

Innovative Methods and Engineering Practices in Environmental Impact
Assessment Under the Dual Carbon Goals

双碳目标下环境影响评价的创新方法 与工程实践

刘超斌 张丹 郑平 主编



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

CIP INFORMATION

Title: Innovative Methods and Engineering Practices in Environmental Impact Assessment Under the Dual Carbon Goals

题目：双碳目标下环境影响评价的创新方法与工程实践

Author: Chaobin Liu, Dan Zhang, Ping Zheng

作者：刘超斌 张丹 郑平

ISBN: 979-8-90040-075-4

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

Innovative Methods and Engineering Practices in Environmental Impact Assessment Under the Dual Carbon Goals

双碳目标下环境影响评价的创新方法与工程实践

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

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 16.25

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in March 2026

Printing: First printing in March 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.

编委会

EDITORIAL BOARD

主 编

刘超斌 湖北荆州环境保护科学技术有限公司

张 丹 湖北天欧检测有限公司

郑 平 湖北圣岚生态环境技术咨询有限公司



内容简介 ABSTRACT

《双碳目标下环境影响评价的创新方法与工程实践》是一部聚焦国家“碳达峰、碳中和”战略背景下环境影响评价（EIA）制度转型与技术革新的专业著作。全书立足于生态文明建设与绿色低碳发展的时代要求，系统梳理了传统环评体系在应对气候变化、推动产业结构优化、实现减污降碳协同增效等方面的局限性，并深入探讨了面向“双碳”目标的环评理论创新、方法拓展与工程应用路径。

本书首先从宏观视角切入，构建了投入产出生命周期评价（IO-LCA）模型，将经济系统与环境排放数据有机融合，通过编制环境卫星账户、匹配部门碳排放强度向量，实现了对区域隐含碳、贸易碳泄漏等复杂问题的量化分析。该模型不仅突破了传统生产端核算的边界，更从最终消费和全球供应链角度揭示了碳排放的真实驱动机制，为制定差异化、精准化的区域低碳政策提供了科学支撑。

在此基础上，著作聚焦钢铁、建材等高碳排重点行业，结合超低排放改造、余热余能回收、水泥熟料工艺优化等典型工程场景，详细阐述了如何在环评实践中嵌入碳排放绩效对标、全生命周期碳足迹核算、协同减污降碳方案比选等创新方法。书中强调，新时代环评不应仅关注末端治理，而应贯穿项目设计、能源系统集成、技术经济可行性及二次环境影响评估全过程，推动节能降碳措施从“可选项”转变为“必选项”。

此外，本书还前瞻性地探讨了环评制度与碳市场、绿色金融、碳关税等新兴政策工具的衔接机制，提出构建“环评—碳评”一体化评估框架的构想，以增强环境管理对气候治理的响应能力。全书兼具理论深度与实践导向，既有对国际前沿方法的本土化适配，也有对国内典型案例的系统剖析，可为生态环境管理部门、环评技术机构、科研院校及企业绿色转型提供重要参考。



前言

PREFACE

当前，全球正经历一场深刻而紧迫的绿色低碳变革。中国作为负责任大国，明确提出力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的战略目标，这不仅是对全球气候治理的重大承诺，更是推动高质量发展、构建人与自然和谐共生现代化的内在要求。在此背景下，作为我国环境治理体系核心制度之一的环境影响评价（EIA），亟需从理念、方法到实践进行全面升级，以更好服务于国家“双碳”战略大局。

传统环评制度自建立以来，在预防环境污染、优化项目选址、促进清洁生产等方面发挥了不可替代的作用。然而，其长期聚焦于局地污染物控制，对温室气体排放、资源能源效率、产业链碳足迹等系统性、全局性问题关注不足，导致在“双碳”目标约束下出现制度脱节与功能弱化。一方面，大量高碳锁定效应项目在环评阶段未被有效识别；另一方面，现有环评缺乏对减污与降碳协同路径的科学评估工具，难以引导产业向绿色低碳方向实质性转型。因此，推动环评制度与“双碳”目标深度融合，已成为新时代生态环境治理现代化的关键命题。

本书正是在这一时代背景下应运而生。我们三位作者长期从事环评技术咨询、政策研究与工程实践工作，深切感受到行业对“碳评”方法论与操作指南的迫切需求。为此，我们系统整合多年积累的项目经验、研究成果与政策理解，尝试构建一套既符合国际趋势又契合中国国情的“双碳”导向环评创新体系。

全书以“理论—方法—应用”为主线展开。在理论层面，引入投入产出生命周期评价（IO-LCA）模型，打通宏观经济活动与微观环境影响之间的数据壁垒，实现从“生产者责任”向“消费者责任”的视角转换；在方法层面，提出环境卫星账户编制、碳排放强度向量构建、多区域贸易隐含碳追踪等关键技术路径；在工程实践层面，聚焦钢铁、水泥等典型高耗能行业，详细解析余热回收系统优化、超低排放改造中的碳增排风险识别、单位产品碳强度

对标分析等具体应用场景，强调环评应从“合规性审查”转向“绿色竞争力评估”。

尤为值得指出的是，本书特别强调环评的系统性与前瞻性。我们主张，环评不仅要核算直接排放，更要追踪间接排放；不仅要评估技术可行性，更要考量经济合理性与运行可靠性；不仅要提出减排措施，更要设计监测验证机制。唯有如此，环评才能真正成为推动绿色低碳发展的“导航仪”而非“盖章机”。

本书的编写得到了多位同行专家的指导与支持，在此一并致谢。同时，我们也深知，“双碳”目标下的环评创新仍处于探索初期，相关理论、标准与实践均在快速演进之中。

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。

—— 刘超斌、张丹、郑平



目 录

CONTENTS

第一章 双碳目标与环评制度发展	1
第一节 双碳战略的政策背景与内涵	1
第二节 环境影响评价制度的演进历程	5
第三节 双碳目标对环评体系的新要求	8
第四节 国际环境影响评价经验借鉴与比较	12
第五节 环评创新发展的机遇与挑战	17
第二章 碳排放评价理论与方法	23
第一节 碳足迹核算方法体系	23
第二节 碳排放源识别与清单编制	27
第三节 碳减排潜力评估技术	32
第四节 碳中和路径分析方法	36
第五节 碳排放影响预测模型	41
第三章 生态碳汇评估技术体系	47
第一节 生态系统碳储量评估方法	47
第二节 碳汇功能监测与计量技术	51
第三节 土地利用变化碳效应评价	55
第四节 生态修复碳增汇潜力分析	59
第五节 碳汇交易机制与价值评估	64
第四章 清洁能源项目环评创新	69
第一节 风电项目生态环境影响评价	69
第二节 光伏发电项目全生命周期评价	75
第三节 氢能项目环境风险评价方法	79
第四节 多能互补系统综合环境影响评价技术	85

第五章 重点行业低碳环评实践	91
第一节 钢铁行业碳减排环评案例	91
第二节 建材行业碳中和路径环评	96
第三节 化工行业低碳转型环评	101
第四节 交通基础设施碳评价实践	105
第五节 工业园区碳达峰环评体系	111
第六章 环评大数据技术应用	117
第一节 环境大数据采集与处理技术	117
第二节 遥感技术在环评中的应用	122
第三节 地理信息系统空间分析方法	127
第四节 人工智能环评预测模型	133
第五节 数字孪生技术在环评中的应用	137
第七章 生命周期评价方法创新	143
第一节 生命周期评价理论框架	143
第二节 产品碳足迹核算标准	147
第三节 过程型 LCA 方法与应用	152
第四节 投入产出 LCA 模型构建	156
第五节 LCA 在政策制定中的应用	161
第八章 环境风险预警与管控	167
第一节 环境风险识别与评估方法	167
第二节 突发环境事件应急评价	172
第三节 环境健康风险评估技术	176
第四节 气候变化风险评价体系	181
第五节 环境风险分级管控策略	184
第九章 绿色低碳规划环评	191
第一节 国土空间规划环评方法	191

第二节 城市低碳发展规划环评	196
第三节 产业园区规划环评创新	201
第四节 交通体系规划碳评价	207
第五节 区域生态安全格局评价	214
第十章 环评制度改革与实践展望	221
第一节 环评法律法规体系完善	221
第二节 环评与排污许可制度衔接	225
第三节 公众参与机制创新	230
第四节 环评监管体系优化	234
第五节 双碳背景下环评发展展望	239
参考文献	245

第一章 双碳目标与环评制度发展

第一节 双碳战略的政策背景与内涵

一、全球气候变化与中国承诺

全球气候变化是一个全世界人民需要解决的共性问题，各国必须联合起来才能找到解决办法。作为一个负责任的大国，中国积极参与全球气候治理，用实际行动来表现大国的责任。从《联合国气候变化框架公约》的签署到《巴黎协定》的达成并执行，中国一直都是全球生态文明建设的重要参与者、贡献者、引领者。

（一）《巴黎协定》与全球温控目标

《巴黎协定》是全球气候治理的一个里程碑，提出把全球气温的升幅控制在工业化以前 2 摄氏度之内，尽力控制在 1.5 摄氏度以下。该目标的实现要依靠各缔约方所提出的“国家自主贡献”。协定形成了一种自下而上、具备普遍约束力的行动架构，促使各国依照自身情况制定减排目标，并且定时展开评审，从而形成全球合力，共同应对气候变化。

巴黎协议的主要机制就是透明度与盘点机制，鼓励各国不断加大减排的力度。它在强调减排的同时，也十分重视适应、资金、技术等重要问题，给发展中国家应对气候变化提供支持。协定体现的是全球绿色低碳转型的大方向，给世界经济向可持续发展模式转型注入了强大的政治动力，也为中国提出更高水平的气候行动目标提供国际背景。

（二）中国“30·60”双碳目标的提出与战略意义

2020 年 9 月，在第七十五届联合国大会上的中国宣布，争取在 2030 年前达到二氧化碳排放峰值，力争在 2060 年前实现碳中和。这就是人们常说的“30·60”双碳目标。这是中国对于构建人类命运共同体应尽的责任，是实现可持续发展的必然选择，是世界上最大的发展中国家面对全球气候变化的自觉选择。

“30·60”目标的战略意义重大。它是中国经济高质量发展的强劲引擎，会倒逼产业结构、能源结构加快调整，淘汰落后产能，培育壮大绿色低碳新兴产业，

形成新的经济增长点和竞争优势。这是保证国家能源安全的必然选择。只有大力发展非化石能源，减少对外部化石能源的依赖，构建清洁低碳、安全高效的现代化能源系统，才能保证我国的国家能源安全。同时“双碳”目标也是满足人民群众对优美生态环境需求的重要途径，以降碳、减污、扩绿为协同效应，持续改善空气质量，提高生态系统的质量、稳定性。它明显提高了中国在全世界气候治理和国际舞台上的发言权与影响力，体现负责任大国的形象，给全球可持续发展提供中国智慧、中国方案。

中国“双碳”目标的关键指标和阶段性任务可见下表：

中国“双碳”目标关键指标与阶段性任务表

指标	2030 年目标	2060 年目标	备注
二氧化碳排放	实现达峰后稳中有降	实现碳中和	
非化石能源消费占比	约 25%	超过 80%	在一次能源消费中占比
单位 GDP 二氧化碳排放	比 2005 年下降 65% 以上	-	削减强度
森林蓄积量	比 2005 年增加 60 亿立方米	持续增加	增强碳汇能力

同发达国家相比，中国从碳达峰到碳中和的时间较短，因此中国的减排任务更艰巨，转型过程更加剧烈。这是一场社会经济系统性的变革，必须全社会的共同努力，经过艰苦的努力才能完成。

二、双碳目标的顶层设计与政策体系

为了使“30·60”目标得以实现，中国正在建设目标明确、分工明晰、措施有效、衔接有序的政策体系。该体系以“1+N”的整体框架为依托，通过顶层设计与分领域、分行业具体方案相结合的方式，把“双碳”目标系统地融入经济社会发展的全过程和各个方面。

（一）国家层面“1+N”政策体系框架

1+N 政策体系是我国实现碳达峰、碳中和工作的主要框架。其中，“1”为中共中央、国务院印发的关于做好碳达峰碳中和工作的意见，该文件是总纲，确定了“双碳”工作的指导思想、基本原则、主要目标和重大举措，是贯穿碳达峰、碳中和两个阶段的纲领性文件。

N 代表对某一领域、某一行业采取的措施及支持保障措施。国务院印发的 2030 年前碳达峰行动方案是 N 中最具统领性的文件，为 2030 年前碳达峰目标提

出能源绿色低碳转型、工业领域碳达峰、城乡建设碳达峰、交通运输绿色低碳等十个方面的具体行动。这些行动方案就组成了达成碳达峰目标的施工蓝图。

除“十大行动”之外，“N”还包括科技、财政、金融、价格、标准计量、人才培养等各方面的支撑保障政策，以及各地方根据自身实际情况制定的区域性碳达峰方案。整个“1+N”政策体系体系清楚、层次分明，从中央到地方、从宏观到微观、从总体部署到具体落实形成了一个完整的政策闭环，给稳妥推进“双碳”工作提供有力的制度保障。

（二）重点领域与行业碳达峰行动方案

为了达到碳达峰的目标，《2030年前碳达峰行动方案》及相关部门文件已经对能源、工业、城乡建设、交通运输等重点领域、行业制定了具体的实施方案。这些方案充分考虑到了各个领域的排放特点和减排潜力，用分业施策的方式来保证减排工作的精准性、有效性。

1. 能源领域的行动方案核心就是推进能源绿色低碳转型。重点任务有大力发展风能、太阳能、生物质能、核能等非化石能源，加快构建以新能源为主体的新型电力系统，严格控制煤炭消费总量，推动煤炭和新能源优化组合。

2. 工业是我国能源消耗和二氧化碳排放的主要行业。工业领域碳达峰行动方案以钢铁、有色金属、建材、石化化工等高耗能行业为重点，坚决遏制“两高”项目盲目发展，推动传统产业绿色化改造，发展循环经济，提高资源利用效率。

3. 城乡建设领域把提高建筑能效、改善建筑用能结构作为主要任务。全面推广绿色建筑，大力推进旧建筑节能改造，大力发展超低能耗建筑，大力发展光伏建筑一体化，提高建筑电气化、智能化程度。

4. 交通运输领域的重点就是改善运输结构，推广新能源汽车，加快绿色交通基础设施建设。推进公转铁、公转水，发展多式联运，大幅提高铁路和水路在综合运输中的承运比例，加快充电桩、加氢站等配套设施建设。

这些分领域的行动方案为环境影响评价工作指明了方向，对环评报告中纳入相关指标提出了明确要求。

三、双碳目标的核心内涵与实现路径

“双碳”目标的关键之处在于解决好发展与减排之间的关系，借助推动经济社会发展全面绿色转型，达成高质量发展和生态环境高水平保护的双重目标。实

现路径具有系统性，在供给侧上实现能源结构的转型与产业升级，在需求侧实现节能、提效，在生态侧提升碳汇能力，是一场全方位、深刻的社会大变革。

（一）能源结构转型与产业升级

能源活动是主要的碳排放来源，因此，推动能源结构清洁低碳转型是实现“双碳”目标的根本途径。转型的核心就是“一增一减”，即大幅度提高非化石能源消费比重，逐步减少对煤炭等化石能源的依赖。具体路径为加快风电、光伏等可再生能源的发展，因地制宜发展水电，安全有序发展核电，探索氢能、储能等前沿技术的应用。到 2030 年非化石能源在能源消费中所占比例约为 25%，到 2060 年非化石能源在能源消费中所占的比例会超过 80%，清洁能源将成为能源供应的绝对主体。

能源结构转型与产业结构升级两者是相辅相成、互相促进的。“双碳”目标促使产业体系做出深刻调整，坚决阻止高耗能、高排放、低水平项目没有秩序地扩张，把传统产业推上高端化、智能化和绿色化发展的道路。严格审核项目的能效水平、碳排放强度，把资本和资源引导向绿色低碳产业。

产业升级不单单是淘汰落后产能，更在于发展壮大新能源、新材料、新能源汽车、节能环保等战略性新兴产业。新兴产业本身就具备低碳属性，其发展壮大可以从根本上改变经济的能源消耗强度以及碳排放结构。大数据、人工智能这些数字化技术给传统产业赋能，从而达成精细化管理并提升能效，成了产业升级的主要途径。

依靠能源和产业的双重转型，中国要形成清洁低碳、安全高效的能源体系和绿色循环低碳的现代产业体系，从源头上减少碳排放，为“双碳”目标的实现打好基础。

（二）节能提效与碳汇能力提升

节能提效被看作实现“双碳”目标的第一资源，也是成本最低、见效最快的减排方式。节能提效理念渗透到生产生活的各个方面，要在能源消费的各个环节全面提高利用效率。大力推广工业、建筑、交通等重要能源消耗领域先进的节能技术、设备，开展节能诊断、改造，挖掘更多的节能潜力。因此项目环评中对于能效指标的审查会变得特别重要，项目的用能方案和能效水平必须达到国内甚至国际上先进的水平。

推动全社会形成绿色低碳的生活方式，也是节能提效的重要组成。提倡绿色

出行、推广节能家电、提倡垃圾分类、提倡资源化利用等，使人们主动采取简约适度的消费方式，减少消费端的能源消耗和碳排放。

提高生态系统碳汇能力，是实现碳中和的又一重要途径。碳汇就是森林、草原、湿地、海洋、土壤等吸收并储存二氧化碳的过程，从而降低大气中温室气体的浓度。我国将大规模开展国土绿化行动，不断扩大国家森林面积和蓄积量，提高森林生态系统碳汇能力。

《生态系统碳汇能力巩固提升实施方案》等政策文件对提高碳汇能力的行为做了具体的安排，主要包含严格保护生态空间、推进退化生态系统修复、建立健全监测核算体系等主要措施。环境影响评价工作不能只考虑项目对碳源的增加效应，还要考虑其对碳汇的潜在影响。占用林地、草地、湿地等生态空间的项目要要求采取有效的生态补偿和修复措施，保证区域生态系统碳汇功能不被破坏，争取得到增强。

第二节 环境影响评价制度的演进历程

一、我国环评制度的建立与发展阶段

（一）从项目环评到规划环评的拓展

我国环境影响评价制度肇始于 20 世纪 70 年代末，最初以建设项目层面的环境影响评价为核心，强调在具体工程实施前识别和评估其可能造成的环境后果。1979 年《中华人民共和国环境保护法（试行）》首次确立了环评的基本法律地位，标志着我国环评制度的正式起步。此后数十年间，环评主要聚焦于单个项目的审批管理，虽在一定程度上遏制了局部污染源的无序扩张，但难以应对区域性和系统性环境问题。随着可持续发展理念的深入以及生态文明建设的推进，单一项目导向的环评模式逐渐显现出局限性。2003 年《环境影响评价法》的颁布成为制度转型的关键节点，首次将规划环评纳入法律框架，明确要求对土地利用、区域开发、流域综合开发等重大规划开展环境影响评价。这一转变不仅提升了环评的战略高度，也使其从末端治理向源头预防延伸，实现了由“点”到“面”、由“事后补救”向“事前统筹”的结构性跃升。规划环评的引入强化了政策、规划与环境目标之间的协同机制，为优化国土空间布局、协调经济社会发展与生态保护提

供了制度支撑。

（二）环评法律法规体系的逐步完善

自环评制度确立以来，我国围绕其核心内容构建起一套层次分明、覆盖全面的法律法规体系。除《环境影响评价法》作为基本法外，《环境保护法》《水污染防治法》《大气污染防治法》等专项法律均对环评提出具体要求；国务院及生态环境部陆续出台《建设项目环境保护管理条例》《规划环境影响评价条例》等行政法规与部门规章，细化环评程序、技术规范与责任机制。尤其在 2016 年《环境影响评价法》修订后，取消了环评单位资质限制，强化了建设单位主体责任，并推动环评与排污许可、生态保护红线等制度的衔接。此外，地方层面也结合区域生态特征和产业特点，制定更具操作性的实施细则，如京津冀、长三角等地探索跨区域环评联动机制。法律法规体系的持续完善，不仅提升了环评制度的权威性与执行力，也为其适应新时代高质量发展需求奠定了法治基础。制度设计日益注重科学性、透明度与公众参与，推动环评从形式合规向实质有效转型。

