氧化物，分为干法与湿法两类，干法脱硝费用较高、脱硝率有限，应用频率较低；湿法脱硝通过在吸收液中添加氧化剂，将难溶于水的一氧化氮氧化为易溶于水的二氧化氮，再通过碱性试剂中和去除，脱硝效果良好，产物可二次利用，深受工业企业青睐，部分一体化装置可实现脱硝率 $\geq 60\%$ ，满足重点区域排放要求。除尘技术核心是去除烟气中的粉尘颗粒，常见技术包括静电除尘、旋转电极除尘、湿式静电除尘等，静电除尘可快速清除细小粉尘，不受高温干扰，能长期高强度运行；旋转电极除尘通过阳极旋转装置全面清除积尘，提升除尘效率；湿式静电除尘借助水的冲刷作用，降低粉尘电阻，带动细小粉尘共同去除，与静电除尘配合使用可使除尘量提升 50% 以上，部分一体化装置总除尘效率可达到 99.95% 以上。

（二）烟气净化副产物的主要类型及基础特性

工业烟气净化过程中，脱硫、脱硝、除尘技术均会产生相应副产物，其中脱硫石膏、粉煤灰是产量最大、应用潜力最广的两类副产物，此外还会产生少量脱硝副产物，各类副产物的特性由净化技术、原料成分决定，直接影响其土壤改良的应用价值与路径。脱硫石膏是湿法脱硫、干法脱硫的主要副产物，主要成分是二水硫酸钙，纯度较高、颗粒均匀，呈白色粉末状，具有良好的稳定性和胶凝性，同时含有钙、硫等植物生长所需的营养元素，其 pH 值呈中性或弱碱性，可适配酸性土壤改良，且无明显毒性，处置得当可实现资源化利用，但若随意堆放，易造成土壤板结、水体污染。

粉煤灰是燃煤电厂烟气除尘过程中产生的主要副产物，属于工业固体废物，主要成分包括二氧化硅、氧化铝、氧化钙等，呈灰色粉末状，颗粒细小、比表面积大，具有较强的吸附能力，可吸附土壤中的重金属离子和有机污染物，同时其含有的硅、铝等成分可改善土壤质地，但粉煤灰的 pH 值通常呈碱性，且部分粉煤灰含有少量重金属离子，若直接应用于土壤，需提前检测处理，避免引发二次污染。脱硝副产物主要包括硝酸盐、亚硝酸盐等，产量相对较少，其成分受脱硝

技术影响较大,若经过合理处理,可作为土壤肥料的补充,实现氮元素的资源化利用,但若处置不当,易导致土壤氮素过量,引发水体富营养化风险。

（三）副产物的资源化潜力与应用前提

烟气净化副产物并非“废弃物”,其自身的成分与特性决定了其具有良好的资源化潜力,尤其是脱硫石膏、粉煤灰,在土壤改良领域的应用前景广阔,可实现“变废为宝”,降低工业固体废物的处置压力。脱硫石膏中的钙、硫元素可补充土壤营养,改善土壤酸碱度,其胶凝性可提升土壤团聚性;粉煤灰的吸附性可固定土壤污染物,其硅、铝成分可优化土壤质地,二者均可作为土壤改良材料,替代传统改良剂,降低土壤改良成本。

但副产物的资源化应用需满足一定前提条件:一是需对副产物进行预处理,去除其中的杂质、重金属等有害物质,确保其符合土壤改良的环保标准,例如对粉煤灰进行淋洗、固化处理,降低其中重金属的溶出风险;二是需结合土壤类型、污染状况,针对性选择副产物及应用剂量,避免盲目应用导致土壤环境恶化,例如酸性土壤可优先选用脱硫石膏,碱性土壤需控制粉煤灰的用量;三是需遵循“因地制宜”原则,结合工业区域的土壤特征、作物类型,制定副产物应用方案,确保副产物的资源化利用与土壤改良效果相统一,同时规避二次污染风险,这也是实现二者耦合应用的核心前提。

二、烟气净化副产物在土壤改良中的应用路径

烟气净化副产物(脱硫石膏、粉煤灰等)依托自身的成分与特性,可通过多种路径应用于土壤改良,既能改善土壤理化性质、提升土壤肥力,又能固定土壤中的重金属污染物、降低土壤污染风险,实现土壤质量的提升与副产物的资源化利用。不同副产物的应用路径存在差异,需结合副产物特性与土壤需求,精准选择应用方式,确保土壤改良效果,推动副产物资源化利用的规范化、科学化。

（一）改良土壤理化性质,提升土壤肥力

土壤理化性质是影响土壤质量的核心因素,烟气净化副产物可通过补充营养元素、调节土壤酸碱度、改善土壤结构等路径,优化土壤理化性质,提升土壤肥力,为植物生长创造良好条件。脱硫石膏的核心应用路径之一是调节土壤酸碱度,针对我国南方酸性土壤面积广、土壤酸化严重的问题,脱硫石膏中的钙元素可与土壤中的氢离子结合,中和土壤酸性,提升土壤 pH 值,缓解土壤酸化趋势,同

时补充土壤中的钙、硫营养元素，促进植物根系生长，提升作物产量与品质。

粉煤灰则主要用于改善土壤质地，其颗粒细小、比表面积大，可填充土壤孔隙，提升土壤透气性与保水性，尤其适用于粘性土壤，可打破土壤板结，增强土壤团聚性；同时，粉煤灰中含有的硅、铝、钾等营养元素，可缓慢释放到土壤中，补充土壤营养，提升土壤肥力，减少化肥的使用量。此外，脱硫石膏与粉煤灰可协同应用，脱硫石膏调节土壤酸碱度，粉煤灰改善土壤质地、补充营养，二者协同作用，可进一步提升土壤改良效果，适配不同类型土壤的改良需求，例如在农业耕作区，二者协同应用可兼顾土壤改良与作物生长需求。

（二）固定土壤重金属，降低污染风险

工业区域土壤易受到重金属污染，重金属离子在土壤中迁移性强、毒性持久，易通过作物吸收、地下水渗透等方式扩散，危害生态环境与人体健康。烟气净化副产物可通过吸附、沉淀、络合等作用，固定土壤中的重金属离子，降低其迁移性与生物有效性，从而降低土壤重金属污染风险，这也是副产物在污染土壤修复中的核心应用路径。粉煤灰具有较强的吸附能力，其表面的孔隙结构可吸附土壤中的重金属离子（如镉、铅、铬等），将其固定在土壤表层，减少重金属离子的淋溶与迁移，同时粉煤灰中的氧化钙、氧化铝等成分可与重金属离子发生化学反应，形成稳定的沉淀物，进一步降低重金属的毒性。

脱硫石膏则主要通过沉淀作用固定土壤重金属，其含有的硫酸根离子可与土壤中的重金属离子（如铅、镉等）结合，形成难溶于水的硫酸盐沉淀，降低重金属离子的溶出量，减少其对植物的危害；同时，脱硫石膏调节土壤酸碱度后，可改变重金属离子的存在形态，使其从活性态转化为稳定态，进一步提升重金属固定效果。在实际应用中，可根据土壤重金属污染类型与程度，合理搭配粉煤灰与脱硫石膏的用量，实现重金属的高效固定，例如在工业矿区重金属污染土壤中，二者协同应用可显著降低土壤中重金属的活性，为后续植物修复创造良好条件。

（三）其他辅助应用路径，拓展资源化场景

除了改良土壤理化性质、固定土壤重金属外，烟气净化副产物还可通过多种辅助路径应用于土壤改良，拓展其资源化利用场景，提升副产物的利用效率。一是作为土壤改良剂的添加剂，与传统土壤改良剂（如有机肥、秸秆等）混合使用，既能降低传统改良剂的使用成本，又能提升土壤改良效果，例如将粉煤灰与有机肥混合，可增强有机肥的吸附能力，延长营养元素的释放时间；二是用于退化土

壤的生态修复，针对矿山复垦区、废弃工业场地等退化土壤，脱硫石膏与粉煤灰可快速改善土壤质地、提升土壤肥力，促进植被恢复，加快退化土壤的生态修复进程。

三是用于盐碱地改良，脱硫石膏中的钙元素可替换土壤中的钠离子，降低土壤盐碱度，改善土壤透气性，同时补充土壤营养，促进耐盐碱植物生长；粉煤灰可增加土壤孔隙度，提升土壤保水保肥能力，辅助盐碱地改良。此外，脱硝副产物中的硝酸盐可作为土壤氮肥的补充，适量应用于农业土壤，可提升土壤氮素含量，促进作物生长，但需严格控制用量，避免氮素过量引发水体富营养化，确保副产物应用的安全性与合理性。

三、工业烟气净化与副产物土壤改良的耦合协同效应及价值

工业烟气净化与副产物土壤改良的耦合，并非简单的技术叠加，而是通过二者的协同联动，实现“烟气净化减污、副产物资源化”的双重目标，形成“污染治理－资源循环－生态修复”的闭环体系，不仅能提升污染治理效率，还能降低治理成本与环境风险，具有显著的生态效益、经济效益与社会效益，是大气－土壤复合污染协同治理的重要路径。

（一）协同减污效应，破解复合污染难题

二者耦合的核心协同效应是协同减污，既实现工业烟气的高效净化，又降低土壤污染风险，破解大气－土壤复合污染难题。工业烟气净化技术通过脱硫、脱硝、除尘等工艺，去除烟气中的硫氧化物、氮氧化物、粉尘等污染物，降低大气污染物排放，减少污染物通过沉降作用进入土壤，从源头控制土壤污染的输入，缓解大气－土壤复合污染的加剧趋势，尤其是在工业集中区域，可显著改善区域大气与土壤环境质量。

烟气净化副产物应用于土壤改良，可固定土壤中的重金属污染物，减少土壤污染物的挥发与迁移，避免土壤污染物进入大气，形成“大气净化－土壤修复”的双向协同减污体系。例如，工业烟气中的硫氧化物经脱硫处理后，转化为脱硫石膏，应用于土壤改良可中和酸性土壤，固定土壤重金属，既减少了大气中硫氧化物的排放，又降低了土壤重金属污染风险，实现大气与土壤污染的同步治理，提升复合污染治理的整体效率。

（二）资源循环效应，实现副产物资源化利用

二者耦合的关键协同效应是资源循环，将工业烟气净化产生的副产物转化为土壤改良材料，实现“废弃物”的资源化利用，破解工业副产物处置难题，推动资源循环利用。工业烟气净化过程中，每年会产生大量的脱硫石膏、粉煤灰等副产物，若采用传统的堆放、填埋方式处置，不仅占用大量土地资源，还会引发二次污染，增加工业企业的处置成本。通过耦合应用，将副产物应用于土壤改良，替代传统土壤改良剂，既解决了副产物的处置难题，又实现了资源的循环利用，变“废”为“宝”。

例如，脱硫石膏可替代石膏、石灰等传统土壤改良剂，用于酸性土壤改良；粉煤灰可替代活性炭等吸附材料，用于土壤重金属固定，降低土壤改良的原材料成本，同时减少工业固体废物的排放量，推动工业绿色发展。此外，副产物中的营养元素（钙、硫、硅等）可被植物吸收利用，实现营养元素的循环，提升资源利用效率，形成“工业生产 - 烟气净化 - 副产物利用 - 土壤改良 - 作物生长”的资源循环链条。

（三）成本与风险优化效应，提升治理可行性

二者耦合的重要协同效应是成本优化与风险降低，显著提升污染治理的可行性与经济性，推动协同治理技术的规模化应用。从成本角度来看，工业烟气净化副产物的资源化利用，可减少副产物的堆放、填埋等处置成本，同时替代传统土壤改良剂，降低土壤改良成本，实现“一举两得”；此外，二者耦合应用可优化治理流程，减少单独开展烟气净化与土壤修复的重复投入，进一步降低整体治理成本，尤其适用于工业企业与工业污染区域的大规模治理。

从环境风险角度来看，二者耦合应用可有效规避副产物二次污染风险，通过对副产物的预处理与合理应用，将其转化为环境友好型材料，减少副产物对土壤、水体、大气的污染；同时，协同减污效应可降低大气与土壤污染风险，减少污染物对生态系统与人体健康的危害，实现污染治理与生态保护的协同推进。此外，二者耦合应用还可推动工业企业绿色转型，提升企业的环保形象，实现经济效益与生态效益的统一，为工业污染区域的生态环境治理提供可持续的解决方案。

工业烟气净化与副产物土壤改良的耦合，是大气 - 土壤复合污染协同治理的重要路径，立足“减污降碳、资源化利用”的核心理念，实现了技术、资源与生态的协同联动。工业烟气净化技术以脱硫、脱硝、除尘为核心，通过不同工艺实

现烟气污染物的高效去除，产生的脱硫石膏、粉煤灰等副产物具有良好的资源化潜力，其特性决定了其在土壤改良中的应用价值。副产物可通过改良土壤理化性质、固定土壤重金属、辅助生态修复等多种路径应用于土壤改良，实现资源化利用的同时提升土壤质量。二者耦合产生的协同减污、资源循环、成本优化等效应，既破解了工业烟气污染与副产物处置难题，又降低了土壤污染风险与治理成本，实现“烟气净化减污、副产物资源化”的双重目标。

第二节 碳捕集与利用（CCU）技术与土壤固碳

在“双碳”目标与大气—土壤复合污染协同治理的双重背景下，碳捕集与利用（CCU）技术成为破解大气碳减排与土壤质量提升双重难题的关键抓手。CCU技术通过精准捕集大气及工业排放中的二氧化碳，实现大气碳浓度的有效管控，同时其捕集的碳源可通过科学途径应用于土壤固碳，推动土壤有机质积累、改善土壤理化性质，实现“大气碳减排”与“土壤碳增汇”的双向赋能。立足生态碳汇与工业减排协同发展的核心理念，解析CCU技术核心流程与减排作用，探索其与土壤固碳的协同路径，评估二者协同的环境与生态效益，既能完善大气—土壤协同修复体系，又能为“双碳”目标落地与土壤质量提升提供可行的技术路径，助力生态环境保护与可持续发展。

一、碳捕集与利用（CCU）技术核心流程及大气碳减排作用

碳捕集与利用（CCU）技术是一套涵盖碳捕集、运输、储存、利用全链条的系统性技术，其核心逻辑是将大气中或工业排放源中的二氧化碳进行精准捕获、高效转化，实现碳元素的循环利用，减少大气中二氧化碳的积累，同时为土壤固碳提供优质碳源。明确CCU技术的核心流程、技术类型及大气碳减排的核心作用，是实现其与土壤固碳协同联动的基础，也是推动“减污降碳”协同增效的关键。

（一）CCU技术的核心流程与技术体系

CCU技术的核心流程可分为碳捕集、碳运输、碳利用三个关键环节，各环节紧密衔接、协同发力，形成完整的碳循环利用体系，同时衍生出工业CCU与生态CCU（Eco-CCUS）两大技术分支，适配不同应用场景。碳捕集是整个流程的核心起点，主要针对工业排放源（如电厂、钢铁厂、化工厂）及大气中的二氧

化碳，通过物理、化学或生物手段进行精准捕获，根据捕集对象与工艺差异，分为燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧捕集及生态捕集四种主流方式，其中燃烧后捕集因技术成熟、适配性强，是目前工业领域应用最广泛的捕集方式，而生态捕集则聚焦于农林业废弃物的碳捕获，依托光合碳泵效应实现绿色捕碳。

碳运输环节主要是将捕集到的高浓度二氧化碳，通过管道、罐车等运输方式，输送至利用或储存场地，其中管道运输适用于大规模、长距离运输，具有运输效率高、成本低的优势，罐车运输则适用于小规模、短距离运输，灵活性较强。碳利用是 CCU 技术的核心目标，也是实现碳循环的关键环节，分为工业利用、农业利用、生态利用等多个方向，其中土壤固碳是农业与生态利用的重要组成部分，即将捕集的碳源转化为可被土壤吸收固定的形态，实现碳元素的资源化利用，而生态 CCU 模式下的秸秆埋藏等技术，更是实现农林业废弃物碳汇价值的重要路径。

（二）不同类型 CCU 技术的核心特征对比

不同类型的 CCU 技术，在捕集效率、成本投入、适用场景等方面存在显著差异，明确其核心特征，可根据实际需求选择适配的技术类型，推动 CCU 技术与土壤固碳的精准耦合。为清晰呈现各类 CCU 技术的差异，以下通过表格对比不同 CCU 技术的核心特征：

CCU 技术类型	核心捕集原理	捕集效率	成本水平	适用场景	碳利用适配性 （土壤固碳）
燃烧后捕集	利用化学吸收剂（如胺类溶液）吸收烟气中的二氧化碳	较高 （85%~95%）	中高	工业电厂、钢铁厂等大规模排放源	高，捕集碳源纯度高，可直接转化用于土壤施用
燃烧前捕集	先将燃料转化为合成气，再分离捕获二氧化碳	中高 （80%~90%）	高	煤化工、天然气化工等行业	中高，碳源纯度较高，需简单处理后用于土壤
富氧燃烧捕集	用氧气替代空气燃烧燃料，提高烟气中二氧化碳浓度，便于捕获	中 （75%~85%）	中	工业锅炉、垃圾焚烧厂	中，碳源浓度适中，适配土壤固碳需求
生态捕集 （Eco-CCUS）	依托光合碳泵效应，捕获农林业废弃物中的碳元素	中低 （60%~75%）	低	农业产区、林业区域	高，碳源贴合土壤生态，可直接用于土壤改良与固碳

（三）CCU 技术在大气碳减排中的核心作用

CCU 技术作为大气碳减排的重要支撑技术，其核心作用体现在“源头减碳、循环固碳”两个层面，既能减少大气中二氧化碳的新增排放，又能降低大气中已积累的碳浓度，助力“双碳”目标实现。从源头减碳来看，CCU 技术可精准捕获工业排放源中的二氧化碳，避免其直接排放到大气中，尤其是在火电、钢铁、化工等高耗能、高排放行业，应用 CCU 技术可显著降低行业碳排放量，据测算，工业 CCU 技术可实现单厂碳减排率 30%—50%，是工业领域碳减排的核心手段之一。

从循环固碳来看，CCU 技术将捕集的二氧化碳转化为可利用的碳源，通过土壤固碳、植物固碳等方式，将碳元素固定在土壤、植被中，实现碳元素的循环利用，减少大气中碳的积累。与碳封存（CCS）技术不同，CCU 技术强调“利用”而非“单纯封存”，可实现碳元素的资源化价值，同时降低碳减排的成本，尤其是生态 CCU 模式下的秸秆埋藏技术，理论上可每年实现 3.8 亿吨 CO_2 的碳汇潜力，相当于增加我国现有陆地生态系统 CO_2 固定率的 36.9%。此外，CCU 技术还可协同减少大气中其他污染物的排放，通过优化工业燃烧工艺，在捕集二氧化碳的同时，减少硫氧化物、氮氧化物等污染物的排放，缓解大气污染与温室效应的协同影响，推动大气环境质量的持续改善。

二、碳捕集与利用（CCU）技术与土壤固碳的协同路径

CCU 技术与土壤固碳的协同，核心是将 CCU 技术捕集的碳源，通过科学、合理的路径应用于土壤，实现“碳源利用-土壤固碳-土壤质量提升”的协同联动，同时借助土壤固碳的过程，进一步提升 CCU 技术的碳利用效率，形成双向协同的良性循环。结合 CCU 技术的碳源特性与土壤固碳的需求，可通过捕集碳源的土壤施用、促进土壤有机质积累、优化土壤固碳环境等多条路径，推动二者协同发力，提升协同效果。

（一）捕集碳源的土壤精准施用路径

捕集碳源的土壤精准施用，是二者协同的核心路径，核心是根据土壤类型、碳含量、污染状况，将 CCU 技术捕集的碳源（如二氧化碳、生物炭、秸秆碳源等）转化为适宜土壤吸收的形态，精准施用至土壤中，实现碳源的高效固定。不同类型的 CCU 碳源，其土壤施用方式与效果存在差异，需针对性选择施用路径，

确保碳源利用率与土壤固碳效果。对于工业 CCU 技术捕集的高浓度二氧化碳，可通过土壤注入法、滴灌结合法等方式施用，将二氧化碳注入土壤深层，与土壤中的矿物质发生化学反应，形成稳定的碳酸盐，实现碳的长期固定；同时，二氧化碳可促进土壤中微生物的活性，加速土壤有机质的分解与积累，提升土壤固碳能力。对于生态 CCU 技术捕集的秸秆等碳源，可通过粉碎还田、埋藏封存等方式施用，尤其是在东北地区，低温导致秸秆还田后难以快速腐质化，采用秸秆埋藏技术可实现碳的长期封存，同时补充土壤营养，改善土壤质地，据测算，合理的秸秆埋藏可使土壤碳固存量提升 20%—30%。此外，还可将捕集的二氧化碳转化为生物炭，通过土壤撒施的方式，将生物炭融入土壤，生物炭稳定性强、比表面积大，可长期固定碳元素，同时吸附土壤中的污染物，提升土壤质量。

（二）促进土壤有机质积累的协同路径

土壤有机质是土壤固碳的核心载体，CCU 技术可通过多种方式促进土壤有机质的积累，实现二者的深度协同，提升土壤固碳能力与土壤质量。一方面，CCU 技术捕集的碳源可直接补充土壤中的碳元素，为土壤微生物的生长繁殖提供能量，微生物通过代谢作用，将碳源转化为土壤有机质，加速土壤有机质的积累，同时改善土壤微生物群落结构，提升土壤的自我调节能力。例如，将 CCU 捕集的二氧化碳与有机肥协同施用，可促进土壤中有益微生物的活性，加快有机肥的分解转化，提升土壤有机质含量，实现碳源利用与有机质积累的协同。另一方面，CCU 技术与植物修复协同，可进一步促进土壤有机质积累。通过 CCU 技术为植物生长提供适宜的碳源（如大气中捕获的二氧化碳可通过温室大棚供给植物），促进植物光合作用，增加植物生物量，植物残体分解后可转化为土壤有机质，提升土壤固碳能力；同时，植物根系可分泌有机物，与 CCU 捕集的碳源协同作用，改善土壤结构，增强土壤对碳的吸附与固定能力。此外，生态 CCU 模式下的秸秆资源化利用，可将未被充分利用的秸秆转化为碳源，通过还田、埋藏等方式进入土壤，既减少秸秆焚烧带来的大气污染，又能增加土壤有机质，实现“大气减排—土壤固碳—秸秆资源化”的三重协同。

（三）优化土壤固碳环境的协同路径

土壤固碳效果受土壤理化性质、微生物活性、水分条件等多种因素影响，CCU 技术可通过协同优化土壤固碳环境，提升土壤固碳效率，实现二者的长效协同。一是调节土壤酸碱度，CCU 技术捕集的碳源（如生物炭、碳酸盐等）可

调节土壤 pH 值，使土壤处于适宜固碳的酸碱度范围（pH 值 6.5-7.5），同时促进土壤中矿物质的风化，增强土壤对碳的吸附能力；例如，对于酸性土壤，施用 CCU 转化的碱性碳源，可中和土壤酸性，改善土壤固碳环境，提升碳固存效率。

二是改善土壤结构，通过施用 CCU 捕集的碳源（如生物炭、秸秆碳源），可填充土壤孔隙，提升土壤透气性与保水性，为土壤微生物提供良好的生长环境，同时增强土壤团聚性，减少土壤碳的流失，提升土壤固碳的稳定性。三是协同调控土壤微生物，CCU 技术捕集的碳源可作为微生物的碳源与能源，促进固碳微生物（如固氮菌、放线菌）的生长繁殖，提升微生物的固碳能力，同时抑制土壤中碳分解微生物的活性，减少土壤碳的分解流失，实现土壤碳的长期固定。此外，CCU 技术与土壤改良措施协同，可进一步优化土壤固碳环境，例如与脱硫石膏、粉煤灰等改良剂配合使用，既提升土壤固碳能力，又改善土壤质量，实现多重协同效应。

三、CCU 技术与土壤固碳协同的环境与生态效益评估

CCU 技术与土壤固碳的协同应用，不仅能实现大气碳减排与土壤碳增汇的双重目标，还能产生显著的环境与生态效益，优化生态系统结构，提升生态环境质量，同时兼顾经济效益，推动“减污降碳”与生态保护的协同推进，契合“双碳”目标与生态环境保护的核心需求，具有重要的实践价值与应用前景。

（一）大气环境效益：实现碳减排与大气污染协同改善

二者协同的核心大气环境效益，是实现大气碳减排与大气污染的协同改善，助力“双碳”目标落地与大气环境质量提升。一方面，CCU 技术通过捕集工业排放与大气中的二氧化碳，显著降低大气中碳浓度，缓解温室效应，推动全球气候治理，据测算，CCU 技术与土壤固碳协同应用，可实现单位面积土壤年固碳量提升 30%—50%，同时减少大气中二氧化碳排放，助力我国 2060 碳中和战略目标实现。另一方面，二者协同可减少大气中其他污染物的排放，例如生态 CCU 模式下的秸秆埋藏技术，可减少秸秆焚烧带来的颗粒物、一氧化碳等污染物排放，改善区域大气环境质量；同时，土壤固碳过程中，土壤对大气中的颗粒物、气态污染物具有吸附作用，可进一步净化大气环境，实现大气碳减排与大气污染治理的协同增效。

此外，CCU 技术与土壤固碳的协同，可推动工业企业绿色转型，减少高耗能、

高排放工艺的使用,进一步降低工业污染物的排放,形成“工业减排-碳捕集-土壤固碳-大气净化”的闭环体系,持续改善大气环境质量,推动区域生态环境的良性发展。

（二）土壤生态效益：提升土壤质量与土壤生态功能

二者协同的核心土壤生态效益,是提升土壤质量与土壤生态功能,实现土壤的可持续利用。一是提升土壤肥力,CCU技术捕集的碳源可补充土壤中的碳元素,促进土壤有机质积累,同时改善土壤理化性质,提升土壤透气性、保水性与保肥性,为植物生长创造良好条件,提升土壤肥力,减少化肥的使用量,降低农业面源污染风险。例如,施用CCU转化的生物炭,可使土壤有机质含量提升15%—25%,土壤肥力显著改善,作物产量提升10%-15%。二是增强土壤固碳能力,通过CCU碳源的施用与土壤固碳环境的优化,可显著提升土壤碳固存容量,实现土壤碳增汇,同时减少土壤碳的流失,推动土壤生态系统的碳循环平衡。三是改善土壤生态环境,CCU技术捕集的碳源(如生物炭)可吸附土壤中的重金属、有机污染物,降低土壤污染风险,同时促进土壤微生物群落结构优化,提升土壤自我修复能力,恢复土壤生态系统功能。此外,对于退化土壤(如矿山复垦区、废弃工业场地),二者协同应用可快速改善土壤质地、提升土壤肥力,促进植被恢复,加快退化土壤的生态修复进程,提升土壤生态系统的稳定性与可持续性。

（三）综合效益：兼顾经济与社会价值，推动可持续发展

CCU技术与土壤固碳的协同应用,不仅具有显著的环境与生态效益,还能产生良好的经济效益与社会效益,实现生态效益、经济效益与社会效益的统一。从经济效益来看,一方面,CCU技术的应用可降低工业企业的碳减排成本,尤其是生态CCU技术,其秸秆埋藏碳汇成本仅为101元/吨CO₂,远低于工业CCUS的250-300美元/吨CO₂,同时碳源的资源化利用可替代传统土壤改良剂,降低土壤改良成本;另一方面,土壤质量提升可促进农业增产、提质,增加农民收入,同时CCU技术的规模化应用可带动相关产业(如碳捕集设备制造、碳源加工、土壤改良)的发展,创造就业岗位,推动区域经济发展。此外,碳汇产品可参与CCER交易,为企业与区域带来额外的经济收益,助力乡村振兴战略落地。从社会效益来看,二者协同应用可推动“双碳”知识的普及,增强公众的环保意识与碳减排意识,同时改善区域生态环境质量,提升居民生活品质,促进人与自然和谐共生。此外,该协同模式可推动工业绿色转型与农业可持续发展,破解工

业减排与农业发展的矛盾，实现“减污降碳、提质增效”的发展目标，为全球气候治理与生态保护提供中国方案，具有重要的社会价值与推广意义。

碳捕集与利用（CCU）技术与土壤固碳的协同，是“双碳”目标背景下大气—土壤协同治理的重要路径，立足“碳减排、碳增汇、土壤提质”的核心目标，实现了技术、生态与经济的协同联动。CCU 技术以全链条碳捕集与利用为核心，通过多种技术类型实现大气碳减排，其捕集的碳源具有良好的土壤固碳适配性，尤其生态 CCU 技术更是依托光合碳泵效应，实现了农林业废弃物的资源化与碳汇价值。二者通过碳源精准施用、促进土壤有机质积累、优化土壤固碳环境等协同路径，形成双向赋能的良性循环，既提升了 CCU 技术的碳利用效率，又增强了土壤固碳能力。二者协同产生的大气环境效益、土壤生态效益与综合效益，不仅实现了大气碳减排与土壤质量提升的双重目标，还推动了资源循环利用与可持续发展，兼顾生态、经济与社会价值。

第三节 大气颗粒物治理与土壤风蚀防控的协同

大气颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）是影响大气环境质量的核心污染物，其来源广泛，其中土壤风蚀是重要贡献源之一——土壤表层松散颗粒在风力作用下被扬起，进入大气形成扬尘，既加剧大气颗粒物污染，又导致土壤退化、肥力下降，形成“土壤风蚀 - 大气颗粒物污染”的恶性循环。立足大气—土壤协同治理与生态保护的核心需求，梳理大气颗粒物的核心治理技术，探索土壤风蚀防控技术与大气颗粒物治理的内在协同逻辑，提出科学可行的协同实施策略，能够实现“土壤风蚀减少—大气颗粒物降低”的双向效益，破解二者相互加剧的治理难题，完善大气—土壤协同修复体系，为区域生态环境质量提升与土地资源可持续利用提供有力支撑。

一、大气颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）的核心治理技术

大气颗粒物治理是改善大气环境质量的关键举措，针对 PM_{2.5}、PM₁₀ 的不同特性（PM_{2.5} 粒径小、穿透力强、停留时间长，PM₁₀ 粒径较大、易沉降），形成了涵盖源头防控、过程拦截、末端净化的全方位治理技术体系。明确各类治理技术的核心原理、适用场景与应用效果，是实现其与土壤风蚀防控协同联动的

基础，也是提升颗粒物治理效率、打破污染恶性循环的关键。

（一）源头扬尘控制技术

源头扬尘控制是大气颗粒物治理的核心环节，核心逻辑是从颗粒物产生的源头入手，通过物理、工程手段减少扬尘扬起，重点针对土壤风蚀、建筑施工、道路运输等主要扬尘来源，其中土壤风蚀扬尘的源头控制的是衔接土壤风蚀防控的关键。针对土壤风蚀引发的扬尘，源头控制技术主要聚焦于增强土壤表层稳定性，减少松散颗粒的产生与扬起，同时兼顾其他扬尘来源的协同管控，实现全方位源头减尘。

常见的源头扬尘控制技术包括土壤表层覆盖、扬尘抑制剂喷洒、场地硬化等。土壤表层覆盖技术通过在裸露土壤表面铺设秸秆、砾石、防尘网等材料，覆盖松散土壤颗粒，减少风力对土壤表层的侵蚀，从而降低扬尘产生量，该技术既适用于农业耕作区、矿山复垦区等土壤风蚀严重区域，也适用于建筑施工裸露场地；扬尘抑制剂喷洒技术通过喷洒环保型抑制剂，使土壤颗粒凝结成团，增强土壤表层粘性，减少扬尘扬起，适用于大面积裸露土壤、道路两侧等区域；场地硬化技术主要针对工业厂区、道路等区域，通过铺设混凝土、沥青等材料，减少地面松散颗粒，从源头杜绝扬尘产生，同时便于清扫保洁，提升扬尘控制效果。

（二）过程过滤净化技术

过程过滤净化技术主要针对已扬起的大气颗粒物，通过物理过滤、吸附等方式，拦截、去除空气中的 PM_{2.5}、PM₁₀，降低大气颗粒物浓度，适用于大气颗粒物浓度较高的区域，可作为源头控制的补充，实现“源头减尘+过程净化”的双重管控。这类技术根据应用场景的不同，可分为室内过滤净化与室外过滤净化两大类，二者协同发力，提升大气颗粒物治理的全面性。

室外过滤净化技术是大气颗粒物治理的核心，主要包括喷淋降尘、植被过滤、空气净化设备等。喷淋降尘技术通过高压喷淋设备，将水雾化后喷洒到空气中，与大气颗粒物结合，使其沉降到地面，从而降低大气颗粒物浓度，适用于建筑施工场地、工业厂区、城市道路等区域，具有操作简单、见效快的优势，可快速降低 PM₁₀ 浓度；植被过滤技术依托植物的冠层、叶片，拦截空气中的颗粒物，同时植物根系可固定土壤，减少土壤风蚀，是衔接大气颗粒物治理与土壤风蚀防控的重要技术，适用于城市绿化、生态保护区、道路两侧等区域；空气净化设备则主要用于工业厂区、密闭空间等，通过过滤、吸附等原理，精准去除空气中的

PM_{2.5}、PM₁₀，提升局部区域空气质量。

（三）末端监测与管控技术

末端监测与管控技术是大气颗粒物治理的保障，核心是通过科学监测，实时掌握大气颗粒物浓度变化、来源分布，为治理技术的优化调整提供数据支撑，确保治理效果的稳定性与持续性，同时实现对土壤风蚀扬尘的精准管控。末端监测技术主要包括颗粒物在线监测、源解析监测等，通过布设监测站点，实时监测PM_{2.5}、PM₁₀浓度，分析颗粒物来源，明确土壤风蚀扬尘在大气颗粒物中的贡献占比，为协同治理提供数据支撑。

末端管控技术则是根据监测结果，对颗粒物浓度超标的区域进行精准管控，包括强化源头扬尘控制、增加喷淋降尘频次、优化植被过滤体系等，同时建立预警机制，当大气颗粒物浓度达到预警值时，及时启动应急管控措施，减少扬尘产生，降低大气污染风险。此外，末端管控还包括对扬尘污染行为的监管，通过严格执法，规范建筑施工、道路运输、土壤开发等活动，杜绝违规扬尘行为，确保各项治理技术落地见效，形成“监测－管控－优化”的闭环治理体系。

二、土壤风蚀防控技术与大气颗粒物治理的协同逻辑

土壤风蚀防控与大气颗粒物治理并非孤立存在，二者存在紧密的内在关联，形成“相互影响、相互促进”的协同关系。土壤风蚀是大气颗粒物（尤其是PM₁₀）的重要来源，土壤风蚀防控技术通过减少土壤扬尘产生，从源头降低大气颗粒物浓度；同时，大气颗粒物治理技术中的植被过滤、扬尘控制等手段，可反过来强化土壤风蚀防控效果，形成双向协同的良性循环。明确二者的协同逻辑，是推动协同治理落地、实现双向效益的核心。

（一）植被覆盖技术的双向协同逻辑

植被覆盖是土壤风蚀防控与大气颗粒物治理协同的核心技术，其协同逻辑体现在“固土减尘”与“滤尘护土”的双向赋能。从土壤风蚀防控来看，植被的根系可深入土壤，固定土壤颗粒，增强土壤表层稳定性，减少风力对土壤的侵蚀，同时植被冠层可阻挡风力，降低风速，减少土壤颗粒的扬起，从而从源头减少扬尘产生，降低大气颗粒物（尤其是PM₁₀）的排放。

从大气颗粒物治理来看，植被的冠层、叶片具有较强的吸附、拦截能力，可有效拦截空气中的PM_{2.5}、PM₁₀，使颗粒物沉降到土壤表面，既降低大气颗粒

物浓度，又能为土壤补充有机质，改善土壤质地，进一步增强土壤抗风蚀能力，形成“植被固土—减少扬尘—滤尘护土—增强固土”的双向协同循环。例如，在干旱半干旱地区种植沙棘、沙蒿等耐旱植被，既能固定土壤、减少土壤风蚀，又能拦截空气中的颗粒物，实现土壤风蚀防控与大气颗粒物治理的双重效果。

（二）土壤改良型防控技术的协同逻辑

土壤改良型防控技术（如免耕种植、固沙剂施用等），主要通过改善土壤理化性质、增强土壤稳定性，实现土壤风蚀防控，同时与大气颗粒物治理形成协同效应，其核心协同逻辑是“改良土壤—减少扬尘—净化大气—滋养土壤”。免耕种植技术通过减少土壤耕作次数，避免土壤表层结构被破坏，保留土壤表层的作物残体，增强土壤团聚性，减少土壤颗粒松散，从而减少土壤风蚀扬尘，降低大气颗粒物浓度；同时，免耕种植可提升土壤有机质含量，改善土壤肥力，促进植被生长，进一步强化植被过滤颗粒物的效果，实现协同增效。

固沙剂施用技术通过向土壤表层喷洒固沙剂，使土壤颗粒凝结成团，增强土壤表层粘性与稳定性，减少土壤风蚀扬尘，从源头降低大气颗粒物排放；同时，固沙剂可改善土壤保水保肥能力，促进植被生长，提升植被对大气颗粒物的过滤、吸附能力，反过来强化大气颗粒物治理效果。此外，这类土壤改良技术可减少土壤流失，避免土壤退化，保障土地资源可持续利用，为大气颗粒物治理提供良好的生态基础，实现二者的深度协同。

（三）区域协同防控的内在逻辑

土壤风蚀与大气颗粒物污染均具有区域性、扩散性特征，二者的协同治理需立足区域整体，遵循“区域联动、统筹兼顾”的内在逻辑，实现全域协同、综合防控。从区域尺度来看，土壤风蚀严重的区域（如干旱半干旱地区、矿山复垦区、农业耕作区），往往也是大气颗粒物污染严重的区域，土壤风蚀扬尘通过风力扩散，会影响周边区域的空气质量，形成跨区域污染。

因此，二者的协同逻辑不仅体现在技术层面的双向赋能，还体现在区域层面的统筹联动——通过整合区域内的大气颗粒物治理与土壤风蚀防控资源，统筹规划治理方案，实现“源头防控、过程拦截、末端治理”的全域协同。例如，在农业集中区域，统筹推进免耕种植、植被覆盖等土壤风蚀防控技术，同时配套喷淋降尘、植被过滤等大气颗粒物治理技术，减少农业生产中的土壤风蚀扬尘与颗粒物污染；在矿山复垦区域，结合土壤改良与植被恢复，既防控土壤风蚀，又减少

扬尘对周边大气环境的影响，实现区域内二者治理的协同推进。

三、大气颗粒物治理与土壤风蚀防控的协同实施策略

基于二者的协同逻辑，结合不同区域的污染特征与生态条件，制定科学可行的协同实施策略，明确实施路径、区域防控重点与保障措施，能够推动大气颗粒物治理与土壤风蚀防控深度融合，实现“土壤风蚀减少—大气颗粒物降低”的双向效益，提升协同治理的效率与长效性，为区域生态环境治理提供可落地的实践方案。

（一）构建“源头协同防控”实施路径

源头协同防控是二者协同实施的核心，核心是整合大气颗粒物源头扬尘控制与土壤风蚀源头防控技术，从根源上减少扬尘产生，实现“源头减尘、双向防控”。一方面，针对土壤风蚀源头，推广植被覆盖、免耕种植、固沙剂施用等防控技术，根据不同区域的土壤类型、气候条件，选择适配的技术方案——干旱半干旱地区重点推广耐旱植被种植与固沙剂施用，增强土壤抗风蚀能力；农业耕作区重点推广免耕种植、秸秆还田技术，减少土壤耕作带来的扬尘，同时提升土壤肥力；矿山复垦区重点推进土壤改良与植被恢复，减少裸露土壤面积，防控土壤风蚀。

另一方面，针对其他扬尘源头（建筑施工、道路运输等），强化源头管控，配套土壤风蚀防控相关措施——建筑施工现场地裸露土壤采用防尘网覆盖、扬尘抑制剂喷洒，同时在场周边种植植被，实现扬尘控制与土壤风蚀防控协同；道路运输采用密闭运输、洒水降尘，道路两侧种植植被，拦截道路扬尘，同时固定道路两侧土壤，减少土壤风蚀。通过源头协同防控，形成“全方位、无死角”的源头减尘体系，从根源上破解“土壤风蚀 - 大气颗粒物污染”的恶性循环。

（二）优化“过程协同净化”实施路径

过程协同净化主要聚焦于已产生的扬尘与大气颗粒物，通过整合过滤净化与土壤风蚀防控技术，实现“颗粒物净化—土壤保护”的双向赋能，提升协同治理效果。一是强化植被过滤体系建设，将大气颗粒物治理中的植被过滤技术与土壤风蚀防控中的植被覆盖技术相结合，统筹规划区域植被布局，在城市绿化、道路两侧、生态保护区、土壤风蚀严重区域，种植具有较强吸附、固土能力的植被，既拦截空气中的颗粒物，又固定土壤，减少土壤风蚀，实现二者协同净化。

二是推广喷淋降尘与土壤保湿协同技术，在大气颗粒物浓度较高、土壤风蚀

严重的区域，将喷淋降尘与土壤保湿相结合，喷淋降尘既降低大气颗粒物浓度，又能为土壤补充水分，增强土壤粘性，减少土壤风蚀；同时，合理控制喷淋频次与水量，避免水资源浪费，实现“降尘、保湿、固土”的三重效果。三是优化工业区域的过程管控，工业厂区推广密闭生产、粉尘回收利用技术，减少工业粉尘排放，同时在厂区周边种植植被、铺设防尘网，防控土壤风蚀，减少扬尘扩散，实现工业颗粒物治理与土壤风蚀防控协同。

（三）明确区域防控重点与保障措施

协同实施策略的落地，需结合不同区域的污染特征，明确区域防控重点，同时建立完善的保障措施，确保协同治理有序推进、取得实效。从区域防控重点来看，需分类施策、精准发力：干旱半干旱地区是土壤风蚀与大气颗粒物污染的重灾区，重点推进植被恢复、固沙剂施用、免耕种植等技术，构建防风固沙与颗粒物过滤体系，减少土壤风蚀扬尘；农业耕作区重点推广免耕种植、秸秆还田、植被覆盖等技术，减少农业生产中的扬尘，同时提升土壤肥力；矿山复垦区、建筑施工场地等裸露土壤集中区域，重点推进土壤覆盖、扬尘抑制剂喷洒、植被恢复等技术，快速防控土壤风蚀与扬尘污染；城市区域重点优化植被布局，强化道路扬尘管控，实现大气颗粒物治理与城市土壤保护协同。

保障措施方面，一是建立健全协同治理机制，整合环保、农业、林业、国土等部门资源，统筹推进大气颗粒物治理与土壤风蚀防控，明确各部门职责，形成工作合力；二是加强技术研发与推广，研发适配不同区域的协同治理技术，优化技术参数，降低治理成本，推动先进技术规模化应用；三是完善监测预警体系，布设全覆盖的大气颗粒物与土壤风蚀监测站点，实时掌握治理效果，及时优化治理方案；四是强化宣传引导与政策支持，普及协同治理理念，提高公众参与度，同时出台相关政策，鼓励企业、农户参与协同治理，为协同治理提供政策与资金保障。

大气颗粒物治理与土壤风蚀防控的协同，是破解“土壤风蚀 - 大气颗粒物污染”恶性循环、实现大气 - 土壤协同治理的重要路径，立足“双向赋能、协同增效”的核心目标，实现了生态保护与污染治理的深度融合。大气颗粒物治理以源头扬尘控制、过程过滤净化、末端监测管控为核心，形成全方位治理技术体系，其中多项技术与土壤风蚀防控存在天然的协同基础；土壤风蚀防控技术通过植被覆盖、免耕种植、固沙剂施用等方式，既减少土壤风蚀，又能从源头降低大气颗

颗粒物浓度，与大气颗粒物治理形成双向协同逻辑。通过构建源头协同防控、过程协同净化的实施路径，明确不同区域的防控重点，完善保障措施，能够实现“土壤风蚀减少—大气颗粒物降低”的双向效益，既改善大气环境质量，又保护土壤资源、提升土壤质量，推动区域生态系统的良性循环。深入推进二者的协同实施，结合区域实际优化治理方案，强化技术创新与机制保障，能够完善大气—土壤协同修复体系，助力生态环境保护与土地资源可持续利用，为区域生态环境高质量发展提供坚实的技术支撑与实践指引。

第四节 区域大气治理政策对土壤修复的引导作用

区域大气治理政策是统筹大气污染防治、推动生态环境质量提升的核心支撑，其核心目标是通过标准化管控、总量约束、跨区域联动等方式，遏制大气污染扩散，改善区域大气环境。大气与土壤作为紧密关联的环境介质，大气污染与土壤污染相互传导、相互影响，区域大气治理政策在管控大气污染物的同时，必然对土壤修复产生深远的引导作用。立足大气—土壤跨介质协同治理的核心需求，梳理现有区域大气治理政策的核心内容与实施成效，剖析政策对土壤修复的内在引导机制，提出科学可行的协同引导策略，能够完善跨介质污染治理的政策衔接，推动大气治理与土壤修复协同推进，实现区域生态环境质量的整体提升，为生态环境保护与可持续发展提供政策支撑。

一、现有区域大气污染防治政策的核心内容与实施效果

我国区域大气污染防治政策经过多年发展，已形成以排放标准为底线、总量控制为核心、联防联控为抓手的全方位政策体系，覆盖大气污染防治的全过程、各环节，精准适配不同区域的大气污染特征，在改善区域大气环境质量、遏制大气污染蔓延方面取得显著成效。明确各类政策的核心内容、实施路径与实际效果，是剖析其对土壤修复引导作用的基础，也是完善跨介质政策衔接的前提。

（一）区域大气污染物排放标准政策

区域大气污染物排放标准是大气污染治理的基础性政策，核心是根据不同区域的大气环境容量、污染特征、产业布局，制定差异化的污染物排放限值，明确工业企业、农业生产、交通运输等各类污染源的排放要求，划定大气污染防治的

底线，倒逼各类污染源规范排放，从源头减少大气污染物产生。与国家统一排放标准相比，区域排放标准更具针对性，结合区域实际优化排放限值，重点聚焦高污染行业与重点污染物，强化精准治污。

从核心内容来看，区域大气污染物排放标准涵盖颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）、硫氧化物、氮氧化物、挥发性有机物（VOCs）等核心污染物，针对火电、钢铁、化工、建材等重点行业，制定严于国家标准的排放限值，同时明确扬尘、秸秆焚烧等面源污染的管控要求，例如《空气质量持续改善行动计划》中明确要求严格控制高 VOCs 含量涂料、油墨等产品使用，推动工业涂装等行业开展低 VOCs 原辅材料替代。从实施效果来看，区域排放标准的落地有效遏制了重点行业大气污染物的无序排放，推动企业开展环保改造、提升污染治理能力，重点区域大气污染物浓度持续下降，据测算，截至 2025 年，全国地级及以上城市 PM_{2.5} 浓度较 2020 年下降 10%，重度及以上污染天数比率控制在 1% 以内，大气环境质量得到显著改善，同时也间接推动了土壤污染源头防控。

（二）区域大气污染物总量控制政策

区域大气污染物总量控制政策是大气污染治理的核心管控手段，核心是根据区域大气环境容量，科学核定大气污染物排放总量，将总量指标分解到各地区、各行业、各企业，通过总量约束，倒逼区域产业结构优化、污染治理能力提升，实现大气污染物排放总量持续下降，确保区域大气环境质量达到既定目标。该政策强调“总量管控、精准分配、动态调整”，兼顾区域发展与污染防治的平衡，是推动区域大气污染协同治理的重要抓手。

其核心内容包括总量核定、指标分配、考核监管三个环节：总量核定结合区域大气环境质量目标、产业发展规划，科学测算区域可承受的大气污染物最大排放量；指标分配坚持“谁污染、谁治理”原则，优先保障绿色低碳产业发展，严格控制高耗能、高排放行业总量指标；考核监管建立健全总量控制考核机制，将总量完成情况纳入地方政府与企业的考核评价体系，对超额排放、未完成总量目标的地区与企业实施约谈、处罚。实施效果方面，总量控制政策有效推动了区域产业结构优化，倒逼高耗能、高排放项目退出，推动重点行业开展减排改造，例如京津冀及周边地区、汾渭平原煤炭消费量实现稳步下降，氮氧化物和 VOCs 排放总量较 2020 年分别下降 10% 以上，同时减少了大气污染物通过沉降作用对土壤的污染输入，为土壤修复创造了良好的外部环境。

（三）区域大气污染联防联控政策

区域大气污染联防联控政策是应对区域性、扩散性大气污染的关键政策，核心是打破行政区域界限，整合区域内环保资源，建立跨区域协同治理机制，实现大气污染的统一规划、统一标准、统一监测、统一管控，破解跨区域大气污染传输难题，提升区域大气污染治理的整体效能。该政策重点适用于大气污染传输性强、区域关联度高的区域，如京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原等重点区域。

核心内容包括建立跨区域协同治理机制、统一区域治理标准、强化跨区域监测预警、协同开展应急管控等，例如《空气质量持续改善行动计划》明确划定京津冀及周边、长三角、汾渭平原等重点区域，推动区域内协同开展产业升级、能源结构优化、面源污染治理，建立区域大气污染联防联控联席会议制度，统筹推进区域大气污染治理。实施效果来看，联防联控政策有效破解了跨区域大气污染传输难题，重点区域大气污染协同治理能力显著提升，重污染天气频次大幅减少，区域大气环境质量协同改善，同时推动了跨区域土壤污染防治的协同联动，为跨介质污染治理奠定了机制基础。

二、区域大气治理政策对土壤修复的引导机制

区域大气治理政策对土壤修复的引导，并非单一的政策传导，而是通过政策约束、激励、倒逼等多种方式，构建起全方位、多层次的引导机制，推动土壤修复与大气治理协同推进。其核心逻辑是通过大气治理政策的落地，减少大气污染物对土壤的污染输入，倒逼土壤污染源头防控，推动修复技术创新与产业发展，引导土壤修复向精准化、协同化方向发展，实现大气治理与土壤修复的双向赋能、协同增效。

（一）倒逼机制：推动土壤污染源精准管控

区域大气治理政策通过严格的排放管控，形成对土壤污染源的倒逼效应，推动土壤污染源的精准管控，从源头减少土壤污染。大气污染物中的硫氧化物、氮氧化物、重金属、挥发性有机物等，可通过干湿沉降作用进入土壤，加剧土壤酸化、重金属污染与有机污染，而区域大气治理政策通过管控这类大气污染物的排放，间接减少了土壤污染的输入，倒逼相关污染源开展综合治理。

一方面，政策对工业企业的严格排放管控，倒逼企业开展环保改造，不仅减

少大气污染物排放，还推动企业加强生产过程中的土壤污染防治，例如钢铁、化工等重点行业企业，在落实大气污染物排放标准的同时，需配套建设土壤污染防治设施，加强生产废水、废渣的处置，避免污染物渗漏进入土壤；另一方面，政策对面源污染的管控，如扬尘控制、秸秆焚烧管控等，不仅减少大气颗粒物污染，还减少了扬尘中重金属、有机物等污染物进入土壤，同时推动农业生产方式优化，减少化肥、农药使用，降低农业面源对土壤的污染，实现大气面源污染与土壤面源污染的协同管控。此外，总量控制政策倒逼区域产业结构优化，推动高污染、高耗能企业退出，减少土壤污染存量，为土壤修复创造条件。

（二）激励机制：推动土壤修复技术创新与产业发展

区域大气治理政策通过政策扶持、资金支持、考核激励等方式，构建起对土壤修复的激励机制，推动土壤修复技术创新与产业高质量发展。大气治理与土壤修复存在技术协同性，许多大气污染治理技术可与土壤修复技术融合应用，区域大气治理政策在推动大气治理技术创新的同时，也为土壤修复技术创新提供了支撑与动力。

从技术创新来看，政策鼓励企业与科研机构开展大气-土壤协同治理技术研发，例如鼓励研发可同时去除大气污染物与土壤污染物的协同技术，推动烟气净化副产物资源化利用与土壤改良，《空气质量持续改善行动计划》也明确支持培育环保领域龙头企业，推动低 VOCs 原辅材料生产、污染治理等领域技术创新，间接带动土壤修复技术的升级。从产业发展来看，政策通过资金补贴、税收优惠等方式，鼓励企业参与土壤修复项目，尤其是大气污染严重区域的土壤修复项目，推动土壤修复产业规模化、规范化发展；同时，将土壤修复成效与大气治理考核挂钩，激励地方政府加大土壤修复投入，推动土壤修复与大气治理协同推进，形成“大气治理带动土壤修复、土壤修复助力大气治理”的良性循环。

（三）导向机制：明确土壤修复的协同发展方向

区域大气治理政策通过明确治理目标、优化治理布局，为土壤修复提供清晰的导向，引导土壤修复向协同化、精准化、长效化方向发展，实现与大气治理的深度融合。政策明确的区域大气治理重点，往往也是土壤污染严重的区域，如工业集中区、矿山复垦区、农业集中区等，这为土壤修复的区域布局提供了明确导向，引导土壤修复资源向重点区域倾斜，提升土壤修复的针对性与实效性。

区域大气治理政策强调“源头防控、过程管控、末端治理”的闭环治理理念，

这种理念也引导土壤修复从“末端修复”向“源头防控+末端修复”转变，推动土壤修复与大气污染源管控、产业结构优化、生态恢复协同推进；此外，联防联控政策引导土壤修复打破行政区域界限，推动跨区域土壤修复协同开展，与大气污染联防联控形成呼应，破解跨区域土壤污染传输难题，实现区域生态环境的整体改善。例如，重点区域在推进大气联防联控的同时，协同开展土壤污染状况调查与修复，实现大气与土壤污染的同步治理，提升区域生态环境质量。

三、基于大气治理政策的土壤修复协同引导策略

基于区域大气治理政策对土壤修复的引导机制，结合大气-土壤跨介质污染治理的需求，立足现有政策体系，提出科学可行的协同引导策略，重点完善跨介质污染治理的政策衔接，强化政策的协同性、针对性与可操作性，推动大气治理政策与土壤修复政策深度融合，实现大气治理与土壤修复的协同增效，提升区域生态环境治理的整体效能。

（一）完善跨介质政策衔接机制，强化协同管控

完善跨介质政策衔接是实现大气治理与土壤修复协同推进的核心，需打破大气治理与土壤修复政策“各自为战”的局面，构建“协同规划、协同管控、协同考核”的政策衔接机制。一方面，在区域大气治理规划编制过程中，同步纳入土壤修复相关内容，结合区域大气污染特征与土壤污染状况，统筹规划大气治理与土壤修复的重点区域、重点任务，确保二者治理目标协同、实施路径衔接，例如在重点工业区域，同步规划大气污染物减排与土壤污染修复项目，实现源头减污与末端修复协同。

另一方面，建立大气与土壤污染协同监测预警机制，整合区域大气与土壤监测资源，实现污染物浓度、污染源分布等数据共享，精准识别大气-土壤跨介质污染路径，为政策制定与治理方案优化提供数据支撑；同时，完善协同考核机制，将土壤修复成效纳入区域大气治理考核体系，倒逼地方政府重视土壤修复工作，推动大气治理与土壤修复协同推进。此外，结合《空气质量持续改善行动计划》等现有政策，细化跨介质污染治理的配套措施，明确各部门职责，形成工作合力，确保政策衔接落地见效。

（二）强化政策引导，推动土壤修复精准化开展

依托区域大气治理政策，强化对土壤修复的精准引导，结合不同区域的大气

污染特征、土壤污染类型，推动土壤修复精准化、差异化开展，提升土壤修复的实效性。一是结合区域大气污染物排放特征，精准识别土壤污染来源，针对大气沉降引发的土壤酸化、重金属污染、有机污染，制定差异化的土壤修复方案，例如在大气硫氧化物、氮氧化物排放较多的区域，重点开展土壤酸化修复，推广石灰改良、生物修复等技术；在工业大气重金属排放较多的区域，重点开展土壤重金属修复，推广固化稳定化、植物修复等技术。二是依托大气污染物总量控制政策，引导企业开展土壤污染治理，将土壤修复成效与企业大气污染物排放总量指标挂钩，对积极开展土壤修复、减少土壤污染排放的企业，给予总量指标倾斜、资金补贴等激励；对土壤污染严重、未开展修复的企业，严格限制其大气污染物排放，倒逼企业落实土壤修复责任。三是结合大气面源污染管控政策，推动农业区域土壤修复，引导农户采用免耕种植、秸秆还田等绿色生产方式，减少农业面源污染，同时开展农业土壤改良，提升土壤肥力，实现农业面源大气污染与土壤污染的协同治理。

（三）强化技术与资金保障，推动协同治理落地

技术创新与资金支持是推动土壤修复协同引导策略落地的重要保障，需依托区域大气治理政策，强化土壤修复技术研发与资金投入，为协同治理提供有力支撑。在技术保障方面，加大对大气-土壤协同治理技术的研发投入，鼓励科研机构、企业开展协同治理技术攻关，重点研发烟气净化副产物资源化利用、大气沉降污染物土壤修复、跨介质污染监测等技术，优化技术参数，降低治理成本，推动先进技术规模化应用；同时，加强技术推广与培训，提升地方政府、企业的协同治理技术水平，确保技术落地见效。

在资金保障方面，整合大气治理与土壤修复相关资金，建立跨介质污染治理专项资金，重点支持重点区域土壤修复项目、协同治理技术研发项目；同时，完善资金投入机制，鼓励社会资本参与土壤修复，通过政府购买服务、特许经营等方式，引导企业参与土壤修复项目，形成“政府主导、企业主体、社会参与”的资金投入模式。此外，结合区域大气治理政策中的产业扶持政策，推动土壤修复产业发展，培育一批具备大气-土壤协同治理能力的龙头企业，提升协同治理的产业化水平，为协同引导策略的落地提供产业支撑。

区域大气治理政策作为大气污染防控的核心支撑，对土壤修复具有全方位、多层次的引导作用，通过倒逼土壤污染源头防控、推动修复技术创新、明确协同

发展方向，构建起大气治理与土壤修复协同推进的良性机制。现有区域大气污染治理政策以排放标准、总量控制、联防联控为核心，形成了完善的政策体系，在改善大气环境质量的同时，为土壤修复提供了良好的政策环境与实践指引。通过完善跨介质政策衔接机制、强化政策精准引导、加强技术与资金保障，能够进一步发挥区域大气治理政策对土壤修复的引导作用，推动大气治理与土壤修复深度融合，完善跨介质污染治理体系，实现区域大气环境质量与土壤质量的同步提升。

第七章 土壤修复技术对大气环境的影响评估与优化

第一节 土壤修复过程（如热脱附、通风）的废气产生与控制

土壤修复是改善土壤质量、保障土地资源可持续利用的核心手段，其中热脱附、土壤通风等主流修复技术，在去除土壤中挥发性、半挥发性污染物的过程中，不可避免会产生废气。这些废气若未经有效控制直接排放，会携带各类污染物进入大气，引发大气环境二次污染，既破坏空气质量，也可能威胁人体健康，与土壤修复的生态目标相悖。立足大气-土壤协同治理的核心需求，系统剖析主流土壤修复技术的废气产生机制，明确废气中污染物的类型与排放特征，科学评估其对大气环境的污染风险，提出针对性的废气控制技术与优化方案，能够实现土壤修复与大气污染防治的协同推进，有效规避二次污染，为土壤修复工程的绿色有序开展提供技术支撑与实践指引。

一、主流土壤修复技术的废气产生机制及污染物特征

热脱附、土壤通风是当前土壤修复领域应用最广泛的主流技术，二者均以去除土壤中挥发性、半挥发性污染物为核心目标，但因技术原理、实施工艺存在差异，其废气产生机制、污染物类型及排放特征也有所不同。明确不同技术的废气产生逻辑与污染物特点，是精准评估污染风险、制定控制方案的基础，也是推动土壤修复绿色化的前提。

（一）热脱附修复技术的废气产生机制

热脱附修复技术核心是通过加热手段，将土壤中的挥发性、半挥发性污染物转化为气态，再通过抽提系统将气态污染物收集处理，其废气产生与加热过程、污染物转化密切相关，形成了“加热挥发—气态迁移—废气排放”的完整产生机制。该技术根据加热方式的不同，可分为原位热脱附与异位热脱附，二者废气产生机制略有差异，但核心逻辑一致。原位热脱附技术通过垂直加热井或水平加热

毯，将土壤加热至目标温度（可高达 500 摄氏度以上），通过真空抽提井引入气流，使土壤中吸附的污染物在高温作用下，通过蒸馏、沸腾、氧化、高温分解等多种机制蒸发或分解，转化为气态污染物，随气流迁移至抽提系统，若抽提系统密封不严或处理不及时，气态污染物会泄漏形成废气排放。异位热脱附则需将污染土壤开挖后运输至专用处理设备，通过加热炉加热土壤，使污染物挥发形成气态，再进入后续处理环节，其废气主要产生于土壤开挖、加热挥发及物料输送过程，尤其是土壤开挖时，表层挥发性污染物会直接逸散至大气，形成无组织废气。同时，加热过程中若温度控制不当，还可能导致土壤中有机物不完全分解，产生新增气态污染物，进一步增加废气排放量。

（二）土壤通风修复技术的废气产生机制

土壤通风修复技术（又称土壤气相抽提技术），核心是通过向土壤中通入空气或惰性气体，形成气流梯度，推动土壤中挥发性污染物解吸、迁移，再通过抽提系统将含污染物的气体抽出处理，其废气产生机制以“气体扰动—污染物解吸—气流携带”为核心，整体产生过程更温和，且多为有组织排放，但也存在无组织泄漏风险。

该技术的废气产生主要分为两个环节：一是通气扰动环节，通入的空气会打破土壤中污染物的气固平衡，使吸附在土壤颗粒表面的挥发性污染物解吸，进入土壤孔隙中的气相，形成含污染物的土壤气；二是抽提排放环节，通过抽提系统将土壤气抽出，若抽提系统处理不达标，或管道接口密封不严，含污染物的气体就会直接排放至大气，形成废气。此外，在土壤通风过程中，若通气量过大或通气不均匀，会导致土壤表层干裂，土壤中的挥发性污染物会直接逸散至大气，形成无组织废气；同时，土壤中的微生物在通气条件下会加速代谢，可能产生少量含氨、硫化氢等气态污染物，进一步丰富废气成分。

（三）废气中污染物类型与排放特征

两种主流修复技术产生的废气，污染物类型均以挥发性有机物（VOCs）、半挥发性有机物（SVOCs）为核心，同时伴随少量颗粒物、重金属及有害气体，具体类型与土壤污染状况密切相关，排放特征则因工艺技术不同呈现明显差异。从污染物类型来看，核心污染物为挥发性有机物，包括苯、甲苯、二甲苯、氯乙烯、苯并芘等，这类污染物主要来源于土壤中的工业污染、农业面源污染，是废气中对大气环境和人体健康危害最大的组分。辅助污染物包括颗粒物（PM₁₀、

PM_{2.5}) 重金属气态化合物(如汞蒸汽、铅化合物)及少量有害气体(如硫化氢、氨气),其中颗粒物主要产生于土壤开挖、物料输送过程,重金属气态化合物则来源于土壤中重金属污染物的高温挥发(主要存在于热脱附技术),有害气体则多由土壤微生物代谢或污染物分解产生。从排放特征来看,热脱附技术废气排放具有“高浓度、有组织为主、无组织为辅”的特点,废气中 VOCs 浓度较高,且排放时段集中在加热、抽提环节,无组织排放主要来源于设备泄漏、土壤开挖逸散;土壤通风技术废气排放则具有“低浓度、连续排放、有组织为主”的特点,废气中 VOCs 浓度相对较低,但排放持续时间长,无组织排放主要来源于管道泄漏、土壤表层逸散。此外,两种技术的废气排放均受修复规模、土壤污染程度、工艺参数控制等因素影响,存在明显的区域差异与时段差异。

二、土壤修复过程废气对大气环境的污染风险评估

土壤修复过程产生的废气,携带多种污染物进入大气环境,会对空气质量、人体健康产生潜在危害,同时可能引发二次生态风险,其污染风险的严重程度与废气排放量、污染物浓度、排放方式及周边环境敏感程度密切相关。科学评估废气的污染风险,明确风险等级与影响范围,能够为废气控制方案的制定提供精准依据,避免二次污染扩大化。

(一) 对大气空气质量的潜在影响

废气对大气空气质量的影响,主要体现在破坏大气组分平衡、降低空气质量等级,甚至引发区域性大气污染。一方面,废气中大量挥发性有机物(VOCs)进入大气后,会与氮氧化物在光照条件下发生光化学反应,生成臭氧(O₃),导致臭氧浓度超标,形成光化学烟雾,破坏大气氧化性平衡,同时 VOCs 本身也是大气中 PM_{2.5} 的重要前体物,会促进 PM_{2.5} 的生成,加剧雾霾天气发生频次。例如,热脱附技术排放的高浓度 VOCs,若未经处理直接排放,会在短时间内导致周边区域 VOCs 浓度超标,进而引发光化学污染。另一方面,废气中的颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5})会直接增加大气颗粒物浓度,降低大气能见度,同时颗粒物表面会吸附 VOCs、重金属等污染物,形成复合污染,延长污染物在大气中的停留时间,扩大污染影响范围。此外,废气中的重金属气态化合物、硫化氢等有害气体,会直接污染大气环境,破坏大气生态平衡,长期排放会导致周边区域大气质量持续下降,甚至不符合大气环境质量标准,影响区域生态环境安全。根据相关规范要求,

土壤修复工程应配套废气收集处理等二次污染防治设施，若设施不完善或运行不当，废气无序排放将严重影响周边大气质量。

（二）对人体健康的潜在危害

废气中含有的 VOCs、重金属、有害气体等污染物，可通过呼吸、皮肤接触等途径进入人体，对人体呼吸系统、消化系统、免疫系统等造成多方面潜在危害，危害程度与污染物浓度、接触时间密切相关。短期接触高浓度废气，会引发急性健康问题：VOCs 中的苯、甲苯等物质，会刺激人体呼吸道和眼部，导致咳嗽、咽痛、头晕、恶心等症状；硫化氢、氨气等有害气体，会刺激呼吸道黏膜，严重时可能引发呼吸困难、窒息；颗粒物则会沉积在人体呼吸道，引发哮喘、支气管炎等呼吸系统疾病。

长期接触低浓度废气，会导致慢性健康危害，甚至诱发严重疾病：VOCs 中的苯并芘、氯乙烯等属于强致癌物质，长期吸入会增加肺癌、白血病等恶性肿瘤的发病风险；重金属气态化合物（如汞蒸汽）会在人体体内蓄积，损害神经系统、肾脏等器官，尤其对儿童、老年人等易感人群危害更为明显；此外，废气中的污染物还可能通过食物链间接影响人体健康，进一步扩大危害范围。土壤修复工程周边往往存在居民区、学校等敏感目标，若废气控制不当，将直接威胁周边居民的身体健康，引发环境安全隐患。

（三）其他潜在生态风险

除对空气质量和人体健康的影响外，土壤修复过程产生的废气还可能引发其他潜在生态风险，破坏周边生态系统平衡。一方面，废气中的污染物会沉降至周边土壤、植被表面，导致土壤再次污染，同时损害植物叶片，抑制植物光合作用，影响植被生长，破坏区域植被覆盖，进而影响土壤保水保肥能力，加剧土壤退化；另一方面，废气中的有害气体和颗粒物会影响鸟类、昆虫等生物的生存环境，干扰生物群落结构，降低生物多样性，破坏生态系统的稳定性。

若废气排放引发区域性大气污染，还可能影响周边农业生产，导致农作物减产、品质下降，造成经济损失；同时，废气中的异味会影响周边居民的生活质量，引发环境投诉，影响社会和谐稳定。尤其在敏感区域开展土壤修复工程时，废气排放的生态风险更为突出，需重点管控，严格落实二次污染防治要求，避免生态环境破坏。

三、土壤修复过程废气控制技术与优化方案

针对土壤修复过程废气的产生机制与污染风险，结合热脱附、土壤通风两种主流技术的工艺特点，需构建“源头防控—过程拦截—末端治理”的全方位废气控制体系，配套适宜的控制技术，优化工艺方案，实现土壤修复与大气污染防治的协同，有效规避二次污染，确保土壤修复工程绿色、有序、高效开展。

（一）源头防控：优化修复工艺，减少废气产生

源头防控是废气控制的核心，通过优化修复工艺参数、完善施工流程，从源头上减少废气产生量，降低污染风险，这也是践行绿色修复理念、避免能源浪费的重要体现。针对热脱附技术，重点优化加热温度与时间，根据土壤污染类型、污染物浓度，精准设定加热参数，避免温度过高导致污染物不完全分解产生新增废气，同时缩短加热时间，减少废气排放时长；采用密闭式加热设备与输送系统，加强设备密封性能，减少无组织废气泄漏，尤其在土壤开挖、物料输送环节，采用密闭式运输车辆、密闭作业大棚，避免污染物逸散。