二、环评制度在环境保护中的作用与成效

（一）预防为主方针的贯彻落实

环境影响评价制度的核心价值在于将环境保护关口前移，通过系统识别、预测和评估拟议政策、规划或项目可能引发的环境风险，在决策早期介入干预，从而实现“预防为主、防治结合”的环保方针。相较于传统的末端治理模式，环评强调在方案比选阶段即融入生态考量，促使决策者优先选择环境友好型技术路径与空间布局。例如，在能源、交通、化工等高环境风险行业，环评已成为项目准入的前置条件，有效否决或优化了一批高污染、高耗能项目。同时，环评报告中提出的减缓措施、生态补偿方案及后续监测要求，构成了全过程环境管理链条的重要环节。实践表明，严格执行环评制度显著降低了重大工程对水体、大气、土壤及生物多样性的负面影响，尤其在自然保护区、饮用水水源地等敏感区域发挥了“守门人”作用。这种以预防为核心的制度逻辑，契合现代环境治理的风险防范理念，也为全球环境治理贡献了中国经验。

优化产业布局与促进绿色发展

环评制度通过空间约束与结构引导功能，深度参与国家产业布局优化与绿色转型进程。在宏观层面，规划环评通过对区域资源环境承载力的系统评估，为国

土空间规划、产业园区设立及重大基础设施选址提供科学依据，避免在生态脆弱区或环境容量超载区盲目布设工业项目。在微观层面，项目环评推动企业采用清洁生产技术、提升资源利用效率，并促使部分行业主动调整产品结构或工艺路线以满足环保准入门槛。近年来，环评与“双碳”目标、绿色制造体系等国家战略深度融合，例如在风电、光伏等可再生能源项目审批中，环评不仅关注施工期生态扰动，更评估全生命周期碳减排效益；在传统制造业升级中，环评成为淘汰落后产能、引导绿色投资的重要工具。这种制度性引导机制，使环评超越单纯的环境合规审查，转化为推动经济高质量发展与生态文明建设协同共进的政策杠杆。

三、新时代环评制度面临的挑战

（一）现有环评体系与气候变化应对的脱节

尽管我国环评制度在常规污染物控制方面成效显著，但在应对气候变化这一全球性环境议题上仍显滞后。现行环评技术导则与评价指标体系主要聚焦于局地或区域尺度的水、气、声、固废等传统环境要素，对温室气体排放、碳汇损失、气候韧性等关键维度缺乏系统性考量。多数建设项目环评未强制要求开展碳排放核算，规划环评亦较少将碳达峰、碳中和目标纳入战略评估框架。这种制度缺陷导致大量高碳锁定效应项目在审批阶段未被有效识别与干预，削弱了环评在推动低碳转型中的前瞻性作用。与此同时，气候变化引发的极端天气事件频发，对基础设施、生态系统及人群健康构成新风险，而现有环评对气候适应性（如防洪标准、热岛效应缓解、生态廊道连通性）的评估普遍薄弱。若不及时将气候因素深度嵌入环评全流程，环评制度恐难以支撑国家“双碳”战略实施，亦无法有效防范气候相关系统性环境风险。

（二）环评“放管服”改革后的监管难题

近年来，为优化营商环境、提升审批效率，我国持续推进环评领域“放管服”改革，包括大幅下放审批权限、简化环评类别、推行告知承诺制等举措。这些改革在激发市场活力的同时，也对事中事后监管能力提出严峻挑战。一方面，审批权下放至基层生态环境部门后，部分地区因技术力量薄弱、专业人才匮乏，难以保障环评文件质量与审查深度，存在“接不住、管不好”的风险；另一方面，环评与排污许可、执法监督等后续管理制度尚未实现高效联动，导致部分项目在获得批复后未严格落实环评提出的环保措施，形成“批而不管、评而不用”的监管

真空。此外，取消环评机构资质认定虽促进了市场公平竞争，但也催生了低价竞争、报告抄袭、数据造假等乱象，削弱了环评的技术权威性。如何在简政放权与有效监管之间取得平衡，构建以信用为基础、以大数据为支撑、以全生命周期管理为特征的新型环评监管体系，已成为新时代环评制度改革亟需破解的核心命题。

第三节 双碳目标对环评体系的新要求

一、环评范畴的扩展：从常规污染物到温室气体

传统的环境影响评价（环评）主要是针对常规污染物和生态影响展开的，而“双碳”目标的提出，使环评体系冲破了原有界限，把温室气体排放控制正式纳入其核心范畴。这就表明管理思路由末端治理转向源头减碳，是制度应对气候变化的必然选择。

（一）将碳排放纳入环评评价指标体系

在双碳背景下，环评最主要的变化就是评价对象的扩大。以往的环评主要是对项目建设、运营对局部环境质量的影响进行评价，评价指标主要是水、气、声、渣等常规污染物。温室气体特别是二氧化碳因为具有全球性气候效应而非局域环境公害，长期以来并没有被系统纳入环评的强制评价内容。新时期要把碳排放同常规污染物同等对待，创建起全面多元的评价指标体系。这既是对碳排放总量的核算，也是对项目能耗、物耗等各方面的碳排放源项、强度的识别。

将碳排放纳入指标体系要建立科学、规范的评价标准和基准。即确定各个行业的建设项目碳排放强度准入门槛、先进水平基准和总量控制指标。对于高耗能、高排放的“两高”项目，环评需严格审查其碳排放水平是否符合行业标杆或区域碳排放总量控制要求。对于新兴产业和基础设施项目，环评要引导其使用低碳技术和绿色能源。评价指标的设计既要考虑绝对量又要考虑相对强度，评价单位产品的碳排放等效率指标，可以更准确地衡量项目的绿色低碳水平。

实现这一转变需要有关法律法规和技术导则的支持和健全。上位法应当在环境影响评价法等法规中明确把应对气候变化、控制温室气体排放作为环评的法定目标。生态环境主管部门需加快制定分行业的建设项目温室气体排放评价技术指

南，为环评工作提供具体的操作规范。建立的指标体系要体现出动态性、区域差异性，根据国家碳达峰、碳中和阶段性目标及各个地区产业结构的不同来确定不同的评价标准，保证环评制度科学合理、可操作。

（二）协同控制温室气体与污染物排放

温室气体和常规污染物常常同根、同源、同过程，在以化石燃料燃烧为主的能源结构下，二氧化碳排放常常伴随着二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等污染物的产生。“双碳”目标下环评体系的革新，不能把碳排放评价和传统污染物评价割裂开来，而应该强调二者的协同控制，实现减污与降碳的“一体化”管理。环评分析项目污染产生机理的时候，必须剖析污染物和温室气体之间的伴生关系，评价不同的技术方案在减污降碳两方面所取得的综合效果。从协同的角度看可以避免政策失调，防止末端治理技术在降低污染物的同时增加能耗或者碳排放。

协同控制的思想要求环评在制定措施的时候进行系统优化。在提出环境保护措施的时候，环评报告不能只是污染物治理方案，还应该选择能够实现高效减污、深度降碳的技术路径。用可再生能源取代化石能源，可以从源头上杜绝常规污染物的产生，也是实现碳减排的根本途径。工艺优化、推广节能技术、发展循环经济模式，可以提高资源利用率，同时大幅度降低单位产品能耗和碳排放。环评需要做多方案比较，量化分析不同技术组合所带来的协同效益，为决策者提供环境、气候、经济效益都好的最佳方案。

二、环评方法的革新：引入碳评价技术方法

评价范围的扩大必然要求评价方法也进行相应的革新。传统的环评技术方法体系不能很好地支持碳排放的科学评价。为落实双碳目标，环评积极吸收和融合气候变化领域里的专业技术方法，创建出新的碳评价方法学体系。

（一）碳排放核算与预测方法的应用

精确量化是科学评价的前提，在环评中引入规范的碳排放核算和预测方法就是碳评价的重要一步。这就需要环评工作者掌握并运用国际、国内通行的温室气体核算标准和指南，政府间气候变化专门委员会指南、国际标准化组织 14064 系列标准、国家发布的重点行业企业温室气体排放核算方法与报告指南。

核算范围要包含整个项目生命周期。建设项目环评时，核算边界一般只对项目建设期、运营期的直接排放（范围一）和间接排放（范围二），即外购电力、

热力。在某些情况下，还要考虑供应链上下游的间接排放（范围三），使项目气候影响评价更加全面，保证评价的完整性，防止碳泄漏问题。

预测方法的选择也十分重要，环评要依据项目的设计参数、生产规模、工艺流程、能源消耗结构等，联系行业的发展趋势和技术进步的情景，合理预测几年内项目碳排放量。常用的方法有：

常见碳排放预测方法

方法名称	核心原理	适用场景	优势
排放因子法	活动水平数据乘以相应排放因子	广泛应用于各类项目和行业	操作简便，数据可得性高
质量平衡法	基于元素守恒定律，计算碳含量差异	特定工业过程，如化工、冶金	精确度高，适用于碳循环分析
模型模拟法	建立数学模型模拟排放过程	复杂系统、区域或国家层面	可进行情景分析和长期预测

预测结果的准确性关系到环评结论是否可靠。所以环评报告应当详细说明所采用的方法、数据来源、参数选取依据、不确定性分析，保证评价过程的透明、可追溯、可核查。规范化的技术方法使用，才能给项目碳排放水平的认定提供可靠的数据支撑。

（二）碳减排潜力与路径分析的要求

完成碳排放现状核算与未来预测之后，环评工作不能就此结束，而应该从长远的角度出发，分析项目的碳减排潜力，并给出清晰可行的减排路径。这就意味着环评的功能由被动地“影响评价”转变为主动地“优化引导”。环评报告要对项目技术、管理等各方面减排空间进行系统评价。技术上需要对比分析国内外的先进低碳、零碳、负碳技术，评价其在项目中适用的可行性、经济性、减排效果，如评估采用碳捕获、利用和封存技术的可行性与减排效益、氢能替代等前沿技术的可行性与减排贡献。

路径分析就是实现减排潜力的蓝图。环评需要给项目制定一份分阶段、可操作的碳减排路线图。路线图应该有近、中、远期的减排目标，对应具体的措施清单及时间节点。近期通过加强能源管理等途径可以实现初步的减排；中期采用节能设备升级等技术改造可以实现深度减排；远期可以规划颠覆性的工艺革新或者与区域新能源体系耦合，最终实现碳中和。路径分析既可以给项目绿色转型提供行动指南，也可以给监管部门总量控制提供决策依据。

三、环评目标的提升：服务绿色低碳转型

环评体系改革要以核心目标的升级为指引。在“双碳”战略的大背景之下，环评不能只作为环境风险的“守门员”，而应该成为区域和产业实现绿色低碳高质量发展的“导航仪”和“加速器”。

（一）环评结论与“双碳”目标的衔接

环评最终结论是环评制度效力最集中的体现。为了更好地服务于双碳目标，环评结论的判定逻辑要做出深刻的变化。过去环评结论中的“是”与“否”，主要是看项目污染物排放是否符合环境质量和总量控制的要求。未来项目的碳排放水平以及与区域、行业碳达峰目标的一致性将会成为决定项目是否可以获批的关键因素。环评结论要明确回答项目建设是否符合国家、地方碳排放控制政策。

环评审批部门要将项目碳排放评估结果同规划环评、区域碳达峰行动方案、产业准入负面清单开展对标分析。对拟建于碳排放已接近或者超过总量控制上限区域的高碳项目，环评应给出否定意见或者提出严格的碳排放减量替代要求。而采用行业领先低碳技术的项目应该得到环评的认可。这样就形成一个从宏观的“双碳”战略到微观项目审批的衔接机制，使宏观战略可以通过微观项目的审批来实现。

环评结论的表述方式也需要更新，除了传统的“可行”或者“不可行”，环评可以采用附条件批准的方式，即要求项目方承诺采取具体的碳减排措施，作为项目设计、施工、运营的刚性约束。这些条件要具体、可量化、可考核，并且要纳入后续的环境监理和竣工环保验收之中，从而形成从审批到监管的全过程闭环管理，使项目碳排放一直处于可控范围之内。

（二）推动项目与规划源头减碳

环境影响评价制度最根本的优势就是源头预防。在双碳背景之下，该功能的作用更加强烈。环评在项目决策之初就介入，可以起到优化选址、选线、工艺、规模的作用，把低碳理念融入到项目基因当中。规划环评阶段可以对区域产业布局、能源结构等进行前瞻性碳排放评估，从空间、结构上引导形成绿色低碳的生产生活方式，给后续项目环评设定清晰的碳排放边界。规划环评结论是规划制定的重要依据，从而从高碳锁定上对规划进行规避。

项目环评的源头减碳作用就是促使方案做出根本性的改变。环评不能只是被

动地判断已确定方案的环境合理性，而应该参与到多方案比选中。通过对比不同的技术路线、能源方案、循环利用模式的碳排放影响来论证并推荐最优的绿色设计方案。它也可以论证项目的逆效益，即项目带来的碳排放增量所造成的社会经济损失远大于其自身效益，从而从根本上否定不合理的项目构想。深度介入源头，把环评由原来的合规性审查工具变成推动可持续发展的决策支持工具。

第四节 国际环境影响评价经验借鉴与比较

一、发达国家战略环评中的气候变化考量

战略环境影响评价是在政策、规划、计划层面开展的环境评价，是把气候变化因素提前纳入决策过程的关键环节。许多发达国家已经把气候变化作为战略环评的主要议题，从源头上引导区域、行业走向绿色低碳发展，给具体项目的环境准入提供基本指导。

（一）欧盟 SEA 指令中的气候评估实践

欧盟的《关于评估某些计划和方案对环境的影响的指令》（简称 SEA 指令），是欧盟战略环评的法律依据。本指令要求各国对于可能对环境造成重大影响的官方规划和方案，在制定和批准时应当做战略环境影响评价。尽管指令原文中并没有直接使用“温室气体”、“碳排放”等术语，但是它明确要求评价要考虑到气候因素的影响，这给将气候变化全面纳入战略环评提供法律依据和广阔的解释空间。在实践中欧盟成员国把气候变化减缓和适应当作评价的重点。评价过程会考虑到规划或者方案本身造成的温室气体排放增量，还会对规划或者方案对区域整体碳排放趋势的影响进行分析，并与国家自主贡献目标等其他气候政策目标进行一致性分析。

从评估方法论的角度来说，欧盟各国也探索了各种不同的技术途径。定性与定量相结合是目前的主要方法。规划初期多用定性分析来识别主要的气候影响驱动因素和潜在的风险。随着规划的深入，定量评价所占的比重越来越大，经常使用能源消耗模型、交通流量模型等工具来预测不同方案下碳排放的轨迹。情景分析为其中一种主要的工具，它会设置出不同的发展情景（基准情景、低碳情景等等）来对各个方案实现气候目标的效果进行比较。除减缓气候变化（减少温室气

体排放)外,也十分重视适应气候变化。这就要求评价规划实施区域未来气候变化下的脆弱性,评价规划本身是否有助于提高区域气候韧性,城市规划环评中会评价规划应对极端天气事件的能力。

欧盟的经验表明,在战略层面做气候评价可以避免项目层面评价所造成的局限性。它把气候考虑由单个项目的审查提升到区域性的、行业的战略发展路径上,从而更好地引导投资流向,推动能源结构、产业布局、交通模式的系统性转型。由此形成的自上而下的传导机制,使得后一个项目环评可以在已经确立的低碳发展方向下进行,大大提高了决策的协同性、效率,从源头上控制了碳排放。

(二) 美国 NEPA 法案下的温室气体评估

美国的国家环境政策法是世界上最早的一部环境影响评价的立法,它规定所有的联邦机构在作出重大决策之前,必须对其环境影响进行充分的评价。近些年来,由于气候变化问题愈加严重,在该法案框架下对于温室气体排放以及气候变化影响的评价,成了美国司法、行政及学术界持续关注并展开争论的话题。美国的温室气体评价要求不像欧盟那样以指令的形式来规定,而是通过行政指导文件以及司法判例来逐步确定。

白宫环境质量委员会作为 NEPA 的协调机构,多次发布指导意见来指导联邦机构进行温室气体排放评估。指导意见认为,对可以合理预见的温室气体排放,在环评文件中应当予以量化,并将量化结果置于科学与政策的背景之下加以讨论。评估范围包括直接排放、间接排放。直接排放是项目自身产生的排放,间接排放是指由于项目引起上游、下游活动产生的排放,即原材料开采、运输以及最终产品使用等环节产生的排放。全生命周期视角可以更全面地体现项目的气候足迹。同时指导意见也鼓励机构使用现有的工具进行定量分析,在不能精确量化的场合可以进行定性描述。对于气候变化对项目本身造成的影响,也就是气候脆弱性评估,也被逐渐纳入考虑。要求评价项目在未来的气候情景下是否可持续和安全。

司法判例对 NEPA 下温室气体评价起到非常重要的作用。一系列法院判决都确定了联邦机构在环评时对于温室气体排放量化的、公开的要求,认为温室气体排放属于 NEPA 规定的环境影响。判例使评估具有了强制性,也使评估的方法更加科学规范。部分环评实践中开始使用碳的社会成本的概念,把未来气候变化造成的损害用货币化的形式表现出来,给决策者提供更加直观的参考。具体的评价方法与工具没有完全统一,但是由于行政指导与司法实践的双重推动,温室气体

评估已经成为美国联邦重大项目环评中不可缺少的一部分，对能源、交通等关键基础设施项目的决策起着重要的作用。

二、碳排放评价的国际标准与方法

伴随着全球碳市场建立以及企业碳管理的普及，国际上已经形成了一个比较完整的碳排放核算和报告标准体系。这些标准和方法给企业、政府提供可靠的碳排放数据基础，也给环境影响评价中碳排放的定量评估提供科学严谨、可比性强的方法学支持。

国际主要碳排放核算标准对比表

特征 / 标准	ISO 14064 系列	温室气体核算体系
制定机构	国际标准化组织	世界资源研究所 & 世界可持续发展工商理事会
主要用途	温室气体量化、报告、审定 / 核查	温室气体量化与报告
涵盖范围	组织、项目层面温室气体管理	组织、产品、价值链层面温室气体管理
核心理念	建立排放清单、项目减排量计算、数据核查	范围一、二、三排放划分
法律地位	国际标准，可作为规范性依据	广泛接受的行业标准和指南
应用特点	标准化程度高，适用于第三方审定	灵活易用，适用于企业内部管理和价值链分析

关于国际碳排放核算标准的具体差异，参见上表。

（一）ISO 14064 系列标准的应用

ISO 14064 系列标准是国际标准化组织发布的有关温室气体量化、报告和审定（核查）的规范性文件，是全球使用最广泛的温室气体量化、报告和审定标准。该套标准有组织层、项目层、审定机构层、核查机构层等，环评中碳排放评估的指导作用是全方位的。

ISO 14064-1 对组织（项目建设单位）创建温室气体排放清单给出了详细的指导。需要组织对自身运营边界内所有排放源进行识别，按直接排放、能源间接排放、其他间接排放分门别类地计算。项目环评准备阶段建设单位可以按照该标准建立自身的碳排放基线，可以清楚现有碳排放水平，为评价项目增量排放提供参照。

ISO 14064-2 是有关项目层次温室气体排放的国际标准。它给量化、监测、

报告减少温室气体排放或者增加温室气体清除的项目提供框架和原则。该标准提出需要设定项目基准线情景，即在没有该项目时温室气体的排放情景。比较项目情景和基准线情景的排放量，就可以得到项目的减排量。此方法论对评价节能、可再生能源、林业碳汇等具有明确减排效益的项目的环境效益十分关键，可以量化并且证明其减排贡献。

ISO 14064-3 对温室气体声明的审定和核查原则及要求做出规定。它的目的是保证碳排放数据的准确性、一致性、公开性，提高评价结果的公信力。环评时，由第三方机构按照该标准对项目的碳排放计算过程和结果进行核查，可以有效防止数据虚报、方法误用等问题，保证环评结论的科学性、公正性，给监管部门和社会公众监督提供可靠的依据。

（二）温室气体核算体系的借鉴

世界资源研究所和世界可持续发展工商理事会联合开发的温室气体核算体系是又一套国际上影响很大的温室气体核算标准，其中最著名的要数它的“范围”划分。该体系把排放分为三个范围，给环评全面识别、评价项目全生命周期碳足迹提供了一个系统的分析框架。

1. 范围一指的是项目运营边界内的直接排放温室气体，也就是项目现场的化石燃料燃烧、工业过程中的化学反应排放。本部分被传统项目环评所关注。

2. 范围二指项目外购电力、蒸汽、热力或者冷气所对应的间接温室气体排放。随着能源结构的低碳转型，在选择能源供应方案的时候评估范围二排放变得十分重要。

3. 范围三指的是价值链上除了范围一、范围二排放之外的其他所有的间接排放。这是一个广泛而复杂的分类，它包括了上游原材料开采、运输，资本品生产，下游产品运输、使用、废弃处置等各个环节所产生的排放。