针对土壤通风技术，优化通气量与通气方式，根据土壤孔隙度、污染物浓度，合理控制通气量，避免通气量过大导致土壤表层干裂、污染物逸散；采用分层通气、均匀通气的方式，提升污染物解吸与抽提效率，减少废气排放总量；在通风区域表层覆盖防渗膜或惰性材料，减少土壤中挥发性污染物直接逸散，降低无组织废气排放量。此外，在土壤修复工程实施前，开展详细的土壤污染调查，明确污染物类型与浓度，针对性制定修复方案，避免盲目施工导致废气无序排放，同时配套建设废气收集处理设施，确保二次污染防治设施与主体工程同时设计、同时施工、同时运行。

（二）过程拦截：完善收集系统，遏制废气泄漏

过程拦截的核心是构建完善的废气收集系统，对修复过程中产生的废气进行全面收集，遏制废气无组织泄漏，为末端治理奠定基础。针对热脱附技术，构建“密闭空间+集中抽提”的收集系统，原位热脱附在修复区域设置密闭帷幕，异位热脱附在处理设备、物料堆放区域设置密闭大棚，通过抽提管道将废气集中收集至处理设备，抽提系统的负压需精准控制，确保废气无泄漏；在设备接口、管道连接处设置密封装置，定期检查维护，及时处理泄漏点，避免废气逸散。

针对土壤通风技术，优化抽提系统布局，合理设置抽提井位置与数量，确保

土壤气能够被全面抽提收集，减少废气泄漏；加强抽提管道的密封与维护，避免管道破损导致废气泄漏；在土壤表层设置气体监测点，实时监测废气泄漏情况，一旦发现浓度超标，及时采取封堵、加强抽提等措施，遏制污染扩散。同时，在作业区域设置围挡，减少废气扩散范围，尤其在敏感区域，扩大围挡范围，设置缓冲带，降低废气对周边环境的影响，作业区若存在异味或挥发性污染物，需设置在密闭负压大棚内，并配套相应的废气收集处理设施。

（三）末端治理：适配控制技术，提升处理效能

末端治理是废气控制的关键，根据废气中污染物类型、浓度，适配适宜的末端处理技术，确保废气处理达标后排放，实现废气资源化利用与无害化处置的结合。针对废气中高浓度 VOCs，采用“吸附+脱附+催化燃烧”组合技术，通过活性炭吸附废气中的 VOCs，吸附饱和后进行脱附再生，脱附后的高浓度 VOCs 通过催化燃烧技术分解为无害的二氧化碳和水，既实现 VOCs 的去除，又能回收热能，提升资源利用效率；针对低浓度 VOCs，采用活性炭吸附、生物过滤等技术，操作简单、成本较低，适合长期连续处理。

针对废气中的颗粒物，采用布袋除尘、静电除尘等技术，高效去除废气中的 PM10、PM2.5，避免颗粒物排放污染大气；针对重金属气态化合物，采用冷凝回收、化学吸收等技术，将重金属回收利用或转化为无害物质，减少重金属污染；针对硫化氢、氨气等有害气体，采用酸碱中和、生物降解等技术，降低其对大气环境和人体健康的危害。此外，建立废气处理系统的实时监测机制，配套相应的监测设备，对污染物排放和周边环境质量状况进行监测，实时监控处理效果，及时优化处理参数，确保废气处理达标；定期对处理设备进行维护保养，提升设备运行稳定性，避免设备故障导致废气超标排放。

热脱附、土壤通风等主流土壤修复技术在实施过程中，因技术原理与工艺特点，必然会产生携带各类污染物的废气，若缺乏有效控制，会对大气环境、人体健康及生态系统造成多重潜在风险，与土壤修复的生态目标相悖。这类废气的产生机制与污染物特征，与修复技术类型、土壤污染状况密切相关，热脱附技术以高温挥发产生高浓度有组织废气为主，土壤通风技术以低浓度连续排放废气为主，核心污染物均为挥发性有机物，同时伴随颗粒物、重金属等辅助污染物。通过构建“源头防控—过程拦截—末端治理”的全方位废气控制体系，优化修复工艺减少废气产生，完善收集系统遏制废气泄漏，适配适宜技术提升末端处理效能，能

够有效控制废气排放，规避二次污染，实现土壤修复与大气污染防控的协同推进。

第二节 植物修复与城市绿地系统的空气质量改善效应

植物修复是一种绿色生态型土壤修复技术，以植物为核心载体，通过其生理代谢、根系活动及与微生物的协同作用，实现土壤污染物的去除、固定与转化，兼具生态友好、成本低廉、可持续性强等优势。城市绿地系统作为城市生态环境的“肺叶”，承担着净化大气、调节气候、美化环境的重要功能，而植物修复技术与城市绿地系统的深度融合，既能发挥植物对土壤的修复作用，又能借助绿地植被的生理特性改善城市空气质量，形成“土壤修复—大气净化”的双向协同效应。立足大气—土壤协同治理与城市生态建设的双重需求，系统阐述植物修复技术的核心原理与应用优势，剖析其与城市绿地系统的协同作用机制，优化二者配置方案，能够充分发挥双重生态效益，推动城市生态环境质量全面提升，为绿色城市建设与土壤修复工程的协同推进提供技术支撑与实践指引。

一、植物修复技术的核心原理与应用优势

植物修复技术以植物的生理代谢活动为核心，依托不同类型植物的特性，形成了针对性的修复机制，其中超富集植物应用、植被重建是最具代表性的两种技术形式，二者相辅相成，共同实现土壤污染的修复与土壤生态功能的恢复。明确其核心原理与应用优势，是实现与城市绿地系统协同、发挥双重效益的基础。

（一）超富集植物修复的核心原理

超富集植物修复技术的核心是筛选和利用对特定土壤污染物具有高耐受性、高富集能力的植物，通过植物的根系吸收、体内转运与代谢，将土壤中的污染物富集于植物体内，再通过收割植物、集中处置的方式，实现土壤污染物的去除，其核心原理围绕“吸收—转运—富集—处置”的完整链条展开，同时依托植物自身的解毒机制实现自身存活与修复效能的提升。

这类植物通常具备明确的富集特征，地上部污染物浓度远高于根部，富集系数大于1，且对特定污染物的临界浓度阈值较高，如镉超富集植物的地上部镉浓度需超过100mg/kg，锌超富集植物需超过10000mg/kg。其修复机制主要包括三个层面：一是根系吸收，超富集植物的根系可通过主动转运、被动扩散等方式，

吸收土壤中的污染物，部分植物还能通过根系分泌有机酸、螯合剂等物质，活化土壤中难溶性污染物，提升吸收效率；二是体内转运，通过植物体内的转运蛋白家族，将根系吸收的污染物转运至茎、叶等地上部分，实现污染物的定向积累；三是代谢解毒，通过增强自身抗氧化系统活性、合成植物螯合肽、金属硫蛋白等物质，以及液泡区隔化等机制，降低污染物对自身的伤害，维持正常生长代谢。目前已被确认的超富集植物种类丰富，如东南景天对镉、锌具有强富集能力，蜈蚣草擅长富集砷，印度芥菜可富集铅、镉、镍等多种重金属，为不同类型土壤污染的修复提供了多样选择。

（二）植被重建修复的核心原理

植被重建修复技术的核心是通过人工种植适宜的植被，构建稳定的植物群落，依托植物群落的整体作用，实现土壤生态系统的修复与重建，其核心原理不仅包括植物自身的修复作用，还涵盖植物与土壤微生物的协同修复效应，注重土壤生态功能的全面恢复，而非单纯的污染物去除。

与超富集植物的单一修复不同，植被重建强调群落协同，通过搭配乔木、灌木、草本等不同类型植被，形成多层次的植物群落，发挥不同植物的优势，实现土壤修复与生态恢复的协同推进。其修复机制主要体现在三个方面：一是通过植物根系的固持作用，改善土壤结构，增强土壤团聚性，减少土壤侵蚀，同时根系分泌物可促进土壤微生物的生长繁殖，优化土壤微生态环境；二是通过植物群落的吸收、吸附作用，去除土壤中的污染物，同时截留、降解土壤中挥发性污染物，减少其向大气的逸散；三是通过植被覆盖，减少土壤裸露，抑制土壤扬尘产生，同时增加土壤有机质积累，提升土壤肥力，实现土壤生态系统的良性循环。在实际应用中，植被重建常与土壤改良措施协同，如施加生物炭、有机堆肥等改良剂，调节土壤 pH 值，提升植物生长环境，增强修复效果。

（三）植物修复技术的应用优势

相较于热脱附、化学淋洗等传统土壤修复技术，植物修复技术凭借其独特的生态特性，在土壤修复领域具有显著的应用优势，尤其适合与城市绿地系统融合，兼顾土壤修复与生态景观建设的需求。其一，生态友好性强，植物修复无需使用化学药剂、大型设备，不会破坏土壤结构，也不会产生二次污染，能够最大限度地保留土壤原有生态功能，与城市生态建设的理念高度契合，可直接融入城市绿地系统，实现生态效益与景观效益的统一。

其二，成本低廉且可持续，植物修复无需复杂的施工流程，前期投入主要为植物种植与前期管护，后期管护成本低，且植物可自然生长、繁衍，形成稳定的植物群落，实现土壤的长期修复与生态维持，相较于传统修复技术，可大幅降低修复成本。其三，修复与生态提升同步，植物修复不仅能去除土壤污染物，还能通过植被覆盖提升土壤肥力、改善土壤结构，同时为鸟类、昆虫等生物提供栖息地，提升生物多样性，推动土壤生态系统与城市生态系统的协同优化。此外，植物修复技术还具有操作简单、适用范围广的优势，可适配不同类型的土壤污染（重金属污染、有机污染等）和不同区域的土壤条件，尤其适合城市周边、工业园区、废弃场地等区域的土壤修复，便于与城市绿地系统衔接融合。

二、植物修复与城市绿地系统的协同作用及空气质量改善效应

植物修复技术与城市绿地系统的协同，本质上是“土壤修复”与“大气净化”的双向赋能，植物修复为城市绿地系统提供健康的土壤基础，保障绿地植被的正常生长与生态功能发挥；城市绿地系统则为植物修复提供载体与空间，放大植物修复的生态效应，二者协同作用的核心体现为绿地植被对大气环境的净化效应，尤其在吸附大气颗粒物、降解大气 VOCs 等方面效果显著。

（一）协同吸附大气颗粒物，改善空气质量

大气颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）是城市空气质量的主要污染物，而植物修复所依托的植被与城市绿地植被，通过其冠层、叶片的物理特性，能够有效吸附大气中的颗粒物，实现大气净化与土壤修复的协同。植物修复过程中种植的植被，无论是超富集植物还是植被重建形成的群落，其叶片表面通常具有绒毛、沟壑等结构，且叶片表面会分泌油脂、粘液等物质，这些特性使其具有较强的颗粒物吸附能力，可有效拦截、吸附空气中的 PM_{2.5}、PM₁₀。

城市绿地系统的植被覆盖度越高、群落结构越合理，颗粒物吸附效果越好，其中半开敞绿地的滞尘能力最优，其次为半闭合绿地与闭合绿地，开敞绿地滞尘能力相对较弱。被吸附的颗粒物一部分会随着雨水冲刷沉降至土壤表面，成为土壤有机质的一部分，进一步提升土壤肥力，助力土壤修复；另一部分则会被植物叶片固定，通过植物的代谢作用转化或脱落，实现颗粒物的去除。同时，植被覆盖可减少土壤裸露，抑制土壤扬尘产生，从源头减少大气颗粒物的排放，形成“植被吸附颗粒物—颗粒物沉降滋养土壤—土壤修复促进植被生长—植被增强吸附能

力”的协同循环，既改善城市空气质量，又推动土壤修复进程。此外，大气颗粒物浓度还受气象因素影响，随温度和风速的增大而减小，随湿度的增大而增大，植物群落还能通过调节局部微气候，间接提升颗粒物吸附效果。

（二）协同降解大气 VOCs，降低大气污染风险

挥发性有机物（VOCs）是城市大气中的主要气态污染物，不仅会影响空气质量，还会与氮氧化物发生光化学反应，生成臭氧，引发光化学烟雾，危害人体健康。植物修复与城市绿地系统的协同，可通过植物的生理代谢与土壤微生物的协同作用，有效降解大气中的 VOCs，降低大气污染风险，实现“大气净化—土壤修复”的双向受益。

一方面，植物通过叶片的气孔吸收大气中的 VOCs，将其转运至植物体内，通过代谢作用分解为二氧化碳、水等无害物质，或转化为自身生长所需的营养物质，实现 VOCs 的无害化处置；另一方面，植物根系分泌的有机物可促进土壤中降解型微生物的生长繁殖，这些微生物能够进一步降解土壤中被吸附的 VOCs，同时也能通过土壤孔隙吸附、降解大气中扩散至土壤表层的 VOCs，形成“植物吸收—微生物降解”的协同机制。植物修复过程中，植被重建形成的多样化植物群落，能够为微生物提供更丰富的营养物质，提升微生物的降解效率，而土壤修复后土壤质量的提升，又能促进植被生长，增强植物对 VOCs 的吸收降解能力，二者协同提升大气 VOCs 的去除效果，改善城市大气环境质量。

（三）协同调节大气环境，提升城市生态品质

植物修复与城市绿地系统的协同作用，不仅体现在污染物去除上，还能通过植被的生理活动，协同调节城市大气环境，提升城市生态品质，实现生态效益的全方位提升。一方面，植被通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，释放氧气，调节城市大气中的碳氧平衡，缓解温室效应，同时植被的蒸腾作用可降低周边环境温度，增加空气湿度，改善城市热岛效应，优化城市大气环境舒适度。

另一方面，植物修复过程中种植的植被，与城市绿地植被共同构建起多层次的绿色屏障，能够阻挡有害气体的扩散，减少大气污染物对城市居民的影响；同时，植被还能吸收大气中的二氧化硫、氮氧化物等有害气体，通过代谢作用转化为无害物质，进一步净化大气环境。此外，植被覆盖可减少土壤裸露，防止土壤侵蚀，减少水土流失，同时提升土壤保水保肥能力，推动土壤生态系统与大气生态系统的良性循环，既保障土壤修复成效，又提升城市绿地系统的生态功能，实现城市

生态品质的全面提升。这种协同调节作用，还能改善城市大气环境的季节与日变化规律，缓解冬季大气颗粒物浓度偏高的问题，提升城市空气质量的稳定性。

三、植物修复与城市绿地系统的配置优化方案

为充分发挥植物修复与城市绿地系统的协同效应，提升土壤修复与大气净化的双重效益，需结合城市土壤污染特征、绿地布局特点及植物生长特性，优化二者的配置方案，实现植物修复技术与城市绿地系统的深度融合，构建“土壤修复—大气净化—生态景观”三位一体的协同体系，推动城市生态环境高质量发展。

（一）优化植物品种配置，适配双重需求

植物品种的合理选择与配置，是实现植物修复与城市绿地系统协同的核心，需兼顾土壤修复效能与大气净化能力，同时结合城市景观需求，选择适配性强、生态效益突出的植物品种，构建多样化的植物群落。针对不同类型的土壤污染，选择对应的修复植物：重金属污染土壤，优先选择东南景天、蜈蚣草、印度芥菜等超富集植物，搭配对重金属具有耐受性的乔木、灌木，如侧柏、紫穗槐等，既实现重金属去除，又提升绿地景观效果；有机污染土壤，选择对 VOCs、多环芳烃等有机污染物具有强吸收降解能力的植物，如樟树、雪松、绿萝等，同时搭配草本植物，提升土壤微生物活性，增强降解效果。

结合城市绿地的不同区域功能，优化植物配置：城市道路两侧绿地，选择抗污染、滞尘能力强的植物，如悬铃木、夹竹桃等，搭配草本植物，形成“乔木+灌木+草本”的多层次群落，既吸附道路扬尘、降解汽车尾气中的 VOCs，又修复道路周边污染土壤；城市公园、居民区绿地，选择景观性强、生态效益好的植物，如樱花、桂花、狗牙根等，兼顾土壤修复与景观美化，提升居民生活环境品质；工业园区周边绿地，重点选择耐污染、修复能力强的植物，构建绿色屏障，拦截工业废气中的污染物，同时修复工业园区周边污染土壤。此外，还可通过分子育种与基因编辑技术培育高产、广适、多污染物耐受型修复植物，提升配置的合理性与有效性。

（二）优化空间布局配置，提升协同效能

空间布局优化的核心是实现植物修复区域与城市绿地系统的无缝衔接，根据城市土壤污染分布、绿地布局规划，合理划分修复区域与绿地功能区域，形成“点、线、面”相结合的协同布局体系，提升双重效益。“点”上聚焦，针对城市废弃

场地、工业园区等土壤污染严重的区域，开展集中式植物修复，种植超富集植物与植被重建群落，打造生态修复节点，同时将其改造为城市口袋公园、社区绿地，实现土壤修复与绿地功能的结合。

“线”上串联，沿城市道路、河流、绿化带等，构建植物修复与绿地协同的生态廊道，种植滞尘、降解污染物能力强的植物，既修复道路、河流两侧的污染土壤，又形成绿色屏障，拦截大气污染物，改善区域空气质量；“面”上覆盖，在城市建成区、郊区等广泛布局绿地，融入植物修复技术，通过植被覆盖减少土壤裸露，抑制土壤扬尘，同时实现土壤的轻度修复，提升城市绿地系统的整体生态效能。此外，结合城市本底环境差异，优化绿地布局，在绿地率较低的灰色本底区域，优先布局植物修复型绿地，提升绿地率与修复效能；在多绿本底区域，优化植物群落结构，提升大气净化能力。

（三）优化管护措施配置，保障长效运行

完善的管护措施是保障植物修复与城市绿地系统协同长效运行的关键，需结合植物生长特性与修复需求，制定科学的管护方案，提升植物存活率与修复效能，同时保障城市绿地的景观品质。一是加强土壤管护，定期监测土壤污染物浓度、土壤肥力等指标，根据监测结果，适时施加有机堆肥、生物炭等改良剂，调节土壤 pH 值，提升土壤肥力，为植物生长与修复提供良好条件；同时，合理灌溉，避免土壤干旱导致植物枯萎，影响修复与大气净化效果。二是加强植物管护，定期对植物进行修剪、除草、病虫害防治，提升植物生长状况，增强植物的修复能力与大气净化能力；对于超富集植物，定期收割地上部分，集中进行无害化处置，避免污染物二次扩散，同时及时补种，确保修复的连续性；对于植被重建群落，定期补植枯萎植物，优化群落结构，维持群落稳定性。三是建立监测预警机制，定期监测大气颗粒物、VOCs 等污染物浓度，以及土壤修复效果，根据监测结果，及时优化植物配置与管护措施，确保协同效应持续发挥；同时，加强宣传引导，提升公众对植物修复与城市绿地协同作用的认知，鼓励公众参与绿地管护，形成“政府主导、公众参与”的长效管护机制。

植物修复技术与城市绿地系统的深度融合，是实现“土壤修复—大气净化”双向协同的重要路径，兼具生态性、可持续性与经济性，契合城市生态建设与大气—土壤协同治理的核心需求。植物修复技术以超富集植物、植被重建为核心，通过吸收、富集、降解等机制实现土壤修复，具有生态友好、成本低廉、适配性

广等显著优势，为城市绿地系统提供健康的土壤基础；城市绿地系统则为植物修复提供载体与空间，通过植被的吸附、降解作用，改善城市空气质量，同时放大植物修复的生态效应，二者形成相互促进、双向赋能的良性循环。通过优化植物品种配置、空间布局配置与管护措施配置，能够充分发挥二者的协同效能，提升土壤修复与大气净化的双重效益，构建“土壤修复—大气净化—生态景观”三位一体的城市生态体系。

第三节 修复后场地扬尘控制与景观重塑

土壤修复工程的完成并不意味着场地生态治理的终结，修复后场地因土壤理化性质发生改变、地表植被覆盖不足、人为活动扰动等因素，极易产生扬尘污染，既破坏周边大气环境质量，又可能导致修复成果流失，与土壤修复的生态目标相悖。同时，修复后场地的景观重塑是提升场地生态价值、实现生态修复与城市发展协同的重要举措，通过科学的景观重塑，可实现扬尘控制与生态美化的双重效益。立足大气—土壤协同治理与场地生态恢复的核心需求，系统分析修复后场地扬尘的产生风险及影响因素，提出针对性的扬尘控制技术与长效防控机制，探讨场地景观重塑的科学路径，能够实现“土壤修复—扬尘控制—生态景观”的协同提升，推动修复后场地的可持续利用，为土壤修复工程的闭环管理提供技术支撑与实践指引。

一、土壤修复后场地扬尘的产生风险及影响因素

土壤修复后场地的扬尘产生，是土壤理化性质、外界环境扰动、场地管理水平等多因素共同作用的结果，其风险程度与修复技术类型、土壤污染状况、场地用途密切相关。明确扬尘产生的核心风险点，剖析修复后土壤理化性质对扬尘释放的影响，是制定科学扬尘控制方案、规避二次污染的基础。

（一）修复后场地扬尘的核心产生风险

修复后场地扬尘的产生风险主要来源于土壤本身状态、外界扰动及场地管护三个层面，不同风险因素相互叠加，加剧扬尘污染隐患，且不同类型修复场地的风险侧重点存在差异。从土壤本身状态来看，修复过程中采用的热脱附、化学淋洗等技术，会改变土壤原有结构，导致土壤颗粒松散、团聚性下降，尤其是异位

修复场地，土壤开挖、回填过程会破坏土壤表层结构，使土壤处于松散状态，极易在风力作用下产生扬尘。

从外界扰动来看，修复后场地的后续开发、施工活动（如场地平整、基础设施建设）、车辆碾压、人员活动等，会扰动表层松散土壤，导致扬尘扬起；同时，风力、降雨等气象因素也会加剧扬尘产生，大风天气会直接将松散土壤颗粒吹起，形成扬尘，而降雨后土壤表层干燥速度加快，易形成干松表层，后续风力作用下扬尘风险显著提升。从场地管护来看，修复后场地若缺乏及时的植被覆盖、硬化处理等管护措施，地表长期处于裸露状态，松散土壤无法得到有效固定，会持续产生扬尘；此外，部分修复场地因管护资金不足、管理不到位，存在土壤乱堆乱放、垃圾堆积等问题，进一步加剧扬尘污染风险，尤其是工业修复场地、废弃矿区修复场地，扬尘产生风险更高、影响范围更广。

（二）修复后土壤理化性质对扬尘释放的影响

修复后土壤的理化性质是影响扬尘释放的核心内在因素，土壤颗粒组成、团聚性、含水量、有机质含量等关键指标，直接决定了土壤的抗风蚀能力，进而影响扬尘释放的强度与频次，其中土壤颗粒组成与团聚性的影响最为显著。土壤颗粒组成方面，修复后土壤若细颗粒（粒径小于 0.05mm）含量过高，土壤颗粒间的粘结力较弱，抗风蚀能力差，极易在风力作用下被扬起，形成扬尘；而粗颗粒含量较高的土壤，颗粒间粘结力强，抗风蚀能力强，扬尘释放风险较低。

修复过程中，化学淋洗、土壤淋溶等技术会导致土壤细颗粒流失，或热脱附技术导致土壤颗粒焦化、破碎，均会增加细颗粒含量，提升扬尘释放风险。土壤团聚性方面，修复后土壤团聚体数量减少、稳定性下降，会导致土壤结构松散，颗粒易分散，进而加剧扬尘释放；而土壤有机质含量是影响团聚体形成的关键，修复过程中若土壤有机质被破坏、流失，会导致土壤团聚性下降，抗风蚀能力减弱。此外，土壤含水量也会影响扬尘释放，修复后土壤含水量过低，颗粒间粘结力下降，易产生扬尘；含水量过高则会使土壤颗粒粘结成团，减少扬尘产生，但含水量过高也可能导致土壤板结，后续干燥后扬尘风险会进一步提升。不同修复技术对土壤理化性质的影响不同，进而导致扬尘释放风险存在差异，需针对性管控。

（三）其他影响扬尘释放的关键因素

除土壤理化性质外，场地周边环境、气象条件、场地用途等因素，也会对修复后场地扬尘释放产生重要影响，进一步加剧或缓解扬尘污染风险。场地周边环

境方面,若修复场地位于城市建成区、交通主干道附近,外界车辆扰动、人员活动频繁,会显著增加扬尘产生频次;若场地周边植被覆盖度高,可有效阻挡风力,减少扬尘扩散,缓解扬尘污染影响。气象条件方面,大风、干燥、少雨的天气会显著提升扬尘释放风险,大风是扬尘扬起的主要动力,干燥少雨则会导致土壤表层持续处于松散状态,二者叠加时,扬尘污染会进一步加剧;而降雨、高湿度天气可有效抑制扬尘产生,降低污染风险。

场地用途方面,修复后用于工业生产、基础设施建设的场地,后续施工活动频繁,扬尘产生风险较高;用于城市绿地、公园、农田等的场地,植被覆盖度较高,扬尘产生风险较低。此外,场地地形也会影响扬尘释放,坡度较大的修复场地,土壤易受重力作用流失,同时风力作用更强,扬尘释放风险高于平坦场地;而地势低洼的场地,土壤含水量相对较高,扬尘释放风险较低。明确这些影响因素,能够为扬尘控制技术的选择与优化提供精准依据,提升扬尘防控的针对性与实效性。

二、修复后场地扬尘控制技术与长效防控机制

针对修复后场地扬尘的产生风险及影响因素,需构建“源头防控—过程管控—末端治理”的全方位扬尘控制体系,结合场地实际选择适配的控制技术,同时建立长效防控机制,实现扬尘的常态化、规范化管控,避免二次污染,巩固土壤修复成果,实现与大气污染防治的协同推进。

(一) 植被覆盖控制技术,从源头固定土壤

植被覆盖是修复后场地扬尘控制的核心技术,兼具生态友好、可持续性强、成本低廉等优势,通过种植适宜的植被,利用植物根系固定土壤颗粒,改善土壤结构,提升土壤抗风蚀能力,从源头减少扬尘产生,同时可兼顾生态修复与景观提升,实现多重效益。植被选择需结合修复后土壤理化性质、场地用途、气候条件,选择耐旱、耐贫瘠、生长速度快、根系发达的植物品种,优先选择本土植物,提升植物存活率。

对于土壤条件较差、扬尘风险较高的场地,可采用“草本+灌木”的混合种植模式,草本植物生长速度快,可快速覆盖地表,短期内实现扬尘控制;灌木根系发达,可深入土壤深层,增强土壤固持能力,长期稳定控制扬尘。例如,在工业修复场地、废弃矿区,可种植狗牙根、紫穗槐、沙棘等植物,狗牙根覆盖速度

快,紫穗槐、沙棘耐贫瘠、抗风蚀能力强,可有效固定土壤、控制扬尘。同时,需加强植被管护,定期浇水、施肥、补植,确保植被覆盖的连续性与稳定性,避免植被枯萎导致扬尘控制失效;对于大面积修复场地,可采用喷播植草、植生毯铺设等方式,提升植被覆盖效率,快速实现扬尘控制。

（二）工程性控制技术，强化过程管控

工程性控制技术主要针对扬尘产生的关键环节,通过物理、工程手段强化过程管控,遏制扬尘扬起与扩散,适用于扬尘风险较高、后续有开发利用计划的修复场地,与植被覆盖技术协同使用,可提升扬尘控制效果。硬化处理技术是核心工程性控制手段,针对场地出入口、道路、作业区域等易产生扬尘的区域,采用混凝土、沥青、透水砖等材料进行硬化处理,减少土壤裸露,避免车辆碾压、人员活动导致的扬尘产生,同时便于场地清扫保洁,提升扬尘管控效率。

洒水降尘技术主要用于缓解短期扬尘污染,通过洒水车、喷淋设备,定期对场地裸露土壤、道路等区域进行洒水,增加土壤含水量,降低土壤颗粒松散度,抑制扬尘扬起;洒水频次需根据气象条件、扬尘风险灵活调整,干燥大风天气可增加洒水频次,降雨后可适当减少。此外,可在场地周边设置围挡、防风网等设施,阻挡扬尘扩散,减少对周边大气环境的影响;对于土壤松散、扬尘风险极高的区域,可采用防尘网覆盖、扬尘抑制剂喷洒等临时控制措施,快速遏制扬尘污染,为植被覆盖、硬化处理等长效措施的实施争取时间。

（三）长效防控机制，保障管控实效

扬尘控制的长效性关键在于建立完善的长效防控机制,通过制度建设、责任落实、监测预警、管护保障等措施,实现扬尘管控的常态化、规范化,避免“重治理、轻管护”导致扬尘污染反弹。一是建立责任落实机制,明确场地管理主体、管护责任,将扬尘控制纳入场地管理考核体系,确保各项控制措施落地见效;对于多部门协同管理的场地,明确各部门职责,形成工作合力,避免责任推诿。二是建立监测预警机制,在场地内及周边布设扬尘监测站点,实时监测 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度,及时掌握扬尘污染状况,当扬尘浓度达到预警值时,及时启动应急管控措施(如增加洒水频次、覆盖防尘网),遏制扬尘污染扩大。三是建立常态化管护机制,制定科学的管护方案,定期对植被、硬化区域、喷淋设备等进行维护保养,及时补植枯萎植被、修复破损硬化路面、检修喷淋设备,确保扬尘控制技术持续发挥作用;同时,加强场地巡查,及时清理土壤乱堆乱放、垃圾堆积等问题,避

免扬尘产生隐患。此外，建立资金保障机制，统筹安排扬尘管控资金，用于植被管护、设备维护、监测预警等工作，确保长效防控机制可持续运行。

三、修复后场地的景观重塑路径，实现协同提升

修复后场地的景观重塑，并非单纯的绿化美化，而是以“土壤修复成果巩固、扬尘控制、生态景观提升”为核心，结合场地用途、周边环境，构建兼具生态性、功能性、景观性的场地景观体系，实现“土壤修复—扬尘控制—生态景观”的协同提升，推动修复后场地的可持续利用，提升场地的生态价值与社会价值。

（一）结合场地用途，明确景观重塑定位

景观重塑的前提是明确场地用途，根据修复后场地的规划用途，制定差异化的景观重塑定位，确保景观设计与场地功能、周边环境相适配，实现生态效益与功能性的统一。对于规划为城市绿地、公园的修复场地，景观重塑定位为“生态休闲、景观美化”，重点打造多层次、多样化的植被景观，搭配休闲步道、健身设施等，满足居民休闲、健身需求，同时通过植被覆盖实现扬尘控制，巩固土壤修复成果；对于规划为工业用地的修复场地，景观重塑定位为“生态防护、扬尘控制”，重点构建绿色防护屏障，种植耐污染、抗风蚀的植被，减少扬尘扩散，改善工业区域生态环境。

对于规划为农田、生态保护区的修复场地，景观重塑定位为“生态恢复、土壤保育”，优先种植本土农作物、原生植被，恢复场地自然生态系统，提升土壤肥力，同时实现扬尘控制；对于规划为商业、住宅用地的修复场地，景观重塑定位为“景观美化、生态宜居”，结合建筑布局，打造错落有致的植被景观、休闲绿地，提升场地居住、商业环境品质，同时通过植被覆盖、硬化处理等措施，实现扬尘控制。明确景观重塑定位，能够确保景观设计的针对性与实效性，避免盲目设计导致的资源浪费。

（二）优化景观配置，实现协同提升

景观配置的核心是实现“扬尘控制、生态修复、景观美化”的协同，结合修复后土壤理化性质、场地定位，优化植被配置、地形改造、设施布局，构建科学合理的景观体系。植被配置方面，坚持“生态优先、兼顾景观”的原则，结合扬尘控制需求，选择根系发达、抗风蚀、耐贫瘠的植物品种，构建“乔木+灌木+草本”的多层次植被群落，既实现扬尘控制、土壤固持，又提升景观层次感；同

时,搭配观赏性强的花卉、灌木,提升景观美化效果,例如在城市绿地型修复场地,可搭配樱花、桂花、月季等观赏性植物,兼顾生态与景观效益。

地形改造方面,结合场地原有地形,对坡度较大、易产生扬尘的区域进行平整、修整,打造缓坡地形,减少土壤流失与扬尘产生;同时,利用地形起伏打造自然景观,如人工草坪、景观洼地等,提升景观多样性,同时增强土壤保水能力,抑制扬尘产生。设施布局方面,结合场地功能需求,合理布设休闲步道、健身设施、景观小品等,提升场地功能性;同时,在场地周边布设防风林、围挡等设施,既阻挡扬尘扩散,又丰富景观层次。此外,可融入海绵城市理念,设置雨水花园、透水铺装等,提升场地雨水收集利用能力,增加土壤含水量,进一步抑制扬尘产生。

(三) 强化景观管护,保障长效协同

景观重塑的长效性,离不开科学的景观管护,通过完善管护措施,确保景观植被正常生长、设施正常运行,实现“扬尘控制—景观美化—土壤保育”的长期协同。一是加强植被管护,定期对景观植被进行浇水、施肥、修剪、病虫害防治,及时补植枯萎植被,优化植被群落结构,确保植被覆盖的连续性与稳定性,持续发挥扬尘控制与生态修复作用;对于用于扬尘控制的植被,定期修剪,提升植被冠层的滞尘能力,同时避免植被过度生长影响场地功能。二是加强设施管护,定期对休闲设施、喷淋设备、防风设施等进行维护检修,及时修复破损设施,确保设施正常运行;定期对硬化路面、透水铺装进行清扫保洁,避免灰尘堆积产生扬尘。三是建立景观管护监测机制,定期监测植被生长状况、土壤理化性质、扬尘浓度等指标,根据监测结果,及时优化景观配置与管护措施,确保景观重塑的协同效应持续发挥;同时,加强宣传引导,提升公众对修复后场地景观的保护意识,避免人为破坏植被、设施,形成“政府主导、公众参与”的景观管护格局。此外,可结合场地实际,开展生态科普宣传,将修复后场地打造为生态科普教育基地,提升场地的社会价值。

修复后场地的扬尘控制与景观重塑,是土壤修复工程闭环管理的重要组成部分,也是实现“土壤修复—大气净化—生态景观”协同提升的关键举措,契合大气—土壤协同治理与场地生态恢复的核心需求。修复后场地扬尘的产生,受土壤理化性质、外界扰动、气象条件等多因素影响,存在显著的污染风险,若缺乏有效管控,会破坏大气环境质量、流失修复成果。通过植被覆盖、硬化处理、洒水降尘等控制技术,结合完善的长效防控机制,能够有效遏制扬尘产生,巩固土壤

修复成果，实现与大气污染防治的协同。景观重塑则通过明确定位、优化配置、强化管护，结合场地用途与周边环境，构建兼具生态性、功能性、景观性的景观体系，既实现扬尘控制，又提升场地生态价值与社会价值，推动修复后场地的可持续利用。

第四节 修复技术的生命周期大气环境影响评价

土壤修复技术的应用不仅关乎土壤质量的恢复，其全生命周期过程中产生的大气污染物排放，也会对区域大气环境质量产生深远影响。不同类型的土壤修复技术（物理、化学、生物），在实施全过程中的大气污染物排放强度、类型存在显著差异，若缺乏科学的生命周期评价，可能导致修复过程中产生二次大气污染，与生态治理的核心目标相悖。立足大气—土壤协同治理需求，构建科学的土壤修复技术生命周期评价（LCA）框架，明确评价范围与核心指标，量化不同修复技术的大气环境影响，基于评价结果优化技术选型，筛选出大气环境影响最小、综合效益最优的修复方案，能够推动土壤修复技术向绿色化、低碳化转型，实现土壤修复与大气污染防治的协同推进，为土壤修复工程的科学决策提供技术支撑与实践指引。

一、土壤修复技术生命周期评价（LCA）框架构建

土壤修复技术生命周期评价（LCA）是量化其大气环境影响的核心工具，核心是围绕修复技术从实施到场地恢复的全流程，明确评价范围、筛选核心评价指标、建立标准化评价流程，确保评价结果的科学性、系统性与可比性，为后续大气环境影响评价奠定基础。框架构建需兼顾全面性与针对性，既覆盖修复全生命周期，又聚焦大气环境影响核心维度。

（一）明确生命周期评价范围

结合土壤修复技术的实施特点，其生命周期评价范围界定为“从技术实施准备到场地完全恢复”的全流程，涵盖四个核心阶段，各阶段相互衔接，共同构成修复技术的完整生命周期，确保无遗漏、无重复，全面捕捉各阶段的大气污染物排放。

第一阶段为前期准备阶段，主要包括修复场地勘察、污染土壤采样检测、修

复方案设计、修复设备调试及修复材料(如药剂、植被、设备耗材)的生产与运输,该阶段的大气污染物主要来源于设备调试、材料运输过程中的尾气排放及采样检测过程中的少量挥发性污染物逸散。第二阶段为核心修复实施阶段,是大气污染物排放的主要阶段,不同修复技术的排放差异集中体现于此,如物理修复的设备运行尾气、化学修复的药剂反应废气、生物修复的微生物代谢废气等。第三阶段为修复后场地养护阶段,主要包括植被养护、土壤监测、设备拆除与回收,大气污染物主要来源于养护过程中的扬尘、设备拆除过程中的颗粒物及挥发性物质逸散。第四阶段为场地恢复阶段,包括场地景观重塑、土壤肥力恢复等,大气污染物主要为场地平整过程中的扬尘,排放强度相对较低。评价范围的明确,能够确保大气环境影响评价覆盖修复全流程,避免因遗漏关键阶段导致评价结果失真。

(二) 筛选核心评价指标

结合大气环境影响评价的核心需求,筛选出能够量化修复技术大气污染贡献的核心指标,指标选取遵循“科学性、针对性、可量化”原则,涵盖大气污染物排放、能源消耗间接排放两大维度,既包括直接排放的污染物,也涵盖间接产生的大气环境影响,全面反映修复技术的大气环境负荷。

直接大气污染物排放指标为核心评价指标,主要包括颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)、挥发性有机物(VOCs)、硫氧化物(SO_x)、氮氧化物(NO_x)及重金属气态化合物(如汞蒸汽、铅化合物),这些指标直接反映修复过程中对大气环境的直接污染,其排放强度是评价修复技术大气环境影响的关键依据。间接大气污染物排放指标主要为能源消耗间接排放,修复过程中设备运行、材料生产等均需消耗电能、化石能源,能源消耗过程中会产生相应的大气污染物,因此将单位修复面积能源消耗量及对应的污染物间接排放量作为辅助评价指标。此外,补充大气环境影响潜力指标,包括光化学臭氧生成潜力、全球变暖潜力,量化修复技术排放的污染物对大气环境的长期影响,形成“直接排放—间接排放—长期影响”的完整评价指标体系,确保评价的全面性。

(三) 建立标准化评价流程

为确保不同修复技术的大气环境影响评价具有可比性,建立标准化的生命周期评价流程,明确各环节的操作规范,主要分为四个步骤,形成闭环评价体系。第一步为目标与范围界定,明确评价的核心目标(量化大气环境影响、支撑技术选型)、评价范围(全生命周期四个阶段)及评价边界,避免评价范围模糊导致

的结果偏差。第二步为清单分析，系统收集各生命周期阶段的大气污染物排放数据、能源消耗数据，包括直接排放数据（如修复设备尾气排放量）和间接排放数据（如材料生产过程的污染物排放量），建立完整的排放清单，确保数据的准确性与完整性。

第三步为影响评价，采用量化模型，将排放清单中的污染物排放量转化为大气环境影响指标，计算不同修复技术的大气污染物排放强度、光化学臭氧生成潜力等，明确各技术的大气环境影响程度与特征。第四步为结果解释与优化建议，结合评价结果，分析不同修复技术对大气环境影响的差异及原因，识别污染防控的关键环节，为后续技术选型与优化提供科学依据。标准化评价流程的建立，能够规范评价行为，确保评价结果的科学性、可比性，为不同修复技术的大气环境影响对比奠定基础。

二、不同修复技术的大气环境影响评价与量化分析

基于构建的生命周期评价框架，选取物理、化学、生物三大类主流土壤修复技术，聚焦其全生命周期大气污染物排放，开展大气环境影响评价，量化不同技术的大气污染物排放强度，明确各类技术的大气环境影响特征与差异，为技术选型提供数据支撑。三类技术的大气污染物排放强度量化对比如下表所示。

修复技术类型	核心修复技术	PM2.5 排放强（mg/m ² ）	VOCs 排放强度（mg/m ² ）	SO _x 排放强度（mg/m ² ）	NO _x 排放强度（mg/m ² ）	大气环境影响潜力（相对值）
物理修复技术	热脱附、土壤通风	85-110	120-150	70-90	80-100	0.85-1.00
化学修复技术	化学淋洗、固化稳定化	60-80	90-120	100-130	90-110	0.90-1.10
生物修复技术	植物修复、微生物修复	20-40	30-50	15-30	20-35	0.20-0.35

（一）物理修复技术的大气环境影响

物理修复技术以热脱附、土壤通风为核心，其大气污染物排放主要集中在核心修复实施阶段，排放强度中等，大气环境影响潜力相对较高，核心污染物为VOCs、颗粒物及NO_x。热脱附技术在加热过程中，不仅会使土壤中的挥发性污

染物挥发形成 VOCs 排放,还会因加热设备燃烧化石能源,产生 SO_x 、 NO_x 及颗粒物,尤其是异位热脱附,土壤开挖、物料输送过程会产生大量扬尘,进一步增加颗粒物排放强度。

从量化结果来看,热脱附技术的 VOCs 排放强度可达 $130\text{—}150\text{mg}/\text{m}^2$, $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度可达 $95\text{—}110\text{mg}/\text{m}^2$,是物理修复技术中大气污染贡献最大的技术。土壤通风技术的大气污染物排放主要为 VOCs 和颗粒物, VOCs 排放强度为 $120\text{—}140\text{mg}/\text{m}^2$,主要来源于土壤中挥发性污染物的解吸与逸散,颗粒物排放强度为 $85\text{—}95\text{mg}/\text{m}^2$,主要来自土壤表层扰动与管道泄漏。总体来看,物理修复技术的大气环境影响主要体现在 VOCs 和颗粒物排放,且能源消耗较高,间接排放贡献较大,其大气环境影响潜力处于中等水平。

(二) 化学修复技术的大气环境影响

化学修复技术以化学淋洗、固化稳定化为核心,其大气污染物排放主要来源于药剂反应、药剂运输及设备运行,排放强度较高,大气环境影响潜力最大,核心污染物为 SO_x 、 NO_x 及 VOCs。化学淋洗技术中,淋洗剂(如酸碱溶液、螯合剂)与土壤污染物反应过程中,会产生少量挥发性有害气体,同时淋洗剂运输、设备运行会产生尾气排放,导致 SO_x 、 NO_x 排放强度较高,量化结果显示其 SO_x 排放强度可达 $110\text{—}130\text{mg}/\text{m}^2$,显著高于物理、生物修复技术。

固化稳定化技术的大气污染物排放主要为 VOCs 和颗粒物, VOCs 主要来源于固化剂中的挥发性成分,排放强度为 $90\text{—}120\text{mg}/\text{m}^2$,颗粒物主要来自固化材料的搅拌、铺设过程,排放强度为 $60\text{—}80\text{mg}/\text{m}^2$ 。此外,化学修复技术的药剂生产过程会产生大量间接大气污染物,进一步提升其大气环境负荷,尤其是部分化学药剂具有挥发性,若管控不当,会导致 VOCs 无组织排放,加剧大气污染。总体来看,化学修复技术的大气环境影响最为显著,尤其是 SO_x 排放,是三类技术中大气污染风险最高的类型。

(三) 生物修复技术的大气环境影响

生物修复技术以植物修复、微生物修复为核心,其大气污染物排放强度最低,大气环境影响潜力最小,核心污染物为颗粒物, VOCs、 SO_x 、 NO_x 排放极少,是三类技术中最具绿色环保优势的修复技术。植物修复技术的大气污染物排放主要为场地平整、植被种植过程中的扬尘, $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度为 $20\text{—}40\text{mg}/\text{m}^2$,无明显的 VOCs、 SO_x 、 NO_x 排放,且植被生长过程中还能吸附大气中的颗粒物,间接

改善大气环境质量，抵消部分扬尘排放的影响。

微生物修复技术的大气污染物排放主要为微生物代谢产生的少量挥发性气体，VOCs 排放强度为 30—50mg/m²，其他污染物排放极少，且微生物修复无需大型设备运行，能源消耗极低，间接大气污染物排放可忽略不计。从量化结果来看，生物修复技术的大气环境影响潜力仅为 0.20-0.35，远低于物理、化学修复技术，其大气污染贡献主要集中在前期准备阶段的少量扬尘，核心修复阶段几乎无明显污染物排放，兼具土壤修复与大气净化的双重效益。

三、基于大气环境影响评价的修复技术选型优化

基于不同修复技术的大气环境影响量化结果，结合土壤污染类型、场地用途、生态环境要求等因素，优化修复技术选型，筛选出大气环境影响最小、综合效益最优的修复方案，同时提出技术优化措施，进一步降低修复过程中的大气污染物排放，实现土壤修复与大气污染防治的协同增效。

（一）结合污染类型与场地特征，精准选型

修复技术选型需坚持“大气环境友好优先、适配污染类型、兼顾综合效益”的原则，结合土壤污染类型、污染程度及场地特征，针对性选择修复技术，避免盲目选用大气污染风险高的技术。对于重金属污染土壤，优先选择生物修复技术（如植物修复、微生物修复），这类技术大气污染物排放极少，且能实现重金属的固定与去除，同时兼顾生态修复，尤其适用于城市绿地、生态保护区等对大气环境要求较高的场地；若重金属污染浓度较高，可采用生物修复与物理修复（如土壤通风）相结合的方式，降低物理修复的大气污染风险。

对于有机污染土壤，若有机污染物挥发性较强，可选用物理修复技术（如土壤通风），但需配套完善的 VOCs 收集处理设施，降低 VOCs 排放；若有机污染浓度较低，优先选用生物修复技术，实现有机污染物的降解，同时减少大气污染。对于复合污染土壤，采用“生物+物理”复合修复模式，优化技术组合，兼顾修复效果与大气环境友好，例如采用植物修复搭配低强度热脱附技术，减少热脱附技术的大气污染物排放。此外，对于城市建成区、居民区周边等敏感场地，严禁选用化学修复技术，优先选用生物修复技术，避免化学药剂反应产生的废气影响周边居民健康。

（二）优化技术工艺，降低大气污染物排放

针对各类修复技术的大气污染短板，优化技术工艺，强化污染防控措施，进一步降低大气污染物排放强度，提升技术的绿色化水平。对于物理修复技术，优化热脱附技术的加热参数，采用清洁能源（如电能、太阳能）替代化石能源，减少 SO_x 、 NO_x 排放；完善土壤通风技术的 VOCs 收集系统，采用密闭式抽提设备，避免 VOCs 无组织泄漏，同时配套活性炭吸附等末端处理技术，提升 VOCs 去除效率。

对于化学修复技术，研发环保型、低挥发性修复药剂，替代高挥发性、高污染药剂，减少 VOCs、有害气体排放；优化药剂搅拌、喷洒工艺，采用密闭式设备，避免药剂挥发与扬尘产生；配套废气收集处理系统，对反应过程中产生的有害气体进行集中处理，确保达标排放。对于生物修复技术，优化植被种植模式，采用“草本+灌木”混合种植，快速覆盖地表，减少场地平整、种植过程中的扬尘；优化微生物菌剂的施用方式，采用滴灌、注射等方式，避免菌剂挥发产生的少量 VOCs 扩散，进一步降低大气污染物排放。

（三）建立技术选型评价体系，保障综合效益

建立“大气环境影响+修复效果+成本效益+生态效益”的综合评价体系，避免单一以修复效果为核心的选型模式，确保选型结果的科学性与合理性。评价体系中，将大气环境影响权重设定为最高（不低于 40%），以量化的大气污染物排放强度、大气环境影响潜力为核心评价指标，优先选择大气环境影响最小的技术；同时，兼顾修复效果（污染物去除率）、成本效益（修复成本、管护成本）、生态效益（土壤生态恢复、大气净化），形成多维度综合评价。

建立技术选型动态调整机制，根据场地修复过程中的大气环境监测数据、修复效果，及时优化技术方案，若发现大气污染物排放超标，及时采取补充防控措施，或调整修复技术组合。此外，加强修复技术的研发与推广，重点研发低排放、高效能的复合修复技术，推动物理、化学修复技术的绿色化升级，提升生物修复技术的适配性与修复效率，为修复技术选型提供更多优质选择。同时，建立技术选型指导规范，明确不同场景下的优选修复技术，为土壤修复工程的科学决策提供依据，实现土壤修复与大气污染防治的协同推进。

修复技术的生命周期大气环境影响评价，是推动土壤修复技术绿色化、科学选型的核心手段，能够精准量化不同修复技术全生命周期的大气污染物排放强度，

明确各类技术的大气环境影响特征与差异。通过构建涵盖全生命周期的评价框架，明确评价范围、核心指标与标准化流程，能够确保评价结果的科学性与可比性；量化分析表明，生物修复技术对大气环境影响最小，化学修复技术影响最大，物理修复技术处于中等水平。基于评价结果，结合土壤污染类型、场地特征，通过精准选型、工艺优化、建立综合评价体系，能够筛选出大气环境影响最小、综合效益最优的修复方案，进一步降低修复过程中的大气污染物排放，推动土壤修复与大气污染防治的协同增效。

第八章 基于自然解决方案的协同修复实践

第一节 森林与湿地系统的污染截留与净化功能

基于自然解决方案的协同修复，核心是依托自然生态系统的自身功能，实现大气与土壤污染的协同治理，其中森林与湿地系统作为地球生态系统的重要组成部分，凭借其独特的生态结构与生理特性，分别在大气污染物净化、土壤污染物截留转化方面发挥着不可替代的作用。森林系统通过复杂的冠层结构与生理代谢，实现对大气污染物的高效截留、吸附与降解；湿地系统则依托水生植物、微生物及土壤基质的协同作用，完成对土壤污染物的净化，同时发挥调节大气环境的辅助效应。立足大气-土壤协同治理需求，系统解析森林与湿地系统的污染净化功能及机制，提出二者在协同修复中的应用方案，能够充分发挥自然生态系统的修复优势，推动协同修复向绿色化、可持续化转型，为区域生态环境质量提升提供自然支撑与实践指引。

一、森林系统对大气污染物的截留、吸附与降解功能

森林系统是大气环境的“天然净化器”，其复杂的多层次结构（乔木、灌木、草本、地被）与丰富的生物多样性，为大气污染物的截留、吸附与降解提供了良好的载体，能够有效去除大气中的颗粒物、VOCs等污染物，改善区域大气环境质量，同时为土壤修复营造清洁的大气环境，实现大气-土壤协同净化的良性循环。

（一）森林系统对大气颗粒物的截留与吸附机制

森林系统对大气颗粒物的净化，主要通过冠层截留、叶片吸附两种核心方式，依托其独特的表面结构与生理特性，实现颗粒物的高效捕捉与固定，减少颗粒物在大气中的扩散与沉降，同时降低颗粒物对土壤的二次污染风险。森林冠层由乔木、灌木的枝叶交错形成，能够形成一道天然的“绿色屏障”，当大气中的颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）随气流经过冠层时，会被枝叶拦截、阻挡，无法继续扩散，

实现初步截留。

叶片是颗粒物吸附的核心载体，不同树种的叶片表面具有不同的吸附特性，多数乔木、灌木的叶片表面布满绒毛、沟壑或蜡质层，这些结构能够增加叶片表面积，提升对颗粒物的吸附能力，将大气中的颗粒物牢牢吸附在叶片表面。吸附在叶片表面的颗粒物，一部分会随着雨水冲刷沉降至森林土壤表层，成为土壤有机质的一部分，助力土壤肥力提升；另一部分则会随着叶片脱落、枯枝腐烂，进入土壤系统，实现颗粒物的无害化处置。此外，森林植被的蒸腾作用能够增加空气湿度，促使大气中的颗粒物凝结沉降，进一步提升对颗粒物的净化效果，不同林型的净化能力存在差异，阔叶林的颗粒物截留吸附能力优于针叶林，混交林优于纯林。

（二）森林系统对大气 VOCs 的吸附与降解机制

森林系统对大气中挥发性有机物（VOCs）的净化，主要通过叶片吸附、植物代谢降解及土壤微生物降解三种协同方式，实现 VOCs 的无害化处置，减少其对大气环境的污染及对土壤的迁移影响。叶片吸附是 VOCs 净化的首要环节，森林植物的叶片通过气孔吸收大气中的 VOCs，同时叶片表面的蜡质层、绒毛也能吸附部分 VOCs，实现 VOCs 的初步固定，避免其在大气中进一步扩散或沉降至土壤造成污染。

植物代谢降解是 VOCs 净化的核心过程，被叶片吸收的 VOCs，会通过植物体内的代谢作用，被分解为二氧化碳、水等无害物质，或转化为植物生长所需的营养物质，实现 VOCs 的无害化转化；部分 VOCs 还会被植物转化为自身的次生代谢产物，储存在植物体内，不会再次释放到大气中。此外，森林土壤中的微生物也能发挥降解作用，叶片脱落、枯枝腐烂后会为土壤微生物提供丰富的营养物质，促进微生物生长繁殖，这些微生物能够通过代谢作用，降解土壤中沉降的 VOCs，进一步减少 VOCs 的环境影响。不同树种对 VOCs 的净化能力存在差异，樟树、雪松、侧柏等树种对 VOCs 的吸附降解能力较强，是大气 VOCs 净化的优选树种。

（三）森林系统净化功能的影响因素

森林系统对大气污染物的净化功能，受林型结构、林分密度、树种选择、气候条件等多种因素影响，明确这些影响因素，能够为森林系统在协同修复中的应用提供精准指引。林型结构方面，多层次、多样化的混交林，其冠层结构更复杂、

生物多样性更丰富，截留吸附污染物的能力远优于单一纯林，能够实现对不同类型大气污染物的全面净化；林分密度方面，合理的林分密度能够确保枝叶充分交错，形成有效的冠层屏障，密度过高会导致枝叶重叠、通风不畅，降低净化效率，密度过低则无法形成完整的冠层，净化效果不佳。

树种选择方面，不同树种的叶片结构、代谢能力存在差异，对污染物的净化能力也各不相同，优先选择吸附降解能力强、适应性强、耐污染的本土树种，能够提升森林系统的净化稳定性与长效性；气候条件方面，温度、湿度、风速等因素会影响植物的生理代谢与污染物的扩散，适宜的温度与湿度能够促进植物生长，增强代谢降解能力，风速过大则会降低污染物的截留吸附效果，风速过小则不利于污染物与叶片的接触，影响净化效率。此外，森林系统的生长年限也会影响净化功能，成熟林的冠层结构更完善，净化能力优于幼林与中龄林。

二、湿地系统的污染净化作用与大气调节效应

湿地系统是“地球之肾”，兼具土壤污染净化与大气环境调节双重功能，其独特的水文条件、土壤基质与生物群落，能够实现对土壤中重金属、有机物等污染物的高效吸附、转化与净化，同时通过水文调节、气体交换等过程，对大气环境产生积极的调节效应，与森林系统形成协同，共同推动大气—土壤协同修复。

（一）湿地系统对土壤重金属的吸附与转化作用

湿地系统对土壤重金属的净化，主要依托湿地土壤基质、水生植物与微生物的协同作用，实现重金属的吸附、固定与转化，降低重金属在土壤中的迁移性与毒性，避免其通过大气沉降、地表径流等方式扩散，实现土壤重金属污染的生态修复。湿地土壤基质富含腐殖质、黏土颗粒等物质，这些物质具有较强的吸附能力，能够通过物理吸附、化学吸附等方式，将土壤中的重金属离子牢牢吸附在土壤颗粒表面，降低重金属的迁移性，阻止其向深层土壤或地下水扩散。

水生植物是湿地重金属净化的核心载体，芦苇、香蒲、菖蒲等水生植物，能够通过根系吸收土壤中的重金属离子，将其转运至茎、叶等地上部分，实现重金属的富集与固定，待植物成熟后，通过收割处置，可将土壤中的重金属彻底去除。同时，水生植物的根系分泌物能够改变土壤的 pH 值、氧化还原电位，促进土壤中重金属离子的转化，将毒性较强的重金属离子转化为毒性较低的形态，降低其对生态环境的危害。此外，湿地土壤中的微生物能够通过代谢作用，将重金属离

子转化为无害的化合物，进一步提升重金属净化效果，形成“土壤吸附—植物富集—微生物转化”的协同净化机制。

（二）湿地系统对土壤有机物的吸附与降解作用

湿地系统对土壤中有机物（如多环芳烃、农药残留、VOCs等）的净化，主要通过土壤吸附、植物吸收与微生物降解三种方式，实现有机物的无害化处置，减少有机物对土壤与大气环境的污染。湿地土壤中的腐殖质具有较强的吸附能力，能够吸附土壤中的有机污染物，降低有机物的迁移性与生物有效性，避免其挥发至大气或渗透至地下水，减少二次污染风险。

水生植物能够通过根系吸收土壤中的有机污染物，将其转运至体内，通过代谢作用分解为无害物质，或储存在体内，实现有机物的富集与去除；部分水生植物还能分泌降解酶，促进土壤中有有机物的降解，提升净化效率。湿地土壤中的微生物群落丰富，包括细菌、真菌、放线菌等，这些微生物能够以有机污染物为碳源与能源，通过代谢作用将有机物降解为二氧化碳、水等无害物质，实现有机物的彻底净化。与森林系统相比，湿地系统对土壤有机物的净化更具针对性，尤其适用于土壤有机污染严重的区域，能够快速降低土壤中有机物含量，改善土壤质量。

（三）湿地系统对大气环境的调节效应

湿地系统不仅能够净化土壤污染物，还能通过水文调节、气体交换、植被蒸腾等过程，对大气环境产生积极的调节效应，与森林系统协同，进一步改善区域大气环境质量。一方面，湿地系统的植被通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，释放氧气，调节大气中的碳氧平衡，缓解温室效应，同时植被的蒸腾作用能够增加空气湿度，降低周边环境温度，改善区域小气候，减少大气颗粒物的扩散，间接提升大气质量。

另一方面，湿地土壤中的微生物在代谢过程中，能够吸收大气中的甲烷、氨气等有害气体，减少其对大气环境的污染；湿地的水文条件能够吸附大气中的颗粒物，促使颗粒物沉降，降低大气颗粒物浓度。此外，湿地系统能够涵养水源，减少地表径流，避免土壤侵蚀与扬尘产生，同时为周边植被生长提供良好的水分条件，间接提升周边区域的植被覆盖度，进一步增强大气净化能力，形成“湿地净化土壤—调节大气—促进植被生长”的良性循环。

三、森林与湿地系统在协同修复中的应用方案

结合森林与湿地系统的污染净化功能，立足大气－土壤协同修复需求，结合不同区域的污染特征与生态环境条件，制定科学可行的应用方案，明确二者的配置方式与管理要点，充分发挥森林与湿地系统的协同效应，实现大气净化与土壤修复的双重提升，推动基于自然解决方案的协同修复落地见效。

（一）科学配置森林与湿地系统，提升协同净化效能

森林与湿地系统的配置需结合区域污染类型、地形地貌、气候条件，遵循“因地制宜、协同互补”的原则，构建“森林－湿地”协同修复体系，实现大气净化与土壤净化的协同推进。对于大气污染严重、土壤重金属污染突出的区域，采用“森林缓冲带＋湿地净化区”的配置模式，在污染区域周边布设森林缓冲带，选择吸附降解能力强的树种，构建多层次混交林，拦截吸附大气污染物，减少污染物向土壤的沉降；在污染区域内部或下游布设湿地净化区，种植芦苇、香蒲等水生植物，净化土壤中的重金属与有机物，同时调节大气环境。

对于土壤有机污染严重、大气 VOCs 浓度较高的区域，采用“森林净化林＋湿地降解区”的配置模式，在区域周边种植樟树、雪松等对 VOCs 吸附降解能力强的树种，构建森林净化林，净化大气中的 VOCs；在土壤污染核心区域布设湿地降解区，利用湿地微生物与水生植物的协同作用，降解土壤中的有机污染物，同时减少有机污染物向大气的挥发。对于地形复杂、水土流失严重的区域，采用“山地森林＋河谷湿地”的配置模式，山地森林用于截留大气颗粒物、涵养水源，减少土壤侵蚀与扬尘产生；河谷湿地用于净化土壤污染物，调节区域水文与大气环境，实现生态修复与污染治理的协同。

（二）优化树种与水生植物选择，强化净化功能

植物选择是提升森林与湿地系统净化功能的关键，需结合区域污染特征与生态环境条件，选择适配性强、净化能力突出、本土性强的树种与水生植物，确保系统的稳定性与长效性。森林系统树种选择方面，优先选择本土树种，避免外来物种入侵，针对大气颗粒物污染严重的区域，选择叶片绒毛多、冠层茂密的树种，如悬铃木、侧柏、紫穗槐等；针对大气 VOCs 污染严重的区域，选择樟树、雪松、桂花等吸附降解能力强的树种；构建混交林时，合理搭配乔木、灌木与草本，提升生物多样性与净化能力。

湿地系统水生植物选择方面, 优先选择耐污染、净化能力强、适应性广的本土水生植物, 针对土壤重金属污染, 选择芦苇、香蒲、菖蒲等富集能力强的植物; 针对土壤有机污染, 选择凤眼莲、狐尾藻等降解能力强的植物; 同时, 合理搭配挺水植物、浮水植物与沉水植物, 构建多层次水生植物群落, 提升湿地的净化效能与生态稳定性。此外, 可根据污染程度, 定期更换或收割水生植物与森林植被, 避免污染物在植物体内过度富集导致二次污染, 确保净化功能持续发挥。

(三) 完善管理措施, 保障协同修复长效运行

科学的管理措施是保障森林与湿地系统协同修复长效运行的关键, 需建立“监测-管护-修复”的闭环管理机制, 强化系统的日常管护与动态调整, 确保净化功能持续发挥。一是建立监测机制, 在森林与湿地系统内及周边布设监测站点, 实时监测大气污染物(颗粒物、VOCs)浓度、土壤污染物(重金属、有机物)含量, 以及植物生长状况、微生物活性等指标, 及时掌握系统的净化效果, 为管理措施优化提供数据支撑。

二是加强日常管护, 定期对森林植被进行修剪、浇水、施肥、病虫害防治, 及时补植枯萎植被, 优化林分结构, 确保森林系统的净化能力; 对湿地系统进行清淤、补水, 控制湿地水位, 避免湿地干涸, 定期清理湿地内的垃圾与枯萎水生植物, 防止二次污染, 同时监测湿地土壤的理化性质, 及时采取土壤改良措施, 提升湿地净化能力。三是建立动态调整机制, 根据监测结果, 及时优化植物配置与管理措施, 针对净化效果不佳的区域, 更换植物品种或调整配置方式; 同时, 加强宣传引导, 提升公众对森林与湿地系统保护的意识, 避免人为破坏, 形成“政府主导、公众参与”的管护格局, 确保协同修复长效运行。

森林与湿地系统作为基于自然解决方案的核心载体, 分别在大气污染物净化、土壤污染物截留转化方面发挥着独特优势, 二者协同作用能够实现大气-土壤污染的全方位、可持续修复, 契合生态治理的绿色发展理念。森林系统通过冠层截留、叶片吸附与植物代谢, 高效净化大气中的颗粒物、VOCs等污染物, 为土壤修复营造清洁的大气环境; 湿地系统依托土壤基质、水生植物与微生物的协同作用, 实现对土壤重金属、有机物的吸附与降解, 同时发挥调节大气环境的辅助效应, 二者形成相互支撑、协同互补的良性循环。通过科学配置森林与湿地系统、优化植物选择、完善管理措施, 能够充分发挥二者的协同净化效能, 推动大气净化与土壤修复的深度融合, 实现区域生态环境质量的全面提升。

第二节 城市绿色基础设施的协同效益

城市绿色基础设施是基于自然解决方案在城市区域的核心实践载体，以绿色空间为核心，整合各类生态元素，构建起连接城市生态系统各环节的绿色网络，不仅承担着城市生态美化的功能，更在大气－土壤协同修复中发挥着多元协同效益。不同于森林与湿地系统的自然属性，城市绿色基础设施更贴合城市发展需求，通过人工规划与自然生态结合的方式，涵盖绿地、绿道、屋顶绿化等多种类型，实现大气净化、土壤修复、雨水调蓄、热岛缓解等多重功能的协同发力。立足城市生态治理与大气－土壤协同修复需求，界定城市绿色基础设施的核心类型与协同修复定位，系统分析其多重协同效益，优化布局与配置方案，能够充分发挥其生态效能，推动城市生态环境质量提升，实现城市发展与生态保护的协同共赢，为城市型协同修复实践提供科学指引。

一、城市绿色基础设施的核心类型与协同修复定位

城市绿色基础设施是由各类绿色空间、生态廊道及配套设施构成的复合型生态系统，其核心是通过人工干预与自然生态的融合，构建兼具生态功能与城市服务功能的绿色网络。明确其核心类型、特征及在协同修复中的定位，是发挥其多重协同效益、推动大气－土壤协同修复在城市落地的基础，也是适配城市紧凑布局、缓解城市生态压力的关键。

（一）城市绿色基础设施的核心类型及特征

城市绿色基础设施以“绿色、生态、协同”为核心，结合城市空间布局特点，形成了多元化的核心类型，各类类型功能互补、相互衔接，共同构成城市生态修复的绿色网络，其特征与功能适配城市不同区域的生态需求。绿地是城市绿色基础设施的基础类型，涵盖城市公园、社区绿地、街头绿地、口袋公园等多种形式，分布广泛、贴近城市居民生活，核心特征是植被覆盖度高、生态功能多元，能够快速实现大气净化与土壤修复的基础功能，同时承担着休闲、健身等社会服务功能。

绿道是城市绿色基础设施的线性纽带，以生态廊道为核心，连接城市各类绿地、湿地、公园等生态空间，核心特征是连通性强、贯穿城市全域，不仅能够实现生态空间的衔接，更能发挥污染物截留、生态廊道构建的作用，推动大气－土

壤协同修复的区域联动。屋顶绿化是城市绿色基础设施的立体延伸，依托城市建筑屋顶开展植被种植，核心特征是空间利用率高、不占用地面土地资源，适配城市土地资源紧张的现状，能够有效弥补地面绿地不足的短板，实现城市立体生态修复，同时兼具保温隔热、美化建筑的附加功能。此外，城市绿色基础设施还包括垂直绿化、滨水绿带等辅助类型，与核心类型协同，构建起“地面－立体－线性”的全方位绿色生态网络。

（二）城市绿色基础设施在协同修复中的核心定位

城市绿色基础设施在大气－土壤协同修复中，承担着“核心载体、协同纽带、功能枢纽”的三重定位，区别于森林、湿地系统的自然修复属性，其定位更贴合城市生态治理的实际需求，实现生态修复与城市发展的深度融合。作为核心载体，城市绿色基础设施通过各类绿色空间的植被覆盖与土壤改良，构建起城市大气－土壤协同修复的基础平台，能够直接实现大气污染物净化与土壤污染物修复，是城市区域协同修复的核心抓手。

作为协同纽带，城市绿色基础设施通过绿道等线性空间，连接城市不同区域的修复场地、森林、湿地等生态空间，实现大气净化、土壤修复、雨水调蓄等功能的联动，打破区域修复的碎片化格局，推动协同修复的规模化、系统化。作为功能枢纽，城市绿色基础设施整合了大气净化、土壤修复、热岛缓解、雨水调蓄等多重功能，不仅能够实现大气－土壤的协同修复，还能联动城市生态系统的其他环节，提升城市生态系统的整体稳定性，缓解城市生态压力，实现“修复－防护－服务”的多元协同，契合城市生态治理的综合需求。

（三）城市绿色基础设施与其他生态系统的协同衔接

城市绿色基础设施并非独立存在，其协同修复效能的发挥，离不开与森林、湿地等自然生态系统的协同衔接，形成“城市绿色设施－森林－湿地”的全域协同修复体系，实现城市与周边生态空间的联动。一方面，城市绿色基础设施作为城市生态系统的核心，能够承接森林系统输送的生态效益，通过绿道等廊道，将森林系统的大气净化功能延伸至城市内部，减少城市大气污染物浓度，同时为城市土壤修复提供清洁的大气环境。

另一方面，城市绿色基础设施与城市周边湿地系统协同，通过滨水绿带等设施，承接湿地系统的土壤净化与水文调节功能，减少城市土壤污染与水土流失，同时通过雨水调蓄功能，为湿地系统补充水源，实现二者的生态互补。此外，城

市绿色基础设施能够整合城市内部各类修复场地，通过植被覆盖、土壤改良等措施，推动场地修复与城市生态环境的融合，实现“点（修复场地）—线（绿道）—面（绿地）”的协同修复格局，提升全域协同修复效能，推动城市生态系统与自然生态系统的良性循环。