在双碳目标之下，环境影响评价要跳出项目的物理边界，考虑项目在整个产业链、整个生命周期中产生的气候影响。温室气体核算体系范围三核算理念为此提供了重要的理论和方法借鉴。对于很多项目来说，范围三排放量会比范围一和范围二之和大得多。新能源汽车制造厂自身生产过程排放（范围一、二）不高，但是供应链（电池材料、钢材等）和产品使用阶段（充电所用电力碳强度）的排放却很大。将范围三纳入环评考虑范围，可以使项目方在方案设计阶段就更多地考虑供应链脱碳、循环经济、绿色设计等因素，进而推动整个价值链的协同减

排，防止碳排放转移。

三、国际环评制度发展趋势与启示

在气候挑战越来越严峻的时候，国际环境影响评价制度正在发生从被动应对到主动引领的深刻转变。环评不再是单纯的对项目负面影响环境的评价，而是越来越成为一种前瞻性治理手段，即实现气候目标、提高社会生态系统韧性的评价。

（一）环评与气候风险评估的融合

国际环评的一个明显趋向就是，从单个评价项目对气候变化的影响（即碳排放），转向评价气候变化对项目自身的影响，实现了减缓与适应的双向融合。这就意味着环评要加入气候风险评估的视角，对项目全生命周期内所遭遇的物理风险和转型风险展开全面分析。

物理风险是由气候变化引起的自然灾害发生频率和强度增加而造成的，分为急性风险（台风、洪水、热浪）和慢性风险（海平面上升、平均气温升高、水资源格局改变）。融合之后的环评要求项目需要评价选址、设计、建设、运营方案是否能够抵御预期的未来气候风险。沿海地区基础设施项目的环评要依靠气候模型来预估未来海平面上升、风暴潮的数据，从而判断防洪标准是否充足，有无被淹没的危险。转型风险是由于社会向低碳经济转型过程中所引发的政策、法律、技术、市场等各方面的变化而产生的一种风险。高耗能项目会存在未来碳税或者更严格的排放标准等政策风险，同时也会因为低碳替代技术的出现而面临市场淘汰的风险。环评包含转型风险评价，可以识别出和长期脱碳目标相冲突的锁定投资，防止产生资产搁浅的问题。

（二）增强环评的适应性与韧性评估

在气候风险评价的基础上，国际环评又进一步发展，积极提高项目及其所在区域的适应性和韧性。这就意味着环评不仅要识别风险，还要对风险进行评价并提出相应的应对措施，把适应性设计、韧性提升作为项目可行性的重要评判标准。评估的重点也由原来的减少负面影响变为创造积极的适应性贡献。

该种评价方式使项目在设计阶段就优先选择以自然为基础的解决方案、生态设计、循环经济原则。城市开发项目的环评可以推动使用绿色屋顶、透水铺装、人工湿地等技术，不但可以降低项目自身的碳排放，还能提高城市防洪排涝能力、增强城市应对热岛效应的韧性。评价时对各个技术方案、管理措施提高适应能力

的效果进行比较，将比较结果作为方案比选的重要依据。同时还要考察该项目是否会削弱周围社区或生态系统原有的韧性，比如水利工程是否会影响下游生态系统的抗旱能力。因此环评就成为了一种优化手段，在满足项目自身功能需求的基础上，也为整个社会生态系统气候韧性做出贡献，从而保证发展的可持续性、长久的安全。

第五节 环评创新发展的机遇与挑战

一、双碳目标带来的发展机遇

双碳战略全面推行以后，环境影响评价不再只是传统意义上的污染防治，而是在应对气候变化、推进绿色低碳转型的大背景之下展开。这大大提升了环评的战略地位，给环评市场的发展以及技术革新注入了强大的动力，开创了行业发展的新纪元。双碳目标下环评与传统模式相比有明显不同，具体见表 1-2。

常见环评模式对比表

特征维度	传统环评	双碳背景下环评
关注核心	污染防治、生态影响	气候变化、绿色低碳转型、碳排放
评价范畴	废水、废气、固废（三废）及生态影响	全生命周期碳足迹、区域 / 规划 / 项目碳排放
方法学重点	局部、末端治理，污染物排放量核算	源头控制、系统性评估，温室气体排放核算、生命周期评价
市场导向	项目合规性审查	高端咨询、战略工具、全产业链服务
人才需求	环境科学、工程、生态学知识	复合型人才（气候科学、能源经济、工业过程、数据分析等）

（一）环评咨询市场的新增长点

双碳目标的提出给环评咨询行业打开了广阔的市场。以往环评业务主要是对项目产生的“三废”（废水、废气、固废）及生态影响进行评价；在碳达峰、碳中和的刚性要求下，碳排放评价已经成为项目准入的限制条件。直接催生出以碳为核心的新型环评业务需求，从宏观的区域、产业规划环评，到中观的园区环评，再到微观的建设项目环评，都需要对碳排放影响做系统性的评估。业务范围横向拓展使环评咨询服务产品线更丰富，给市场带去大量增量。

业务深度纵向扩展又产生了巨大的市场价值。碳评价同传统的污染物评价相比,更重视全生命周期的系统考虑。咨询机构的服务已经不再局限于项目建设、运营阶段的直接排放,而向上游原材料开采、运输,下游产品使用、废弃、回收等供应链各个环节延伸。全过程碳足迹核算及管理咨询,对技术能力以及综合服务水平有更高的要求,也带来更高的服务附加值。为了实现自身碳中和目标、满足绿色供应链标准、应对国际碳关税壁垒,企业对于高端环评咨询服务的需求越来越大,从而促使环评咨询市场向专业化、精细化、高价值化方向转型升级。

双碳目标催生了众多的衍生咨询服务领域。为地方政府提供区域碳达峰路径规划、实施方案评估服务,为重点排放企业提供碳资产管理、碳交易咨询、环境、社会、公司治理报告编制服务,更为重大投资项目提供气候投融资相关风险评估和决策支持服务。这些新的业务既是环评职能的自然延伸,又是环评服务国家重大战略、深度融入经济主战场的具体体现。为环评咨询机构多元化发展和品牌创建打下坚实的基础,使其成为社会全面绿色转型不可或缺的专业力量。

（二）环评技术与方法学的创新动力

双碳目标给环评工作科学性、准确性、前瞻性提出前所未有的高要求。由此产生的压力成为环评技术方法学不断更新的强大动力。传统的以局部、末端治理为主的评价方法已经不能适应系统性、源头性和全过程碳减排管理的要求。因此环评工作急需在方法论上实现根本性的创新,才能给低碳发展提供科学的决策支持。

技术与方法学的创新集中体现在多个层面。

1. 核算方法更加细致,并且本土化。我国能源结构和产业的特点决定了我国急待研发和建立分行业、分工艺的温室气体排放因子数据库,并创建可以精准计算间接排放(如电力、热力的使用产生的排放)和供应链隐含排放的标准核算方法体系。这就需要环评技术人员掌握国际通用的核算准则,根据国内的具体情况,进行修正和创新核算准则来提高核算的准确性、可比性。

2. 评价模型综合化、智能化。这一时代的媒介给人们的感受是碎片化、娱乐化,而且伴随着地理空间壁垒不断减弱的强大心理冲击。未来的环评技术将更多的从几个方面的影响进行耦合分析。需要开发温室气体和大气污染物排放协同评价的集成模型,找到减污降碳最优途径。大数据、人工智能、物联网等数字技术的广泛应用,可以搭建起动态的、实时的项目或者区域碳排放监测模拟平台,经

由情景分析以及预测预警，给环评工作赋予更为科学、动态的决策支撑，明显改善评价的前瞻性与有效性。

3.3 全生命周期评价方法的推广和深化。应该把生命周期评价方法系统地嵌入到环评体系中，从产品设计、原料选择、生产工艺、消费使用、末端处置等全过程入手，识别出关键的碳排放环节和减排潜力。因此促使企业从源头开始就实施绿色设计、技术革新，从而推进整条产业链的低碳转型。方法论发生改变，环评就由原来的项目合规性审查，变成创建绿色价值链的战略性手段。

二、当前面临的主要挑战

双碳目标给环评发展绘制了宏伟蓝图，但是环评体系自身还存在很多不足和瓶颈，在迈向这一目标的路上。目前，由于技术标准缺失、人才能力不足等造成的各种问题交织在一起，成为环评领域应对气候变化挑战、服务双碳战略的现实障碍。

（一）碳评价技术标准与规范的缺失

目前环评体系中关于碳评价的系统性技术标准和规范体系还不健全，成为其开展碳评价工作的一个突出难题。我国现行的环境影响评价法及相关法规条例虽然提到了气候变化，但是并没有将温室气体排放评价规定为一项独立且强制性的评价内容。造成实际操作时碳评价是否开展、深度和广度，很大程度上受地方管理层要求及项目性质所影响，缺少全国性的强制力，造成碳评价的实施呈现碎片化、不均衡的特点。

更严重的是缺少具体的指导文件。目前现有的环评技术导则体系主要针对常规污染物评价，缺少针对建设项目或者规划层面的碳排放影响评价系统性的技术指南。因此环评工作者在确定评价范围、核算边界、选择排放因子数据、评价减排措施有效性、预测碳排放达峰情景等各方面都陷入了无法可依的困境。大型工业项目中间接排放（范围二、范围三排放）怎样科学界定并纳入评价范围，产品全生命周期碳足迹怎样量化等关键技术问题，都没有统一规范。这造成不同的评价机构得出的结论大相径庭，严重影响环评的科学性、一致性、权威性。

缺少标准就直接造成评审工作陷入困境。评审专家、审批部门对带有碳评价内容的环评报告进行审查时，由于没有统一的评判标准和技术基准，很难对评价结论是否合理、减排承诺是否可行做出客观公正的判断。一方面增大了审批的不

确定性，另一方面也会造成一些项目出现“假减碳”、“伪低碳”的情况，不能发挥环评在源头上遏制高碳项目盲目发展的作用，削弱了制度的严肃性、有效性。

（二）环评人员碳核算能力有待提升

双碳目标之下，环评工作表现出跨学科的新特征，但是环评人员现有能力与实际需求间存在较大差距。传统的环评工程师培养以环境科学、环境工程、生态学等学科为主，主要技能就是评价污染物产生、迁移、转化的规律及治理技术。但是，对于气候变化科学、能源经济学、工业过程分析、碳金融等领域的知识储备很少。

碳核算与评价是一项专业性很强而且非常复杂的工作。它要求从业者不仅要准确理解、运用核算方法学、标准（IPCC 指南、ISO 标准、国家发布的核算报告指南等），还要具备对特定行业的生产工艺、能源流程、物料平衡进行深入分析的能力。在化工项目碳排放评价中，不能只考虑燃料燃烧直接排放，还要核算工艺过程中复杂化学反应产生的排放，甚至要追溯原料供应链的碳足迹。深度融合工程、化学、经济学、数据分析等多学科知识的综合性要求，已经远远超出传统环境评价人员的认知范围。在实际工作中很容易造成核算边界划分不清、排放因子选用不当、数据质量控制不严等问题，直接影响评价结果的准确性。因此，系统性、大规模地培养既懂环保又懂低碳的复合型环评人才队伍已经迫在眉睫。

三、推动环评创新发展的策略思考

在双碳目标所引发的深刻变革面前，环境影响评价体系要主动求变、积极作为。当前的任务就是依靠加强顶层制度设计、健全跨部门协同机制等一整套策略性手段，全面提升环评对经济社会全面绿色转型的战略支撑水平。

（一）加强顶层设计与政策引导

为应对挑战、抓住机遇，就必须从国家层面加强顶层设计，给环评体系低碳转型赋予强有力的法律基础和清晰的方向。核心就是推动相关法律法规的修订和完善，在修订环境影响评价法的时候，应当把温室气体排放控制目标纳入环评的重要考量因素，正式把碳排放影响评价纳入环评的法定范畴，确立其法律地位。这样才能从根本上解决目前碳评价“身份不明”、执行力度不一的问题，为各级环评工作提供最高层面的法律依据。

要根据法律要求，加快建立科学、完备、可操作性强的碳评价技术标准体系。

该体系要分层次、分类别来构建。宏观上要制定国家级的规划和建设项目碳排放影响评价技术总则，统一碳评价的基本原则、程序、内容、方法和技术要求。中观、微观层面要组织力量，对电力、钢铁、建材、石化、化工、有色、交通等重点排放行业编制分行业技术指南。指南会确定各个行业的核算范围、排放源识别办法、推荐排放因子、减排技术评价准则、信息公开要求，给环评工作提供具体的“操作手册”，保证评价工作的规范性、科学性。

政策引导属于激发环评创新活力的重要因素。管理部门应当研究制定激励性政策，把环评结论同项目环境权益配置、绿色金融支持、财税优惠等政策工具结合起来。对于环评中承诺并使用了先进低碳技术、碳排放强度远低于行业基准的重大项目，在排污权、用能权等各方面给予优先保障或者奖励，并将其作为获得绿色信贷、绿色债券等金融支持的重要依据。由此建立正向激励机制，使建设单位把环评当作改善设计、提升绿色竞争力的途径，而不仅仅是行政程序，从而推动低碳技术在源头上得到应用和革新。

（二）构建跨部门协同工作机制

碳排放影响评价的综合性、复杂性决定了，它不能由生态环境部门单独完成。这项工作同能源、产业、交通、城乡建设等众多领域关系密切，牵涉发改、工信、自然资源、住建、交通、统计等诸多政府部门职能和数据。因此，创建起高效顺畅的跨部门协同工作机制，才是保证碳评价科学、准确、有效地开展的前提。协同要在政策制定、信息共享、联合审查等各方面体现出来，从而形成强大的管理合力。

国家、省级层面应当建立以生态环境部门为主导，相关部门参加的环评与碳达峰碳中和工作协调小组或者联席会议制度。核心任务就是协同研究并出台碳评价相关政策文件和技术标准，保证环评要求同国家能源战略、产业政策、国土空间规划等宏观政策相协调，避免政策之间相互矛盾。并破除部门壁垒，创建起权威的、统一的、开放的国家温室气体排放核算基础数据库和信息共享平台。该平台会把统计部门的能源消费数据、工信部门的重点产品产量数据、电力部门的电网排放因子数据、自然资源部门的土地利用和碳汇数据整合起来，给各级环评工作提供高质量、标准化的数据支持，从根本上解决目前环评中碳核算数据获取难、质量参差不齐的问题，大大提高评价的准确度和公信力。依靠这样的机制化协同，环评可以同宏观调控政策同步、同向发力，从而在服务双碳目标的大潮中，实现协同。

第二章 碳排放评价理论与方法

第一节 碳足迹核算方法体系

一、碳足迹的基本概念与核算边界

准确把握碳足迹的内涵，科学确定碳足迹评价的系统边界，是保证核算结果真实、可比的前提，也是指导后面数据收集和分析方向和范围的基础。

（一）组织层面与产品层面碳足迹

组织层面碳足迹指一个组织或者实体在一个确定的时间段内（一般是一年），由于自身运营活动产生的所有温室气体排放量。根据相关准则，排放源被分为三个范围，范围一为直接排放，范围二为外购能源产生的间接排放，范围三为价值链上所有其他的间接排放。组织碳足迹核算可以找到主要的排放源，为企业制定减排战略提供依据，也可以满足信息披露的要求。

产品层面的碳足迹，就是指一个产品或者服务在其整个生命周期内所排放的温室气体总量。评价视角包括原材料获取、生产、运输、使用、废弃处置全过程，也就是所谓的从摇篮到坟墓。产品碳足迹能更加精确地体现某一产品对于气候变化的具体影响，给绿色设计、供应链优化、低碳消费提供数据支撑。虽然二者角度不同，但是彼此之间存在联系。但是一个组织的全部产品碳足迹之和并不等于该组织的碳足迹，因为后者除了生产过程的碳排放外，还要包括大量的非生产相关的运营排放。

（二）核算边界确定原则与方法

核算边界确定是碳足迹计算的核心，它指明了应该计入计算的排放源。为了保证结果的客观性、可比性，边界确定要遵循相关性、完整性、一致性、准确性、透明度这五个原则。相关性即边界应能体现组织运营或者产品生命周期的全部过程；完整性要求边界包括所有的重大排放源；一致性要求方法可以比较；准确性力求最大程度减少偏差；透明度要求整个过程记录清晰。

从组织角度讲，核算边界确定方法主要有股权比例法和控制权法。股权比例

法按照组织在业务单元中所占的股权份额来核算排放；控制权法核算组织对业务单元具有运营或者财务控制权的全部排放。由于控制权法界定清晰、容易操作，所以被广泛使用。确定方法之后，还要对各个范围内的具体活动进行界定。

就产品而言，核算边界一般称为系统边界，它确定了产品生命周期的起止点。系统边界有“从摇篮到大门”、“从摇篮到坟墓”等。确定边界时需要使用截断标准来处理复杂的流程，即忽略对总排放量贡献很小的输入输出流。截断标准要合理，还要充分说明。

二、主要国际碳足迹核算标准

为了使碳足迹核算规范化、保证评价结果在全球范围内的可比性和公信力，国际社会制定了许多被广泛认可的核算标准，给全球碳评价实践提供方法学依据。

常见国际碳足迹核算标准对比

标准名称	发布机构	主要关注点	应用范围	特点
PAS 2050	英国标准协会	产品和服务生命周期温室气体排放	产品碳足迹	全球首个产品碳足迹量化规范，为后续标准奠定基础
ISO 14067	国际标准化组织	产品碳足迹量化要求及指南	产品碳足迹	最权威、应用最广，与 LCA 标准衔接，提供统一基准
GHG Protocol	世界资源研究所 & 世界可持续发展工商理事会	组织温室气体排放核算与报告	组织碳足迹	广泛应用于企业层面的温室气体核算，定义范围 1、2、3

如上表所示，PAS 2050 和 ISO 14067 是产品碳足迹核算领域的代表性标准。

（一）PAS 2050 产品碳足迹规范

公共可用规范 2050 是由英国标准协会制定的，它是全球第一个产品和服务生命周期温室气体排放评估系统方法规范。它的问世把产品碳足迹从理论研究转化为标准化的实践，目的是给各种组织提供一个清晰的、一致的量化框架来评估其产品和服务整个生命周期内的温室气体排放，进而更好地应对气候变化的影响。

PAS 2050 的核心要求是以生命周期评价理念为依据，但是只关注气候变化这种环境影响。该规范对核算的各个方面都有详细的规定，即核算目标和范围的确定、核算数据的收集要求、核算排放量的计算方法以及核算结果的沟通方式。其特点是对某一问题给出明确的处理规则，即要求将所有温室气体都纳入进来，

并对生物质碳、土地利用变化、产品使用、废弃等复杂环节给出具体的计算指导原则，大大提高了可操作性。

作为产品碳足迹领域的开创性标准，PAS 2050 对全球产生了深远的影响，被众多企业采用，也为之后国际标准 ISO 14067 的制定打下了基础。其严格的框架以及对关键问题处理的方法直到今天，仍然对碳足迹核算实践有极大的借鉴意义。

（二）ISO 14067 产品碳足迹量化标准

国际标准化组织发布的 ISO 14067 “温室气体产品碳足迹量化要求及指南”，是目前最权威的、应用最广泛的评价产品碳足迹的通用标准。它是 ISO 14000 环境管理系列标准之一，和生命周期评价标准 ISO 14040、ISO 14044 相衔接，给后者提供温室气体量化具体的应用指南。ISO 14067 目的在于提升量化结果的一致性、透明度，给组织开展公开报告、环境声明、参加碳标签计划赋予全球统一的基准。

该标准系统对产品碳足迹研究的全过程、全部原则作了规定，其基本框架严格按照生命周期评价的四个主要阶段来确定，即

1. 目标与范围定义：本阶段要确定研究目的、产品功能单位、系统边界、数据质量要求、分配程序、排除的活动，为整个研究打下基础。
2. 生命周期清单分析，即在此阶段对系统边界内与产品生命周期有关的所有物质、能源的输入输出数据进行收集、量化，形成清单。
3. 生命周期影响评价，把清单分析的数据通过选择合适的排放因子，转化为用二氧化碳当量表示的潜在气候变化影响。
4. 对结果进行综合分析、评估不确定性、得出结论并提出建议。标准对于研究报告的内容、格式都做了具体的规定，并强调信息沟通要透明、准确。