二、城市绿色基础设施的多重协同效益分析

城市绿色基础设施的协同效益，体现在大气净化、土壤修复、雨水调蓄、热岛缓解等多个维度，各类效益相互关联、协同发力，不仅能够实现大气—土壤的协同修复，还能优化城市生态环境、提升城市居民生活品质，形成“生态修复—环境优化—民生改善”的良性循环，其效益发挥与绿色基础设施的类型、布局、配置密切相关。

（一）大气净化与土壤修复的核心协同效益

大气净化与土壤修复是城市绿色基础设施最核心的协同效益，二者相互支撑、相互促进，实现大气—土壤污染的双向治理。大气净化方面，各类绿色基础设施的植被通过叶片截留、吸附、代谢等作用，高效去除大气中的颗粒物（PM_{2.5}、PM₁₀）、VOCs、硫氧化物等污染物，其中绿地的乔木、灌木形成的冠层能够有效拦截大气颗粒物，屋顶绿化、垂直绿化则能补充地面净化空间，减少大气污染物在城市内部的扩散。

土壤修复方面，绿色基础设施的植被通过根系固定、微生物协同作用，实现对城市土壤污染物的吸附、降解与固定，尤其针对城市工业遗留场地、道路周边等污染区域，绿地植被能够吸收土壤中的重金属、有机污染物，改善土壤理化性质，提升土壤肥力；同时，植被枯枝落叶腐烂后形成的腐殖质，能够增加土壤有机质含量，改善土壤结构，增强土壤的抗侵蚀能力，减少土壤扬尘产生，进一步助力大气净化。二者形成“植被净化大气—减少污染物沉降—改善土壤环境—植被生长提升净化能力”的协同循环，实现大气—土壤协同修复的良性发展。

（二）雨水调蓄与水土保持的辅助协同效益

城市绿色基础设施的雨水调蓄与水土保持效益，是对大气—土壤协同修复的重要补充，能够减少水土流失与土壤污染扩散，为协同修复营造稳定的生态环境。雨水调蓄方面，绿地、屋顶绿化等设施通过植被截留、土壤渗透等方式，收集、储存雨水，减少城市地表径流，避免雨水冲刷导致的土壤侵蚀与污染物扩散，同

时补充地下水，改善城市水资源状况；绿道、滨水绿带则能引导雨水有序排放，减少城市内涝，同时过滤雨水中的污染物，避免其进入土壤与地下水，减少土壤二次污染风险。

水土保持方面，绿色基础设施的植被根系能够牢牢固定土壤颗粒，减少土壤侵蚀与扬尘产生，尤其在城市坡度较大区域、道路两侧，绿地与绿道的植被能够有效遏制土壤流失，保护城市土壤资源；同时，植被覆盖能够减少土壤裸露，降低大气颗粒物浓度，进一步提升大气净化效果。雨水调蓄与水土保持效益的发挥，能够稳定土壤环境、减少污染物扩散，为大气－土壤协同修复提供良好的生态基础，提升协同修复的长效性。

（三）热岛缓解与生态宜居的延伸协同效益

城市绿色基础设施的协同效益不仅局限于污染修复，还能延伸至热岛缓解与生态宜居层面，通过改善城市微气候，提升城市生态环境品质，间接推动大气－土壤协同修复效能的提升。热岛缓解方面，绿色基础设施的植被通过蒸腾作用吸收热量、增加空气湿度，降低周边环境温度，缓解城市热岛效应；同时，植被覆盖能够减少城市地面硬化带来的热量积聚，改善城市大气流通状况，促进大气污染物的扩散与降解，间接提升大气净化效果。

生态宜居方面，各类绿地、绿道为城市居民提供了休闲、健身、亲近自然的空间，提升居民生活品质；同时，绿色基础设施能够吸附大气污染物、净化空气，改善城市空气质量，减少大气污染对居民健康的危害；土壤修复后形成的健康土壤环境，能够支撑植被更好生长，进一步提升绿色基础设施的生态功能，形成“生态修复－环境优化－民生改善”的协同效应。此外，绿色基础设施还能为城市生物提供栖息地，提升城市生物多样性，增强城市生态系统的稳定性，为大气－土壤协同修复提供更坚实的生态支撑。

三、城市绿色基础设施的布局与配置优化方案

为充分发挥城市绿色基础设施的多重协同效益，提升大气－土壤协同修复的整体效能，需结合城市空间布局、污染特征、人口分布等实际情况，优化绿色基础设施的布局与配置，构建“全域覆盖、协同联动、功能互补”的绿色生态网络，实现生态修复与城市发展的深度融合，推动城市生态环境高质量发展。

（一）优化全域布局，构建协同修复网络

布局优化的核心是打破城市绿色基础设施的碎片化格局，构建“点、线、面”相结合的全域协同修复网络，实现大气－土壤协同修复的区域联动。“点”上聚焦，在城市污染严重区域（如工业遗留场地、道路周边、垃圾填埋场周边），重点布局社区绿地、口袋公园等小型绿地，针对性开展土壤修复与大气净化，打造区域性修复节点；在城市居民密集区域，增加绿地布局，提升大气净化效果，改善居民生活环境。

“线”上连通，以绿道为核心，构建贯穿城市全域的线性生态廊道，连接各类绿地、修复场地、滨水区域，实现不同区域协同修复的联动，促进大气污染物的扩散与土壤污染物的迁移转化，打破区域修复壁垒；重点打造滨水绿带，衔接城市湿地系统，实现雨水调蓄与土壤净化的协同。“面”上覆盖，扩大城市绿地总面积，提升绿地覆盖率，在城市外围布局大型公园、生态绿地，形成城市生态屏障，拦截外来大气污染物，减少其对城市内部的影响；在城市建成区推进屋顶绿化、垂直绿化，弥补地面绿地不足的短板，实现城市立体生态覆盖，提升全域协同修复效能。

（二）优化类型配置，强化协同修复功能

类型配置优化需结合城市不同区域的污染特征与功能需求，针对性选择绿色基础设施类型，实现功能互补，强化大气－土壤协同修复效能。针对大气污染严重的城市道路周边、工业园区周边，重点布局绿地与绿道，选择吸附降解能力强的植被，构建多层次植被群落，提升大气颗粒物、VOCs 的净化效果，同时通过植被根系修复周边污染土壤；针对土壤污染严重的工业遗留场地，重点布局绿地，结合植物修复技术，选择超富集植物与本土植被搭配，实现土壤污染物的去除与生态恢复。

针对城市中心土地资源紧张的区域，重点推进屋顶绿化、垂直绿化，选择耐旱、耐贫瘠、生长速度快的植被，实现立体生态修复，补充大气净化与土壤修复空间；针对城市滨水区域，布局滨水绿带与湿地型绿地，结合雨水调蓄功能，实现雨水净化与土壤保护的协同，减少土壤侵蚀与污染物扩散。同时，合理搭配各类绿色基础设施类型，实现“地面绿地＋屋顶绿化＋绿道”的协同配置，提升多重协同效益，推动大气－土壤协同修复与城市功能的深度融合。

（三）完善配套管理，保障协同效能长效发挥

科学的配套管理是保障城市绿色基础设施协同效能长效发挥的关键，需建立“规划－建设－管护－监测”的闭环管理机制，强化全过程管控，确保绿色基础设施的生态功能持续发挥。一是强化规划引领，结合城市总体规划与生态修复规划，明确绿色基础设施的布局、类型与建设标准，确保布局优化与城市发展相适配，避免盲目建设；在规划过程中，充分考虑城市污染特征，针对性布局修复型绿色基础设施，提升协同修复的针对性。

二是加强建设管控，规范绿色基础设施的建设流程，注重植被选择与土壤改良，优先选择本土、耐污染、净化能力强的植被，结合土壤污染状况，采用生物炭改良、有机堆肥等措施，提升土壤肥力与修复能力；确保绿道、屋顶绿化等设施的建设质量，保障其生态功能的正常发挥。三是完善管护与监测机制，定期对绿色基础设施的植被进行修剪、浇水、施肥、病虫害防治，及时补植枯萎植被，优化植被群落结构；建立监测体系，实时监测大气污染物浓度、土壤污染物含量、植被生长状况等指标，根据监测结果，及时优化布局与配置方案，针对性采取修复措施；同时，加强宣传引导，提升公众保护意识，鼓励公众参与绿色基础设施的管护，形成“政府主导、公众参与”的长效管理格局。

城市绿色基础设施作为基于自然解决方案在城市区域的核心实践载体，凭借其多元化的类型与多重协同效益，在大气－土壤协同修复中发挥着不可替代的作用，契合城市生态治理与可持续发展的核心需求。其核心类型涵盖绿地、绿道、屋顶绿化等，定位为协同修复的核心载体、协同纽带与功能枢纽，通过与森林、湿地系统的协同衔接，构建全域协同修复体系。城市绿色基础设施能够实现大气净化、土壤修复、雨水调蓄、热岛缓解等多重效益的协同发力，形成“生态修复－环境优化－民生改善”的良性循环。

第三节 生态农业模式对减少面源污染与氨排放的作用

农业生产过程中产生的土壤面源污染与大气氨排放，是影响大气－土壤协同治理成效的重要因素，也是农业生态环境治理的重点难点。传统农业模式中化肥过量施用、秸秆随意丢弃、种养分离等问题，易导致化肥农药流失形成土壤面源污染，同时引发大气氨排放增加，破坏土壤肥力与大气环境质量。生态农业模式

以“生态优先、循环高效”为核心，整合测土配方施肥、秸秆还田、种养结合等关键技术，实现农业生产与生态保护的协同发展，既能有效减少土壤面源污染，又能降低大气氮排放，是基于自然解决方案在农业领域的重要实践。立足农业生态修复与大气-土壤协同治理需求，系统梳理生态农业模式的核心内涵与实施路径，分析其协同减排作用，结合实践案例验证成效并提出推广建议，能够推动农业绿色转型，实现农业生产、土壤保护与大气净化的协同共赢，为农业领域协同修复提供实践指引。

一、生态农业模式的核心内涵与实施路径

生态农业模式是依托自然生态系统规律，整合各类绿色生产技术，构建“资源循环利用、污染源头防控”的农业生产体系，其核心内涵是打破传统农业“高投入、高污染、低循环”的生产模式，实现“用地与养地结合、生产与生态协同”，兼顾农业产出与生态保护。测土配方施肥、秸秆还田、种养结合作为生态农业模式的核心组成部分，各有侧重、协同发力，通过科学的实施路径，推动农业生产向绿色化、循环化转型。

（一）生态农业模式的核心内涵

生态农业模式的核心是构建“资源循环、污染可控、生态友好”的农业生产体系，其内涵贯穿农业生产全过程，核心体现在三个方面。一是资源高效利用，通过优化农业生产要素配置，实现化肥、农药等投入品减量增效，秸秆、畜禽粪污等农业废弃物资源化利用，减少资源浪费与环境污染，契合农业绿色发展转型的核心要求。二是生态系统协同，依托农田生态系统的自我修复能力，结合人工干预措施，实现土壤肥力提升、病虫害绿色防控，减少面源污染与大气氮排放，推动大气-土壤协同修复。三是生产生态共赢，在保障农业产量与农产品质量的前提下，实现农业生产与生态保护的有机统一，既提升农业生产效益，又改善农业生态环境，助力乡村生态振兴。

测土配方施肥、秸秆还田、种养结合三大核心技术，共同构成生态农业模式的主体框架，三者相互衔接、协同互补，分别从投入品管控、废弃物利用、种养协同三个维度，实现污染源头防控与资源循环利用，彰显生态农业的核心价值，推动农业发展全面绿色转型。

（二）核心生态农业技术的实施路径

生态农业模式的落地见效，关键在于依托科学的实施路径，推动测土配方施肥、秸秆还田、种养结合三大核心技术的规范化、规模化应用，确保各项技术发挥实效。测土配方施肥技术的实施，遵循“测土—配方—配肥—施肥”的闭环路径，首先通过专业检测手段，精准掌握农田土壤的理化性质、养分含量及作物需肥规律，避免盲目施肥；随后根据检测结果，科学配制符合农田需求的肥料配方，实现氮、磷、钾及中微量元素的精准供给；最后采用侧深施肥、种肥同播等高效施肥模式，提升肥料利用率，减少化肥流失，从源头降低面源污染与氨排放风险。

秸秆还田技术的实施，结合不同区域作物类型与土壤条件，采用翻埋、碎混、堆沤腐熟等多元化路径，将农作物秸秆转化为土壤有机质，既解决秸秆随意丢弃带来的污染问题，又能提升土壤肥力；同时可搭配秸秆生物菌剂、酶制剂等配套产品，加快秸秆降解速度，避免秸秆腐烂过程中产生过量氨排放，实现废弃物资源化利用与污染防治的协同。种养结合技术的实施，构建“种植—养殖—废弃物利用”的循环路径，将畜禽养殖产生的粪污经无害化处理后，作为有机肥还田利用，替代部分化肥，减少化肥施用带来的面源污染与氨排放；同时依托养殖废弃物的养分供给，提升作物产量与品质，形成“种养互补、循环高效”的生产格局，推动农业资源循环利用。

（三）生态农业模式的整体实施保障

生态农业模式的规模化实施，需依托完善的保障体系，确保各项技术落地见效、长效运行。一方面，强化技术指导，组建专业技术团队，为农户提供测土、配方、施肥及秸秆还田、种养结合等技术培训与现场指导，提升农户的技术应用能力，规范技术操作流程，避免因操作不规范导致的污染问题。另一方面，完善配套设施，搭建测土配方施肥服务平台，推进配肥中心建设，为农户提供精准配肥服务；配套建设秸秆收储、畜禽粪污无害化处理等设施，解决秸秆还田、种养结合过程中的设施短板。此外，强化政策扶持，出台补贴政策，鼓励农户采用生态农业技术，降低农户应用成本，推动生态农业模式的广泛推广，助力农业绿色转型。

二、生态农业模式的协同减排作用分析

生态农业模式通过测土配方施肥、秸秆还田、种养结合等核心技术的协同应

用,能够实现“减少土壤面源污染、降低大气氨排放”的双重目标,二者相互关联、协同发力,既保护土壤生态环境,又改善大气质量,形成农业领域大气-土壤协同修复的良性循环,其协同减排作用主要体现在三个维度。

（一）对土壤面源污染的防控作用

土壤面源污染的主要来源是化肥、农药流失及农业废弃物污染,生态农业模式通过源头管控与过程治理,有效减少面源污染负荷,保护土壤环境。测土配方施肥技术通过精准供给养分,避免化肥过量施用,减少氮、磷等养分流失,降低化肥对土壤及周边水体的污染;同时,精准施肥能够提升土壤肥力,改善土壤结构,增强土壤的保肥保水能力,进一步减少养分流失,从源头遏制面源污染。

秸秆还田技术将秸秆转化为土壤有机质,不仅能够提升土壤肥力,还能改善土壤孔隙结构,增强土壤对化肥、农药的吸附能力,减少污染物流失;同时,秸秆腐烂过程中产生的微生物,能够降解土壤中的残留农药,降低农药污染风险,构建“田内-田外”的双重农药残留降解屏障。种养结合技术通过畜禽粪污还田,替代部分化肥,减少化肥施用带来的污染,同时实现养殖废弃物资源化利用,避免粪污随意排放对土壤造成的污染,形成“资源循环、污染可控”的面源污染防控体系,推动土壤生态环境持续改善。

（二）对大气氨排放的削减作用

大气氨排放主要来源于化肥施用、畜禽养殖粪污处理及秸秆腐烂等过程,生态农业模式通过技术优化,从源头减少氨排放,改善大气环境质量。测土配方施肥技术通过精准控制氮肥施用总量,优化施肥时间与方式,减少氮肥挥发,降低氨排放;同时,配方中合理搭配中微量元素,提升氮肥利用率,进一步减少氨的逸散,实现化肥施用与氨排放削减的协同。

秸秆还田技术通过科学的还田方式,加快秸秆降解速度,避免秸秆在自然腐烂过程中产生大量氨气;同时,秸秆还田提升土壤有机质含量,改善土壤微生物群落结构,促进土壤中氨的转化与固定,减少氨排放。种养结合技术通过畜禽粪污无害化处理,将粪污转化为有机肥,减少粪污露天堆放、随意排放带来的氨排放;同时,粪污还田后,其养分缓慢释放,避免集中释放导致的氨挥发,实现养殖废弃物利用与氨排放削减的双赢,助力大气环境质量提升。

（三）面源污染与氨排放的协同防控效应

生态农业模式的协同减排作用,不仅体现在单独防控面源污染与氨排放,更

实现了二者的协同防控、相互促进，形成良性循环。减少化肥施用既能降低土壤面源污染，又能减少氮肥挥发带来的氨排放，实现“一控双减”；秸秆还田既提升土壤肥力、减少面源污染，又能抑制氨排放，同时为作物生长提供良好的土壤环境，提升作物对养分的吸收能力，进一步减少化肥施用。

种养结合实现了养殖废弃物的资源化利用，既减少粪污对土壤的污染，又替代化肥减少氨排放，同时提升土壤肥力，形成“种养循环-污染减少-氨排放降低”的协同效应。这种协同防控效应，不仅降低了农业生产对生态环境的影响，还能提升农业生产效益，实现农业生产与生态保护的协同发展，契合大气-土壤协同治理的核心需求，推动农业生态环境持续改善。

三、生态农业模式的实践验证与推广优化建议

生态农业模式的协同减排成效，已在多地实践中得到验证，结合典型案例总结经验，针对推广过程中存在的问题，提出科学可行的优化建议，能够推动生态农业模式规模化、规范化推广，充分发挥其在协同修复中的作用，助力农业绿色转型与乡村生态振兴。

（一）典型实践案例及成效验证

湖北枝江作为农业面源污染防治的典型区域，构建了以“水碳氮协同调控”为核心的生态农业模式，整合测土配方施肥、秸秆还田、种养结合等技术，形成了可复制、可推广的实践样板，其协同减排成效显著。该区域通过测土配方施肥精准调控氮磷供给，结合秸秆还田提升土壤肥力，推行种养结合实现畜禽粪污还田，同时构建“田内—田外—沟塘”的三重农药残留降解屏障，在不增加农民成本的前提下，实现氮磷与温室气体协同减排。

实践表明，该生态农业模式推广后，区域化肥利用率提升 30% 以上，农药使用量减少 20%，土壤氮磷流失量下降 40%，大气氨排放浓度降低 35% 以上，同时农田灌溉用水节约 30% 以上，实现了“减污降碳、农民增收”的双重目标，不仅有效控制了土壤面源污染、削减了大气氨排放，还推动了农业生产向资源节约、环境友好、生态循环的高质量发展转型，为同类农业产区的绿色转型提供了可复制经验。

（二）推广应用中存在的主要问题

尽管生态农业模式协同减排成效显著，但在规模化推广过程中，仍存在一些

问题制约其效能发挥。一是农户认知不足，部分农户仍沿用传统种植模式，对测土配方施肥、秸秆还田等生态农业技术的协同减排作用了解不深，缺乏主动应用的意愿，尤其小农户应用积极性不高。二是技术推广不均衡，偏远农村地区技术指导不足，农户技术应用不规范，导致部分区域生态农业技术未能充分发挥减排成效；同时，测土、配肥等配套服务体系不完善，难以满足农户的个性化需求。三是配套设施不完善，部分地区缺乏秸秆收储、畜禽粪污无害化处理等配套设施，导致秸秆还田、种养结合技术难以规模化实施；此外，生态农业技术应用成本相对较高，农户承担压力较大，缺乏有效的激励机制，制约了模式的广泛推广。四是技术适配性不足，不同区域的土壤条件、作物类型存在差异，部分生态农业技术未能结合区域实际进行优化，导致减排成效参差不齐。

（三）推广应用的优化建议

针对生态农业模式推广过程中存在的问题，结合实践经验，从认知提升、技术优化、设施完善、政策扶持四个方面，提出推广应用的优化建议，推动模式规模化、规范化发展。一是强化宣传培训，通过田间观摩、技术讲座、入户指导等方式，向农户普及生态农业技术的协同减排作用与经济效益，提升农户认知水平与应用意愿，重点加强对小农户的技术培训，引导其主动采用生态农业模式。二是优化技术推广体系，组建专业技术团队，结合不同区域的土壤条件、作物类型，优化生态农业技术方案，提升技术适配性；完善测土配方施肥、秸秆还田等配套服务，搭建区域性技术服务平台，为农户提供精准化、个性化技术服务，规范技术操作流程，确保减排成效。三是完善配套设施建设，加大对秸秆收储、畜禽粪污无害化处理等设施的投入，推动设施规模化、标准化建设，解决技术实施的设施短板；同时，推动农业废弃物资源化利用产业链发展，提升废弃物利用效率，降低农户应用成本。四是强化政策扶持与激励，出台针对性的补贴政策，对采用生态农业技术的农户给予资金补贴，降低应用成本；建立生态农业示范基地，总结推广典型经验，发挥示范引领作用；健全激励约束机制，将生态农业发展纳入农业生态环境保护考核，推动地方政府与农户主动参与，形成“政府主导、市场推动、农户参与”的推广格局，推动生态农业模式广泛应用，充分发挥其协同减排作用。

生态农业模式作为基于自然解决方案在农业领域的重要实践，通过测土配方施肥、秸秆还田、种养结合等核心技术的协同应用，实现了减少土壤面源污染与

大气氨排放的双重目标，彰显了“生产与生态协同、资源与环境共赢”的核心价值，契合农业绿色转型与大气-土壤协同治理的需求。其核心内涵在于构建资源循环利用、污染源头防控的农业生产体系，通过科学的实施路径，推动各项技术落地见效，形成面源污染与氨排放的协同防控效应。典型实践案例充分验证了生态农业模式的协同减排成效，为模式推广提供了宝贵经验。

第四节 案例研究：流域尺度的协同治理规划

流域作为大气-土壤-水体协同作用的核心单元，其生态环境具有整体性、关联性特征，流域内大气污染与土壤污染相互影响、相互传导，形成复合型污染格局，制约区域生态环境质量提升。流域尺度的大气-土壤协同治理，是打破“分段治理、单一治理”壁垒，实现全域生态修复的关键路径，需依托自然解决方案与工程技术的深度整合，结合流域污染特征制定科学规划。本文选取琼江流域作为典型案例，该流域作为川渝跨界重要流域，兼具农业生产、工业发展与生态保护多重功能，污染类型复杂，治理难度较大，具有较强的代表性。通过明确流域内大气-土壤污染现状、分布特征与核心成因，制定针对性的协同治理规划，总结治理经验与成效，能够为区域尺度大气-土壤协同修复实践提供可复制、可推广的模式，推动流域生态环境高质量发展，筑牢长江上游生态屏障。

一、典型流域选取及污染特征分析

选取琼江流域作为研究案例，该流域横跨四川、重庆两地，是长江上游重要支流，流域总面积约 4300 平方公里，涵盖四川遂宁、资阳及重庆潼南、铜梁等多个区域，流域内农业生产发达、工业布局集中，人口密度较高，大气-土壤污染呈现复合型、区域性特征，其污染现状与治理困境具有较强的代表性，能够为同类流域协同治理提供参考。

（一）流域大气-土壤污染现状

琼江流域大气污染以颗粒物、VOCs 及氨排放为核心，土壤污染以农业面源污染为主，兼具部分工业遗留污染，形成“大气污染沉降-土壤污染累积-水体污染传导”的复合型污染链条。大气环境方面，流域内 PM_{2.5}、PM₁₀ 年均浓度均超出区域环境质量标准，其中农业生产产生的氨排放、工业生产与交通尾气排

放的 VOCs，以及秸秆焚烧产生的颗粒物，是大气污染的主要来源，尤其农业生产集中区域，氨排放浓度显著高于其他区域。

土壤环境方面，流域内农田土壤普遍存在氮磷过量累积问题，部分区域土壤重金属（镉、铅）含量超标，主要集中在工业企业周边及农业集约化种植区域；同时，土壤中农药残留、畜禽粪污污染较为突出，农业面源污染负荷较高，导致土壤肥力下降、理化性质恶化，且土壤中的污染物易通过地表径流、挥发等方式，进一步加剧大气与水体污染，形成恶性循环，制约流域生态环境协同修复成效。

（二）污染分布特征

琼江流域大气—土壤污染呈现明显的区域性、差异性分布特征，与流域内产业布局、人口分布及地形条件密切相关。大气污染方面，呈现“工业集中区>农业集中区>生态保护区”的分布格局，重庆潼南、四川遂宁等工业布局集中区域，VOCs、颗粒物排放浓度较高；农业集约化种植区域，氨排放浓度突出，且秸秆焚烧季节颗粒物浓度显著上升；流域上游生态保护区大气质量相对较好，污染浓度较低。

土壤污染方面，呈现“点源污染集中、面源污染广泛”的分布特征，工业企业周边、畜禽养殖集中区为点源污染核心区域，土壤重金属、有机物污染浓度较高；流域内农田区域为面源污染主要区域，氮磷累积、农药残留问题普遍存在，且沿河流两岸土壤污染程度高于远离河流区域，主要受农业面源污染径流传导影响。此外，跨界区域因治理协同不足，污染分布呈现交叉扩散特征，增加了治理难度。

（三）污染核心成因

琼江流域大气—土壤污染的形成，是产业发展、农业生产、治理机制及自然条件等多因素共同作用的结果，核心成因主要体现在三个方面。一是产业与农业生产方式不合理，流域内部分工业企业环保设施不完善，废气排放不达标，导致 VOCs、颗粒物等大气污染物排放；农业生产中化肥过量施用、秸秆随意焚烧、畜禽粪污无序排放，既加剧土壤面源污染，又导致大气氨排放与颗粒物污染增加，形成“农业污染双向传导”格局。

二是治理机制协同不足，琼江流域横跨川渝两地，此前缺乏统一的协同治理机制，存在“分段治理、各自为政”的问题，跨界区域污染防控存在盲区，且大气治理与土壤治理脱节，未能实现协同发力，导致污染交叉扩散、治理成效不佳。三是基础设施与技术支撑薄弱，部分区域缺乏完善的废气收集处理、土壤修复及

农业废弃物处理设施，生态修复技术应用不足，且数字化监管水平较低，难以实现污染精准防控，进一步加剧了污染蔓延。

二、流域尺度大气－土壤协同治理规划制定

结合琼江流域污染现状、分布特征与核心成因，立足“全域协同、源头防控、标本兼治”的原则，整合自然解决方案与工程技术，制定流域尺度大气－土壤协同治理规划，明确治理目标、实施步骤与核心措施，实现大气净化、土壤修复与水体保护的协同推进，推动流域生态环境持续改善。

（一）治理目标明确

结合流域生态环境现状与区域发展需求，制定短期、中期、长期分层治理目标，确保治理工作有序推进、落地见效。短期目标（1—2年）：完善流域协同治理机制，建成基础污染监测体系，削减重点区域大气污染物排放，降低农业面源污染负荷，实现PM_{2.5}、PM₁₀浓度同比下降15%以上，土壤氮磷流失量下降20%以上，氨排放浓度下降25%以上。

中期目标（3—5年）：全面落实各项治理措施，完善污染防控基础设施，推广生态修复技术，实现大气环境质量达标，土壤污染风险得到有效管控，农业面源污染得到全面遏制，跨界区域污染协同治理成效显著，建成一批生态修复示范工程，流域生态系统稳定性明显提升。长期目标（5年以上）：构建“大气－土壤－水体”协同治理长效机制，实现流域生态系统全面修复，大气环境质量持续优良，土壤环境质量全面达标，形成“生态优先、绿色发展”的流域发展格局，打造川渝跨界流域协同治理样板。

（二）核心治理措施整合

整合自然解决方案与工程技术，从大气净化、土壤修复、协同防控三个维度，制定针对性治理措施，实现多技术、多手段协同发力。大气污染治理方面，工程技术上，推进工业企业废气治理设施提标改造，建设VOCs收集处理系统，规范工业废气排放；自然解决方案上，在流域周边及工业企业周边构建森林缓冲带、滨水绿带，推广生态农业模式，减少氨排放与秸秆焚烧，通过植被吸附降解大气污染物，提升大气净化能力。

土壤污染治理方面，工程技术上，对工业遗留污染场地采用化学淋洗、固化稳定化等技术进行修复，对农田土壤采用土壤改良、植物修复等技术，降低土壤

氮磷累积与重金属含量；自然解决方案上，推广秸秆还田、种养结合等生态农业技术，提升土壤肥力，增强土壤自我修复能力，构建湿地净化系统，拦截土壤污染物流失，减少对水体与大气的污染传导。协同防控方面，搭建流域数字化监测平台，实现大气、土壤污染实时监测，建立川渝跨界协同治理机制，开展联合巡河、联合执法，打破行政壁垒，实现污染协同防控。

（三）实施步骤规划

按照“调研摸排—试点先行—全面推进—巩固提升”的步骤，有序推进流域协同治理规划实施，确保治理成效稳步提升。第一步，调研摸排阶段，开展流域大气—土壤污染全面普查，精准掌握污染分布、浓度及成因，完善污染监测站点布局，建立污染数据库，为治理措施制定提供数据支撑，同步完善川渝跨界协同治理机制，签署合作协议。

第二步，试点先行阶段，选取工业集中区、农业集约化区域及跨界区域作为试点，落实大气净化、土壤修复等核心治理措施，建设生态修复示范工程，总结试点经验，优化治理方案，解决治理过程中存在的问题。第三步，全面推进阶段，将试点经验推广至整个流域，全面落实各项治理措施，完善基础设施建设，强化技术指导与监管，实现大气—土壤协同治理全覆盖。第四步，巩固提升阶段，开展治理成效评估，针对治理薄弱环节优化措施，健全长效治理机制，推动治理工作从“集中整治”向“常态化管护”转变，确保治理成效持续巩固。

三、流域协同治理经验与推广模式总结

琼江流域大气—土壤协同治理规划实施以来，通过机制创新、技术整合、全民参与，取得了显著的治理成效，积累了宝贵的协同治理经验，形成了可复制、可推广的流域尺度协同修复模式，为区域尺度协同治理提供了实践指引。

（一）治理成效验证

经过多年治理，琼江流域大气—土壤污染得到有效管控，生态环境质量显著提升，治理成效达到预期目标。大气环境方面，PM_{2.5}、PM₁₀ 年均浓度较治理前下降 30% 以上，VOCs、氨排放浓度下降 40% 以上，大气环境质量持续改善，达到区域环境质量标准；土壤环境方面，农田土壤氮磷累积量下降 35% 以上，工业遗留场地重金属超标问题得到有效解决，土壤肥力明显提升，土壤污染风险得到全面管控。

流域生态系统稳定性显著增强，湿地、森林等生态系统功能得到恢复，实现了“大气净化、土壤修复、水体保护”的协同共赢，跨界区域污染治理成效突出，25个川渝跨界国考断面水质达标率达到100%，打造了川渝跨界流域协同治理的样板，实现了生态保护与经济协同发展的协同推进，生态价值转化惠及流域内百万群众。

（二）核心治理经验总结

琼江流域协同治理的核心经验，主要体现在三个方面。一是坚持机制创新，打破行政壁垒，在全国首创跨省际协同治理机制，设立联合推进办公室，互派干部、签署合作协议，开展联合巡河、联合执法，实现流域全域协同治理，破解了跨界污染治理难题，这一模式获评全国基层治水十大经验。二是坚持技术融合，整合自然解决方案与工程技术，既依托森林、湿地、生态农业等自然系统的自我修复能力，又采用工业废气治理、土壤修复等工程技术，实现源头防控与过程治理协同发力，提升治理效能，同时推进数字孪生流域建设，实现污染精准管控。三是坚持全民参与，构建“党建引领+社会参与”的治理格局，开展“万名机关党员净岸巡河”“河小青”志愿服务等活动，发动群众参与流域治理，形成“政府主导、市场推动、群众参与”的治理合力，确保治理措施落地见效，同时强化政策扶持，完善配套设施，为治理工作提供坚实保障。

（三）可复制推广模式提炼

结合琼江流域治理经验，提炼出流域尺度大气-土壤协同治理可复制、可推广的模式，核心包括三个方面。一是构建“跨界协同+全域管控”的治理机制，打破行政区域壁垒，建立跨区域协同治理平台，完善联合监测、联合执法、联合考核机制，实现流域污染全域管控，避免“分段治理”带来的治理盲区。二是打造“自然修复+工程治理”的技术模式，结合流域污染特征，合理整合自然解决方案与工程技术，优先采用生态友好型技术，实现大气净化、土壤修复与水体保护的协同推进，兼顾治理成效与生态效益，推动生态价值转化。三是建立“监测赋能+全民参与”的保障模式，搭建数字化监测平台，实现污染实时监测、精准防控，同时强化宣传引导与技术培训，提升群众生态保护意识，完善政策扶持与基础设施建设，健全长效管护机制，确保治理成效持续巩固。该模式适用于跨界流域、农业工业复合流域等各类复杂流域，能够为区域尺度大气-土壤协同修复实践提供科学指引，推动流域生态环境高质量发展。

流域尺度的大气-土壤协同治理，是破解复合型污染、实现全域生态修复的关键路径，琼江流域作为典型跨界流域，其治理实践充分证明，通过明确污染现状与成因、制定科学的协同治理规划、整合自然解决方案与工程技术、健全协同治理机制，能够有效实现大气-土壤污染协同防控，推动生态环境质量显著提升。琼江流域总结的机制创新、技术融合、全民参与的治理经验，以及提炼的“跨界协同+全域管控”“自然修复+工程治理”“监测赋能+全民参与”的推广模式，具有较强的可复制性与可推广性，能够为各类流域及区域尺度大气-土壤协同修复实践提供宝贵经验与实践指引。

第九章 协同修复的监测、模拟与评估体系

第一节 天地空一体化的环境监测网络

大气-土壤协同修复的精准推进,离不开科学完善的环境监测体系作为支撑,监测网络的全覆盖、高精度与实时性,直接决定协同修复的针对性与成效。天地空一体化环境监测网络依托多技术融合,整合卫星遥感、地面监测、无人机监测等多种手段,打破传统单一监测的局限,实现对大气-土壤污染状况、协同修复效果的全方位、立体化监测,为协同修复规划制定、措施优化、成效评估提供精准的数据支撑。立足协同修复的实际需求,构建科学合理的监测网络框架,明确核心监测指标与监测频率,优化布局与运行机制,能够推动监测工作从“被动监测”向“主动防控”转型,实现大气-土壤污染及协同修复效果的实时、精准把控,为协同修复的长效推进筑牢基础,助力生态环境治理的精准化、科学化发展。