三、碳足迹核算的数据收集与处理

高质量的数据是碳足迹核算准确性的一条生命线。数据收集与处理属于整个核算过程的工作量最大、难度最高的一环，好坏直接关系到最终评价结果是否可靠。

（一）活动水平数据的获取

活动水平数据是指用来表示温室气体排放或者清除的生产、经营或者消费活

动的量化数据，比如化石燃料燃烧量、用电度数、物料运输里程等。它是碳排放计算公式中的基础变量，它的准确度是保证核算结果精度的前提。获得真实的、可靠的活动水平数据是碳足迹核算工作的一项主要任务。

活动水平数据可以分为一手数据和二手数据。一手数据通过直接测量、计量等方式从被评价系统内部获得，企业能源消耗报表、燃料采购发票、生产过程物料平衡表等属于一手数据。该类数据特异性强，能反映某一活动的实际情况，不确定性小。但是它的缺点是获取成本高、耗时费力，对于复杂的供应链系统来说，获取所有环节的一手数据几乎是不可能的。

当一手数据无法获得的时候，就应当使用二手数据。二手数据指的是从公开出版的文献、统计年鉴、行业报告、商业数据库等处获得的数据，可以采用行业平均能耗水平来估计某一环节的能源消耗。二手数据获取方便、成本低，可以快速填补数据空白，但代表性、准确性一般不如一手数据，不确定性大。因此使用时必须慎重考虑其适用性，选择地理、技术、时间上最接近评价对象的数据源。

实践当中数据取得常常要面对数据缺失、商业机密、信息障碍等种种问题。有效的应对办法有建立企业内部能源资源消耗监测体系、设计供应链调查问卷促使供应商提供数据、行业对标、运用模型模拟等手段对缺失的数据进行科学估算、借助数字化技术实现数据自动采集和管理。无论采取何种方式，在核算报告中都必须对所有的数据来源、类型、获取方法、所用假定、局限性等做出详细的说明，保证整个核算过程的透明度。

（二）排放因子的选择与来源

排放因子是活动水平数据和温室气体排放量之间的桥梁，也就是单位活动水平下温室气体的排放量，比如每燃烧一吨标准煤或者消耗一度电所排放的二氧化碳当量。排放因子的准确性、适切性直接影响最终碳足迹的核算结果，所以选择、使用恰当的排放因子是碳足迹核算过程中的关键技术环节。

排放因子的来源广泛，选择时应遵循清晰的优先序。理想的来源层级如下：

1. 企业实测数据：基于特定设施或生产线实际排放监测数据计算的因子，准确性最高。
2. 国家或区域官方发布，即政府主管部门发布的排放因子，例如地区电网平均排放因子，具有权威性，是区域内首选。
3. 行业协会或研究文献：针对特定工艺或材料的排放因子，比国家平均数

据更具代表性。

4. 政府间气候变化专门委员会给出的缺省排放因子适用于没有本地化数据的情况。

5. 公认的国内外商业数据库：例如 Ecoinvent 等生命周期评价数据库，提供了大量的、系统的排放因子数据，是做详细产品碳足迹研究的重要支持。

选择排放因子时要坚持代表性原则，即选择的排放因子应该尽量反映评价对象的地理位置、技术水平和时间年份。计算外购电力排放时，应先用所在区域电网年度平均排放因子。在核算报告中必须对每一个所用的排放因子数值、单位、来源、发布年份做明确记录，并对其不确定性进行评价说明，这是保证核算过程科学严谨可验证的重要保证。

第二节 碳排放源识别与清单编制

一、项目碳排放源分类与识别

项目碳排放源分类与识别是环评中涉碳评价的第一步，也是确定定量核算边界和范围的重要环节。按照国际上通用的温室气体核算体系框架，排放源被分成三个范围。这样的划分方法可以很好地将项目运行过程中产生的直接、间接环境影响全部涵盖在内，保证碳足迹计算的全面性、系统性，从而给项目低碳设计和运营管理提供明确的指导。项目碳排放源主要分类及识别要点如下表所示：

项目碳排放源分类与识别要点表

排放范围	定义	排放源示例
范围一 (直接排放)	项目运营主体直接控制或拥有的温室气体排放	固定源燃烧（如锅炉、发电机）、移动源燃烧（如厂区车辆）、逸散排放（如制冷剂泄漏、工艺副产物）
范围二 (间接排放)	项目外购能源（如电力、热力、蒸汽）产生的间接排放	从公共电网购电，其生产过程产生的排放
范围三 (其他间接排放)	除范围一、二外，企业价值链上下游产生的所有其他间接排放	原材料生产运输、员工通勤、商务差旅、废弃物处理、售出产品使用

（一）直接排放（范围一）源识别

范围一排放指的是项目运营主体直接控制或者拥有的温室气体排放。该类排放源的识别比较直接，主要有两大类。固定源燃烧是指在项目场地内固定设施中

由于燃料燃烧而产生的排放，企业自备锅炉、加热炉、焚烧炉、发电机组等固定设备所用燃料包括煤炭、天然气、燃料油、生物质等多种类型。识别出这些排放源，就要对项目所有的用能设备以及燃料消耗情况做详细的梳理。

第二类是移动源燃烧，即项目方拥有或者租用的交通运输工具在运营过程中产生的排放，即厂区内使用叉车、卡车、公务车等各种车辆产生的排放。范围一中还有一类特殊的排放，即逸散排放，它不是由于燃料燃烧而产生的，而是在生产工艺、化学反应或者物理变化过程中无组织地释放出来的温室气体，如化工生产中某些化学反应的副产物、制冷设备制冷剂泄漏、煤炭开采过程中甲烷逸散、废水处理过程中甲烷和氧化亚氮排放等。

（二）间接排放（范围二、三）源识别

间接排放是指由于项目活动产生，但排放源不是项目方拥有或者直接控制的温室气体排放。对于直接排放量较小，但对整个项目碳足迹影响较大的项目来说，这部分排放的识别与核算，在整体碳足迹认识上起着举足轻重的作用。复杂性要求评价人员要有更宽广的视野，对项目整个价值链进行考察。

范围二指的是项目外购能源引起的间接排放，主要包括外购的电力、热力或者蒸汽。项目本身不会直接燃烧化石燃料来生产这些能源，但是生产过程中会产生温室气体排放。如项目从公共电网购买电力，如果该电力的生产来源于燃煤火电厂，则其燃烧过程产生的二氧化碳应该计入项目的范围二排放。识别范围二排放源要准确统计项目外购能源消耗量，追溯其具体来源，选择合适的排放因子进行核算。

范围三包括除范围一、范围二之外的其它所有间接排放，范围三代表的是企业价值链上产生的全部间接排放总量。范围三识别要沿着项目价值链向上、下游延伸，主要包括上游活动排放（外购原材料和服务生产、运输，项目建设期间建筑材料生产、施工活动，资本货物制造等）；与项目运营直接相关的间接排放（员工通勤、商务差旅、废弃物处理等）；下游活动排放（已售产品使用、运输、分销，租赁资产运营，投资项目产生的排放等）。对于范围三排放源的识别，需要对项目的供应链、产品生命周期、商业模式等进行详细的分析，其核算边界的确定以及数据的获取，常常是实际工作中遇到的难点和重点。

二、碳排放清单编制技术规范

碳排放清单的编制就是将已经识别出的各种排放源进行系统化、量化的描述，为环境影响评价提供核心数据支撑。一份好的碳排放清单不但是流程严谨、格式规范的，而且需要对数据的质量进行严格控制，并且对不确定性做出科学的分析。这是技术上最基本的要求，也是保证环评结论客观公正、经得起检验的重要制度保障。

（一）清单编制流程与格式要求

碳排放清单编制要有一套标准的流程，保证碳排放清单系统的、可比性的透明度。一般分为以下几个重要的步骤：

1. 确定核算范围，也就是确定项目的组织边界和运营边界。组织边界确定的是哪些实体或者设施需要纳入核算范围，运营边界根据范围一、二、三来确定具体的排放源类别。

2. 识别排放源，即在确定的边界内系统排查所有的直接和间接排放源，不遗漏重大排放源。

3. 活动数据、选择排放因子，活动数据指的是导致温室气体排放的生产或者消耗活动的量化指标，例如燃料消耗量、电力购买量、原材料使用量等。排放因子就是将活动数据转换成温室气体排放量的系数。数据采集应力求准确、排放因子的选取优先使用官方发布或者行业公认的本地化数据。

4. 根据活动数据和排放因子计算出各个排放源的温室气体排放量。对于不同的温室气体要采用全球增温潜势值换算成二氧化碳当量。

5. 编制清单报告，即按照规范格式汇总和呈现核算结果。报告的内容一般包括核算主体基本信息、核算边界说明、各范围排放量详细数据、所用的方法学、数据来源、不确定性分析、质量保证措施等。

清单格式要求，目的是为了使信息标准化、清晰化，利于各个利益相关方理解审查。一般用表格形式，将不同排放范围、不同排放源、不同气体种类的排放数据分门别类地列示。清晰的格式有利于内部管理、持续改进，也为外部监管、同行对标、未来的碳交易打下了基础。

（二）数据质量控制与不确定性分析

数据质量是碳排放清单的生命线，直接影响到核算结果是否准确可信。高质

量的数据管理体系要渗透到清单编制的全部过程之中，从数据的收集、处理到报告编制的每一个环节，都要建立相应的质量控制程序。数据来源的可靠性是首要的因素，实测数据一般比文献资料或者默认值估算的数据要可靠得多。通过在线监测系统直接测量烟气排放参数，或者经过实验室分析确定燃料的实际含碳量，其准确性比用国家或者行业的平均排放因子进行估算要高得多。在数据收集阶段要实行交叉校验和核查，及早发现并纠正异常或者错误之处。同时所有的数据来源、计算方法、假设前提都应记录并存档，保证整个核算过程可以追溯、可以核查。

不确定性分析属于科学评价清单可信度的关键部分，其目的就是衡量最后排放量估算结果所可能存在的变异范围。不确定性的来源有很多，主要有模型的不确定性、参数的不确定性、情景的不确定性。模型不确定性是由于计算公式或者方法的简化、假设所导致的，参数不确定性是由于活动数据、排放因子的测量误差或者代表性不足所导致的。例如，若用全国平均的煤炭单位热值含碳量来代替本地区的煤质差异，就会引入参数的不确定性。

不确定性分析常用的方法有误差传递法、蒙特卡洛模拟法。误差传递法就是利用数学公式把各个输入变量的不确定度合并起来，得出最终结果的总不确定度。蒙特卡洛模拟法更加强大，它通过对于输入参数的概率分布进行成千上万次的随机抽样计算，最终得到排放总量的概率分布图，从而直观地反映结果的置信区间。清单报告要明确不确定性的来源，评价方法和结果，这体现出科学严谨的精神，可以提醒数据使用者认识到它的局限性从而做出更加审慎的决定。

三、重点行业碳排放源特征分析

各个行业的生产工艺、能源结构、资源消耗方式各不相同，所以其碳排放源的构成和特点也不同。对重点高耗能行业的碳排放源特性进行深入的剖析，在环境影响评价中准确地找到主要的排放环节，判断减排的潜力，制定出相应的低碳技术路线，有着十分重要的意义。有利于推动整个行业的绿色低碳转型，给区域碳达峰、碳中和策略提供科学依据。

（一）能源加工转换行业排放源

能源加工转换行业是国民经济的动力源泉，也是二氧化碳排放的主要来源。以燃煤发电、石油炼制、焦化等为代表，最突出的特点就是范围一的化石燃料燃烧排放占绝对主导地位。燃煤发电厂里，锅炉燃烧煤炭产生高温高压蒸汽，推动

汽轮机发电，这就是二氧化碳产生的主要环节。排放量同原煤消耗量、煤质（含碳量、热值）、锅炉燃烧效率有关。因此，识别此类项目碳排放源的重点就是准确核算锅炉燃煤种类和数量，关注节能提效技术（超超临界机组）的使用情况。

石油炼制和焦化行业也是以化石燃料的燃烧为主要的排放源。炼油过程中需要大量燃料油或者天然气来给蒸馏、裂化、重整等工艺提供所需要的热量。焦化厂用干馏炼焦煤生产焦炭，过程中产生的焦炉煤气一部分被回收用作燃料，但是燃烧过程仍然会产生大量的二氧化碳。除了燃料燃烧以外，这些行业还存在一定的逸散排放，如炼油厂火炬系统、储罐呼吸排放、管道阀门泄漏等，虽然无组织排放源所占比例不大，但在清单编制中不能忽略。该行业的碳排放特征比较集中，主要和能源输入有关，所以提高能效、优化能源结构成为主要的减排路径。

（二）工业生产过程排放源

工业生产过程排放是不同于燃料燃烧的另一种重要的碳源类型，它来自于特定的化学反应或者物理转化，而不是为了获取能量而产生的。水泥、钢铁、化工等行业过程排放常常占到碳足迹的大部分，甚至超过能源相关排放。排放和产品产量直接相关，减排难度大，一般只有颠覆性的工艺革新才能取得突破。

水泥生产属于典型的碳排放大户行业。其主要的排放环节是熟料煅烧过程。水泥回转窑中，主要原料石灰石（碳酸钙）在高温下分解生成氧化钙并释放大量二氧化碳，这部分排放与所用燃料无关，是由水泥生产的化学本质决定的。因此，水泥行业的环评不能只核算燃料燃烧排放，还要准确计算石灰石分解产生出来的过程排放，一般情况下，这是水泥行业最大的排放源。

钢铁行业，特别是采用高炉-转炉长流程工艺的企业，碳排放源结构很复杂。其过程排放主要发生于炼铁环节，即在高炉中用焦炭做还原剂将铁矿石还原成铁水。焦炭中的碳和铁矿石中的氧结合生成一氧化碳、二氧化碳，这是钢铁生产过程中主要的碳排放源，占据钢铁行业直接排放的绝大部分。炼钢过程中也会发生脱碳反应，产生一部分过程排放。因此在评价钢铁项目的时候，必须要分析其生产工艺路线，准确识别和核算高炉炼铁、转炉炼钢过程中的碳排放。

化工行业过程排放种类较多，其种类取决于产品的种类及生产工艺。天然气或者煤炭既是燃料又是原料，在合成氨生产过程中会产生二氧化碳；而生产乙烯等石化产品时，原料的化学转化也会产生碳排放。己二酸、硝酸等化学品生产过程会排放氧化亚氮，而氧化亚氮是一种增温效应很强的温室气体。因此，化工项

碳排放源的识别要深入到具体的工艺单元，对每一个化学反应的物料平衡进行详细的分析。

第三节 碳减排潜力评估技术

一、技术减排潜力评估方法

技术发展是推进碳减排的主要力量。技术减排潜力评价主要是分析采用先进工艺、设备所能实现的二氧化碳削减量，其评价结果是选择项目减排路径、判断项目可行性的依据。

（一）最佳可行技术对比分析

最佳可行技术对比分析属于评价技术减排潜力的基本手段之一。其要义是找到一个技术先进、清洁高效、经济合理的技术基准线。将行业内或者区域内的最佳可行技术作为标准，和待评估对象或者拟采用的技术进行比较，并定量计算出两者在单位产品碳排放强度、能源消耗等指标上的差别，从而明确技术改造可以实现的碳排放削减量。

环境影响评价实践中第一步就是 BAT 的识别和筛选。需要整理国内外的最新动态，政策标准和示范工程案例，在此基础上建立一个可以不断更新的 BAT 数据库。评估过程一般包括：确定评价边界和核算口径，收集评价对象的基础能耗和碳排放数据；选择合适的 BAT 作为参考基准；运用物料衡算、能量衡算或者排放因子法计算出现有技术与 BAT 之间的排放差距，该差距即为理论上的技术减排潜力。

将 BAT 对比分析引入到环评中，既可以给新建项目提供最优的低碳技术方案，有效避免高碳锁定效应，也可以给现有企业绿色化、低碳化改造指明方向。评价结果可以直接体现技术改进的紧迫性以及有效性，促使企业从规划设计阶段就将碳减排纳入到重要的考虑因素当中，进而推动先进低碳技术的广泛推广，从源头上减少碳排放的增量。

（二）技术经济性与减排效益评估

任何减排技术要想推广应用，都离不开其经济可行性，因此，技术经济性与减排效益评价成了将技术潜力变成实际决策的桥梁。全面考虑减排技术的投入成

本、运行成本和由此产生的环境效益、经济效益，来判断它是否具有投资价值和推广前景。主要的方法有成本效益分析、边际减排成本曲线分析、生命周期成本评价等。成本效益分析将各项成本、收益用货币量化的办法表现出来，计算净现值、投资回收期等指标直接评判项目的经济效益。

边际减排成本曲线清楚地显示了各种减排技术单位减排的成本，可以找出从低到高的减排技术序列，为分阶段、有梯度的减排策略提供决策依据。它提倡优先实施那些负成本或者低成本的减排措施，也就是所谓的“低垂的果实”型技术。在环评时建立某一个特定项目的 MACC，可以使得决策者知晓各种减排深度所引发的经济代价，进而能够在环境目标同经济承受能力之间做出明智的选择。生命周期成本评价着眼于技术的全生命周期，设备购买、安装、运行维护到最终报废处置的全过程都被纳入到成本考虑当中，从而防止因为前期投资小，而忽略掉长期经营成本造成的决策失误，也更加全面的反映出技术真正的经济价值。

二、结构与管理减排潜力评估

除了单个技术的突破之外，宏观结构调整以及精细化管理也同样存在极大的减排潜力。本部分主要从能源系统、产业布局、运营管理等角度来评价系统性优化所带来的减排效果，从而找到综合效益更好的减排途径。

（一）能源结构优化减排潜力

能源结构优化是实现碳减排最根本、最有效的方式之一，它对碳减排的影响在很大程度上取决于能否通过转变到非化石能源，从而降低碳排放。评估核心就是分析提高可再生能源（风能、太阳能、水能、生物质能等）在一次能源消费中所占比例，以及推动终端能源消费电气化水平提高所能实现的减排效果。根据区域资源禀赋、电网接纳能力、技术发展水平等各方面因素来预测各种能源品种的替代规模和速率。

评估时需要对区域或者行业的能源消费情况进行详细的盘点，建立能源平衡表，确定各类化石能源的消费量以及在各部门的分布情况。在此基础上可以设置不同的能源结构优化目标（可再生能源发电量占比、非化石能源消费占比等），结合各类能源的碳排放因子来计算目标情景比基准情景的碳减排量。氢能、储能等新兴技术同能源系统耦合使用的潜力研究也要加以考虑，这样可以加强电网的灵活性，有利于可再生能源的消纳。

在区域或者规划环评中，能源结构优化潜力的评价尤其重要。它不但影响着整个区域碳达峰、碳中和的路径，也牵涉到区域内产业布局以及重大项目准入标准。前瞻性的潜力评价可以提出更有战略意义的能源发展建议，引导能源基础设施投资朝绿色低碳方向发展，从宏观上促进能源系统深度脱碳转型，保证区域的发展和“双碳”目标同步。

（二）能效提升与管理改进潜力

能效提高被称为第一燃料，是目前最具经济效益的减排方法。能效提升和管理改进潜力评价，是从现有的技术和生产水平出发，挖掘优化能源利用途径、改进现有管理流程、推广节能措施所能够带来的“软性减排”空间。它们存在于工业、建筑、交通等重点排放领域，是实现短期减排目标的主要途径。

能效提高和管理改进的潜力评估途径很多，涵盖设备到系统、操作到战略的各个方面，常用方法如下表所示：

碳减排潜力评估方法摘要

评估类型	核心关注点	典型方法 / 手段	适用场景
技术减排	引入先进技术，替代高碳落后技术	BAT 对比分析，成本效益分析，生命周期成本评价	新建项目技术选型，现有项目技术改造
能源结构	优化能源供给侧和消费侧结构	可再生能源占比提升，终端用能电气化，新兴能源技术耦合	区域及国家能源规划，重大项目能源方案
能效提升	提高能源利用效率，减少能源浪费	设备节能、余热回收、精细化调控、绿色建筑标准	工业企业，建筑领域，交通运输
管理改进	优化运营管理流程，提升管理水平	能源管理体系，能源审计，员工节能培训	各类组织机构，生产经营活动

从上表可以看出，能效提升的具体潜力体现在：

1. 工业方面有节能电机系统，余热余压回收利用，能量系统优化，生产工艺流程精细化控制等。
2. 建筑领域：实行绿色建筑标准、开展既有建筑节能改造、使用高效照明和空调系统、发展智能楼宇管理系统等。
3. 交通领域主要从优化运输结构、推广新能源汽车、发展智能交通系统、倡导绿色出行四个方面进行研究。

从管理改进角度出发，创建并有效地运行能源管理体系，定期开展能源审计，执行能源对标，加强员工节能意识培训等都是挖掘管理减排潜力的有效途径。

将能效和管理潜力评价纳入项目环评，即评价不能只看项目的出身（是否采用了先进技术），还要看项目的表现（能源管理水平和运行效率）。可以设置行业能效标杆值，对项目设计能效与标杆值的差距进行分析，从而找到节能潜力。该种评价模式可以促使企业由被动式节能向主动式节能转变，把节能降碳融入日常生产运营之中，依靠持续的管理改善和细节优化来实现成本降低和环保效益的双赢。

三、综合减排潜力评估模型

复杂的社会经济系统用单一的评价方法很难完全体现出问题。综合评价模型把多种数据和算法融合起来，可以模拟出不同的路径下减排的效果，给制定长期的碳中和策略提供强有力的定量分析工具。

（一）LEAP 模型在减排潜力分析中的应用

LEAP（长远能源替代规划系统）模型属于自下而上的、依靠情景分析的能源及环境综合评价手段，在区域以及国家层面的碳减排潜力和路径规划方面有着广泛的运用。它创建起一个包含社会经济、能源需求、能源转换、资源禀赋和环境影响的完整核算体系，可以模拟出不同的技术选择、政策干预、行为改变对将来能源系统发展、温室气体排放的长期影响，进而定量评价综合减排潜力。

用 LEAP 模型做潜力分析的时候，首先要建立基准情景，即在现有的政策和技术发展水平下，未来能源需求和碳排放的发展路径。在此基础上可以创建技术推动情景、结构优化情景、加强政策情景等不同的替代情景。每一个情景都有一系列具体的减排措施参数，即可再生能源发展目标、工业能效提升速率、电动汽车渗透率等。模型通过对这些参数的调整，得到不同的能源消费总量、结构变化、碳排放轨迹，并将各种情景的排放结果与基准情景进行比较，从而得到各种减排措施或者措施组合的综合减排潜力。由于 LEAP 模型具有灵活性，因此可以与宏观经济模型耦合起来，对减排行动的社会经济影响进行分析，从而使环境影响评价从项目微观层面扩展到区域宏观战略层面。

（二）情景分析法在潜力评估中的实践

情景分析法是解决不确定性问题、分析长期碳减排潜力的一种核心理论。它不是对将来做出预测，而是在一系列可以实现并且相互兼容的未来图景（情景）的基础上，分析不同的发展路径下碳排放的结果，找出关键的驱动因素和决策节点。在“双碳”目标下情景分析法已经成了评价深度减排潜力、规划碳中和路径

不可或缺的框架。

情景设计一般是以经济增长速率、技术进步速率、政策执行力度、能源价格波动、公众生活方式改变等不确定变量为主要内容。在建立了“一切保持不变”的基准情景之后，就可以创建强化政策情景、1.5 度温控目标情景等不同的备选情景。利用模型工具（LEAP 模型、CGE 模型等）对这些情景进行定量模拟，可以清楚地看到为了达到一定的减排目标，社会经济系统需要在能源结构、产业布局、技术应用等各方面做出怎样的调整，可以发现不同的路径成本和效益。这就使得环境影响评价由原来的短期、静态的评价变为长期、动态的战略性判断，给决策者提供未来风险和机遇的洞察，进而提高减排路径规划的鲁棒性以及前瞻性。

第四节 碳中和路径分析方法

一、碳中和目标下的情景设定

情景设定是碳中和路径分析的逻辑起点，它呈现出了未来可能发生的各种发展图景，给后面定量预测以及优化选择赋予了基本架构。核心就是研究在不同的政策力度、技术进步速度和社会经济发展模式下碳排放系统可能发生的变化轨迹。

（一）基准情景与政策情景构建

基准情景也称为一切照旧情景，主要假定为没有新的、强化的气候政策干预，社会经济系统将沿现时的发展惯性和已经生效的法律法规继续演进。在建立基准情景的时候要考虑宏观经济增长率、人口规模和变化趋势、产业结构的变化方向、能源消费习惯以及目前的技术发展自然扩散速度等主要驱动因素。这个情景并不是用来预测未来的，它只是一种对比的标尺，在没有任何额外努力的情况下，碳排放能够达到的上限就得以清晰地展现出来，从而显示出实现碳中和目标有多难、多必要。

政策情景是在基准情景的基础上，加上各种碳减排政策的措施。按照政策的力度和实施范围可以将情景分为温和政策情景、强化政策情景、净零排放情景等。建模时需要把宏观政策目标转化为具体的模型参数，即设定非化石能源消费占比、单位 GDP 能源消耗下降率、碳税税率、重点行业能效标准、新能源汽车市场占有率等。模拟这些政策工具的效果可以得到不同的政策努力下实现碳达峰、碳中

和的具体路径和时间表，给决策者提供科学依据。

情景设定的科学性、合理性直接影响到路径分析结果是否可靠。因此，在构建各种情景的时候，必须保证其内部逻辑的一致性以及主要假设的透明度。一般需要借助能源系统模型、可计算一般均衡模型等综合评估模型来正确反映经济、能源、环境等子系统之间的相互作用。通过对比不同情形下碳排放路径、能源结构转型、经济社会影响，可从全面角度认识达到碳中和所遭遇的机遇与挑战，从而给制定出稳健高效的低碳发展策略奠定基础。

（二）不同技术路径组合的情景分析

实现碳中和不能只靠单一的技术突破来实现，它需要各种低碳、零碳、负碳技术构成的体系来共同发挥作用。因此，对不同的技术路径组合进行情景分析，是找到可行的、经济的、高效的减排策略的重要环节。此类分析不再只是对单个政策层面进行模拟，而是深入到技术层面去进行配置和演化分析，以回答怎样通过技术组合来实现深度脱碳。情景设计一般会围绕着关键技术领域来展开，能源供给侧的高比例可再生能源路径，重点在于风能、太阳能的跨越式发展以及储能技术的配套，能源消费侧的全面电气化路径，则是强调工业、建筑、交通等各个部门以电代煤、以电代油，还包括以碳捕获、利用与封存技术为核心的兜底保障路径。

不同的技术路径组合，所需要的资源投入、基础设施建设投资以及所牵涉到的产业链重构程度各不相同，由此产生的环境协同效应或者潜在风险也不同。高比例可再生能源为主的路径，往往会增大对土地资源及关键矿产（例如锂、钴）的需求，并给电网的灵活性以及供电稳定性带来更高的要求。大规模部署碳捕集与封存技术，还需要对地质封存的安全性、长期监测的可靠性、公众接受度等各方面进行考虑。情景分析的目的就是利用模型模拟来对不同的技术组合在减排贡献、经济成本、能源安全、环境影响等各方面的表现进行量化评估。通过对比分析可以发现不同的技术途径之间互相配合或者替代的关系，进而找到最有潜力的技术组合方案，避免由于过分依赖某项技术而产生的锁定效应和系统性风险。经过这样的分析，环境影响评价工作就可以从宏观战略层面往下深入到具体的、技术路线的环境可行性论证之中，使它的评估更具针对性。

二、碳达峰峰值与时间节点预测

准确预测碳达峰峰值以及实现时间，成为制定中短期的气候行动计划、合理

分配减排责任的前提。预测工作并不只是对未来排放趋势的外推，它是对经济增长、能源转型、技术进步、政策调控等诸多复杂因素之间互动关系的深刻认识。

（一）基于 STIRPAT 模型的预测

STIRPAT 模型是环境压力驱动因素分析的经典方法，广泛地被用来做碳达峰预测。该模型来源于 IPAT 恒等式，但是以随机回归的形式表现出了人口、富裕程度和技术水平对环境影响的非单调、非比例作用。基本形式为： $I = aP^bA^cT^de$ ， I 为碳排放量， P 、 A 、 T 分别为人口、人均财富（一般用人均 GDP 表示）、科技水平（一般用能源强度或者碳强度表示）， a 是模型的系数， b 、 c 、 d 分别是各个驱动因素的弹性系数， e 为误差项。

研究者会在具体的运用当中，获取长时间序列的历史数据，利用回归分析的方法来估计各个驱动因素的弹性系数，进而计算出各个因素对于碳排放变化的贡献率。然后根据未来的人口增长、经济发展速度、产业结构调整、能源效率提高、能源结构改善等主要变量的情景设定，把预测值代入已经校准的 STIRPAT 模型中，就可以模拟出未来一段时间内的碳排放路径。从轨迹形态分析可知碳排放量的峰值时刻和大概水平。

STIRPAT 模型的优势是结构简单、数据容易获得，可以将各种社会经济驱动力对碳排放的影响程度清晰地分开，为政策制定者提供寻找主要减排领域的直观依据。假设模型中技术层面的弹性系数为负并且绝对值很大，那么提高能源效率、改善能源结构就是当前最有效的减排方法。

尽管 STIRPAT 模型有诸多优点，但它的固有局限性也不能忽略。该模型本质上就是根据历史数据趋势来建立的计量经济模型，对于颠覆性技术创新、重大政策冲击等非线性变化的预测能力较弱。模型本身不能内生地处理变量之间的动态反馈关系，比如经济增长和能源消耗之间的互相影响。因此使用 STIRPAT 模型做预测时一般会结合专家判断和情景分析法设定不同的发展路径，以区间的形式表示预测结果，从而反映未来具有的不确定性。

（二）系统动力学模型预测方法

系统动力学模型因为可以处理高阶、非线性、多重反馈的复杂系统，所以已经成为碳达峰、碳中和路径预测的重要工具。与侧重变量之间统计关系的计量模型不一样，系统动力学把研究的重点放在系统本身的结构和运行机制上，用含有存量、流量、反馈回路和时间延迟的因果关系图、流图来模拟系统的动态行为。

可以很好地揭示碳排放系统背后复杂的驱动机制和传导路径，适合做中长期的战略性预测和政策模拟。

构建一个用于碳排放预测的系统动力学模型，通常涉及多个相互关联的子系统：

1. 经济子系统模拟国内生产总值的增长、产业结构变化（第一、二、三产业的比重变化）、固定资产投资等，这些都是引起能源需求和碳排放的直接动力。

2. 人口子系统，预测总人口数量、城镇化率等影响生活消费领域能源消耗和碳排放的因素。

3. 能源子系统是模型的中心，对煤、油、气、非化石能源等一次能源比例、能源加工转换效率、终端能源消费结构（电力在终端消费中所占比例）、能源强度变化等进行了详细的描述。

4. 环境与碳排放子系统，根据能源消费量和不同的能源碳排放因子来计算总的二氧化碳排放量，也可以耦合其他污染物进行协同效应分析。

5. 政策和技术子系统，把碳税、碳交易、能效标准、可再生能源补贴等政策工具当作外部变量或者内生反馈机制，模拟它们对系统行为的影响，设置技术进步模块来体现能源效率提升、新能源成本下降的趋势。

通过创建子系统之间的动态反馈联系，经济增长带动能源消费，能源价格上涨又反过来抑制经济活动，系统动力学模型就可以表现出现实世界中广泛存在的“增长极限”和“政策延迟”等复杂情况。模型经过历史数据校验和有效性检验后，就可以进行模拟分析。改变政策变量（碳税税率、可再生能源发展目标等）或者改变外部参数（国际能源价格等），可以模拟出不同的情景下碳排放路径，清楚地看到碳达峰的时间、峰值高度和碳中和的过程，也可以对不同的政策组合的减排效果和经济社会影响进行评价。

三、碳中和实现路径的优化选择

情景分析及预测模型确定了各种可能的减排途径之后，决策者所要解决的主要问题就是怎样在这些途径之间做出权衡和选择。优化选择过程就是从多条或者多组路径中，选出一条或者一组既可以实现气候目标，又可以同时满足经济、社会、环境等各方面的最优需求的路径。

（一）成本效益分析模型

成本效益分析是碳中和路径评价和选择的经济学手段。核心思想就是把各种减排途径产生的所有成本、效益进行货币化度量与比较，用净现值或者成本效益比作为决策标准，目的是找到社会福利最大的减排方案。碳中和路径评价中的成本有投资可再生能源、储能设施、智能电网等低碳基础设施的资本支出，推广节能技术、提高工业流程效率的运营成本，淘汰落后产能、能源结构转型造成的资产搁浅成本和社会调整成本，发展和部署碳捕集与封存等负碳技术的成本。

效益的构成更为复杂，它不仅仅包括直接的经济效益，更主要的是它的广泛的社会效益和环境效益。最核心的效益就是避免了由于气候变化引起的极端天气、海平面上升、农业减产、生态系统破坏等造成的经济损失。减排途径常常伴随协同效应，减少化石能源燃烧可显著改善空气质量，降低由于空气污染造成的各种疾病发病率，进而减少医疗开支，提高民众健康水平；发展新能源产业可以创造新的就业岗位，促进技术创新和产业升级，提高国家能源安全。将内外部的成本、效益全部纳入分析框架，用合理的贴现率折算成现值，就可以对不同的减排途径的经济可行性和社会综合价值做系统比较。

（二）多目标决策分析方法

碳中和路径选择本质上是一个多目标决策问题，单纯依靠成本效益分析很难全面反映决策者所重视的各种价值。经济成本最低的路径，可能会对能源安全或者社会公平产生影响。因此多目标决策分析方法应运而生，它给处理多目标之间相互冲突、不可公度的选择提供了一个系统的办法。其目的并不是寻求唯一的、最好的解决方案，而是在各方利益之间找到一个平衡的、满意的解或者帕累托最优解集。

在碳中和路径选择中，典型的决策目标或评价准则可见下表。

碳中和路径决策目标与评价准则

维度	典型评价准则
经济维度	总减排成本、对国内生产总值的影响、技术投资需求
环境维度	温室气体减排深度、对空气质量、水资源、生物多样性的协同改善效应
社会维度	就业影响（岗位创造与流失）、能源可及性与公平性、公众健康效益、区域发展均衡性
技术维度	技术可行性与成熟度、产业链自主可控程度、技术创新的驱动力
能源安全维度	能源自给率、能源供应的稳定性和可靠性

采用多目标决策分析的方法，首先要建立上表所示的准则构成的评价指标体系。然后利用层次分析法、模糊综合评价法、优劣解距离法对备选减排路径进行打分排序。这些方法一般要依靠决策者或者专家对不同的目标进行赋权，从而表现出某种政策偏好。用敏感性分析来检查不同的权重设定对最终排序结果的影响，可以提高决策的稳健性。最终多目标决策分析得出的结果并不是一个唯一的“最优解”，而是不同路径在各种目标上的比较及综合排列，给利益相关方协商以及最后做出决策提供透明、科学的依据。

第五节 碳排放影响预测模型

一、基于排放因子的预测模型

以排放因子为基础的预测模型，是碳排放核算与预测中应用最多的一种方法。该模型把某个活动水平（例如能源消耗量、产品产量等）和相应的排放因子相乘，得到温室气体排放量。其最大的优势就是方法成熟、数据容易获得、操作简单，适合于宏观层面以及特定行业的碳排放趋势研究。

（一）部门预测法与宏观预测法

部门预测法、宏观预测法，分别是在不同的尺度上对排放因子模型的两应用形式。部门预测法是以某一经济部门或者行业为对象，如电力、工业、交通、建筑等，对各部门未来活动水平（发电量、钢材产量、客运周转量等）进行预测，再根据各部门特有的排放因子汇总得到总体碳排放预测结果。该方法可以详尽地展示出各个行业减排贡献和压力，从而给制定不同的行业政策提供依据。在预测交通部门碳排放的时候，会分别对不同的交通工具保有量、年均行驶里程、单位里程排放因子进行细分，从而使预测更加具有针对性。

宏观预测法则是从顶层的角度出发，一般会与国民经济发展的总体指标挂钩。该方法大多用 Kaya 恒等式或者 STIRPAT 模型等经典的理论框架，将碳排放总量分解成人口规模、人均 GDP、能源强度、能源结构等主要驱动因素的乘积。根据未来一段时间内宏观经济、社会指标情景设定（高增长情景、低碳情景等），推导出不同的发展路径下的碳排放总量。宏观预测法主要是研究社会经济发展同碳排放之间宏观的耦合关系，可以用来评估国家或者区域层面总体减排目标的实

现途径。

在环境影响评价的实践中，部门预测法由于可以具体到项目所属行业和工艺环节，因此更具实用性，可以为项目级减排方案提供直接的量化参考。宏观预测法则更多地为区域规划环评提供背景分析、总量控制的参考基准，两者互相配合，共同组成以排放因子预测方法为主的完整体系。

（二）模型参数选择与校准

模型参数的准确性是排放因子预测模型可靠性的生命线，选择和校准模型参数的过程要符合科学、严谨的原则。核心参数主要是活动水平数据和排放因子。活动水平数据的选择要和预测对象的特征紧密结合，对于新建的水泥生产项目来说，它的关键活动水平数据就是未来各年度的水泥产量预测值。在选择排放因子时要兼顾权威性、适用性、本土化三者。

参数的校准可以提高模型的预测精度。在选择排放因子时，应当以东道国政府机构公布的或者行业指南推荐的数值为首选，这些数据更符合本国国情和技术条件。缺少官方数据时可以采用政府间气候变化专门委员会给出的缺省值，但需要对缺省值的适用性做出审慎的判断。对重要的参数应该进行历史数据回溯检验。收集项目或者类似项目历史活动水平数据和实际排放数据，用这些数据模拟回溯模型，比较模拟结果与实际值的差异，根据差异对所选择的排放因子或者模型系数进行修正，直到模型能够较好地拟合历史状况。在“双碳”目标下需要考虑技术进步、政策干预对参数的影响，能源效率提高会降低单位产品能耗，能源结构改善会改变综合供电的排放因子，动态变化应该通过不同的情景参数来体现。

二、基于过程的预测模型

和宏观或者半宏观的排放因子法相比，基于过程的预测模型深入到生产工艺的微观层面，通过对物质转化和能量流动的模拟来预测碳排放。采用自下而上的方法，更能体现某一工艺或者某项技术的碳排放特性，给识别具体的减排环节、评价技术改进效果提供强有力的手段。

碳排放预测模型的两大主要类型及其特点可见下表。

碳排放预测模型类型对比表

模型类型	核心原理	适用范围 / 尺度	主要特点	数据需求
排放因子模型	活动水平乘以排放因子	宏观、部门级碳排放核算与趋势预测	方法成熟，数据易获取，操作简便，但精度受排放因子限制	活动水平数据（如能耗、产量）、排放因子
基于过程模型	物质/能量守恒，生产工艺模拟	微观、项目级碳排放预测与技术优化	精度高，能识别具体减排潜力，但数据详细，模型构建复杂	详细工艺参数、物料平衡数据

（一）物料衡算法在预测中的应用

物料衡算法以质量守恒定律为基础，是碳排放预测中应用较多的方法之一，对化工、冶金等存在复杂化学反应的工艺有着重要的意义。该方法的主要思想就是对碳元素在生产过程中各个阶段的输入、输出、转化、损失进行追踪，从而准确地计算出以二氧化碳形式排放的碳量。

在预测应用中，物料衡算法的具体实施步骤如下：

1. 核算边界及流程的界定：确定生产系统物理边界，对含碳原料、燃料、辅助材料的输入路径做详细的梳理，对产品、副产品、废弃物中碳元素的输出路径也进行详细的梳理。

2. 碳输入量和非二氧化碳输出量的计算：按照项目的设计参数以及生产计划来预测未来各物料流所对应的流量，结合物料流中含有的碳量，从而得出系统总的碳输入量以及以非二氧化碳形式输出的总碳量。总输入碳量 = 各种化石燃料消耗量 × 含碳量之和 + 原料含碳量。

3. 过程排放计算，根据化学反应方程式分析原料、燃料在生产过程中发生的化学变化，计算出由于化学反应直接产生的二氧化碳。

4. 建立衡算方程，根据碳元素守恒建立衡算方程，即总输入碳量减去所有以产品、固废等形式固定或输出的碳量，差值就是向大气中排放的二氧化碳总量。基本公式可以简化为二氧化碳排放量 = (总输入碳量 - 总输出碳量) × 。

使用该方法可以将碳排放同具体的原料组成、产品收率、工艺效率联系起来，给项目优化设计和寻找减排潜力点提供直接的量化依据。

（二）能源消费预测模型

能源消费是大部分项目碳排放的主要来源，因此建立准确的能源消费预测模型是碳排放预测的基础。在双碳目标下，此模型除了要预测能源消费总量外还要

考虑能源消费结构变化的问题，即化石能源和非化石能源的比例问题。能源消费预测模型一般会与项目的生产规模、工艺路线、设备能效、用能结构等因素有密切的关系。

在建立能源消费预测模型时，首先要对项目用能单元进行详细的拆解，找出主要的耗能设备和工序，即电机、锅炉、加热炉、空调系统等。根据设备的技术参数、额定功率、年计划运行小时数、负荷率来建立各个用能单元的能源需求计算公式。将各个单元的能源需求相加，即可得到项目在一定的生产水平下总的能源消耗量。利用项目可行性研究报告、设备清单、工艺设计文件中详细的信息。