一、天地空一体化环境监测网络的框架构建

天地空一体化环境监测网络的核心是构建“天空-空中-地面”三层联动的监测框架,整合各类监测手段的优势,实现监测范围全覆盖、监测数据全融合、监测过程全联动,打破传统监测“各自为政”的碎片化格局,形成上下协同、左右联动的立体化监测体系。其框架构建需立足大气-土壤协同修复的核心需求,结合不同监测手段的特性,明确各层级监测的功能定位,实现多手段的有机融合与高效协同。

(一) 监测网络的整体框架架构

天地空一体化环境监测网络采用“三层联动、全域覆盖、数据互通”的整体架构,分为天空层、空中层、地面层三个核心层级,各层级各司其职、协同互补,共同构成全方位的监测体系。天空层以卫星遥感监测为核心,发挥大范围、宏观监测的优势,实现对区域尺度大气-土壤污染的整体把控,重点监测大范围大气污染物分布、土壤污染空间格局及生态系统整体状况,为协同修复提供宏观数据

支撑，契合陆海空天一体化精密监测系统的建设要求。

空中层以无人机监测为核心，弥补卫星遥感与地面监测的短板，实现中尺度、精准化监测，聚焦重点污染区域、修复区域，开展精细化监测，捕捉局部区域大气污染物浓度变化、土壤污染细节及修复效果动态，提升监测的精准度与灵活性。地面层以地面监测站点为核心，构建网格化监测网络，实现小尺度、实时性监测，聚焦大气-土壤污染核心区域、敏感区域，开展连续监测，捕捉污染物浓度实时变化，为协同修复措施的动态调整提供即时数据支撑，形成“宏观-中观-微观”三层联动的监测格局。

（二）核心监测手段的整合与应用

天地空一体化监测网络的高效运行，关键在于实现卫星遥感、地面监测、无人机监测等核心手段的有机整合，发挥各类手段的优势，实现监测效能最大化。卫星遥感监测依托高分辨率卫星，搭载多光谱、热红外等探测设备，能够实现大范围、全天候监测，重点监测大气中 PM_{2.5}、PM₁₀、VOCs 等污染物的空间分布，土壤中重金属、有机污染物的累积状况，以及植被覆盖、土地利用等生态指标，同时能够快速捕捉污染扩散趋势，为区域尺度协同修复规划制定提供数据支撑，契合综合气象观测体系协同化、全球化的发展趋势。

无人机监测依托小型、中型无人机搭载便携式监测设备，能够灵活进入复杂区域，开展精准化监测，重点针对工业遗留场地、农业集中区域、修复工程区域等，实现大气污染物浓度的精准监测、土壤污染物的多点采样监测，以及修复区域植被生长、土壤改良效果的动态跟踪，弥补卫星遥感分辨率不足、地面监测覆盖有限的短板。地面监测通过构建网格化监测站点，配备大气自动监测仪、土壤采样设备、水质监测仪等，实现对大气污染物浓度、土壤污染物含量的实时连续监测，同时监测土壤温湿度、pH 值、大气温湿度等辅助指标，为监测数据的精准性提供保障，构建精细化泛在感知网络。

（三）监测数据的融合与共享机制

各类监测手段产生的监测数据具有不同的尺度、精度与格式，构建数据融合与共享机制，是实现天地空一体化监测网络高效运行的核心。建立统一的监测数据标准，规范卫星遥感、无人机、地面监测等各类数据的格式、精度要求，确保不同来源数据的兼容性，依托人工智能、边缘计算等技术，实现“智能感知—自主决策—即时服务”的智慧化升级。搭建一体化数据共享平台，整合各类监测数

据，实现数据实时汇聚、存储、分析与共享，打破部门、区域之间的数据壁垒，推动监测数据在协同修复规划、措施优化、成效评估等环节的高效应用，逐步形成“综合观测协作、观测站网共用、观测数据共享”的统筹发展格局。

建立数据质量管控机制，对各类监测数据进行校验、筛选与修正，剔除异常数据，确保监测数据的真实性、准确性与可靠性；依托大数据分析技术，对监测数据进行深度挖掘，分析大气—土壤污染的时空变化规律、污染传导路径及协同修复效果，为协同修复工作提供科学的决策支撑，提升监测数据的利用价值。

二、监测网络的核心监测指标与监测频率

明确核心监测指标与科学的监测频率，是确保天地空一体化监测网络精准发挥作用的关键，需结合大气—土壤协同修复的核心需求，聚焦污染防治与修复效果评估，筛选针对性强、代表性突出的监测指标，制定科学合理的监测频率，实现对大气—土壤污染及协同修复效果的全面、及时监测，为协同修复工作提供精准的数据支撑。

（一）大气污染核心监测指标

大气污染监测指标聚焦协同修复中大气污染物的净化效果，结合大气污染的主要类型，筛选能够全面反映大气环境质量及修复成效的核心指标，涵盖颗粒物、挥发性有机物、有害气体等类别。颗粒物指标主要包括PM_{2.5}、PM₁₀，重点监测其浓度变化，反映大气颗粒物污染的净化效果，这也是群众最直观感知的大气污染指标；挥发性有机物（VOCs）指标重点监测苯、甲苯、二甲苯等典型污染物浓度，反映工业排放、农业挥发等来源的污染物净化情况；有害气体指标包括二氧化硫、氮氧化物、氨等，重点监测其浓度变化，其中氨排放监测重点聚焦农业生产区域，为大气污染防治与协同修复提供针对性数据。

辅助监测指标包括大气温湿度、风速、风向等气象指标，用于分析大气污染物的扩散规律，为协同修复措施的优化提供参考，契合综合气象观测体系对多维度指标监测的要求，确保监测数据能够全面支撑精准治污。

（二）土壤污染核心监测指标

土壤污染监测指标聚焦土壤污染物的去除与土壤质量的改善，结合土壤污染的主要类型，筛选能够反映土壤污染状况、土壤肥力及修复成效的核心指标，涵盖重金属、有机污染物、土壤理化性质等类别。重金属指标重点监测镉、铅、汞、

铬等典型污染物的含量，重点聚焦工业遗留场地、农业集中区域，反映土壤重金属污染的修复效果；有机污染物指标重点监测多环芳烃、农药残留、VOCs 等，反映土壤有机污染的降解与去除情况，尤其关注化工园区、垃圾填埋场等重点区域的监测。

土壤理化性质指标包括土壤 pH 值、有机质含量、土壤含水量、土壤容重等，反映土壤质量的改善情况，为土壤修复措施的优化提供参考；同时，监测土壤-大气界面交换通量，包括氨、VOCs 等污染物的交换通量，反映大气-土壤之间的污染传导情况，为协同修复的协同性优化提供数据支撑，确保监测能够覆盖土壤污染防治的全流程。

（三）科学合理的监测频率设定

监测频率的设定需结合监测指标的特性、污染变化规律及协同修复需求，兼顾监测的及时性与经济性，实现“重点指标高频监测、常规指标定期监测、辅助指标按需监测”的差异化监测频率体系。大气污染核心指标中，PM_{2.5}、PM₁₀、二氧化硫、氮氧化物等常规污染物，采用实时连续监测模式，确保能够及时捕捉大气污染物浓度的动态变化；VOCs、氨等污染物，根据污染程度，采用每日 1—2 次的监测频率，重点区域可适当提高监测频率。

土壤污染核心指标中，重金属、有机污染物等常规指标，参考土壤环境监测规范，背景点和基础点每 5—10 年完成一轮监测，风险监控点每 1—3 年完成一轮监测，修复区域可根据修复进度，提高至每 3-6 个月监测一次，跟踪修复效果；土壤理化性质指标与土壤-大气界面交换通量，每 6-12 个月监测一次，重点修复区域可适当提高监测频率。辅助监测指标根据实际需求，按需开展监测，确保监测工作的科学性与高效性，避免盲目监测造成的资源浪费，同时满足精准治污的需求。

三、监测网络的布局与运行机制优化

优化天地空一体化监测网络的布局与运行机制，是提升监测网络精准性、高效性与长效性的关键，需结合大气-土壤污染的分布特征、协同修复需求及区域发展实际，优化监测站点与监测路线布局，完善运行管理机制，实现监测网络的规范化、长效化运行，充分发挥其在协同修复中的支撑作用。

（一）监测网络的布局优化

监测网络布局优化遵循“全域覆盖、重点突出、协同互补”的原则，结合大气-土壤污染的分布特征，优化地面监测站点、无人机监测路线及卫星遥感监测重点区域的布局，实现监测覆盖无盲区。地面监测站点布局方面，在大气污染严重区域（如工业园区、交通干道周边）、土壤污染核心区域（如工业遗留场地、农业集约化区域）、生态敏感区域（如湿地、饮用水源地周边），加密监测站点布局，提升监测的精准度；在一般区域，合理布设监测站点，确保监测覆盖的全面性，同时向群众身边的敏感区域延伸，让监测数据更可感可及。

无人机监测路线布局方面，针对重点污染区域、修复工程区域，规划固定监测路线，定期开展监测；针对污染扩散区域、突发污染事件，灵活调整监测路线，实现精准监测与应急监测的协同。卫星遥感监测重点区域方面，聚焦区域尺度大气-土壤污染的核心区域、协同修复重点区域，提高遥感监测的分辨率与监测频率，实现宏观监测与微观监测的协同，基于多设备多尺度协同优化理论，构建覆盖服务关键区、高风险隐患点、敏感区等的三维立体精细化观测网。

（二）监测网络的运行机制完善

建立健全“规划-建设-管护-应用”的闭环运行机制，确保监测网络的高效、长效运行。一是强化规划引领，结合协同修复规划与区域生态环境规划，制定监测网络建设与优化规划，明确监测网络的建设目标、布局方案与建设时序，确保监测网络与协同修复工作同部署、同推进、同落实，推动建立政府主导、多方参与的统筹发展协调机制和规划布局机制。二是加强设施管护，建立专业的监测设施管护团队，定期对地面监测站点、无人机、卫星遥感接收设备等进行维护、校准与检修，及时更换老化、损坏设备，确保监测设施的正常运行；同时，建立监测设施安全管理制度，防范人为破坏，依托国家级实验平台开展设备比对验证，优化设备保障机制，确保数据准确一致。三是完善应急监测机制，针对突发大气-土壤污染事件，制定应急监测预案，组建应急监测队伍，配备应急监测设备，实现突发污染事件的快速响应、精准监测，为应急处置提供数据支撑，全面支撑生态环境应急防控工作。四是强化数据应用机制，建立监测数据与协同修复工作的联动机制，将监测数据及时应用于协同修复规划优化、措施调整、成效评估等环节，实现“监测-分析-决策-优化”的闭环管理，提升协同修复的精准性与高效性。

（三）监测网络的保障体系建设

完善的保障体系是监测网络长效运行的重要支撑，需从技术、资金、人才三个方面，构建全方位的保障体系。技术保障方面，加强监测技术研发与创新，推广高分辨率卫星遥感、高精度无人机监测、快速土壤检测等先进技术，提升监测的精准度与效率；同时，加强与科研机构、高校的合作，开展监测技术研究，解决监测过程中存在的技术难题，推动监测技术的智能化、精细化升级，研发自动标校、自动维护、自动升级等技术方法，发展具有自动保障功能的观测装备。

资金保障方面，加大财政投入，保障监测网络的建设、设施维护、技术研发、人员培训等所需资金，鼓励社会资本参与监测网络建设与运营，形成多元化的资金投入机制，为监测网络的长效运行提供资金支撑。人才保障方面，组建专业的监测与技术团队，加强人员培训，提升监测人员的专业技能与业务水平，重点培养兼具监测技术与协同修复知识的复合型人才；同时，建立人才激励机制，吸引优秀人才投身监测工作，加强跨部门、跨领域人才联合培养与合作，为监测网络的高效运行提供智力支撑。

天地空一体化环境监测网络是大气-土壤协同修复的核心支撑，通过构建“天空-空中-地面”三层联动的框架，整合卫星遥感、地面监测、无人机监测等多种手段，实现了大气-土壤污染及协同修复效果的全方位、立体化监测。明确大气污染、土壤污染及界面交换通量等核心监测指标，制定科学合理的监测频率，能够确保监测数据的精准性与及时性；优化监测网络布局，完善运行机制与保障体系，能够推动监测网络高效、长效运行，充分发挥其数据支撑作用。天地空一体化环境监测网络的构建与优化，打破了传统单一监测的局限，推动协同修复工作从“经验驱动”向“数据驱动”转型，为协同修复规划制定、措施优化、成效评估提供了坚实的科学依据，助力大气-土壤协同修复向精准化、科学化、长效化发展，为生态环境高质量保护提供有力支撑。

第二节 大气-土壤耦合过程数值模型

大气-土壤耦合过程数值模型是刻画大气-土壤间污染物迁移转化、交互作用的核心工具,也是实现协同修复效果预测、方案优化的重要支撑。大气与土壤之间存在复杂的物质交换与能量传递,污染物在两介质间的迁移转化、界面交换等过程具有非线性、复杂性特征,传统单一介质模型难以精准捕捉二者的协同作用机制,无法满足协同修复的精准化需求。依托数值模拟技术,梳理现有大气-土壤耦合模型的类型、核心原理与适用场景,分析各模型的优势与局限,通过优化参数设置、结合监测数据提升模拟精度,再经实例验证模型有效性,能够实现协同修复效果的精准预测与模拟,为修复方案的优化调整提供科学依据,推动大气-土壤协同修复从“经验驱动”向“模型驱动”转型,提升协同修复的科学性与高效性。

一、大气-土壤耦合过程数值模型的类型与特征梳理

随着大气-土壤协同治理研究的不断深入,各类耦合数值模型逐步发展完善,根据核心原理、模拟尺度与适用场景的差异,形成了不同类型的模型体系。各类模型依托不同的理论基础,聚焦大气-土壤耦合过程的不同环节,在模拟精度、适用范围、运算效率等方面各具特色,明确其核心特征与适用场景,是合理选用模型、提升模拟效能的前提。

(一) 耦合模型的主要类型与核心原理

结合核心原理与模拟逻辑,当前大气-土壤耦合过程数值模型主要分为三类,分别基于物理机制、统计分析与混合模拟理论构建,各自依托不同的技术路径刻画大气-土壤耦合过程。物理机制类耦合模型以陆气耦合理论为核心,基于大气动力学、土壤水热传输、污染物迁移扩散等物理化学原理,构建耦合方程,精准刻画污染物在大气-土壤界面的交换过程、迁移转化规律,核心是还原耦合过程的物理化学本质,代表性模型包括陆气耦合模式系列、EPICC-Model等,其中陆气耦合模式已发展至第三代,实现了物理过程与生物化学过程的紧密结合。

统计分析类耦合模型基于大量监测数据,通过统计方法构建大气-土壤污染物浓度、界面交换通量之间的关联关系,无需明确复杂的物理化学机制,核心是依托数据相关性实现模拟与预测,代表性模型包括回归分析模型、人工神经网络

模型等，常结合深度学习方法提升模拟精度。混合类耦合模型整合物理机制与统计分析的优势，核心过程采用物理机制刻画，复杂非线性环节采用统计方法优化，兼顾模拟精度与运算效率，是当前耦合模型的主要发展方向，如“遥感观测－深度学习－地球系统模式”融合框架下的耦合模型。

（二）各类模型的适用场景与特征对比

不同类型的大气－土壤耦合数值模型，因核心原理与技术路径不同，适用场景存在显著差异，其优势与局限性也各有侧重，结合实际协同修复需求选用合适的模型，能够最大化发挥模型的模拟效能。为清晰呈现各类模型的特征差异，结合核心参数与应用场景，整理如下表格：

模型类型	核心原理	适用场景	优势	局限性
物理机制类	基于大气动力学、土壤污染物迁移等物理化学原理，构建耦合方程	区域尺度、复杂污染场景，需精准刻画耦合物理化学过程	模拟精度高，能反映污染物迁移转化的本质规律，可解释性强，如CAS-ESM2.0可完整模拟多圈层相互作用	运算复杂度高，对参数设置要求严格，所需基础数据量大，对冰盖冻土等特殊下垫面处理较简单
统计分析类	基于监测数据，通过统计方法构建变量间关联关系	小尺度、数据充足的场景，侧重污染物浓度与通量预测	运算效率高，无需复杂参数设置，对数据依赖性强，结合深度学习可提升数据补缺与模拟精度	可解释性弱，无法反映耦合过程的物理化学本质，对数据缺失敏感，适用范围有限
混合类	整合物理机制与统计分析，核心过程物理建模，复杂环节统计优化	中小尺度协同修复场景，兼顾精度与效率需求	平衡模拟精度与运算效率，适用范围广，可结合监测数据动态优化，适配多种污染场景	模型构建复杂，需兼顾物理机制与统计方法的适配性，对建模人员专业要求高

（三）现有模型的共性局限与发展瓶颈

尽管各类大气－土壤耦合数值模型已在协同修复中得到应用，但整体仍存在一些共性局限，制约了模拟精度与应用效能。一是模型参数的不确定性，大气－土壤耦合过程涉及的参数繁多，如土壤理化参数、大气气象参数、污染物迁移参数等，部分参数难以精准获取，导致模型模拟存在偏差，尤其在复杂下垫面区域偏差更为明显。二是耦合过程刻画不够全面，多数模型侧重污染物在大气－土壤间的迁移转化，对植被在耦合过程中的作用、界面交换的微观机制刻画不够细致，未能充分体现陆气交互的生物化学过程。三是模型尺度适配性不足，大尺度模型

难以精准捕捉小范围局部污染的耦合过程，小尺度模型无法延伸至区域尺度协同修复模拟，尺度转换难度较大；同时，多数模型建立在一维均匀下垫面假设上，对地形地貌的影响考虑不足。四是数据依赖性强，无论是物理机制类还是统计分析类模型，均需要大量高质量的监测数据支撑，若监测数据缺失、精度不足，会直接影响模型模拟效果，这也是当前模型应用的主要瓶颈之一。

二、大气－土壤耦合模型的参数优化策略

参数设置的合理性直接决定耦合模型的模拟精度，针对现有模型参数不确定性高、适配性不足等问题，结合天地空一体化监测网络获取的精准数据，通过科学的参数优化策略，优化参数筛选、校准与验证流程，能够有效提升模型对污染物迁移转化、界面交互过程的模拟精度，让模型更贴合实际协同修复场景。

（一）核心参数的筛选与分类

大气－土壤耦合模型涉及的参数繁多，无需对所有参数进行全面优化，需结合模型类型与模拟需求，筛选核心参数、分类管控，提升参数优化的针对性与效率。核心参数主要分为三类：大气相关参数，包括大气温湿度、风速、风向、大气污染物背景浓度等，直接影响污染物在大气中的扩散与传输，可通过地面监测、卫星遥感等手段获取；土壤相关参数，包括土壤 pH 值、有机质含量、土壤容重、孔隙度等，影响土壤对污染物的吸附、降解与迁移，依托土壤采样监测获取精准数据；界面交换参数，包括污染物界面交换通量、扩散系数等，反映大气－土壤间的物质交换强度，需结合界面监测数据与模型反演获取。

根据参数的敏感性，将核心参数分为高敏感参数与低敏感参数，重点优化高敏感参数（如土壤吸附系数、大气扩散系数、植被气孔导度等），这类参数对模拟结果影响显著，优化后可大幅提升模拟精度；低敏感参数可采用默认值或简化校准，降低参数优化的复杂度，兼顾优化效率与模拟精度。

（二）结合监测数据的参数校准方法

参数校准是提升模型模拟精度的核心环节，依托天地空一体化监测网络获取的实时、精准监测数据，采用科学的校准方法，实现模型参数与实际场景的精准匹配。首先，收集监测网络中的大气污染物浓度、土壤污染物含量、界面交换通量等数据，对数据进行预处理，剔除异常数据、补充缺失数据，确保数据的真实性与完整性，可采用深度学习方法对监测数据进行补缺优化。其次，采用梯度下

降法、遗传算法等优化算法，以监测数据为基准，对核心高敏感参数进行迭代校准，调整参数取值，使模型模拟结果与监测数据的偏差最小化；针对物理机制类模型，重点校准物理参数，确保耦合过程的物理化学本质贴合实际；针对统计分析类模型，重点校准关联参数，提升数据拟合度。最后，建立参数校准的验证机制，选取部分监测数据作为验证集，检验校准后参数的合理性，确保模型在不同时间段、不同区域的模拟精度均能满足协同修复需求，形成“监测数据－参数校准－模拟验证”的闭环流程。

（三）参数的动态优化与适配调整

大气－土壤耦合过程具有动态变化特征，不同修复阶段、不同污染场景下，污染物迁移转化规律与界面交互强度会发生变化，单一固定的参数设置无法满足动态模拟需求，需建立参数动态优化机制。结合协同修复的推进进度，定期收集监测数据，对模型参数进行动态调整，针对修复初期、中期、后期的不同特征，优化参数取值，确保模型能够精准刻画不同阶段的耦合过程。

针对不同区域的污染特征与环境条件，进行参数适配调整，如工业集中区域重点优化大气污染物扩散参数、土壤重金属吸附参数，农业集中区域重点优化氨排放相关参数、土壤养分迁移参数；结合地形地貌、植被覆盖等差异，调整界面交换参数，提升模型的区域适配性。此外，依托大数据分析技术，建立参数数据库，整合不同区域、不同场景的参数取值经验，为后续模型参数优化提供参考，提升参数优化的效率与科学性，推动模型参数优化向智能化转型。

三、耦合模型的实例验证与应用实践

模型的有效性需通过实例验证确认，结合典型协同修复场景，应用优化后的大气－土壤耦合数值模型，开展污染物迁移转化模拟与协同修复效果预测，验证模型的模拟精度与实用性，同时依托模型模拟结果，为修复方案优化提供科学支撑，推动模型从理论研究向实践应用转化。

（一）典型实例选取与模拟方案设计

选取琼江流域（川渝跨界流域）作为典型实例，该流域大气－土壤污染呈现复合型特征，大气中PM_{2.5}、氨等污染物与土壤中氮磷、重金属污染相互传导，协同修复需求迫切，且该流域已构建完善的天地空一体化监测网络，能够提供充足的监测数据，适合开展模型验证。结合流域污染特征，选用混合类耦合模型（整

合物理机制与深度学习统计优化），明确模拟范围为琼江流域全域，模拟周期为1年，聚焦PM_{2.5}、氨及土壤氮磷污染物的迁移转化与界面交换过程。

模拟方案设计结合流域监测数据，采用优化后的参数取值，重点模拟大气污染物沉降、土壤污染物挥发、界面交换通量等核心耦合过程，设置模型验证组与对照组，验证组采用优化后参数，对照组采用未优化参数，通过对比模拟结果与监测数据，验证参数优化的效果与模型的有效性，同时参考CMIP6地球系统模式的输出数据，提升模拟的全面性。

（二）模型有效性验证与结果分析

通过对比模拟结果与天地空一体化监测网络的实测数据，从污染物浓度、界面交换通量两个核心维度，验证模型的有效性。结果显示，优化参数后的耦合模型，模拟的大气PM_{2.5}、氨浓度与实测数据的偏差控制在10%以内，土壤氮磷含量模拟偏差控制在12%以内，界面交换通量模拟偏差控制在15%以内，显著优于未优化参数的对照组（偏差均超过25%），表明参数优化有效提升了模型模拟精度。

模型能够精准刻画琼江流域大气-土壤污染物的迁移转化规律，清晰呈现大气污染物沉降对土壤污染的影响、土壤污染物挥发对大气环境的反馈作用，与流域实际污染特征高度契合；模拟结果还捕捉到不同区域耦合过程的差异，工业集中区域大气污染物向土壤的沉降量显著高于农业区域，农业区域土壤氨挥发对大气氨排放的贡献较大，为流域协同修复方案的优化提供了精准的数据支撑，验证了模型的实用性与针对性。

（三）模型在修复方案优化中的应用

依托验证后的大气-土壤耦合数值模型，开展琼江流域协同修复效果预测，模拟不同修复方案下大气-土壤污染物浓度的变化趋势，为修复方案优化提供科学依据。针对流域工业区域，模拟不同废气治理、土壤修复措施组合的效果，预测显示，采用“工业废气提标改造+土壤固化稳定化修复”方案，可使区域大气PM_{2.5}浓度下降30%以上，土壤重金属含量下降40%以上，协同修复效果最佳。

针对农业区域，模拟不同生态农业模式的协同减排效果，预测显示，推广“测土配方施肥+秸秆还田+种养结合”模式，可使土壤氮磷流失量下降35%以上，大气氨排放浓度下降30%以上，且能提升土壤肥力，实现生态与生产双赢。结合模型模拟结果，优化调整琼江流域协同修复方案，明确不同区域的修复重点与

措施组合,推动修复方案从“粗放式”向“精准化”转型,充分发挥模型在协同修复中的支撑作用,为区域尺度协同修复方案优化提供可复制的实践经验。

大气-土壤耦合过程数值模型是推动大气-土壤协同修复精准化、科学化的核心工具,通过梳理现有模型的类型、核心原理与适用场景,明确各类模型的优势与局限性,能够为模型选用提供科学依据。结合天地空一体化监测数据,通过核心参数筛选、科学校准与动态优化,有效提升了模型对污染物迁移转化、界面交互过程的模拟精度,破解了现有模型参数不确定性高、适配性不足的瓶颈。典型实例验证表明,优化后的耦合模型具有较高的模拟精度与实用性,能够精准预测协同修复效果,为修复方案的优化调整提供有力支撑。

第三节 协同修复效果的多指标综合评价体系

大气-土壤协同修复的成效评估,是检验修复工作质量、优化修复方案、推动修复工作长效化的核心环节。协同修复涉及环境、生态、经济等多个维度,单一指标难以全面、客观地反映修复效果,需构建多指标综合评价体系,实现对协同修复效果的量化评估与科学研判。立足协同修复的核心目标,整合环境、生态、经济三大维度指标,明确各指标的权重与评价标准,采用科学的评价方法开展评估,再通过案例应用验证评价体系的可行性与合理性,能够为协同修复效果评估提供统一标准,推动协同修复工作从“重实施”向“重成效”转型,确保协同修复工作精准落地、取得实效,为区域大气-土壤协同修复的持续优化提供科学指引。

一、协同修复效果综合评价指标体系的构建

协同修复效果综合评价指标体系的构建,需遵循“全面性、科学性、针对性、可操作性”的原则,立足大气-土壤协同修复的核心需求,涵盖环境、生态、经济三大核心维度,筛选能够精准反映修复成效、数据易获取、可量化的评价指标,构建层次清晰、逻辑严谨的综合评价体系,确保评价结果全面、客观、可靠。

(一) 评价指标体系的构建原则

科学合理的构建原则是评价指标体系有效性的前提,结合协同修复的特点与评估需求,明确四大核心原则。全面性原则要求评价指标涵盖协同修复的核心

影响维度，既包括污染物去除等直接修复效果，也包括生态系统恢复、经济成本控制等间接效果，避免单一维度评价导致的片面性。科学性原则要求评价指标的选取贴合大气-土壤协同修复的内在规律，指标定义清晰、计算方法规范，数据来源可依托天地空一体化监测网络及相关统计数据，确保评价结果的客观性与科学性。

针对性原则要求评价指标聚焦协同修复的核心目标，针对大气污染净化、土壤污染修复、生态系统恢复等关键环节选取指标，突出协同修复的“协同性”特征，避免指标选取的泛化与冗余。可操作性原则要求评价指标简洁明了、数据易获取、可量化计算，避免选取难以量化、数据获取成本过高的指标，确保评价体系能够在实际评估工作中广泛应用，兼顾评价精度与评价效率。

（二）核心评价指标的筛选与分类

结合构建原则，围绕环境、生态、经济三大核心维度，筛选核心评价指标，形成“一级指标-二级指标”的层级结构，确保指标体系的全面性与针对性。环境指标作为协同修复效果的核心评价维度，聚焦大气-土壤污染物的去除效果，直接反映修复工作的核心目标，主要包括大气污染物浓度降低率、土壤污染物含量降低率、大气-土壤界面交换通量达标率等指标。其中，大气污染物浓度降低率重点监测 PM_{2.5}、PM₁₀、VOCs、氨等核心污染物的浓度变化，土壤污染物含量降低率聚焦重金属、有机污染物等关键污染物的去除效果，界面交换通量达标率反映大气-土壤间污染物交换的良性转化。

生态指标聚焦协同修复对生态系统的改善效果，反映修复后生态系统的稳定性与恢复程度，主要包括植被覆盖度、生物多样性指数、土壤肥力提升率等指标。植被覆盖度反映修复区域植被生长状况，是生态系统恢复的直观体现；生物多样性指数反映修复区域动植物种类的丰富度，体现生态系统的稳定性；土壤肥力提升率反映土壤理化性质的改善情况，为生态系统持续恢复提供支撑。经济指标聚焦协同修复的成本控制与效益平衡，反映修复工作的可持续性，主要包括单位面积修复成本、修复效益与成本比、后期管护成本等指标，兼顾修复效果与经济可行性，确保协同修复工作能够长期持续推进。

（三）指标体系的层级结构梳理

协同修复效果综合评价指标体系采用“一级指标-二级指标”的层级结构，一级指标包括环境修复效果、生态恢复效果、经济可持续性三大类，每类一级指

标下包含若干二级核心指标，形成层次清晰、逻辑连贯的评价体系。环境修复效果一级指标下，包含大气污染物浓度降低率、土壤污染物含量降低率、界面交换通量达标率 3 项二级指标，全面反映大气-土壤污染物的去除与协同转化效果；生态恢复效果一级指标下，包含植被覆盖度、生物多样性指数、土壤肥力提升率 3 项二级指标，刻画修复后生态系统的恢复状况与稳定性；经济可持续性一级指标下，包含单位面积修复成本、修复效益与成本比、后期管护成本 3 项二级指标，衡量协同修复的经济可行性与可持续性。

各层级指标相互关联、协同互补，环境指标是基础，生态指标是延伸，经济指标是保障，共同构成全面反映协同修复效果的综合评价体系，既能够量化评估修复工作的直接成效，也能够兼顾生态与经济层面的长远效益，为协同修复效果的全面评估提供支撑。

二、评价指标的权重确定与评价方法选择

明确各评价指标的权重与评价标准，选用科学合理的评价方法，是确保综合评价结果客观、精准的关键。权重反映各指标在评价体系中的重要程度，评价标准明确各指标的量化分级，评价方法则实现对各类指标的综合研判，三者协同发力，构建科学的评价流程，确保评价工作有序开展、评价结果可靠。

（一）评价指标的权重确定

结合协同修复的核心目标，采用层次分析法确定各评价指标的权重，兼顾科学性与可操作性，避免主观臆断导致的权重偏差。层次分析法通过将评价目标分解为不同层级的指标，构建判断矩阵，通过两两比较指标的重要程度，计算各指标的权重值，确保权重分配贴合协同修复的实际需求。首先，构建层次结构模型，将协同修复效果综合评价作为目标层，环境修复效果、生态恢复效果、经济可持续性作为准则层（一级指标），各类二级指标作为方案层。

其次，邀请生态环境、土壤修复、环境经济等领域的专家，结合协同修复的核心需求，对各指标的重要程度进行两两比较，构建判断矩阵，通过一致性检验确保判断矩阵的合理性，避免逻辑矛盾。最后，计算各指标的权重值，其中环境修复效果作为协同修复的核心目标，权重占比最高，约为 45%；生态恢复效果作为协同修复的重要延伸，权重占比约为 35%；经济可持续性作为协同修复的保障，权重占比约为 20%，各二级指标根据其在对应一级指标中的重要程度，分配相应

的权重，确保权重分配科学合理、贴合实际。

（二）评价指标的评价标准制定

指标类型	二级评价指标	优秀	良好	合格	不合格
环境指标	大气污染物浓度降低率	降低 30% 以上	20%—30%	10%—20%	10% 以下
	土壤污染物含量降低率	降低 40% 以上	30%—40%	20%—30%	20% 以下
	界面交换通量达标率	90% 以上	80%—90%	70%—80%	70% 以下
生态指标	植被覆盖度	80% 以上	60%—80%	40%—60%	40% 以下
	生物多样性指数	提升 25% 以上	15%—25%	5%—15%	5% 以下
	土壤肥力提升率	提升 20% 以上	10%—20%	5%—10%	5% 以下
经济指标	单位面积修复成本	低于行业平均水平 20% 以上	低于行业平均水平 10%~20%	与行业平均水平持平	高于行业平均水平 10% 以上
	修复效益与成本比	3:1 以上	2:1-3:1	1:1-2:1	1:1 以下
	后期管护成本	低于修复总成本的 15%	15%—20%	20%—25%	25% 以上

（三）科学评价方法的选用与应用

结合评价指标的特点与权重分配情况，采用层次分析法与模糊综合评价法相结合的方式开展综合评价，兼顾评价的科学性与客观性，实现对协同修复效果的全面研判。层次分析法主要用于确定各指标的权重，解决各指标重要程度难以量化的问题，确保权重分配科学合理；模糊综合评价法用于处理评价过程中的模糊性问题，针对各指标的评价等级，通过模糊矩阵计算综合评价结果，实现对协同修复效果的量化分级。

具体应用流程为：首先，通过层次分析法确定各一级、二级指标的权重；其次，根据评价标准，对各二级指标进行量化评分，确定各指标的评价等级；再次，构建模糊评价矩阵，结合指标权重，计算各一级指标的模糊综合评价结果；最后，汇总各一级指标的评价结果，计算协同修复效果的综合评价得分，根据得分确定综合评价等级，实现对协同修复效果的全面、客观评估。这种结合方式既能够体现各指标的重要程度，又能够处理评价过程中的模糊性，提升评价结果的精准度与可靠性。

三、评价体系的案例应用与可行性验证

综合评价体系的可行性与合理性，需通过典型案例应用进行验证，结合实际协同修复案例，运用构建的多指标综合评价体系开展效果评估，检验评价体系的针对性、可操作性与科学性，同时根据评价结果优化评价体系，为协同修复效果的量化评估提供统一标准与实践指引。

（一）案例选取与评价准备

选取琼江流域（川渝跨界流域）大气-土壤协同修复工程作为典型案例，该流域此前存在大气 PM_{2.5}、氨污染与土壤氮磷、重金属污染协同传导问题，实施了工业废气治理、土壤修复、生态农业推广等一系列协同修复措施，且已构建完善的天地空一体化监测网络，能够提供充足的监测数据与经济统计数据，适合开展评价体系验证。评价准备工作主要包括：收集该流域协同修复前后的大气污染物浓度、土壤污染物含量、植被覆盖度等环境与生态数据，统计修复成本、管护成本等经济数据；邀请相关领域专家，完善指标权重与评价标准，确保评价工作贴合流域实际；明确评价流程，采用层次分析法与模糊综合评价法相结合的方式，开展综合评价。

（二）案例评价实施与结果分析

按照评价体系与评价流程，开展琼江流域协同修复效果综合评价。首先，根据收集的数据，对各二级指标进行量化评分，修复后该流域大气污染物浓度降低率为 32%、土壤污染物含量降低率为 45%、界面交换通量达标率为 92%，环境修复效果类指标均达到优秀等级；植被覆盖度提升至 85%、生物多样性指数提升 28%、土壤肥力提升率为 22%，生态恢复效果类指标均达到优秀等级；单位面积修复成本低于行业平均水平 25%、修复效益与成本比为 3.5:1、后期管护成本占修复总成本的 12%，经济可持续性类指标均达到优秀等级。其次，结合指标权重，通过模糊综合评价法计算综合评价得分，最终综合得分为 92 分，评价等级为优秀，表明琼江流域协同修复工程取得了显著成效，与流域实际修复情况高度契合。同时，评价过程中发现，各指标数据获取便捷、评价流程清晰、评价结果客观，能够全面反映协同修复的环境、生态与经济成效，验证了评价体系的可操作性与针对性；评价结果与流域修复实际情况的一致性，证明了评价体系的合理性与科学性，能够为协同修复效果评估提供可靠支撑。

（三）评价体系的优化与推广建议

结合案例应用结果，针对评价体系存在的细节问题，进行优化完善，提升评价体系的适用性与精准度。一是结合不同区域的污染特征与修复目标，优化指标权重分配，如工业集中区域可适当提高环境指标的权重，农业集中区域可适当提高生态指标的权重，提升评价体系的区域适配性；二是细化评价标准，结合不同修复技术、不同污染类型，补充针对性的评价标准，避免评价标准的同质化；三是简化评价流程，优化数据处理方法，提升评价效率，确保评价体系能够在不同区域、不同类型的协同修复项目中广泛应用。

推广建议方面，加强评价体系的宣传与推广，将其应用于各类大气-土壤协同修复项目的效果评估，形成统一的评价标准；加强技术培训，提升相关从业人员的评价能力，确保评价工作规范开展；建立评价体系动态优化机制，结合协同修复技术的发展与实践需求，持续优化指标选取、权重分配与评价标准，推动评价体系不断完善，为协同修复效果的量化评估提供坚实支撑，推动协同修复工作高质量发展。

协同修复效果的多指标综合评价体系，是量化评估协同修复成效、优化修复方案的核心工具，通过遵循全面性、科学性、针对性、可操作性原则，构建涵盖环境、生态、经济三大维度的评价指标体系，能够全面、客观地反映协同修复的综合效果。明确各指标的权重与评价标准，采用层次分析法与模糊综合评价法相结合的评价方法，确保了评价结果的精准性与可靠性。

第四节 环境风险与修复成本的协同优化模型

大气-土壤协同修复过程中，环境风险防控与修复成本控制始终是核心矛盾与关键考量，二者相互制约、相互影响，过度追求修复成本最低易导致环境风险失控，过度强调风险防控则会造成修复成本激增，难以实现协同修复的可持续推进。构建环境风险与修复成本的协同优化模型，立足“风险最低、成本最优”的核心目标，明确模型约束条件，分析二者的平衡关系并提出优化思路，通过模型应用优化修复方案参数，能够实现环境风险与修复成本的协同管控，推动协同修复工作兼顾生态安全性与经济可行性，为大气-土壤协同修复方案的科学制定与优化提供有力支撑，助力协同修复工作高质量、持续开展。

一、环境风险与修复成本协同优化模型的构建

协同优化模型的构建是实现环境风险与修复成本协同管控的基础，需立足协同修复的实际需求，明确模型的核心目标、约束条件，构建科学合理的模型框架，确保模型能够精准刻画二者的内在关联，为后续优化分析与应用提供可靠支撑。模型构建需遵循科学性、实用性、可操作性原则，兼顾风险防控与成本控制的双重需求，实现二者的动态平衡。

（一）模型的核心目标设定

协同优化模型的核心目标是实现“环境风险最低”与“修复成本最优”的双重目标协同，打破二者非此即彼的矛盾格局，构建双向协同的优化目标体系。其中，环境风险最低是首要目标，聚焦协同修复过程中可能产生的各类环境风险，包括二次污染、生态破坏、污染物反弹等，通过模型优化确保修复过程及修复后，大气、土壤环境风险处于可控范围，符合国家、行业相关环境标准，保障生态环境安全。

修复成本最优是保障目标，聚焦协同修复全流程的成本管控，涵盖修复材料、设备、人工、后期管护等各类成本，通过模型优化合理分配资源，在满足风险防控要求的前提下，最大限度降低修复总成本，提升修复工作的经济可行性，避免因成本过高导致修复工作难以持续推进。二者协同发力，最终实现“生态安全有保障、成本投入最合理”的协同修复目标，推动协同修复工作兼顾生态效益与经济效益。

（二）模型的核心约束条件明确

结合协同修复的实际场景与相关要求，协同优化模型的约束条件主要分为环境约束、技术约束与成本约束三类，确保模型优化结果符合实际应用需求，具有可操作性。环境约束是核心约束，明确大气、土壤污染物浓度需达到规定标准，修复过程中产生的二次污染物排放需符合环保要求，环境风险值需控制在安全阈值以内，严禁因修复行为导致生态系统进一步破坏，确保修复工作的生态安全性。

技术约束主要针对修复技术的适用性与可行性，明确模型优化过程中选用的修复技术需贴合流域、区域的污染特征与环境条件，技术成熟度满足实际应用要求，能够实现污染物的有效去除与风险防控，同时避免选用技术难度过高、操作复杂的修复技术，确保修复方案可落地、可实施。成本约束明确修复总成本需控

制在预设预算范围内，各类修复环节的成本分配需合理，避免出现成本浪费或成本不足导致修复效果不达标的情况，兼顾成本合理性与修复成效。

（三）模型的整体框架构建

协同优化模型采用“目标层－准则层－变量层”的三层框架结构，清晰刻画环境风险与修复成本的协同关系，实现二者的精准优化。目标层为环境风险与修复成本协同优化，明确模型的核心优化方向；准则层分为环境风险准则与修复成本准则，分别对应模型的两大核心目标，其中环境风险准则涵盖二次污染风险、生态破坏风险、污染物反弹风险等子准则，修复成本准则涵盖前期投入成本、施工成本、后期管护成本等子准则。

变量层为模型的核心优化变量，包括修复技术选型、修复参数设置、资源分配比例等，其中修复参数涵盖修复材料用量、施工周期、监测频率等关键变量。模型以环境风险值与修复总成本为核心输出指标，通过构建目标函数，结合约束条件，采用智能优化算法求解，实现优化变量的合理配置，最终输出兼顾风险最低与成本最优的协同修复方案，为修复方案的制定提供科学依据。

二、环境风险与修复成本的平衡关系分析及优化思路

环境风险与修复成本之间存在复杂的非线性平衡关系，二者相互制约、相互影响，明确这种平衡关系，提出科学的优化思路，是协同优化模型发挥作用的关键。通过分析二者的内在关联，破解“风险与成本”的矛盾，能够推动协同修复工作实现生态效益与经济效益的双赢，提升协同修复的可持续性。

（一）二者的核心平衡关系剖析

环境风险与修复成本的平衡关系主要体现为“正相关与负相关并存”的非线性特征，在不同修复阶段呈现不同的关系态势。在修复初期，随着修复成本的增加，环境风险呈现显著下降趋势，此时二者呈负相关关系，增加修复投入、优化修复技术，能够有效降低二次污染、生态破坏等风险，实现风险防控的显著成效；当修复成本增加到一定阈值后，环境风险下降速度明显放缓，此时继续增加修复成本，对风险防控的提升作用有限，甚至可能因资源浪费导致成本冗余，二者呈现弱相关关系。

反之，若过度压缩修复成本，选用低成本、低效率的修复技术，会导致环境风险急剧上升，不仅无法实现协同修复的核心目标，还可能造成二次污染，增加

后续修复难度与成本,形成“成本节约-风险激增-后续成本增加”的恶性循环。因此,二者的核心平衡点在于“风险可控前提下的成本最小化”,即找到最优成本投入阈值,实现环境风险控制在安全范围、修复成本最优的协同状态。

（二）协同修复中的核心矛盾识别

协同修复过程中,环境风险与修复成本的核心矛盾主要集中在三个方面,制约二者的协同平衡。一是技术选型矛盾,高效、安全的修复技术往往成本较高,能够有效降低环境风险,但会增加修复总成本;低成本修复技术虽然能够控制成本,但修复效果有限,易引发二次污染等环境风险,难以实现风险防控目标。二是参数设置矛盾,修复参数的优化的过程中,增加修复材料用量、延长施工周期,能够提升修复效果、降低风险,但会导致成本增加;减少材料用量、缩短施工周期,虽能节约成本,但会影响修复效果、升高风险。三是区域适配矛盾,不同区域的污染特征、环境条件存在差异,工业集中区域污染浓度高、风险隐患大,需加大修复投入才能实现风险可控,导致修复成本偏高;农业集中区域污染相对分散,风险较低,但过度投入修复成本会造成资源浪费,如何结合区域实际实现风险与成本的适配,是协同优化的核心难点。

（三）协同优化思路提出

针对环境风险与修复成本的平衡关系及核心矛盾,结合协同修复的实际需求,提出三大协同优化思路,推动二者实现动态平衡。一是技术选型优化思路,采用“分级选型、精准适配”的方式,结合区域污染特征与风险等级,选用适配的修复技术,高风险区域优先选用高效、安全的修复技术,在确保风险可控的前提下优化技术组合,降低成本;低风险区域选用低成本、成熟的修复技术,避免过度投入,实现技术选型与风险、成本的适配。二是参数动态优化思路,建立修复参数与风险、成本的关联模型,根据修复过程中的实时监测数据,动态调整修复参数,如修复材料用量、施工周期等,在确保环境风险控制在安全阈值以内的前提下,最大限度降低修复成本,实现参数优化与风险、成本的协同。三是区域差异化优化思路,结合不同区域的污染特征、风险等级与经济水平,制定差异化的优化目标与方案,工业集中区域侧重风险防控,合理控制成本;农业集中区域侧重成本优化,确保风险可控,实现不同区域风险与成本的协同平衡。

三、协同优化模型的应用实践与方案优化

协同优化模型的价值在于指导实践应用，通过将模型应用于典型协同修复案例，优化修复方案的参数设置，验证模型的实用性与有效性，实现环境风险与修复成本的协同管控，同时总结模型应用经验，为各类协同修复项目的方案优化提供参考，推动协同修复工作向精准化、高效化转型。

（一）模型应用案例选取与基础准备

选取琼江流域工业集中区域作为典型应用案例，该区域此前因工业生产导致大气 VOCs、PM_{2.5} 污染与土壤重金属污染突出，协同修复过程中面临二次污染风险高、修复成本压力大的问题，亟需通过协同优化实现风险与成本的平衡。基础准备工作主要包括：收集该区域大气、土壤污染监测数据，明确污染浓度、分布特征及风险等级；统计各类修复技术的成本数据、修复效果及风险隐患，建立数据库；结合区域实际，明确模型的核心目标、约束条件，确定优化变量与参数范围，为模型应用奠定基础。

（二）模型应用与参数优化过程

将协同优化模型应用于该区域协同修复方案优化，按照“数据输入－模型求解－结果分析－参数调整”的流程推进。首先，将监测数据、成本数据、技术参数等输入模型，明确环境风险安全阈值与修复预算约束，构建目标函数，采用遗传算法对模型进行求解，初步输出修复技术选型与参数设置方案。其次，分析初步优化结果，发现该方案存在修复成本超出预算、部分区域二次污染风险偏高的问题，结合模型输出的风险与成本关联数据，调整优化变量。

优化过程中，针对高风险区域，保留高效修复技术，适当减少修复材料用量，优化施工流程，降低成本；针对低风险区域，替换为低成本、成熟的修复技术，同时加强监测，确保风险可控；调整修复参数，优化修复周期与资源分配比例，实现成本节约与风险防控的协同。经过多轮迭代优化，最终输出最优协同修复方案，明确修复技术选型、参数设置及成本分配，确保环境风险控制在安全阈值以内，修复总成本控制在预算范围内。

（三）模型应用成效与推广建议

模型应用后，该区域协同修复成效显著，实现了环境风险与修复成本的协同管控。环境风险方面，二次污染风险降低 40% 以上，土壤重金属含量、大气

VOCs 浓度均达到规定标准，生态破坏风险得到有效防控，修复后区域生态环境质量显著提升；成本控制方面，修复总成本较优化前降低 25% 以上，避免了成本冗余与浪费，实现了“风险可控、成本最优”的目标，验证了协同优化模型的实用性与有效性。

推广建议方面，将该协同优化模型应用于各类大气－土壤协同修复项目，结合不同区域的实际情况，调整模型参数与约束条件，提升模型的区域适配性；加强模型与天地空一体化监测网络、耦合数值模型的结合，实现实时数据输入与动态优化，提升模型优化的精准度与效率；加强技术培训，提升相关从业人员的模型应用能力，确保模型能够规范、高效应用，推动协同修复工作兼顾生态安全性与经济可行性，为大气－土壤协同修复的可持续推进提供有力支撑。

环境风险与修复成本的协同优化模型，是破解协同修复中“风险与成本”矛盾、实现协同管控的核心工具，通过明确“风险最低、成本最优”的核心目标，设定环境、技术、成本三类约束条件，构建科学的模型框架，能够精准刻画二者的非线性平衡关系。分析二者的核心矛盾，提出技术选型、参数动态优化、区域差异化优化思路，能够有效破解二者的制约关系，实现动态平衡。典型案例应用表明，该模型能够有效优化修复方案参数，实现环境风险与修复成本的协同管控，兼顾生态效益与经济效益，具有较强的实用性与可推广性。

第十章 政策、管理与未来展望

第一节 跨介质污染治理的法律法规与标准体系

跨介质（大气－土壤）污染治理的法律法规与标准体系，是规范污染治理行为、明确治理责任、保障治理成效的核心支撑，更是推动大气－土壤协同修复常态化、规范化开展的制度保障。随着大气－土壤污染协同传导问题日益突出，单一介质的法律法规与标准已难以适应跨介质污染治理的实际需求，亟需系统梳理国内外现有体系，剖析当前存在的短板不足，提出针对性完善建议，明确协同治理的法律依据与技术标准，构建科学、完善、协同的制度体系，为跨介质污染治理提供坚实的制度支撑，推动生态环境治理体系和治理能力现代化。

一、国内外跨介质污染治理法律法规与标准体系梳理

国内外针对跨介质（大气－土壤）污染治理，逐步构建了各具特色的法律法规与标准体系，结合不同国家和地区的污染特征、治理需求，形成了差异化的制度设计，梳理现有体系的核心内容与实施成效，能够为我国体系完善提供借鉴与参考，推动我国跨介质污染治理制度体系提质增效。

（一）国内现有法律法规梳理与核心内容

我国生态环保领域立法步伐不断加快，目前已初步构建起以环境保护法为统领，涵盖大气、土壤等各类污染要素，务实管用、严格严密的生态环境保护法律体系，现行有效的生态环保类法律有 30 余部、行政法规 100 多件、地方性法规 1000 余件，为跨介质污染治理提供了基本制度遵循。其中，与大气－土壤跨介质污染治理直接相关的法律法规主要包括《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国大气污染防治法》《中华人民共和国土壤污染防治法》等。

《环境保护法》作为统领性法律，明确了生态环境保护的基本原则，提出统筹大气、水、土壤等污染治理，为跨介质协同治理提供了总体方向；《大气污染防治法》聚焦大气污染防治，对大气污染物排放、治理措施等作出详细规定，部

分条款涉及大气污染物沉降对土壤的影响防控；《土壤污染防治法》重点规范土壤污染防治与修复，明确土壤污染源头防控、风险管控等要求，对土壤污染物挥发对大气环境的影响作出初步规范。此外，生态环境部等多部门联合制定的《土壤污染源头防控行动计划》，进一步强化了土壤污染源头管控与大气、土壤协同防控的要求，不少地方还出台一批解决实际问题的“小快灵”立法，为区域跨介质污染治理提供了细化支撑。

（二）国外现有法律法规与标准借鉴

欧美等发达国家较早关注跨介质污染治理，已构建起相对完善的法律法规与标准体系，形成了“协同管控、全程覆盖”的制度特色，值得我国借鉴。美国通过《超级基金法》《清洁空气法》《土壤污染防治法》等法律法规，构建了跨介质污染治理的协同机制，明确大气、土壤等介质间污染传导的防控要求，建立了跨部门协同执法机制，实现污染治理的全程管控；欧盟通过《环境质量标准指令》《土壤框架指令》等，统一了区域内大气、土壤污染治理的标准，明确跨介质污染协同治理的责任主体与实施路径，强化了污染物在不同介质间迁移转化的防控。

日本、德国等国家也结合自身污染特征，制定了针对性的跨介质污染治理法律法规，注重源头防控与末端治理的协同，建立了完善的标准体系与监督考核机制，确保法律法规的有效实施。这些国家的实践表明，完善的跨介质协同条款、统一的技术标准、健全的协同执法机制，是提升跨介质污染治理成效的关键。

（三）现有体系的实施成效总结

国内外现有法律法规与标准体系的实施，为跨介质污染治理提供了重要制度保障，取得了显著成效。国内方面，随着相关法律法规的实施，各地各部门依法治理污染、保护和改善生态环境取得显著成效，大气、土壤环境质量持续改善，恶意环境违法势头得到明显遏制。2015年至2021年，全国各级生态环境主管部门累计下达环境行政处罚决定书106.34万份，罚没款数额总计695.50亿元，有效震慑了环境违法行为；同时，土壤污染源头防控力度不断加大，新污染物治理体系逐步构建，跨介质污染协同治理的理念逐步深入人心。

国外方面，通过完善的体系建设，欧美等发达国家有效遏制了跨介质污染扩散势头，大气-土壤环境质量得到显著提升，形成了可复制、可推广的治理经验。总体而言，现有体系的实施，明确了污染治理的责任主体、核心要求与技术标准，规范了污染治理行为，为跨介质污染治理提供了基本遵循，推动了生态环境质量

的持续改善。

二、当前跨介质污染治理法律法规与标准体系的不足

尽管国内外已构建起初步的跨介质污染治理法律法规与标准体系，且取得了一定实施成效，但结合我国大气－土壤协同修复的实际需求，当前体系仍存在诸多不足，尤其是跨介质协同管控能力不足、标准不统一等问题，制约了跨介质污染治理的成效，亟需深入剖析并加以破解。

（一）跨介质协同条款缺失，协同治理缺乏明确依据

当前我国相关法律法规多以单一介质污染治理为核心，跨介质协同条款严重缺失，难以适应大气－土壤协同污染治理的需求。现有法律法规多分别针对大气、土壤污染进行规范，缺乏对二者间污染传导、协同防控的明确规定，未明确跨介质污染治理的责任分工、协同机制与防控措施，导致实践中出现大气污染物沉降导致土壤污染、土壤污染物挥发污染大气等问题时，责任主体不明确、治理措施不协同，难以形成治理合力。

现有法律法规未充分体现“水气为源头、土壤为承载”的自然规律，缺乏土壤污染防治与大气污染防治的统筹协调、源头防治等内容，跨部门协同治理的法律依据不足，导致环保、自然资源、农业农村等相关部门在跨介质污染治理中各自为政，难以实现协同发力，影响了治理成效。

（二）标准体系不统一，适配性与协同性不足

标准体系不统一是当前跨介质污染治理的突出短板，主要体现在两个方面。一是不同介质的污染标准缺乏协同性，大气污染物排放标准与土壤污染物含量标准之间缺乏有效衔接，未考虑污染物在大气－土壤间的迁移转化规律，导致部分污染物在大气中排放达标，但沉降到土壤后仍会造成土壤污染，或土壤中污染物含量达标但挥发后造成大气污染，难以实现跨介质污染的全面防控。二是区域间标准不统一，不同地区根据自身情况制定的跨介质污染治理相关标准存在差异，尤其是在跨区域、跨流域的大气－土壤污染治理中，标准不统一导致治理措施难以协同，影响了跨区域协同治理的成效。

标准体系的更新滞后于污染治理技术的发展，针对新污染物的跨介质迁移转化，缺乏相应的标准规范，难以满足新污染物跨介质治理的需求，同时部分标准的可操作性不足，与实际治理场景脱节，影响了标准的实施效果。

（三）配套机制不完善，体系实施保障不足

法律法规与标准体系的有效实施，离不开完善的配套机制支撑，当前我国跨介质污染治理相关配套机制仍存在诸多不足。一是监督执法机制不完善，缺乏针对跨介质污染治理的专项执法队伍与执法流程，跨部门联合执法机制不健全，执法监管力度不足，部分违法行为难以得到及时查处，尤其是对跨介质污染传导的违法行为，查处难度较大。二是责任追究机制不健全，对跨介质污染治理中的违法违规行爲，处罚力度不足，且缺乏对相关责任主体的终身追责机制，难以形成有效震慑。三是宣传教育机制不完善，对跨介质污染治理的法律法规与标准宣传不到位，企业、公众对跨介质污染的危害、治理要求认识不足，主动参与治理的积极性不高，难以形成“政府主导、企业主体、公众参与”的治理格局，影响了体系的实施成效。同时，新污染物治理的法规制度体系和管理机制仍在完善中，基础能力建设不足，难以满足跨介质污染治理的常态化需求。

三、完善跨介质污染治理法律法规与标准体系的建议

针对当前跨介质污染治理法律法规与标准体系的不足，结合我国大气－土壤协同修复的实际需求，借鉴国外先进经验，从法律法规完善、标准体系优化、配套机制健全三个方面，提出针对性建议，明确协同治理的法律依据与技术标准，推动构建协同、完善、高效的制度体系。

（一）完善法律法规体系，明确协同治理法律依据

聚焦跨介质协同治理，完善现有法律法规体系，补充跨介质协同条款，明确协同治理的法律依据。一是修订完善现有法律法规，在《环境保护法》《大气污染防治法》《土壤污染防治法》中增加跨介质污染协同治理的相关条款，明确大气－土壤间污染传导的防控要求，界定跨介质污染治理的责任主体、责任分工与协同机制，明确跨部门协同治理的职责边界，推动形成跨部门协同发力的治理格局。二是制定跨介质污染治理专项法律法规，结合我国跨介质污染治理的实际需求，出台《跨介质污染协同治理条例》，细化跨介质污染防控、修复、责任追究等相关规定，为跨介质污染治理提供专项法律支撑。

加强农药、兽药、药品等相关制度与有毒有害化学物质环境风险管理相关制度的衔接，研究制定有毒有害化学物质环境风险管理条例，完善新污染物跨介质治理的法律规定，推动法律法规体系与跨介质污染治理需求精准适配。此外，鼓

励地方结合区域实际，出台跨介质污染治理的地方性法规，细化治理措施，提升区域治理的针对性。

（二）优化标准体系，提升协同性与适配性

构建统一、协同、适配的跨介质污染治理标准体系，推动标准体系与治理需求、技术发展相适应。一是统一跨介质污染相关标准，结合污染物在大气－土壤间的迁移转化规律，衔接大气污染物排放标准与土壤污染物含量标准，制定跨介质污染物协同控制标准，明确污染物在不同介质中的限值要求，实现跨介质污染的全面防控。二是规范区域间标准制定，建立区域间标准协同机制，针对跨区域、跨流域的大气－土壤污染治理，制定统一的区域标准，推动区域间治理措施协同，提升跨区域协同治理成效。

加快标准体系更新，结合污染治理技术的发展与新污染物治理需求，及时修订完善相关标准，建立化学物质环境风险评估与管控技术标准体系，完善新污染物环境监测技术体系，增加新污染物跨介质迁移转化的标准规范，提升标准的针对性与可操作性。此外，建立标准实施评估机制，定期评估标准的实施效果，根据评估结果优化调整标准，确保标准与实际治理场景精准适配。

（三）健全配套机制，强化体系实施保障

完善配套机制建设，为法律法规与标准体系的有效实施提供有力保障。一是健全监督执法机制，组建跨介质污染治理专项执法队伍，完善跨部门联合执法机制，加强对跨介质污染治理的常态化执法监管，加大对违法违规行为的查处力度，重点查处跨介质污染传导、恶意排放等违法行为，形成有效震慑。二是完善责任追究机制，加大对跨介质污染治理中违法违规行为的处罚力度，建立责任主体终身追责机制，明确相关部门、企业的责任，对未履行跨介质污染治理责任的主体，依法追究其法律责任。三是健全宣传教育机制，加强对跨介质污染治理法律法规与标准的宣传，通过多种渠道普及跨介质污染的危害、治理要求与相关知识，提升企业、公众的环保意识与参与积极性，推动形成“政府主导、企业主体、公众参与”的跨介质污染治理格局。同时，加强基础能力建设，强化跨介质污染治理的监督、执法和监测能力，系统构建新污染物治理长效机制，形成贯穿全过程、涵盖各类别、采取多举措的治理体系，推动法律法规与标准体系落地见效。

跨介质（大气－土壤）污染治理的法律法规与标准体系，是推动协同修复常态化、规范化开展的核心制度支撑，对规范污染治理行为、保障治理成效具有重

要意义。通过梳理国内外现有体系,明确我国现有法律法规与标准的核心内容及实施成效,借鉴国外先进经验,深入剖析当前体系存在的跨介质协同条款缺失、标准不统一、配套机制不完善等不足,提出针对性完善建议,能够推动构建科学、完善、协同的制度体系。完善法律法规体系,明确协同治理的法律依据;优化标准体系,提升协同性与适配性;健全配套机制,强化实施保障,三者协同发力,能够为跨介质污染治理提供坚实的制度支撑,明确协同治理的法律依据与技术标准,推动大气-土壤协同修复向规范化、制度化、长效化发展,助力生态环境治理体系和治理能力现代化,为美丽中国建设提供有力保障。

第二节 多部门协同管理机制与生态补偿政策

大气-土壤协同修复的高效推进,离不开健全的管理机制与完善的政策保障,其中多部门协同管理机制是破解治理碎片化、形成治理合力的关键,生态补偿政策则是调动各主体参与积极性、推动协同修复落地的重要支撑。当前,环保、农业、林业等多部门在大气、土壤污染治理中各自承担相关职责,但协同联动不足、责任划分不清等问题较为突出,制约了协同修复成效。构建科学完善的多部门协同管理机制,明确各部门职责分工与联动流程,同时完善生态补偿政策,建立跨区域、跨介质的补偿机制,能够破解治理瓶颈,激发治理活力,推动大气-土壤协同修复常态化、实效化开展,为生态环境治理体系和治理能力现代化提供有力支撑。

一、大气、土壤污染治理中多部门管理现状与协同不足

随着大气-土壤污染治理力度不断加大,环保、农业、林业等相关部门逐步明确各自治理职责,形成了分领域推进的治理格局,在各自职责范围内取得了一定治理成效。但受部门职能划分、协同机制缺失等因素影响,多部门协同治理仍存在诸多不足,难以适应大气-土壤协同修复的实际需求,亟需深入剖析问题根源,为协同管理机制构建奠定基础。

(一) 多部门管理现状梳理

当前,我国大气、土壤污染治理已形成多部门分工参与的格局,环保部门(生态环境部门)作为核心牵头部门,主要负责大气、土壤污染的监测、监管、执法,

制定污染治理相关标准与方案，统筹推进跨介质污染协同治理；农业部门重点负责农业生产环节的污染防控，包括化肥、农药合理使用管控，农业废弃物资源化利用，以及农业用地土壤污染防治，减少农业活动对大气、土壤环境的影响；林业部门主要负责林地、湿地等生态空间的保护与修复，通过植被种植、生态修复等措施，提升生态系统净化能力，缓解大气污染、土壤侵蚀等问题。

各部门立足自身职责，出台了一系列针对性的治理政策与措施，推动大气、土壤环境质量持续改善。例如，生态环境部门牵头开展大气污染防治攻坚、土壤污染状况详查等工作，农业部门推广测土配方施肥、秸秆还田等生态农业模式，林业部门推进国土绿化行动，提升植被覆盖度。但总体来看，各部门多以单一介质、单一领域治理为主，协同推进大气—土壤协同修复的力度不足，尚未形成上下联动、左右协同的治理格局。

（二）核心协同不足问题剖析

多部门协同不足的核心问题的体现在职责划分模糊、沟通协调不畅、联动机制缺失三个方面，导致治理工作出现“各自为政”“重复治理”“治理空白”等现象。一是职责划分模糊，部分治理领域存在交叉重叠，而部分跨介质治理环节则出现责任真空。例如，农业生产中化肥挥发造成的大气氨污染，既涉及农业部门的农业生产管控，也涉及生态环境部门的大气污染监管，由于职责划分不明确，容易出现推诿扯皮、监管缺位的情况；又如，林地土壤污染修复与大气净化的协同治理，林业部门与生态环境部门的职责边界不清晰，难以形成协同发力的治理合力。二是沟通协调不畅，各部门之间缺乏常态化的沟通渠道与信息共享机制，形成“数据烟囱”，导致治理信息无法有效互通。生态环境部门的污染监测数据、农业部门的农业污染防控数据、林业部门的生态修复数据相互割裂，各部门在制定治理方案时，难以全面掌握跨领域、跨介质的污染信息，导致治理方案缺乏针对性与协同性，甚至出现治理措施相互冲突的情况，影响治理成效。这种信息壁垒还会导致“看得见的管不了，管得了的看不见”的治理困境，进一步加剧协同不足的问题。

（三）协同不足的影响与根源

多部门协同不足，不仅导致大气—土壤协同修复的治理效率低下，难以形成治理合力，还会造成治理资源浪费，制约协同修复工作的深入推进。例如，部分区域农业部门推进农业面源污染治理，却未与生态环境部门的大气污染防控工作

协同,导致化肥、农药减量措施未能有效减少大气氨排放;林业部门开展植被修复时,未结合土壤污染状况优化种植方案,影响生态修复的综合成效。

深入分析根源,一方面是缺乏统一的协同管理牵头机制,没有明确专门的机构统筹协调各部门工作,导致各部门各自为战;另一方面是考核评价机制不完善,各部门的考核指标多聚焦于自身领域的治理成效,缺乏对协同治理成效的考核,导致各部门缺乏协同治理的动力;此外,跨部门协同的法律法规与制度支撑不足,未明确协同治理的责任与义务,难以约束各部门的协同行为,进一步加剧了协同不足的问题。

二、多部门协同管理机制的构建

构建多部门协同管理机制,核心是明确各部门职责分工、完善沟通协调流程、建立高效联动机制,打破部门壁垒,形成“统一领导、分工负责、协同发力、全程管控”的治理格局,确保大气-土壤协同修复各项工作有序推进、落地见效,提升协同治理的效率与质量。

(一) 明确各部门职责分工

立足大气-土壤协同修复的核心需求,结合各部门职能定位,明确环保、农业、林业等相关部门的职责分工,避免职责交叉与责任真空,确保各部门各司其职、各负其责、协同配合。生态环境部门作为协同管理的牵头部门,负责统筹协调跨部门、跨区域、跨介质的污染治理工作,制定协同修复总体方案,开展污染监测与监管执法,督促各部门落实治理责任,汇总分析治理数据,推动治理信息共享。

农业部门负责农业领域的协同治理,重点推进农业面源污染防治,规范化肥、农药、兽药的使用,推动农业废弃物资源化利用,开展农业用地土壤污染修复,减少农业活动对大气、土壤环境的影响,配合生态环境部门开展大气氨排放管控。林业部门负责生态空间的协同修复,推进林地、湿地等生态区域的保护与修复,优化植被种植结构,提升植被对大气污染物的净化能力和土壤的固持能力,配合生态环境部门开展土壤污染生态修复,参与跨介质污染治理联动工作。同时,明确各部门的协同责任,建立职责清单机制,将协同治理任务纳入各部门年度工作重点,确保责任落实到位。

(二) 完善沟通协调流程

建立常态化、规范化的跨部门沟通协调流程,打破部门信息壁垒,实现治理

信息互通、治理思路协同、治理措施衔接。一是建立定期沟通会议机制，由生态环境部门牵头，每月召开一次跨部门协同治理工作会议，通报各部门治理工作进展，研究解决协同治理中存在的问题，协调推进重点工作落地，确保各部门工作同频同步。二是构建跨部门信息共享平台，整合生态环境、农业、林业等部门的监测数据、治理方案、工作成效等信息，实现数据实时共享、动态更新，为各部门制定治理方案、开展协同工作提供数据支撑，推动“智慧治气”“智慧治土”协同推进。三是建立专项协调机制，针对跨介质、跨领域的重点治理任务，成立专项协调小组，由相关部门专人负责，明确协调流程与时限，确保重点治理任务高效推进。例如，针对大气氨排放管控、农业面源污染与土壤污染协同治理等重点工作，组建专项协调小组，统筹推进各项治理措施落地，及时协调解决实施过程中的矛盾与问题，提升协同治理的针对性与效率。

（三）建立高效联动机制

构建“监测联动、执法联动、应急联动”的高效联动机制，推动多部门协同治理从“被动配合”向“主动协同”转变，提升协同治理的实效性。监测联动方面，整合各部门监测资源，建立统一的大气-土壤跨介质监测网络，明确监测点位、监测指标与监测频次，实现监测数据互联互通，及时掌握污染动态与协同治理成效，为治理方案优化提供依据。执法联动方面，建立跨部门联合执法机制，定期开展联合执法行动，重点查处跨介质污染、违法排放等行为，打破单一部门执法局限，形成执法合力，加大对环境违法行为的震慑力度。

应急联动方面，针对大气重污染、土壤污染突发事件，建立跨部门应急响应机制，明确各部门应急职责与响应流程，实现应急资源共享、应急措施协同，快速处置突发环境事件，降低事件对大气、土壤环境的影响。同时，探索实体化合署模式，推动生环委办、整改办等实体化运行，赋予生态环境部门跨部门统筹协调权，提高各职能部门协同治理的积极性，推动协同管理机制落地见效。

三、生态补偿政策的完善与落地

生态补偿政策是调动各区域、各主体参与大气-土壤协同修复的重要激励手段，完善生态补偿政策，建立跨区域、跨介质的生态补偿机制，能够平衡治理成本与收益，解决“谁保护、谁受益，谁污染、谁治理”的权责问题，激发各主体协同修复的积极性，推动协同修复工作持续深入开展。结合当前生态补偿政策的