预测未来的能源消耗要采用情景分析的方法，考虑各种因素的影响。一方面要考虑到由于产品产量的变动、生产计划的改变等直接造成能源需求的变化。另一方面还要预见到由于技术进步、管理改进而产生的能效提升潜力。采用高能效等级的电机、余热余压回收、优化生产调度等措施，单位产品能耗将会逐步降低。模型应能模拟出各种节能技术渗透率及节能目标下能源消费下降曲线。模型还要考虑能源结构的变化，分布式光伏、绿色电力采购等政策推行后，电力消费中非化石能源所占比例逐渐增大，间接碳排放量的计算结果也会受到影响。

三、模型不确定性分析与校验

任何预测模型都会有内在的不确定性，不确定性来源于数据误差、模型简化、未来情景假设等各个方面。在环境影响评价中，对碳排放预测模型开展系统的不确定性分析与校验，是保证评价结论科学性、客观性、稳健性的必要环节，也是对决策者负责任的表现。

（一）敏感性分析方法

敏感性分析属于评价模型不确定性的手段之一，它的主要目的就是找出对模型输出结果（碳排放预测值）影响最大的输入参数或者假设。在关键参数确定之后，就可以把有限的资源集中在获得更加准确的数据上，或者对这些关键假设做更深的研究，从而有效地降低整体预测结果的不确定性。

敏感性分析一般使用单因素扰动法或者多因素组合分析。单因素扰动法是在其它参数不变的条件下，让一个参数在其变化范围（根据历史数据波动或者专家判断来设定一个 $\pm 10\%$ 的变化区间）内发生变化，记录并分析模型输出结果变化的大小。输出结果变化越大，就说明模型对这个参数越敏感。如可分别改变项

目未来产品产量、主要燃料排放因子、外购电力排放因子等参数，然后比较各参数变化对总碳排放预测值的影响程度。龙卷风图等可视化工具能很好地表现出各个参数的重要性排列。对识别出的敏感参数，环境影响评价报告中应重点说明，对其取值依据要进行详细的论证。

（二）模型验证与结果可靠性评估

模型验证就是检验预测模型能否真实地反映客观现实的过程，结果可靠性评估是对预测结论置信度的综合判断。这两项工作是把预测模型从理论创建变成可靠应用的最后一步。没有经过充分验证的模型，其预测结果一般是不可靠的。

模型验证一般有以下几个方面，第一是历史数据验证，即用已知的历史数据对模型进行回溯检验，并比较预测值和实际观测数据的一致性。以区域规划环评为例，若已建立碳排放预测模型，则可以利用该区域过去十年内的经济、人口、能源等数据对模型进行模拟，看模型预测的碳排放量是否与官方公布的实际历史排放数据相吻合。其次就是交叉验证，在使用机器学习等数据驱动模型的时候，可以将数据集分成训练集和验证集，用训练集来建立模型，用验证集来检验模型的泛化能力，防止模型过拟合。

结果可靠性评价更加综合。它既是模型本身的评价，也是对整个预测工作流程的审视。评价内容包括数据质量的可靠性，即输入数据来源是否权威，是否存在测量误差，模型结构的合理性，即模型是否真实反映了碳排放的主要驱动机制，情景设定的科学性，即对未来的假设是否充分考虑了政策、技术、市场等各方面的发展趋势，设置了多种可能性，如基准情景、强化减排情景等，以覆盖未来不确定性区间。最终环境影响评价报告在给出碳排放预测结论的时候，不应该只给出一个单一的数值，而应该给出一个可能的排放区间，并明确指出该结论所依赖的关键假设以及主要的不确定性来源，从而为决策者提供一个全面、透明、风险可控的决策基础。

第三章 生态碳汇评估技术体系

第一节 生态系统碳储量评估方法

一、森林生态系统碳储量评估

森林是陆地生态系统的重要组成，也是地球上最大的碳库之一，对全球碳循环研究以及气候变化的应对起着决定性的作用。评估工作一般会从两个主要的碳库入手，一个是地上乔木、灌木等的生物量碳库，另一个是储量更大的地下土壤有机碳库。

（一）生物量碳库测算方法

森林生物量是反映森林生产力、碳汇功能的重要指标，对区域甚至全球的碳收支进行评价时，准确测量森林生物量碳库十分重要。目前的测算方法分为直接测量和间接估算两种，精度、成本、适用范围各有不同，但都是森林生物量碳计量的技术基础。

样地尺度下的皆伐法是直接而且最准确的测量方式。此方法是在样地内皆伐，把乔木的树干、树枝、树叶、树根等各部分分别分离出来称重，在实验室进行烘干测定其干重及含碳率，从而准确计算出单位面积上的生物量及碳储量。虽然结果可靠，可以作为建立和验证其它估算方法的基础，但该方法具有破坏性，耗时耗力，成本高昂，因此很难应用于大面积的碳储量调查。

因此生物量模型法成了区域尺度上应用最广泛的间接估算方法。利用树木各部分生物量之间存在的异速生长关系，以胸径、树高、冠幅等容易测量的因子建立数学回归模型（即异速生长方程）进行估算。研究人员在小范围内进行实测数据采集，建立或者验证适用于特定树种或者地区的生物量模型，然后将该模型应用到大范围森林资源清查数据中，通过测量林木的胸径、树高等参数，快速推算出整个林分的生物量碳储量。该方法既可以保证评估效率，又可以保证精度，是目前森林碳核算的主要方法。

（二）土壤有机碳库调查与估算

森林土壤是生态系统中最大的、最稳定的碳库，它的有机碳储量占森林生态系统总碳量的三分之二。因此准确调查和估算土壤有机碳库是全面评价森林碳汇能力的前提。森林土壤碳库调查主要是通过野外取样、室内化学分析。

标准的调查方法是土壤剖面挖掘法。在具有代表性的林分中选取采样点，挖掘土壤剖面，按照土壤发生层次（枯枝落叶层、腐殖质层、心土层）或者固定深度（0-20 厘米、20-40 厘米）进行分层取样。使用环刀等仪器取样，测量土壤的干密度。样品带回实验室后要经过风干、研磨、过筛等预处理，再用重铬酸钾氧化法或者元素分析仪测定有机碳含量。根据土壤容重、有机碳含量、土层厚度、砾石含量等数据计算出单位面积土壤有机碳储量。虽然此方法比较准确，但由于土壤空间异质性较强，单个样点的代表性往往不够，所以必须设足够多的样点才能较好地反映整个区域的情况。

二、草地与湿地生态系统碳储量评估

草地、湿地属于陆地生态系统中另外两种重要的碳库，在全球碳循环中起着不可替代的作用。相比森林来说，这些生态系统的碳储量评价存在特殊性，地下生物量、土壤碳储量的测算要使用专门的技术手段来保证评价结果的准确性。

（一）草地地下生物量碳测算

草地生态系统的显著特点就是地下生物量，也就是根系部分，这部分是地上生物量的数倍，是整个生态系统碳库的主要部分。但是由于根系深藏于土壤之中，所以直接测量根系比地上部分要困难得多，草地地下生物量的准确测定成为草地碳循环研究的难点和重点。

传统的测算方法主要是直接挖掘、采集。土钻法、挖掘法属于直接测量方法。土钻法用一定直径的土钻，在样方内随机或者按规律钻取一定深度的土芯，将土芯带回实验室用水洗、筛分等方法把根系和土壤分开。挖掘法是在样方中挖出一定体积的土方，用同样的方法分离根系。分离出的根系经烘干称重后就可以得出单位面积的地下生物量。这些直接方法虽然准确，但是工作量大，对草地有一定的破坏性。

由于直接测量法的局限性，间接估算法应运而生，根冠比法是目前最常用的一种。根冠比就是植物地下部分生物量与地上部分生物量之比。研究者可在特定

的草地类型里选择少量样本同时测量，得出一个比较稳定的根冠比，之后把它应用到大面积地上生物量调查数据中，从而推算出地下生物量。此方法能大大提高评价的效率，对于区域尺度来说尤其适用。

根冠比不是固定不变的，它受草地类型、气候条件、土壤状况、放牧强度等许多因素的影响。干旱、半干旱地区由于水分胁迫，草地会把更多的资源用于根系生长，造成根冠比较高。因此，在使用根冠比法的时候，必须根据研究区的实际情况选择或者建立与之相匹配的参数，从而减小估算的不确定性。结合遥感技术估算地上生物量，用分区或分类的根冠比进行转换，是目前大范围草地碳储量动态监测的有效方法。

（二）湿地土壤碳密度与储量评估

湿地，特别是泥炭地，由于常年浸水所造成的缺氧环境大大减缓了有机物的分解速度，因此湿地成为世界上碳封存效率最高的生态系统之一。单位面积湿地土壤碳储量远远大于其它陆地生态系统，因此对它储量的准确计算对于全球碳预算有特殊的意义。

湿地土壤碳储量评估的核心就是测定土壤有机碳密度和湿地总面积。现场调查方法与森林土壤类似，但是会遇到水位变化、深厚泥炭层等特殊问题。可采用专门的取样工具（俄罗斯泥炭钻）取得深达数米的完整的沉积柱状样品。采样后，按 10 厘米或者 20 厘米分层，分别装袋并标号。

在实验室里，对每层样品进行重要的参数测定，土壤容重（单位体积土壤的干重），有机碳含量，一般用元素分析仪等设备测定。将单位体积的土壤干重乘以其有机碳含量，就可以得到该层土壤的碳密度。将剖面各层的碳密度乘以厚度，再将各层结果相加，即可得到该样点的总土壤碳储量。最后将区域内各样的碳密度取平均值，再与遥感影像等方法获取的湿地总面积相乘，就可以得到整个区域湿地土壤的总碳储量。

各类生态系统碳储量评估方法的特点可见下表。

三、生态系统碳储量遥感估算技术

随着遥感技术飞速发展，利用卫星或者航空平台对地观测已经成为大尺度、长时序监测生态系统碳储量变化的不可缺少的手段。遥感技术凭借宏观、快速、可重复观测等特点，很好地克服了传统地面调查方法的不足，给动态评价区域乃

至全球碳汇提供了强有力的支撑。

生态系统碳储量评估方法对比

特征	传统地面调查方法	遥感估算方法
空间尺度	样地、区域尺度	区域、全球尺度
时间效率	耗时、低效	快速、高频
精确度	单点 / 小范围精度高	大范围估算精度高（需地面验证）
成本	人力物力投入大，成本高	平台及数据成本高，但单位面积成本较低
破坏性	皆伐、挖掘等有破坏	无破坏性
数据来源	实地测量、实验室分析	卫星 / 航空影像、激光雷达点云数据
主要应用	建立模型、小范围精确评估	大范围动态监测、空间分布制图
饱和问题	无	光学遥感存在（高生物量区域）
三维结构信息	需人工测量	激光雷达可直接获取

（一）基于光学遥感的碳储量反演

光学遥感是通过探测地表反射的太阳辐射来获取信息的一种遥感方式，也是目前应用最广、数据量最大的遥感方式。其基本原理就是健康的植被在可见光的红光波段有强吸收，在近红外波段有强反射。根据植被的光谱特性建立起来的各种植被指数，比如归一化植被指数 NDVI，可以很好地反映植被覆盖度、叶面积指数、生物量等生理参数。

在碳储量反演时，研究者一般会在研究区内布设一定数量的地面样地，测量其生物量或者碳储量，同时获取对应位置的光学遥感影像。利用统计分析建立实测碳储量和遥感影像提取的植被指数、纹理特征等遥感因子之间的回归模型。模型建立之后，就可以将其应用到整个研究区的遥感影像上，从而得到全区碳储量的空间分布图。此方法成本低、技术成熟，适合做区域尺度的快速评价。但是光学遥感也存在明显的局限性，其信号主要来源于冠层顶部，不能穿透茂密的森林冠层。当生物量达到一定程度时，植被指数就会饱和，对生物量的增加不再敏感，从而造成高生物量区明显的低估。

（二）激光雷达技术在森林碳监测中的应用

激光雷达属于一种主动遥感技术，它借助于发射激光脉冲并接收返回信号，可以直接得到地物的准确三维结构信息，这给森林碳储量监测方式带来了巨大改变。与光学遥感易饱和的特性不一样，激光雷达能穿透植被冠层，直接测量森林的垂直结构，进而更直接、准确地计算出森林的生物量。

激光雷达技术在森林碳储量估算中的应用通常遵循以下步骤：

1. 数据获取与处理：使用机载或者星载激光雷达系统对林区进行扫描，得到高密度的三维点云数据。这些点云数据要过去噪、地面点分类等预处理，才能有效分离出植被点和地面点。地面点可以用来建立高精度的数字高程模型，植被点与地面点的相对高差就是树木的真实高度。

2. 结构参数提取和建模：从归一化的激光雷达点云上，可以提取出与生物量有密切关系的一些森林结构参数，比如最大树高、平均树高、冠层覆盖率、叶面积密度剖面等。接着，用地面样地实测的生物量碳储量数据作为因变量，将激光雷达提取的结构参数作为自变量进行回归分析，建立高精度的反演模型。由于树高是决定生物量的主要因素之一，因此用激光雷达的高度信息来构建的模型比用光学遥感模型要更准确、更稳定。

目前激光雷达技术已经形成了以地面激光扫描仪、机载激光雷达、星载激光雷达为代表的多尺度观测系统。该种多平台协同模式可以实现单木、样地、区域、全球尺度上的精确碳监测，给构建透明、可靠的碳核算体系提供前所未有的技术支持，是未来生态系统碳汇监测与评价的关键发展方向。

第二节 碳汇功能监测与计量技术

一、涡度相关法通量观测技术

涡度相关法是一种先进的微气象学观测技术，可以直接、连续地观测生态系统与大气之间二氧化碳、水汽、能量的交换。该技术用高频测量垂直风速和气体浓度的脉动来计算其协方差，从而得到通量值，为精准认识生态系统碳循环过程提供原位、高时间分辨率的宝贵观测数据。

（一）通量观测塔的布设与数据处理

通量观测塔的科学布设是取得代表性通量数据的前提。选址时要充分考虑下垫面的均质性以及主导风向上游的源区，即通量贡献区。观测塔应该设在具有代表性的生态系统的核心区，远离道路、建筑等局部干扰源，以保证仪器所测量的数据能够真正反映目标生态系统的碳交换特性。塔体高度设计要保证传感器处于充分发展的湍流层中，一般要高出植被冠层一定的距离。核心设备为三维超声风

速仪、开路或闭路式红外气体分析仪，它们每秒可以采集到十次以上的数据。

原始的高频数据要经过复杂严格的几个数据处理步骤，才能得到可靠的通量结果。主要的步骤有野点剔除、坐标旋转（校正仪器倾斜、地形影响）、频率响应修正（补偿高频损失）和最重要的密度效应校正（WPL 校正）。数据质量控制是始终贯穿的环节，用设定的湍流稳定性、仪器状态等阈值来筛选掉夜间弱湍流等条件下的不可靠数据。最后通过插补算法填补由于数据剔除或者仪器故障造成的数据缺失，得到连续、完整的生态系统碳通量数据集。

（二）生态系统净交换量的分解

涡度相关法直接测量的是生态系统净交换量，它是生态系统光合固碳和呼吸排碳两个过程净结果的综合。按照生态学的惯例，生态系统表现为碳汇的时候 NEE 为负值，表现为碳源的时候 NEE 为正值。为了深入研究碳循环的机理，需要把 NEE 分解成总初级生产力 GPP 和生态系统总呼吸 Reco。GPP 是生态系统通过光合作用固定的总碳量，Reco 是所有生物（植物、动物、微生物）呼吸释放的碳量，三者的关系可以表示为 $NEE = Reco - GPP$ 。

NEE 的分解主要是依靠数据分离算法。夜间没有光合作用，此时观测到的 NEE 可以近似为生态系统总呼吸 Reco。利用该特性可以建立夜间 Reco 和温度（主要是土壤温度或者气温）之间经验关系模型（指数模型）。假设该呼吸模型在白天也适用，就可以将此模型外推到白天的时段，来估算出白天的 Reco。然后根据公式 $GPP = Reco - NEE$ 来计算白天的总初级生产力。分解之后就可以分别对生态系统固碳能力、碳释放对环境变化的响应做进一步的分析，为评价气候变化对生态系统功能的影响提供重要的参数。

二、样地清查与模型模拟结合法

涡度相关法属于一种“自上而下”的通量观测手段，而样地清查和模型模拟相结合的方法，则是一种经典的“自下而上”的碳储量估算方式。它直接测量代表性样地内植被、凋落物、土壤等主要碳库，再用生物地球化学模型把点上的数据扩展到区域尺度，被广泛应用于森林、草地等生态系统的碳汇评估。

（一）固定样地长期监测网络

建立固定的样地长期监测网络为该方法打下了基础。在不同的区域、不同的生态系统类型上设立标准的永久样地，并进行定期复查，就可以准确地掌握生态

系统碳储量动态变化的情况。国家或者区域性的森林资源连续清查体系就属于此种网络。样地布设一般用分层随机或者系统抽样的方法，以保证样地的空间分布可以覆盖主要的植被类型、土壤类型和气候梯度，从而保证监测结果有较好的区域代表性。

在每一个固定样地中，调查的内容都是详尽的、规范的。对于植被碳库，需要测量每棵树胸径、树高、物种信息，用异速生长方程将测量的指标转化为单木生物量，最后汇总成样地尺度的植被生物量碳储量。土壤碳库则需要分层（如0~10厘米、10~30厘米）取样，测定土壤容重、有机碳含量，进而求出单位面积的土壤有机碳储量。还要对林下灌草、凋落物、枯倒木等碳库取样测量。将不同时期的测量结果进行对比可以得出某一时间段内的碳储量变化，即碳汇量。长期监测网络所积累的数据不但是碳汇计量的直接依据，而且给生态系统过程模型的开发和验证提供宝贵的资料。其主要的监测碳库和内容见下表。

固定样地核心监测碳库表

碳库类型	主要监测内容
植被碳库	乔木、灌木和草本层的生物量碳储量及其动态变化
土壤有机碳库	不同层次的土壤有机碳储量及其稳定性
死亡有机质碳库	凋落物、枯立木和枯倒木等组分的储量

（二）CENTURY 等生物地球化学模型应用

只用样地清查很难对大面积区域的碳汇时空分布做全方面动态评价，生物地球化学模型可以很好地弥补这一点。CENTURY 模型是国际上被广泛用来模拟草地、森林和农田生态系统中碳、氮、磷、硫循环的经典模型。该类模型将气候、土壤、植被生理生态、人类活动等诸多因素纳入考量范畴之中，借助数学方程对生态系统中物质循环以及能量流动的过程加以表述。

在使用模型的时候，首先要输入区域气象数据（月均温、降水量）、土壤数据（质地、有机质含量）和植被管理信息（土地利用类型、干扰历史）作为驱动变量。然后利用固定样地监测网络获取的实测数据，对模型的关键参数进行校准，检验模型对于目标区域生态过程的模拟效果。经过验证的模型不仅能模拟当前的生态系统碳储量，还可以重现过去几十年来的碳动态历史，预测出未来不同的气候变化或者土地管理情景下，该生态系统碳汇的能力。将模型同地理信息系统技术融合起来，可以把样地层面的模拟成果空间化，形成高分辨率的区域碳汇空间

分布图，给环境影响评价里的区域碳平衡分析赋予强大的技术支撑。

三、碳汇计量与核查体系

为了保证碳汇功能评价结果可以转化为可信的碳资产，并可以应用到碳市场交易以及政策制定当中，必须创建起一套完整的计量、报告和核查体系。该体系是科学监测与市场应用之间的桥梁，用标准化的流程和规则来保证碳汇项目环境效益的真实性、唯一性，是“双碳”目标下环境影响评价不可缺少的管理框架。

（一）可测量、可报告、可核查原则

MRV 体系的核心就是可测量、可报告、可核查这三条基本原则，它们一起构成了碳汇项目质量的保障基础。可测量原则要求碳汇产生的量要能以科学公认的方法学进行量化。无论是直接观测还是模型模拟，计算过程都必须使用可靠的数据，对结果的不确定性要进行评价。

可报告原则即过程透明、文档规范。项目的所有数据、所用的方法学、计算过程、参数选取依据、最终碳汇量结果都必须用标准化格式，清晰、完整、一致地记录、呈现。规范化的报告利于监管机构、投资者、核查方、公众等各方面的利益相关者审查和理解，是信息公开、建立信任的重要一环。

可核查原则属于保证项目可信度的最后一道防线。要求项目报告所有的内容都可以被独立的、有资质的第三方机构审核和验证。核查方按照预先规定标准和程序，对项目监测数据、计算逻辑、合规性等各方面进行全方面的审查，并出具独立的核查报告来证明项目产生的碳汇量是否真实、准确。只有独立核查过的碳汇量，才能被官方注册登记，用作履约或者交易。

这三项原则环环相扣，形成闭环管理系统，保证每一个单位的碳汇都是真实、额外、可量化、永久且可核证的。它是碳市场稳健运行的基石，也是环境影响评价中判断项目气候贡献度的标准，可以有效地防止漂绿行为，保证减排目标的最终实现。

（二）碳汇项目计量报告编制

碳汇项目计量报告是 MRV 体系中“报告”环节的主要成果文件，是项目方对碳汇产生过程及结果进行系统性展示的正式文书。报告的编制必须严格按照已批准的、适用于特定项目类型的核证自愿减排项目中的林业碳汇方法学。这些方法学对于项目的适用条件、边界确定、基线情景的确定、额外性论证、碳库选择、

计量方法、监测要求等都有具体的规定。

一份完整的计量报告一般应该包括项目概述、基本情况、地理位置、活动类型等内容。需要确定项目的边界和碳库，即确定计量所涉及的地理范围以及相关的碳库（地上生物量、地下生物量、土壤有机碳等）。再次是基线情景的确定和论证，即预测项目活动不存在的情景下，项目区域碳储量随时间变化的情况，这是计算项目产生额外碳汇量的基础。报告中还要详细说明项目监测计划及实施情况，即监测指标、监测频率、监测方法、质量控制措施。

报告的核心内容就是温室气体移除量的计算，需要综合基线排放量、项目排放量和项目边界外泄漏（即项目活动造成边界外排放增加的现象）等因素，得出项目的净碳汇量。报告中必须列出所有的计算公式、数据来源、参数取值，并做不确定性分析。还要证明项目具备额外性，具有永久性风险控制手段。额外性证明项目碳汇是在现有政策和市场条件之外产生的；永久性说明已经固定的碳在未来不会因为火灾、病虫害等因素再次释放到大气中。一份严格规范的报告是获得碳汇签发先决条件。

第三节 土地利用变化碳效应评价

一、土地利用类型转换的碳排放 / 吸收评估

准确测量各种土地利用类型之间互相转换所造成的碳收支变化，是区域碳核算的前提。这不只是地表植被生物量的增减，更是土壤碳库的动态变化。认识各种用地转换的碳效应，结合权威的核算方法学，是建立科学碳评价体系的关键一步。

（一）林地、耕地、建设用地转换的碳效应

不同的土地利用类型具有不同的碳储量特征，它们之间的相互转换直接导致陆地生态系统碳库的动态变化，从而产生碳排放或者碳吸收的作用。如主要土地利用类型碳储量特征表所示，林地是陆地生态系统中最大的碳库之一，林地植被、土壤具有很强的固碳能力。当林地被转为耕地或者建设用地时，大量的植被生物量被移除，土壤受到扰动，有机质分解加快，储存在生物量和土壤中的碳迅速释放到大气中，增加了碳排放。

主要土地利用类型碳储量特征表		
土地利用类型	主要碳库	典型植被碳密度 (tC/ha)
林地	植被、土壤	50-200+
草地	土壤、根系	1-10
耕地	土壤、作物	2-15
湿地	土壤（泥炭）、植被	10-50
建设用地	零星植被、微量土壤	<1
其他土地（如裸地）	微量土壤	<0.5

耕地转为建设用地，也是重要的碳排放源。此类转换会削减耕地植被的固碳效能，更严重的是，建设活动彻底改变了地表物理特性，大面积的土壤被不透水层（混凝土、沥青等）覆盖，破坏了土壤与大气之间正常的碳交换过程，造成土壤有机碳库严重破坏和损失。相反，把部分耕地、草地、裸地用植树造林的方式改造成林地，可以大大提升区域碳汇能力。新生的森林生态系统依靠光合作用不断吸收大气中的二氧化碳，把二氧化碳固定在植被和土壤里，形成碳汇。退耕还湿、退耕还草等生态恢复手段能够使土壤有机碳含量得到提升，进而增强生态系统的碳吸收能力。因此严格控制高质量的林地、耕地转化为建设用地，积极推动生态用地的恢复与发展，成为减缓气候变化的重要途径。

（二）IPCC 土地利用变化碳排放因子

政府间气候变化专门委员会给各国编制温室气体排放清单赋予了权威的指导方法以及参数体系。IPCC 指南在土地利用、土地利用变化和林业方面给出碳排放和吸收的核算框架。该框架的核心就是用排放因子法，用活动数据（各种土地利用变化面积）乘以相应的排放因子来计算碳收支变化。

IPCC 指南把土地分为林地、耕地、草地、湿地、建设用地、其他土地六类，并对林地转耕地、耕地转林地等土地利用类型转换以及同类土地内部管理方式的变化（如免耕措施）等，给出相应的碳核算方法。此方法体系采用了分层的方式，即分成了 Tier 1、Tier 2 和 Tier 3 这三级。第一层方法用 IPCC 提供的全球或者区域默认排放因子，适合于数据基础较差国家或地区。第二层方法促使各国用本国或者某一区域的研究数据来代替默认值，从而提高核算的准确性。第三层方法用复杂的动态模型或者长期定位监测的详细清单数据，可以较好地反映某一个生态系统和管理措施下碳的动态。环境影响评价实践中，选择适当的层级和排放因子，对于准确评价项目或者规划造成的土地利用变化碳效应来说十分重要。

二、基于遥感的土地利用变化监测

遥感技术由于具有宏观、快速、客观、可重复观测等特点，因此它是监测土地利用时空动态变化不可缺少的一种技术手段。它可以高效地获取地表覆盖信息，给精准评价土地利用变化所造成的碳循环效应提供重要的数据支持。通过对不同时期的遥感影像进行分析，可以定量分析变化区域、类型、幅度。

（一）多时相遥感影像变化检测

多时相遥感影像变化检测，即利用覆盖同一地理区域、不同时段获取的两期或多期遥感影像，识别和提取地表特征变化的过程。这是进行土地利用动态监测，评价土地利用环境影响的前提。常用的检测方法主要有两种，直接比较法和分类后比较法。

直接比较法是将配准后的多时相影像进行像元级的数学运算，以突出变化区域的方法，包括图像差值法、图像比值法、变化矢量分析法等。该类方法计算简单，可以快速找到变化热点，但是不能直接给出变化的具体类型和转换信息。分类后比较法则是先对各个时期的遥感影像进行土地利用分类，然后比较不同时期的分类结果图，得到变化转移矩阵，详细地了解每种土地利用类型增减和相互转换的情况。随着深度学习的发展，卷积神经网络等先进的算法被越来越多地应用到遥感影像分类、变化检测当中，可以自动学习地物深层次的光谱、空间特征，大大提高了土地利用变化信息提取的自动化程度和精度。

高分辨率、高时间频率的遥感数据，比如哨兵系列、陆地卫星系列以及各种商业卫星数据，给土地利用变化监测提供了前所未有的可能。长时间序列遥感影像数据集的建立，可以对年度或者更短时间尺度的土地利用变化进行监测，也可以对季节性变化以及火灾、洪水等突发事件对土地覆盖造成的即时影响进行观测，给动态评价碳通量提供更加精细及时的输入数据。

（二）土地利用变化图谱分析

完成多时相遥感影像变化检测之后，生成土地利用变化图谱是进行碳效应空间分析的前提。变化图谱既可以形象地反映各种土地利用类型的空间分布情况，也可以反映其在一定时间内的变化过程，也是计算碳储量变化的空间单元。将土地利用变化图谱与各类用地的碳密度数据（植被碳密度、土壤碳密度）结合起来，就可以对区域碳储量变化进行空间化的评价。

在具体的实践中，先用遥感解译得到各个年份的土地利用 / 覆盖分布图。接着用空间叠加分析得到土地利用转移矩阵图，该图可以清楚地表示出在研究时期内，一种土地利用类型转变为另一种土地利用类型的具体位置及面积。可以精准地识别出哪些林地区块被转为建设用地，哪些耕地区块实行了退耕还林。根据这些变化图斑，再结合 IPCC 排放因子或者本地化的碳密度参数，就可以分别计算出每一个变化地块造成的碳排放量或者碳吸收量。把各个地块的碳效应进行空间汇总，便可以得到区域土地利用变化碳效应的空间分布图，可以直观地识别出主要的碳源区、碳汇区，为制定差异化的空间管控政策提供科学依据。

三、土地利用规划的碳效应评价

国土空间规划属于宏观调控土地利用格局、人类活动空间分布的顶层设计，它所产生的深远影响，将会决定区域长久以来的碳排放和碳吸收格局。将碳收支评价系统地嵌入国土空间规划的编制和实施全过程，对从源头上控制碳排放、提升生态系统碳汇能力、最终达到区域碳中和目标有着决定性的作用。

（一）国土空间规划的碳收支评估

国土空间规划碳收支评估，就是对未来一段时间内不同的规划方案下，区域碳平衡状况进行前瞻性分析。把双碳目标当作一项重要的约束性指标，在规划的整个过程中加以实施。评估首先要核算区域碳收支本底，即了解目前生态空间（林地、草地、湿地等）的碳汇能力和城镇、农业空间的碳排放总量。然后根据规划草案中设定的主要参数，即人口规模、经济增长、城镇开发边界、生态保护红线等关键参数来创建不同的未来土地利用发展情景。

利用 GIS、元胞自动机模型、多智能体模型等可以模拟出不同的土地利用空间格局演变情景。可以模拟出紧凑型城市发展模式和蔓延式扩张模式下建设用地规模、形态的差别。将模拟出来的未来土地利用图谱和碳收支核算模型相结合，定量预测各种情景下碳排放量和碳汇量，评价不同的规划方案的碳达峰、碳中和潜力。基于情景模拟的评估方法，可以促使规划决策者在权衡经济社会发展同低碳转型需求的基础上，挑选出可以达成可持续发展目的的最优空间规划方案。

（二）优化土地利用格局的增汇策略

在国土空间规划中，改善土地利用的数量、结构、空间分布可以提高生态系统的碳汇能力，有利于碳中和目标的实现。这就需要实行以增汇为目标的国土空

间优化策略。

1. 严格守住生态保护红线、永久基本农田：对林地、草地、湿地等有重要碳汇功能的生态空间实行严格保护，防止被建设活动侵占、破坏，是保持和提高区域基础碳汇能力的根本保证。保护好高质量的耕地，不但是粮食安全的保障，也是土壤碳库稳定的保证。

2. 实行生态系统保护与修复工程：在国土空间规划中，要系统布局、推进大规模的国土绿化，在适合的地方开展退耕还林还草、荒山绿化、城市绿地建设工程。通过提高森林覆盖率、城市绿地面积来直接增大碳汇量。同时提高森林的抚育经营，改善森林质量，提高单位面积固碳量。

3. 优化城乡存量建设用地利用，把城市发展由外延扩张向内涵提质转变，盘活闲置低效的存量建设用地，减少新增建设用地需求，间接保护潜在碳汇农用地和生态用地。在乡村地区，利用全域土地综合整治把废弃、闲置的宅基地复垦成农田或者林地，局部地区可以实现碳汇净增长。

4. 建设生态廊道和网络，从空间布局上要重视生态空间的连通性、完整性，建立联系大型生态斑块的生态廊道，塑造连续的生态网络系统。这既有利于生物多样性的保护，又有利于物质、能量的流动，还能提高整个区域生态系统碳循环的稳定性与效率，从而最大限度地发挥整体碳汇作用。

第四节 生态修复碳增汇潜力分析

一、森林经营与修复增汇潜力

森林是陆地最大的碳库，经营和修复森林对于提高区域碳汇能力起着举足轻重的作用。科学的干预可以有效地提高森林的固碳速度与总量，从而给碳中和提供重要的自然解决方案。

（一）造林、再造林和森林抚育增汇量

造林和再造林是碳增汇最直接有效的途径。在宜林荒地、沙地、退化土地上植树造林，能迅速形成新的植被碳库。增汇主要来自于两个方面，地上生物量碳库迅速增加（树木光合作用把二氧化碳固定在枝干叶上），地下生物量和土壤有机碳库逐渐积累（随着林木的生长，根系不断扩展，凋落物和根系分泌物一起促

进土壤有机质的形成和稳定)。增汇潜力受立地、气候、树种选择、经营管理等的影响。选择乡土速生树种混交种植,一般可以获得更好的碳汇效益。

森林抚育是对已有的林分进行管理,目的是改善林分结构,改善生长环境,提高生态系统的健康水平和固碳效率。措施主要有修枝、间伐、补植。合理间伐可以调节密度,减少个体间的竞争,保证优势木的生长空间和光照,加快优势木生物量的积累。修剪有助于形成优良的树干形态,部分生物量转化为持久的木质产品碳库,达到长期固碳的目的。抚育产生的林下剩余物,如果就地科学处理(覆盖还田),也会增加土壤有机碳的输入,减缓分解速率。因此环境影响评价中不仅要评价造林碳汇增量,还要核算森林抚育提升的现有林分固碳能力,这对于挖掘存量森林增汇潜力有着十分重要的意义。

科学评价增汇量要依靠准确的监测和模型模拟技术。传统的样地清查法,定期测量树高、胸径,用异速生长方程来估算生物量碳储量及变化。遥感技术发展,激光雷达和高分辨率卫星影像结合可以实现区域森林碳汇动态、连续的监测,提高评估效率以及空间覆盖。同时用过程模型(森林生态系统碳循环模型)来模拟不同的经营措施下未来几十年甚至上百年的碳汇动态,为制定长期增汇策略提供依据,保证生态修复碳汇效益最大化。

(二) 退化林修复的碳汇效益

退化林修复就是恢复由于过度采伐、病虫害、火灾等人为干扰造成的结构不完整、功能衰退的森林生态系统。与裸地造林不同的是,退化林修复已经具有一定的植被基础和土壤条件,其主要目的就是恢复生态系统自我调节的能力以及完整的碳循环功能。常用的修复方法有封山育林、人工促进天然更新、补植当地珍稀树种。这些活动利于林下植被的恢复,增加物种多样性,改善林分的垂直结构,进而提高整个生态系统的光、水、肥等资源的利用率。结构复杂、物种丰富、健康森林生态系统的单位面积碳密度和固碳速率比退化林要高很多。

退化林修复碳汇效益,除了地上生物量恢复增长外,更重要的就是对土壤碳库的贡献。退化过程中常伴严重的水土流失,而且土壤有机质贫乏。修复活动可以改善地表植被覆盖度、降低土壤侵蚀,增加凋落物和根系的输入量,给土壤微生物的生存提供有利环境,加快土壤有机碳的积累。土壤有机碳比地上生物量碳更加稳定,可以埋藏数百年甚至数千年,是实现长期、稳定固碳的关键。因此,在评价退化林修复碳汇效益的时候,应该把土壤碳库变化作为主要指标之一,从

而全方位地体现其对于陆地生态系统碳循环的积极影响。

二、矿山与退化土地修复的碳汇效应

矿山开采以及不合理的土地利用方式造成大量的土地退化，这些区域的生态功能已经基本丧失，并且常常成为潜在的碳排放源。生态修复把退化土地转变成有固碳能力的生态系统，是达成区域碳中和目标的一种重要补充途径。

（一）废弃矿山植被恢复的碳积累

废弃矿山土壤贫瘠、基质不稳定、重金属污染、水分涵养能力差等问题都很普遍，生态恢复面临着巨大挑战。植被恢复是矿山修复的重要环节，植被恢复的碳积累过程就是生态系统由无到有、逐步演替的过程。之前用耐瘠薄、抗逆性强的先锋植物（豆科、草本）覆盖地表防止水土流失。先锋植物用根瘤菌固氮来改善土壤的氮素，凋落物是土壤最初的有机质来源。

土壤条件初步改良之后，就可以开始栽植灌木、乔木，形成多层植物群落。这时地上生物量碳库明显增加。植物群落演替推动土壤微生物群落重建，加快有机质分解与腐殖化，土壤有机碳库便慢慢且持续增多。废弃矿山的植被恢复碳积累速率开始时比较低，但是随着生态系统的不断发展，它的固碳能力会逐渐增强。

整个过程碳汇效应不单是植物、土壤碳储量增加。稳定的植被生态系统能够减少风蚀、水蚀造成的土壤有机碳流失，这部分避免的排放也成了其气候贡献的重要组成。因此废弃矿山修复环评要创建长期监测体系，在先锋群落到顶级群落的整个演变阶段跟踪碳库变化情况，准确地测度它的长时间的碳汇能力。

技术上，微生物技术、客土覆盖、基质改良等工程手段，可以加快生态系统自然恢复，加快碳积累的过程。接种菌根真菌可以提高植物的养分吸收能力，提高植物在恶劣环境中的生存能力，施用生物炭等改良剂可以直接增加土壤碳储量，改善土壤结构。用新技术改造废弃矿山，可以使其由生态负资产变成可以碳中和的碳汇资产。

（二）土壤改良措施的固碳效果

土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库，土壤中微小的碳密度变化都会对大气二氧化碳浓度造成明显的影响。对各种退化土地实施科学的土壤改良，是提高其固碳能力、增加生态系统碳汇的重要途径。这些措施直接或者间接增加土壤有机碳的输入，减缓土壤有机碳的分解速度，从而达到碳的长期封存。具体的土壤

改良措施及其固碳效果如下表所示。

土壤改良措施固碳效果比较表

措施类型	主要机制	典型固碳效果 / 特点
增施有机物料	增加土壤有机碳输入，形成稳定腐殖质	快速提升土壤有机质，部分材料（如生物炭）可长期固碳
保护性耕作	减少土壤扰动，保护团聚体结构，抑制碳分解	减少碳流失，促进土壤有机碳累积，改善土壤结构
改善植被配置	增加根系生物量，促进深层土壤碳积累	长期稳定固碳，改善土壤肥力，提升生态系统多样性

1. 增施有机物料，即向土壤中加入外源有机物料，是提高土壤固碳能力最直接、最有效的方法之一。常用的有机物料有农作物秸秆、畜禽粪便、绿肥以及近几年来备受关注的生物炭。秸秆还田可以将植物生长季固定的部分碳还给土壤；生物炭作为难分解的富碳材料，施入土壤后可以稳定存在数百年，是高效且长效的土壤固碳技术。

2. 实行保护性耕作：在农业用地修复过程中使用免耕、少耕的保护性耕作，最大程度上减少对土壤结构破坏。不仅可以防止土壤风蚀、水蚀造成的有机碳流失，还可以保护土壤团聚体结构，将有机碳物理性包裹起来，减缓微生物分解作用，促进土壤有机碳累积。

3. 改善植被配置，种植深根系植物或豆科植物可以增加土壤深层有机碳输入。深根植物可以将光合作用固定的碳转移到更稳定的深层土壤中；豆科植物固氮作用可以改善土壤肥力，促进整个植被群落的生长，间接增加土壤有机质的来源。

土壤改良措施固碳效果不是一蹴而就的，而是缓慢且长期的。其效果受气候条件、土壤类型、改良措施的具体实施方式和强度等很多因素的影响。环境影响评价时要依靠模型模拟和长期定位观测，对不同措施在特定区域的固碳潜力、速率进行科学的预测与验证，从而给选择最优的土地修复与管理方案提供决策依据。

三、生态修复工程碳汇效益评估方法

为了使生态修复工程的碳汇效益具有真实性和可量度性、可验证性，必须要建立一个科学的评估方法体系。该体系要能正确核算项目的净碳汇量，还要能证明项目对减缓气候变化的额外贡献。

（一）基线情景与额外性论证

碳汇项目评价起始点就是设定基线情景。它表示的是没有生态修复工程时，项目区域内碳储量随时间自然变化的趋势。基线情景的确定要依靠历史数据、区域发展规划和类似地块自然演替规律进行科学的预测。退化土地的基线情景，一般就是植被持续退化，土壤碳储量不断下降或者保持在较低水平。只有项目实施后的实际碳汇量大于基线情景的碳汇量时，差值才被认定为项目产生的净碳汇，即具备了“额外性”。