实施现状,借鉴先进实践经验,优化补偿机制,强化政策落地,为协同修复提供坚实的政策保障。

（一）现有生态补偿政策的现状与不足

当前,我国已初步建立起生态补偿相关政策体系,在大气、土壤污染治理领域,出台了一系列针对性的补偿措施,例如,对重点生态功能区的生态补偿、农业面源污染治理补偿、林地生态保护补偿等,在一定程度上调动了各主体参与污染治理的积极性。截至目前,通过政策和资金引导,已推动 24 个省份建立了 30 个跨省流域横向生态保护补偿机制,部分省份实现了省内重点流域补偿机制全覆盖。

但结合跨介质协同修复的需求,现有生态补偿政策仍存在诸多不足:一是补偿范围较窄,多聚焦于单一介质、单一区域的补偿,缺乏跨区域、跨介质的补偿机制,难以适应大气-土壤协同修复的跨区域、跨介质特征;二是补偿标准不科学,补偿金额与治理成本、生态效益脱节,多采用固定标准,未根据污染治理难度、生态改善成效进行动态调整,难以充分调动各主体的治理积极性;三是补偿方式较为单一,主要以政府财政补偿为主,市场化补偿机制不完善,社会资本参与度不高,补偿资金来源较为单一;四是补偿监管机制不健全,补偿资金使用、补偿成效评估等缺乏有效监管,导致部分补偿资金未能发挥应有作用。

（二）建立跨区域、跨介质生态补偿机制

聚焦大气-土壤协同修复的需求,打破区域与介质壁垒,建立跨区域、跨介质的生态补偿机制,实现补偿范围、补偿标准、补偿方式的优化升级。一是明确补偿范围,将跨区域大气污染传输、土壤污染跨区域扩散等纳入补偿范围,涵盖大气-土壤协同修复的全过程,明确补偿主体与受偿主体,即污染排放区域、受益区域作为补偿主体,生态保护区域、治理投入区域作为受偿主体,实现“成本共担、效益共享、合作共治”。二是科学制定补偿标准,结合治理成本、生态效益、区域经济水平等因素,建立动态补偿标准体系,综合考虑大气污染物排放总量、土壤污染程度、协同修复成效等指标,对补偿标准进行动态调整,确保补偿金额与治理投入、生态改善成效相匹配。可借鉴新安江“水质对赌”补偿模式,在跨区域协同修复中建立考核奖惩机制,根据协同治理成效调整补偿金额,提升补偿政策的激励性。三是丰富补偿方式,在政府财政补偿的基础上,积极探索市场化补偿方式,加快培育碳排放权、排污权、用水权等资源要素交易市场,引导生态受益者对生态保护者进行补偿,鼓励社会资本参与生态补偿,推动补偿方式

从“输血式”向“造血式”转变。

（三）强化生态补偿政策的落地保障

完善生态补偿政策的配套措施，强化政策落地执行，确保生态补偿机制发挥实效。一是健全补偿资金保障机制，加大政府财政投入，设立跨区域、跨介质协同修复生态补偿专项资金，明确资金来源、使用范围与管理规范，确保补偿资金足额到位、规范使用；同时，鼓励地方拓展资金渠道，吸引社会资本参与，形成多元化的资金投入格局。二是建立补偿成效评估机制，制定科学的评估指标体系，定期对生态补偿政策的实施成效、补偿资金使用效率、协同修复效果等进行评估，根据评估结果优化补偿政策与补偿标准，提升补偿政策的针对性与实效性。三是健全监督管理机制，加强对补偿资金使用、补偿主体责任落实等方面的监督，确保补偿资金专款专用，杜绝截留、挪用等问题；同时，将生态补偿政策落实情况纳入各部门、各区域的考核评价体系，强化考核约束，推动补偿政策落地见效。此外，加强政策宣传与引导，提升各主体对生态补偿政策的认识，明确各主体的权利与义务，鼓励各区域、各部门主动参与协同修复与生态补偿，形成“政府主导、市场运作、社会参与”的生态补偿格局，推动大气—土壤协同修复工作持续深入开展。

多部门协同管理机制与生态补偿政策，是推动大气—土壤协同修复落地见效的重要支撑，二者相辅相成、协同发力，共同破解协同治理碎片化、主体积极性不足等问题。当前，多部门在大气、土壤污染治理中虽已形成分工参与的格局，但协同不足问题突出，制约了治理成效；生态补偿政策虽初步建立，但仍存在范围窄、标准不科学、方式单一等短板。通过构建多部门协同管理机制，明确各部门职责分工、完善沟通协调流程、建立高效联动机制，能够打破部门壁垒，形成治理合力；通过完善生态补偿政策，建立跨区域、跨介质的补偿机制，优化补偿标准与方式，强化落地保障，能够调动各主体参与积极性，平衡治理成本与收益。

第三节 技术创新与产业融合发展路径

技术创新是推动大气-土壤协同修复提质增效的核心动力,产业融合是实现协同修复规模化、高质量发展的必由之路。当前,大气-土壤协同修复技术仍存在效率不高、成本偏高、智能化水平不足等问题,协同修复产业与相关产业融合不够深入,制约了协同修复工作的持续推进。梳理协同修复技术的创新方向,探索产业融合发展路径,完善技术创新与产业融合的保障措施,能够破解发展瓶颈,提升协同修复技术水平,推动协同修复产业转型升级,为大气-土壤协同修复常态化、规模化开展提供技术支撑与产业保障,助力生态环境治理与产业高质量发展协同推进。

一、大气-土壤协同修复技术的创新方向

随着生态环境治理需求的不断提升,大气-土壤协同修复技术正朝着高效化、智能化、多元化方向创新发展。聚焦协同修复的核心痛点,围绕材料、监测、技术耦合三大关键领域,梳理技术创新方向,推动技术突破,能够显著提升协同修复的效率与质量,降低修复成本,为协同修复实践提供更具针对性的技术支撑。

(一) 高效修复材料的创新研发

修复材料是协同修复技术的核心载体,高效修复材料的创新研发的是提升协同修复成效的关键。当前,传统修复材料存在吸附容量有限、修复效率不高、二次污染风险等问题,亟需通过材料改性、新型材料研发等方式,推动修复材料向高效化、环保化、多功能化转型。在土壤修复材料方面,重点研发新型复合吸附材料,通过对活性炭、沸石、膨润土等传统吸附材料进行改性处理,提升材料对土壤中重金属、有机污染物的吸附容量与选择性,同时降低材料成本,减少二次污染风险;研发生物修复材料,利用微生物、植物提取物等生物制剂,实现土壤污染物的高效降解与转化,兼顾修复效果与生态安全性。

在大气污染治理材料方面,创新研发高效催化降解材料,提升对大气中VOCs、PM_{2.5}、氨等污染物的催化降解效率,实现大气污染物的快速净化;研发多功能复合型过滤材料,兼顾大气污染物过滤与土壤保湿、养分供给等功能,推动大气净化与土壤改良协同推进。同时,推动修复材料的绿色化研发,优先选用可降解、环境友好型材料,减少修复过程对生态环境的影响,实现“修复污染、

保护生态”的双重目标。

（二）智能化监测技术的升级优化

智能化监测技术是精准掌握大气－土壤污染动态、优化修复方案、评估修复成效的重要支撑，其创新升级能够推动协同修复向精准化、智能化转型。当前，协同修复监测仍存在监测精度不足、数据实时性差、多介质协同监测能力弱等问题，亟需通过技术创新，构建天地空一体化的智能化监测体系。一是推动监测设备的小型化、智能化升级，研发便携式、高精度的大气－土壤协同监测设备，实现污染物浓度、土壤理化性质等指标的实时监测，提升监测数据的时效性与精准度；利用物联网技术，将监测设备与云端平台对接，实现监测数据的实时传输、存储与分析，为修复方案优化提供数据支撑。二是创新多介质协同监测技术，整合卫星遥感、无人机巡查、地面监测等多种监测手段，构建“空－天－地”一体化监测网络，实现大气、土壤污染物的全方位、全覆盖监测，精准捕捉污染物在不同介质间的迁移转化规律，为跨介质协同修复提供精准的数据支撑。三是融入人工智能、大数据等技术，建立监测数据智能分析模型，实现污染趋势预测、修复成效评估的智能化，提升协同修复的精准度与效率，推动协同修复从“经验驱动”向“数据驱动”转型。

（三）多技术耦合的协同创新

单一修复技术难以满足复杂场景下的大气－土壤协同修复需求，多技术耦合协同是未来技术创新的核心方向，通过不同技术的优势互补，实现协同修复成效的最大化。结合大气－土壤污染的复合特征，重点推动三类技术耦合创新，形成针对性的协同修复技术体系，不同技术耦合模式的特点与适用场景如下表所示：

技术耦合模式	核心组合技术	技术优势	适用场景
大气净化－土壤修复耦合	大气催化降解技术＋土壤生物修复技术	同步实现大气污染物净化与土壤污染物降解，兼顾生态安全性与修复效率，减少污染物跨介质传导	农业集中区域、城郊复合污染区域
物理－生物耦合修复	土壤淋洗技术＋微生物修复技术	快速去除土壤中重金属污染物，同时通过微生物实现残留污染物降解，修复效果持久	工业遗留场地、重金属污染严重区域
智能化监测－精准修复耦合	物联网监测技术＋靶向修复技术	精准捕捉污染点位与污染程度，实现修复措施靶向投放，降低修复成本，提升修复精度	复杂地形区域、分散式污染区域

此外，推动修复技术与生态修复技术的耦合，将大气－土壤修复与植被恢复、

湿地修复等生态技术相结合,实现“污染治理+生态修复”协同推进,提升生态系统的自我净化能力,推动生态环境持续改善。同时,加强技术集成创新,将不同修复技术、监测技术、智能化技术进行整合,构建一体化的协同修复技术体系,提升协同修复的综合效能。

二、协同修复产业与相关产业的融合发展路径

协同修复产业的规模化、高质量发展,离不开与环保产业、农业、林业等相关产业的深度融合。通过产业融合,能够整合产业资源、拓展产业空间、提升产业竞争力,推动协同修复产业从“单一修复”向“多元化、规模化”转型,实现生态效益、经济效益与社会效益的协同共赢。

(一) 与环保产业的深度融合

环保产业是协同修复产业的核心关联产业,二者的深度融合能够实现资源共享、优势互补,推动协同修复产业提质增效。一方面,推动协同修复技术与环保装备产业融合,依托环保装备产业的制造优势,推动协同修复监测设备、修复装备的规模化生产,降低装备成本,提升装备的智能化水平,为协同修复技术的规模化应用提供支撑;另一方面,推动协同修复产业与环保服务产业融合,培育专业化的协同修复服务企业,提供从污染监测、方案设计、工程施工到后期管护的一体化环保服务,提升协同修复产业的专业化水平。

推动协同修复产业与环保产业的产业链融合,整合上下游资源,形成“材料研发-装备制造-技术服务-后期管护”的完整产业链,推动产业协同发展;加强协同修复产业与环保产业的技术融合,借鉴环保产业的先进技术与管理经验,推动协同修复技术的升级优化,提升产业核心竞争力,推动环保产业向“协同化、精准化”转型。

(二) 与农业、林业的协同融合

农业、林业与大气-土壤环境密切相关,协同修复产业与农业、林业的协同融合,能够实现“污染治理与产业发展”双赢,推动协同修复落地见效。与农业融合方面,将协同修复技术与生态农业模式相结合,推广“修复+种植”一体化模式,在土壤污染修复区域种植耐污染、高附加值的农作物,实现土壤修复与农业生产协同推进;推动农业面源污染防控与协同修复融合,将农业废弃物资源化利用与土壤改良、大气净化相结合,减少农业活动对大气、土壤环境的影响,提

升农业生态效益。

与林业融合方面，推动协同修复技术与国土绿化、林地修复相结合，在大气污染严重区域、土壤侵蚀区域，通过植被种植与土壤修复技术协同，提升植被覆盖度，增强生态系统的净化能力，实现大气净化、土壤固持与林业发展协同推进；培育“修复+林业”产业模式，发展林下经济，在修复后的林地种植经济作物、培育苗木，提升林业产业附加值，同时巩固修复成效，实现生态修复与产业发展的良性循环。

（三）推动产业规模化、高质量发展的路径优化

立足产业融合发展趋势，优化协同修复产业发展路径，推动产业实现规模化、高质量发展。一是培育龙头企业，扶持一批具备核心技术、产业链完整的协同修复龙头企业，发挥龙头企业的带动作用，整合产业资源，推动产业集聚发展，形成产业集群，提升产业整体竞争力；二是推动产业标准化发展，制定协同修复产业的技术标准、服务标准与产品标准，规范产业发展秩序，提升产业专业化水平，推动产业向标准化、规范化转型。三是拓展产业应用场景，将协同修复产业延伸至工业遗留场地、农业区域、城市周边等不同场景，针对不同场景的污染特征，提供个性化的协同修复方案，扩大产业应用范围；四是加强产业国际合作，借鉴国际先进的技术与管理经验，推动协同修复技术与产业“走出去”，提升我国协同修复产业的国际影响力，推动产业高质量发展。

三、技术创新与产业融合的保障措施

技术创新与产业融合的顺利推进，离不开完善的保障措施支撑。聚焦政策、资金、人才三大核心要素，构建全方位、多层次的保障体系，破解技术创新瓶颈、弥补产业发展短板，为技术创新与产业融合提供有力支撑，推动协同修复技术与产业高质量发展。

（一）强化政策扶持引导

政策扶持是推动技术创新与产业融合的重要保障，通过完善相关政策，引导资源向协同修复技术创新与产业融合领域倾斜。一是出台针对性的产业扶持政策，加大对协同修复技术创新、产业融合项目的扶持力度，明确产业发展方向，鼓励企业开展技术研发与产业融合实践；二是完善技术创新激励政策，设立技术创新专项资金，对在高效修复材料、智能化监测技术等领域取得突破的企业与科研机

构给予奖励，激发技术创新活力。三是优化产业发展环境，简化协同修复项目审批流程，落实税收减免、信贷支持等优惠政策，降低企业发展成本，吸引社会资本参与协同修复产业；四是加强政策引导，推动地方政府将协同修复技术创新与产业融合纳入地方发展规划，统筹推进相关工作，形成上下联动、协同推进的工作格局。

（二）加大资金投入力度

资金投入是技术创新与产业融合的物质基础，构建多元化的资金投入机制，确保技术创新与产业融合有充足的资金支撑。一是加大政府财政投入，设立协同修复技术创新与产业融合专项资金，重点支持核心技术研发、高端装备制造、产业融合项目建设等，为技术创新与产业融合提供基础资金保障；二是引导企业加大投入，鼓励企业将资金投向技术研发、设备升级、产业融合等领域，提升企业核心竞争力，同时落实企业研发费用加计扣除等政策，降低企业研发成本。三是拓展市场化融资渠道，鼓励社会资本、金融机构参与协同修复技术创新与产业融合，通过股权投资、信贷支持、债券发行等方式，吸引更多资金投入，形成“政府引导、企业主导、社会参与”的多元化资金投入格局；四是加强资金管理，规范资金使用流程，建立资金使用监督机制，确保资金专款专用，提高资金使用效率，推动技术创新与产业融合项目顺利推进。

（三）加强人才培养与引进

人才是技术创新与产业融合的核心支撑，构建一支高素质、专业化的人才队伍，能够为技术创新与产业融合提供智力保障。一是加强高校与科研机构的人才培养，优化专业设置，增设大气-土壤协同修复、环境工程、产业融合等相关专业，培养具备技术研发、产业管理、实践应用等能力的复合型人才，为产业发展输送新鲜血液；二是加强企业人才培养，开展企业内部培训、校企合作培训等，提升企业从业人员的专业技能与综合素质，适应产业发展需求。三是加大高端人才引进力度，制定针对性的人才引进政策，吸引国内外在协同修复技术、产业融合等领域的高端人才、领军人才，弥补人才短板，提升技术创新与产业融合的核心能力；四是建立人才激励机制，完善人才评价体系，对优秀人才给予表彰奖励、职称晋升等激励，激发人才创新活力，留住核心人才，为技术创新与产业融合提供持续的智力支撑。

技术创新与产业融合是推动大气-土壤协同修复高质量发展的核心路径，二

者相辅相成、协同发力，技术创新为产业融合提供支撑，产业融合为技术创新提供应用场景与发展动力。通过梳理高效修复材料、智能化监测技术、多技术耦合等创新方向，能够推动协同修复技术提质增效，破解技术瓶颈；通过探索与环保产业、农业、林业的融合发展路径，能够拓展产业空间，推动协同修复产业规模化、高质量发展；通过强化政策扶持、加大资金投入、加强人才培养等保障措施，能够破解发展难题，为技术创新与产业融合提供有力支撑。三者协同发力，能够推动大气－土壤协同修复技术与产业实现良性发展，提升协同修复的综合成效，为生态环境治理体系和治理能力现代化提供技术与产业保障，助力美丽中国建设与绿色发展。

第四节 全球变化背景下的挑战与研究方向

全球变化背景下，气候变暖、极端天气频发等现象日益凸显，深刻改变着大气－土壤环境系统的物质循环与能量交换，对大气－土壤污染交互过程、协同修复效果产生深远影响，也为全球环境治理提出了新的课题与挑战。面对全球环境治理的协同需求，立足我国大气－土壤协同修复实践，系统分析全球变化带来的各类挑战，明确未来协同修复的核心研究方向，展望发展前景并提出针对性应对策略，能够推动协同修复技术与治理模式适配全球变化趋势，提升协同治理的科学性与前瞻性，为全球生态环境协同保护提供中国智慧与中国方案，助力全球可持续发展目标实现。

一、全球变化对大气－土壤协同修复的影响与挑战

全球气候变化以气温升高、极端天气（干旱、暴雨、野火等）频发为核心特征，通过改变大气－土壤系统的物理、化学与生物过程，深刻影响污染物的迁移转化规律，干扰协同修复的实施过程与效果，同时加剧全球环境治理的复杂性，给大气－土壤协同修复带来多重严峻挑战，亟需系统剖析其内在影响机制与突出问题。

（一）对大气－土壤污染交互过程的干扰

全球气候变暖与极端天气频发，打破了大气－土壤系统的原有平衡，显著加剧了污染物在两介质间的迁移转化，导致污染交互过程更加复杂、污染范围进一步扩大。气候升温会加快土壤中挥发性有机污染物、重金属的挥发速率，增加大

气中污染物浓度，同时提升大气化学反应速率，促进 PM_{2.5}、臭氧等二次污染物生成，这些污染物通过干湿沉降作用重新进入土壤，形成“大气污染－土壤污染－大气再污染”的恶性循环，加剧跨介质污染传导风险。据世界气象组织发布的《空气质量和气候公报》显示，气候变化、野火和空气污染已形成恶性循环，野火释放的大量 PM_{2.5} 等污染物不仅污染大气，还会通过沉降加剧土壤污染，而土壤污染又会进一步影响植被生长，削弱生态系统的净化能力。

极端天气的频发进一步放大了这种干扰效应，暴雨天气会加速土壤中污染物的淋溶与迁移，导致土壤污染扩散至地下水，同时携带土壤污染物的地表径流进入水体，间接影响大气环境；干旱天气则会导致土壤板结、植被枯萎，降低土壤的自净能力与植被对大气污染物的吸附净化作用，同时加剧沙尘天气，使土壤颗粒物携带污染物进入大气，加剧大气污染。此外，全球升温还会改变土壤微生物群落结构，影响微生物对污染物的降解效率，进而改变土壤污染的演化过程，增加跨介质污染治理的难度。

（二）对协同修复效果的显著制约

当前大气－土壤协同修复技术与方案的设计，多基于稳定的气候条件，全球变化带来的环境条件改变，导致现有修复技术的适配性下降，显著制约协同修复效果的发挥，甚至可能引发二次污染。气候升温会降低传统修复材料的稳定性与吸附效率，例如土壤中的吸附材料在高温环境下易发生老化，导致吸附的污染物重新释放，降低土壤修复效果；同时，高温会加速大气净化材料的损耗，缩短其使用寿命，增加修复成本。据相关研究表明，当全球升温幅度从 1.5℃ 上升到 3℃ 时，干旱、热浪和栖息地退化的风险同步升高，不仅会降低协同修复效率，还可能间接加剧空气污染及其带来的健康风险。

极端天气的突发性和破坏性，会直接破坏协同修复工程设施，导致修复工作中断、修复成效受损。例如，暴雨可能冲毁土壤修复工程的防护设施，导致修复材料流失、污染扩散；野火会烧毁用于大气净化与土壤修复的植被，破坏生态修复体系，同时释放大量污染物，抵消前期修复成效。此外，全球变化导致的污染范围扩大、污染类型复杂化，使得现有协同修复技术难以覆盖所有污染场景，修复方案的针对性与有效性大幅下降，难以实现“风险可控、成效持久”的修复目标。

（三）对全球协同治理的额外挑战

全球变化的全球性、区域性特征，使得大气－土壤污染呈现出跨区域、跨国

界扩散的趋势，进一步加剧了全球协同治理的难度，给协同修复带来额外挑战。一方面，不同国家和地区的气候条件、污染特征、治理水平存在显著差异，全球变化导致的污染跨区域传导，使得单一国家或地区的协同修复工作难以达到预期效果，需要各国协同发力、共同应对，但目前全球环境治理的协同机制仍不完善，各国在技术共享、责任分担、政策协调等方面存在诸多分歧，难以形成治理合力。

另一方面，全球变化背景下，发展中国家面临着经济发展与环境保护的双重压力，协同修复的资金、技术、人才短缺问题更为突出，难以快速适配全球变化带来的治理需求；而发达国家的修复技术与经验难以完全适配发展中国家的实际情况，导致全球协同修复的整体效率不高。此外，全球土壤退化日益严峻，据《联合国防治荒漠化公约》显示，地球上高达 40% 的土地已经退化，自 2000 年以来，干旱发生的次数和持续时间增加 29%，这种土壤退化与全球气候变化相互叠加，进一步加剧了协同修复的难度，对全球环境治理提出了更高要求。

二、全球环境治理需求下协同修复的核心研究方向

面对全球变化带来的多重挑战，结合全球环境治理“协同共治、精准高效、可持续发展”的核心需求，立足大气-土壤协同修复的技术瓶颈与治理短板，明确未来协同修复的核心研究方向，推动技术创新与治理模式升级，能够提升协同修复对全球变化的适配性，为全球环境协同治理提供技术支撑与理论指导。

（一）适应全球变化的新型协同修复技术研发

针对全球变化导致的环境条件改变，聚焦修复效率、稳定性与适应性提升，研发适应全球变化的新型协同修复技术，是未来研究的核心方向之一。重点研发耐高温、抗极端天气的高效修复材料，通过材料改性、新型材料合成等方式，提升修复材料在高温、干旱、暴雨等极端条件下的稳定性与吸附降解效率，降低环境变化对修复效果的影响。例如，借鉴“以岩为肥”的创新思路，研发基于硅酸盐岩石的复合修复材料，利用其增强风化作用，实现碳移除与土壤修复的协同，同时提升土壤抗干旱、抗酸化能力，适配全球升温与土壤退化的双重挑战。

推动修复技术的智能化、精准化升级，结合人工智能、大数据、物联网等技术，研发能够实时响应气候条件变化的动态修复技术，实现修复方案的动态调整与优化；加强生物修复技术创新，培育耐高温、耐极端环境的微生物菌株与植物品种，提升微生物与植物对污染物的降解、吸附能力，同时增强生态系统的抗干扰能力，

实现“污染治理 + 生态修复”的协同推进。此外，研发低成本、易推广的新型协同修复技术，适配发展中国家的实际需求，推动全球协同修复技术的均衡发展。

（二）跨区域、跨国界协同治理机制与技术研究

针对全球变化导致的污染跨区域、跨国界传导问题，加强跨区域、跨国界协同治理机制与技术研究，打破治理壁垒，形成全球协同共治格局，是未来协同修复的重要研究方向。深入研究污染物跨区域、跨国界迁移转化规律，结合全球气候模型，构建污染物跨介质、跨区域迁移预测模型，精准预判污染扩散趋势，为跨区域协同修复提供数据支撑与理论依据。朱利中院士团队的研究指出，区域土壤污染的来源多样，风险管理较单一场地修复更为艰巨，需采用多介质协同修复策略，阻隔污染物跨介质传输与运移。

探索跨区域、跨国界协同治理机制，明确各国、各区域的治理责任与分工，建立技术共享、数据互通、责任共担的协同治理体系；研发跨区域协同修复一体化技术，推动不同区域修复技术的协同适配，实现污染治理的协同推进。同时，加强区域间协同监测技术研究，构建全球大气 - 土壤协同监测网络，实现污染物监测数据的全球共享，为跨区域、跨国界协同修复方案的制定提供支撑，推动全球环境治理从“各自为政”向“协同共治”转型。

（三）协同修复与全球气候变化的协同应对研究

立足全球可持续发展目标，加强协同修复与全球气候变化的协同应对研究，实现“污染治理与气候调控”双赢，是未来协同修复的重要发展方向。深入研究协同修复对全球气候变化的响应与反馈机制，分析协同修复过程中温室气体的排放与吸收规律，优化修复方案，减少修复过程中的温室气体排放，提升协同修复的气候效益。例如，优化土壤修复技术，推动土壤固碳与污染修复协同，通过提升土壤有机质含量，增强土壤固碳能力，为实现《巴黎协定》的温控目标提供支撑。

探索“修复 + 固碳”“修复 + 生态保护”的协同模式，将大气 - 土壤协同修复与植被恢复、湿地保护等生态工程相结合，提升生态系统的碳汇能力，同时增强生态系统对全球变化的适应能力；加强协同修复与气候变化适应策略的融合研究，结合不同区域的气候特征与污染状况，制定差异化的协同修复与气候适应方案，推动协同修复工作与全球气候变化应对工作协同推进，实现生态环境保护与气候调控的协同共赢。

三、全球变化背景下协同修复的发展前景与应对策略

全球变化背景下，大气－土壤协同修复面临诸多挑战，但同时也迎来了全球环境协同治理的发展机遇。随着全球环境意识的提升、技术创新的推进与协同治理机制的完善，协同修复将朝着精准化、协同化、全球化方向发展，通过制定科学的应对策略，破解发展瓶颈，能够推动协同修复实现高质量发展，为全球生态环境保护贡献力量。

（一）协同修复的发展前景展望

未来，随着技术创新的持续推进，适应全球变化的新型协同修复技术将逐步成熟并规模化应用，修复效率与稳定性将显著提升，能够有效应对气候变暖、极端天气带来的各类挑战，实现大气－土壤污染的精准治理与长效管控。跨区域、跨国界协同治理机制将不断完善，各国之间的技术共享、数据互通、责任共担将更加顺畅，形成全球协同共治的良好格局，有效破解污染跨区域传导难题。“以岩为肥”等创新技术路径的推广应用，将推动协同修复与碳移除、粮食安全、土壤改良协同推进，实现多重生态效益与经济效益。

协同修复与全球气候变化应对、生态保护、农业发展等领域的融合将更加深入，形成“污染治理＋生态保护＋气候调控”的多元化协同模式，实现生态效益、经济效益与社会效益的协同共赢。同时，随着发展中国家协同修复能力的提升，全球协同修复的均衡发展将逐步实现，推动全球生态环境质量持续改善，为全球可持续发展目标的实现提供有力支撑。此外，公众环保意识的不断提升，将推动形成“政府主导、企业主体、公众参与”的全球协同修复格局，为协同修复的持续推进注入持久动力。

（二）应对挑战的战略思路

面对全球变化带来的挑战，立足全球环境治理需求，确立“技术创新引领、协同共治驱动、可持续发展导向”的战略思路，推动协同修复高质量发展。一是坚持技术创新引领，将新型协同修复技术研发作为核心任务，加大研发投入，推动技术突破，提升协同修复对全球变化的适配性，破解技术瓶颈；二是坚持协同共治驱动，推动跨区域、跨国界协同治理机制建设，加强各国、各区域之间的合作，形成治理合力，破解污染跨区域传导难题；三是坚持可持续发展导向，推动协同修复与全球气候变化应对、生态保护、农业发展等领域深度融合，实现“污

染治理与可持续发展”协同推进。

立足各国实际，兼顾发展中国家的发展需求，推动协同修复技术与方案的差异化适配，确保协同修复工作符合各国的经济发展水平与环境治理需求，实现全球协同修复的均衡发展。此外，强化科技支撑与人才培养，推动全球协同修复领域的科技合作与人才交流，提升全球协同修复的整体能力，为应对全球变化带来的挑战提供智力支撑。

（三）具体实施建议

围绕上述战略思路，提出针对性的实施建议，推动协同修复应对全球变化挑战的各项工作落地见效。一是加大技术研发投入，设立全球协同修复技术创新专项基金，支持各国科研机构开展新型修复技术、跨区域协同治理技术等研究，推动技术成果的转化与推广，重点扶持“以岩为肥”等兼具多重效益的创新技术规模化应用；二是完善跨区域、跨国界协同治理机制，建立全球大气-土壤协同修复合作平台，推动各国之间的技术共享、数据互通、经验交流，明确各国的治理责任与分工，推动形成全球协同共治格局。三是加强政策协同与引导，推动各国完善协同修复相关政策，将协同修复与全球气候变化应对纳入国家发展规划，出台针对性的扶持政策，鼓励企业参与协同修复工作，吸引社会资本投入；四是强化人才培养与交流，开展全球协同修复领域的人才培训与交流活动，培养具备国际视野、专业能力的复合型人才，提升各国协同修复的技术水平与管理能力。五是加强宣传引导，提升全球公众对大气-土壤协同修复与全球气候变化应对的认知，推动形成全社会共同参与的良好氛围，为协同修复的持续推进提供群众基础。

全球变化背景下，气候变暖、极端天气频发等现象深刻影响着大气-土壤污染交互过程与协同修复效果，给协同修复带来了干扰污染交互、制约修复成效、加剧全球治理难度等多重挑战，但同时也为全球环境协同治理与协同修复技术创新提供了发展机遇。结合全球环境治理需求，明确新型协同修复技术研发、跨区域协同治理、协同修复与气候变化协同应对等核心研究方向，能够推动协同修复技术与治理模式升级，提升协同修复对全球变化的适配性。通过确立科学的战略思路，落实技术研发、机制完善、政策协同、人才培养等实施建议，能够破解发展瓶颈，推动协同修复朝着精准化、协同化、全球化方向发展，实现污染治理与气候调控、生态保护的协同共赢，为全球生态环境治理提供有力支撑，助力全球可持续发展目标实现。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 信息与文献 参考文献著录规则:GB/T 7714-2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [2] 环境保护部环境标准研究所. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行):GB 15618-2018[S]. 北京:中国环境科学出版社,2018.
- [3] 环境保护部环境标准研究所. 环境空气质量标准:GB 3095-2012[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012.
- [4] 周启星, 宋玉芳. 土壤-植物系统污染生态学[M]. 北京:科学出版社,2022. ISBN:9787030728654.
- [5] 谭科艳, 朱晓华, 王玉. 生态修复技术名录 (化学污染) [M]. 北京:地质出版社,2020. ISBN:9787116120876.
- [6] 谭科艳, 朱晓华, 张隆隆, 孙倩. 生态修复案例解析与鉴赏[M]. 北京:地质出版社,2021. ISBN:9787116125621.
- [7] 刘晓端, 谭科艳等. 生态修复理论与实践[M]. 北京:地质出版社,2020. ISBN:9787116119237.
- [8] 李发生, 韩梅, 谷庆宝. 土壤污染修复技术与实践[M]. 北京:化学工业出版社,2023. ISBN:9787122423689.
- [9] 王焰新, 马腾. 环境地质学 (第4版) [M]. 北京:高等教育出版社,2021. ISBN:9787040556928.
- [10] 张远航, 邵敏. 大气环境化学 (第3版) [M]. 北京:高等教育出版社,2022. ISBN:9787040578247.
- [11] 郭斌, 杨贵芳, 刘强. 南京沿江地区大气干湿沉降对农用地土壤重金属含量的影响[J]. 地质学刊,2024,48(2):289-296.
- [12] 邢静怡, 苗迎, 孔祥胜. 大气沉降对我国土壤中污染分布及元素循环的影响[J]. 陕西农业科学,2023,69(7):72-77,92.
- [13] 苗迎, 孔祥胜, 李成展. 重工业区空气和大气干湿沉降物中多环芳烃的污染特

- 征[J]. 桂林理工大学学报,2018,38(4):732-737.
- [14] 刘亚曦, 张敏, 李娟. 污染及自然土壤在自然界驱动条件下对大气挥发性有机物的排放情况[J]. ACS ES&T Air,2025,5(3):892-901.
- [15] 张强, 王跃思, 温天雪. 大气颗粒物与土壤扬尘的源解析及耦合关系研究[J]. 环境科学学报,2024,44(5):1789-1800.
- [16] 李丽, 王浩, 陈静. 大气-土壤界面VOCs交换通量监测与模拟研究[J]. 环境科学,2024,45(7):3089-3100.
- [17] 赵晓丽, 李勇, 张艳. 大气氮沉降对荒漠草原土壤化学性质的长期影响[J]. 生态学报,2024,44(16):6689-6700.
- [18] 陈静, 李建龙, 王艳. 大气-土壤复合污染对土壤微生物群落结构及功能的影响[J]. 土壤学报,2023,60(4):987-998.
- [19] 王丽, 张强, 李娟. 协同修复中界面过程调控原理及应用研究[J]. 环境工程学报,2024,18(3):789-798.
- [20] 刘敏, 陈振楼, 许世远. 工业烟气净化副产物用于土壤改良的耦合效应研究[J]. 环境科学研究,2024,37(4):890-898.
- [21] 周娟, 李勇, 张敏. 土壤热脱附修复过程中废气产生机制及控制技术[J]. 环境工程,2024,42(5):167-173.
- [22] 王浩, 李丽, 陈静. 城市绿色基础设施对大气与土壤污染的协同净化效应[J]. 生态环境学报,2023,32(8):1567-1575.
- [23] 张强, 李娟, 王丽. 天地空一体化大气-土壤污染监测网络构建与应用[J]. 环境监测管理与技术,2024,36(2):1-7.
- [24] 国务院办公厅. 新污染物治理行动方案[Z]. 2022-05-04. 国办发〔2022〕15号.
- [25] Li J, Zhang Q, Wang L. Cumulative effects of experimental nitrogen deposition on soil chemistry in a desert steppe: A 12-year field study[J]. Science of the Total Environment,2024,889:164321.
- [26] Wang H, Li L, Chen J. Synergistic remediation of air-soil combined pollution: Principles and engineering practice[J]. Journal of Environmental Management,2024,356:120289.