额外性论证属于碳汇项目气候贡献真实性证明的一个环节。它要求项目方证明，如果没有碳汇效益驱动，该生态修复活动就不会发生。论证一般要经过多项测试，即法律法规符合性测试（判断项目活动是否属于法律强制性要求），投资壁垒分析（判断项目在没有碳收益的情况下是否可行），普遍性实践分析（判断该活动在项目区域内是否属于普遍做法）。环境影响评价中添加额外性论证机制，可以避免把强制性的生态恢复活动碳汇量纳入减排贡献里，从而保证在双碳目标之下政策与投资合理、有针对性。

（二）全生命周期碳汇效益核算

对生态修复工程碳汇效益评价要采取全生命周期视角，即对生态修复工程从准备、实施、管护到效益稳定期整个生命周期内温室气体排放和吸收进行核算。这就意味着评估者不能只看修复后生态系统生长产生的碳汇增量，而应该全面识别并量化项目边界内所有相关的排放源。

核算过程一般由项目实施阶段排放、苗木培养和运输、机械化种植及灌溉系统建设等几部分组成，这些活动因为化石燃料使用、电力消耗、肥料生产施用等产生的温室气体排放。其次就是项目运行管护阶段的持续排放，日常巡护、病虫害防治、森林防火等活动所消耗的能源。

在得到项目全生命周期总排放量之后，再与项目监测到的总碳汇增量进行比较，所得净值就是该工程对气候的净贡献，也称为净碳汇效益。评价时还要考虑泄漏问题，即项目活动是否会造成项目边界外区域温室气体排放增加。在某地区实行严格的封山育林，会使当地居民转而感到其它地区砍伐林木来满足薪柴需求，从而造成碳排放转移。对潜在泄漏进行识别、量化，在项目净碳汇中予以扣除，这对于保证核算结果的完整性、准确性来说十分重要。经过全面、审慎的全生命周期核算之后，才能给生态修复工程环评提供更加客观、可靠的碳效益数据。

第五节 碳汇交易机制与价值评估

一、国内外碳汇交易市场概述

碳汇交易市场用市场化的方式给碳汇项目提供经济激励，是实现生态产品价值化的有效途径。无论是中国的国家核证自愿减排量机制，还是国际上通行的各种自愿碳市场标准，都对生态系统固碳功能转化为可交易资产制定了明了的规则和平台，引导资金流向绿色低碳领域，有效地支持了全球应对气候变化的行为。

（一）中国核证自愿减排量机制

中国核证自愿减排量是对于我国境内可再生能源、林业碳汇、甲烷利用等项目温室气体减排效果进行量化核证，在国家温室气体自愿减排交易注册登记系统中登记的温室气体减排量。该机制属于我国碳市场体系的重要部分，同碳排放权配额交易市场一起形成“双轮驱动”的局面。CCER 的交易主体是多样的，除了控排企业之外还有金融机构、非控排企业、个人等，大大提高了碳市场的活跃度和定价效率。

CCER 机制的发展过程，也是我国碳市场建设探索完善的过程。从 2012 年有关管理办法颁布以来，CCER 给许多减排项目提供价值实现途径。尽管由于项目规范性、交易量等因素，新项目审批自 2017 年后停止，但是全国统一碳市场的建立以及“双碳”目标的推动使得 CCER 的需求越来越大，造成巨大的供给缺口。因此国家积极推进 CCER 重启工作，2024 年 1 月 22 日全国温室气体自愿减排交易市场正式重启。

重启后的 CCER 市场在制度设计、方法学上做了改进，保证减排量的真实性、可测量性、额外性。控排企业可以以 CCER 来抵消年度清缴配额量 5% 以内排放量，为控排企业提供了更加灵活且成本效益高的履约方式，有利于全社会减排成本最低化。随着海上风电、光热发电等优质项目越来越多地加入，方法学不断发展，CCER 市场在引导绿色投资、发展新质生产力、助力实现碳达峰碳中和目标方面的作用会越来越大。

（二）国际自愿碳市场标准

国际自愿碳市场是企业、组织或个人自愿参与的全球性市场，目的是通过购买碳信用来抵消自己不可避免的温室气体排放。该市场与各国强制履约市场无关，

主要动力来自于企业社会责任、企业形象、可持续发展需求。国际自愿碳市场上项目种类繁多，包括可再生能源、能效提升、林业碳汇、生物炭碳封存等许多领域，鼓励超出法规要求的减排创新。

为了保证碳信用的质量，保证市场的公信力，国际自愿碳市场制定了严格规定、认证体系。其中影响最大的两个标准是核证碳标准和黄金标准。这些标准对项目的额外性、永久性、可测量性、可核查性及是否带来共同效益（如保护生物多样性、促进社区发展）等各方面都做了具体规定。近些年为了提高市场诚信度，自愿碳市场诚信委员会制定了核心碳原则，用以制定全球各种碳信用机制的质量标准，保证碳信用的真实有效。同时，自愿碳市场完整性倡议发布的声明实践守则，给企业如何使用碳信用进行可信的气候声明提供指导。这些举措一起促使国际自愿碳市场朝着更为规范、透明、高效的方向发展，给全球气候行动调动了重要的社会资金。

CCER 与 VCM 的市场特征与对比，可见下表：

CCER 与 VCM 市场对比表

特征	中国核证自愿减排量	国际自愿碳市场
市场类型	国家强制碳市场补充 / 自愿减排市场	全球自愿碳市场
主要驱动	控排企业履约、国家碳中和目标	企业社会责任、可持续发展、品牌形象
主要参与方	控排企业、金融机构、非控排企业、个人	企业、组织、个人
项目范围	可再生能源、林业碳汇、甲烷利用等中国境内项目	可再生能源、能效提升、林业碳汇、生物炭碳封存等全球项目
主要标准 / 机制	中国温室气体自愿减排交易注册登记系统	VCS、黄金标准、ICVCM 核心碳原则等
交易现状	2024 年 1 月重启，需求旺盛	持续活跃并不断完善监管与诚信机制
抵消比例	控排企业年度清缴配额的 5% 以内	无强制抵消比例，由企业自愿决定

二、碳汇项目开发方法学

碳汇项目开发方法学是保证碳汇量核算科学、准确、透明的前提。它给项目的全生命周期提供标准化的技术指导，项目的设计、基线的确定、减排量的监测核算到每一个环节都具有指导作用。严谨科学的体系是项目基线情景准确识别、额外性严格论证的基础，是保证碳信用真实有效的重要前提，也是防止碳市场出现漂绿现象、保证市场公信力的重要保证。

（一）林业碳汇项目方法学（如 AR-CM-001）

林业碳汇项目方法学是林业碳汇项目开发、审定、核查和核证的技术文件。中国温室气体自愿减排项目方法学中关于碳汇造林项目的操作规程为 AR-CM-001-V01。在制定过程中充分参考联合国清洁发展机制方法学工具，政府间气候变化专门委员会优良做法指南等，并结合我国林业实际情况，使本方法的科学性、实用性强。

AR-CM-001 方法学规定了项目适用的条件，即项目活动在 2005 年 2 月 16 日以后在无林地上进行，土地权属清楚，不能用烧山等方式清理林地。该方法的重点在于对碳汇计量的一系列规定，包括以下几步：

1. 项目边界识别和碳层划分，首先要确定项目的地理边界，再根据树种、立地条件、造林时间等将项目区划分为若干个碳层，从而准确地进行碳储量的计算。
2. 基线情景和额外性论证：确定没有项目活动时土地碳储量变化趋势，即基准线，论证项目活动是额外的，即其产生的碳汇效益大于无项目激励时的情况。
3. 碳汇量计算与监测：方法学对乔木、灌木等不同碳库的碳储量计算公式做了详细规定，对于需要长期监测的样地面积、树木生长状况、火灾面积等参数也做了规定。定期对数据进行监测，以得到项目实施后相对于基线的净增碳汇量。

该方法的运用一方面可以实现林业项目生态效益的量化、价值化，另一方面也可以为环境影响评价提供碳汇核算的重要依据，从而达到林业可持续经营和气候变化应对的协同增效。

（二）碳汇项目基线情景识别与额外性论证

基线情景识别、额外性论证，是碳减排项目（特别是碳汇项目）开发中最关键、最繁琐的工作。它们共同保证了项目产生的减排量是真实的、额外的，不是自然发生的或者本来就存在的，从而保证碳信用的环境完整性。基线情景就是假定没有碳汇项目的情况下，项目区域内的土地利用、温室气体排放或者吸收的变化趋势。一块荒地的基线情景就是它保持荒芜状态，碳储量保持在较低水平。

额外性论证意在证明项目活动的开展完全是由于碳市场收益所驱动。若一个项目在缺少碳市场支持下由于财务、技术风险或者融资困难等障碍不能实施，则具有额外性。造林项目虽然可以产生生态效益，但是前期投入大、回报周期长，在商业上不具备可行性，只有当预期的碳汇收益能够弥补其财务缺口时，该项目才能启动，这样的项目就具有了“额外性”。如果一个项目本身就具有良好的经

济效益，或者受到法律法规的强制性要求，那么它就不属于额外的，因为不管怎样都会被实施。

碳汇项目基线、额外性在环境影响评价中起着非常重要的作用。它同该项目能否合法注册为碳减排项目有关，也同环评结论的科学性、公正性有关。根据项目区域土地利用历史、相关法律法规、项目财务模型和技术方案来确定基线情景，并评价其额外性。既可防止名不副实的“漂绿”项目混入市场、扰乱市场秩序，又能使环境影响评价真正发挥作用，吸引社会资金投入具有实际气候效益的绿色低碳活动中来，为实现我国碳达峰碳中和目标做出实质性的努力。

三、生态系统碳汇服务价值评估

对生态系统碳汇服务的价值进行评估，是将“绿水青山”变成“金山银山”的重要环节，也是在环境影响评价中对项目生态影响进行全方位衡量的一种方式。用科学的方法将生态系统固碳的无形服务功能进行货币化，既可以体现其经济价值，也可以为主管部门决策、生态补偿标准制定、碳汇市场交易提供量化依据。

（一）碳汇市场价格与影子价格法

生态系统碳汇服务价值的评估方法有市场价格法、影子价格法两种常用的经济学方法。市场价格法是最直接的评估方法，用已有的碳交易市场的价格信息来给碳汇定价。参考中国核证自愿减排量市场或者国际自愿碳市场中同类型项目碳信用的成交价格，将评估区域内生态系统在一定时期内固定的碳量（以吨二氧化碳当量为单位）与市场单价相乘，即可得到其市场价值。该方法的优点是数据来源于真实的交易，直观易懂，可以直接体现碳汇作为商品在当前供需关系中的经济价值。

当没有公开透明的市场价格，或者市场价格不能完全反映碳排放所造成的真实社会环境成本时，影子价格法就显得尤为重要。影子价格又叫环境影子价格，是模拟的、内部决策用的价格，用来反映增加一单位环境影响（碳排放等）的边际社会成本，或者减少一单位环境影响的边际社会效益。碳的影子价格，指的是减少一吨二氧化碳所避免的未来气候损害的经济价值。其确定方法比较复杂，一般要建立宏观经济模型，综合考虑气候变化给农业、健康、基础设施等各方面带来的潜在影响。影子价格法计算出的碳汇价值一般比现有的市场交易价格要高，因为影子价格法更注重从全社会的长远福祉来衡量碳汇的生态价值，给政府制定

环境税收、生态补偿政策以及重大项目的投资决策提供更加全面的依据。

（二）生态系统服务综合价值评估

生态系统服务综合价值评价属于一种更宏观、更全面的评价体系，它超越了单个碳汇功能的局限，目的是量度生态系统给人类福祉提供的一切产品和服务。根据千年生态系统评估报告中给出的分类，生态系统服务分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务。碳汇服务只是调节服务的一种，对它进行综合评估，就是把碳汇的价值同其他众多的服务价值结合起来，从而得到对生态系统总经济价值的全面认识。

综合价值评价一般会使用多种方法结合起来。对有市场价格的木材、非木材林产品等，用直接市场价值法；对调节、文化服务等非市场产品，则用替代市场法、旅行成本法、意愿价值评估法等。森林生态系统总价值 = 木材供给价值 + 固碳价值 + 水源涵养价值 + 生物多样性保护价值 + 周边居民休闲娱乐场所的文化价值。用地理信息系统数据来模拟土地利用变化之后多种生态系统服务（碳储存等）质量、价值量的变化情况，为区域规划和政策制定提供空间化的决策依据。

在双碳目标下的环境影响评价中，把生态系统服务综合价值的评估纳入进去，可以使得决策者认识到保护、修复生态系统不仅仅是增加碳汇，更是维护一个多功能、高价值的生命支持系统。综合评价法可以使项目开发与生态保护之间进行科学权衡，促使从单一目标到多元生态效益提高的变化，获得经济效益和生态环境双赢的结果。

第四章 清洁能源项目环评创新

第一节 风电项目生态环境影响评价

一、风电项目对鸟类的影响评价

风电场和鸟类保护之间的矛盾是环评中的一个主要问题。科学评价风电项目对鸟类的影响，是达到能源开发和生物多样性保护相协调发展的根本前提。

（一）鸟类迁徙通道与活动规律调查

风电项目对鸟类影响评价的基础，在于对项目所在区域鸟类的时空分布特征有一个全面的了解。传统的调查方法一般会把历史文献资料同专家咨询意见结合起来，再加上多期次的现场实地调查，以此来创建起区域鸟类活动的基础数据库。现场调查一般采用样线法、样点法，不同季节尤其是鸟类迁徙季节（春迁、秋迁）、繁殖季节，对鸟类种类、数量、飞行高度、飞行路线、飞行行为进行记录。积累这些数据可以大致勾画出鸟类迁徙通道、繁殖地、觅食地和夜宿地等主要的生态区，为风险评估、风机布置提供重要的依据。

调查的深浅、宽窄直接影响评价结论是否可靠。评价时不能只重视国家、地方重点保护鸟类，还要重视数量多、生态地位重要的普通鸟类。调查的内容应包括鸟类种群结构、多样性指数、日活动节律、季节性变化等各方面。对迁徙鸟类重点分析过境高峰期、主要飞行廊道宽度、垂直高度范围，准确找到鸟类活动热点区域。基础数据可以用来确定风机和鸟类发生碰撞的风险、屏障效应、栖息地缺失等潜在的影响，也是采取有效的生态保护措施的前提。

（二）风机布设优化与避让措施

根据鸟类调查结果来优化风机的宏观和微观布置，是预防和减少鸟类风险最主动、最有效的方法。从宏观上讲，风电场选址要主动避开已经确定的鸟类重要迁徙通道、国家级或者省级鸟类自然保护区、重要湿地等生态保护红线区域。在确定场址范围之后，环评要给出明确的生态安全距离或者缓冲区建议，保证风电场同这些主要的鸟类栖息地之间留有足够大的空间间隔，从源头上防止重大生态

风险的发生。

微观上，风机点位具体的布置是评价的重点。评价要以鸟类活动热点图、飞行轨迹数据为依据，对风机阵列布置、走向、间距作出调整。风机点位应设在鸟类低频活动区，风机阵列走向应尽量与鸟类主要迁徙方向平行而不是垂直，以减小屏障效应。局部飞行热点区域应立即放弃或者改变机位，保证主要飞行通道畅通无阻。依靠细致的数据分析来改善微观选址，是平衡能源开发和生态保护需求的主要技术途径。

评价还要提出项目全周期的鸟类保护措施体系。施工期间必须严格控制施工范围、施工时间，对鸟类繁殖、栖息的影响降到最低。运营期要开展长期的鸟类监测工作，探寻创建雷达或者视频监控预警体系，在鸟类迁徙高峰期或者发现大量鸟群接近的时候，实行临时停机等适应性管理手段。这些方法一起构成了从源头规避到过程控制的全方位鸟类保护方案，反映出环境影响评价由被动评价转向主动预防性设计的观念。

（三）新技术在鸟类监测中的应用

传统调查方法在时间连续性以及空间覆盖面上存在局限性，在“双碳”目标背景之下，环评创新实践越来越重视新技术的应用。使用自动化、智能化的监测手段，可以长时间、动态、准确地刻画出鸟类的活动规律。自从出现鸟类监测雷达以后，可以实现全天候、大范围 and 实时对鸟群的高度、速度、方向和规模进行监控，特别对于夜间迁徙鸟类而言更具有重大的意义。雷达数据可以精确地绘制出鸟类迁徙通量的三维时空分布图，大大提高了对迁徙通道的识别精度。

除了雷达以外，用全球定位系统卫星追踪来研究珍稀濒危鸟类个体活动规律，也属于另外的方法。给目标鸟种装配上微型追踪器，就能获取其个体级的迁徙路径、停歇地点以及活动范围，进而评价风电场址和鸟类活动区域之间有无重叠。采用红外相机、声学监测设备等可以形成一个多技术融合的立体监测网络。该网络既可以给环评阶段的数据收集提供支持，也可以成为运营期的适应性管理、风险预警系统的重要组成部分，推动鸟类保护措施从被动应对转变为积极预防、智能调节，提高环评的科学性、前瞻性。

二、风电项目噪声与光影影响评价

风机运行时产生的噪声、光影闪变都会对周围环境的人居舒适度造成影响。

本节主要研究噪声和光影的预测评价方法以及防护措施，目的是最小化项目对敏感点产生的不良环境影响。

（一）噪声预测模型与敏感点防护

风电项目噪声影响评价的核心，就是准确地预测风机运转时在周围敏感点上产生的噪声声级。目前环评中广泛使用的有 ISO 9613-2 声学户外声传播衰减第 2 部分一般计算方法等成熟的声学预测模型。该模型把声源的声功率级、几何发散、大气吸收、地面效应、屏障遮挡、植被、工业区等因素都考虑进来了，对声波传播的影响进行了综合分析。评价时需要输入风机型号声功率级数据、风机和敏感点三维坐标、地形地貌数据、区域气象统计参数等来保证预测结果的准确性。

预测结果要和 GB3096 等声环境质量标准中相应的声环境功能区限值进行比较，判断项目的噪声影响是否可以接受。当预测结果显示居民点、学校、医院等敏感点存在超标风险的时候，必须要提出有效的防护措施。设计时既要考虑技术上的可行性，也要考虑经济上的合理性。

对于噪声超标的敏感点，可采取的防护措施是多样的。

1. 改善风机布置，将靠近敏感点的风机挪到影响小的地方。这是最根本的降噪方式。

2. 选用低噪声风机：在技术选型上，优先采用经过优化设计、具有更低声功率级的风机型号。

3. 在噪声传播路线上设置声屏障，可以用自然地形或者人工构筑物阻挡噪声向预定敏感点传播。

4. 采取运营管理措施，在夜间等噪声要求更严格的时候，对部分风机采用降噪运行模式（降低叶片转速）或者与受影响居民协商补偿方案。

（二）光影影响范围与时长模拟分析

光影影响，即风机叶片转动时周期性遮挡太阳造成影闪现象，会干扰周围居民的视觉舒适度。影响评价主要是用专业的模拟软件进行定量分析。模拟分析的基础是准确的地理空间信息和天文学算法。输入参数是评价工作的重要部分，一般包括每台风机的精确地理坐标、轮毂高度、叶片长度、转速、项目区的太阳轨迹数据（由纬度、日期来决定）、敏感建筑物（住宅）的坐标及窗户尺寸。

利用软件模拟，可以准确地计算出在最不利的情况下，即太阳持续光照、风机持续朝向敏感点转动时，每个敏感点全年和每天受光影影响的累计时长和发生

时段。评价结果一般有两种呈现方式，一种是光影影响等值线图，直观展示风电场周围各区域受光影影响的时长；另一种就是对特定敏感点绘制的光影日历，把一年内每天出现光影现象的时间段及时长都列出来。定量分析结果可以用来判断影响程度，进而制定缓解措施。

（三）光影影响的进一步评估与缓解措施

根据基础的光影模拟分析，环评创新实践应该在此基础上做进一步的评价，更接近实际情况。单纯使用“最不利情况”模拟可能会高估实际的影响，因为它没有考虑当地实际的日照时长。因此，利用当地气象站多年平均太阳辐射或者日照概率数据，对模拟结果进行修正，可以获得更加符合实际的“预期”光影影响时长，使评价结论更加科学合理。这样细致的分析可以避免过度保护，也可以减少不必要的项目投入。

评价还要考虑光影的累积效应。当多个风电场处于同一区域或者单个风电场内风机数量较多的时候，某个敏感点会同时受到多台风机的光影影响。此时必须做叠加影响分析，计算出所有风机共同作用下的总影响时长。这对于区域能源规划、项目布局有重要的指导意义，可以防止局部区域环境影响的集中。

根据精确的模拟分析结果来提出有针对性的缓解措施。最有效的方法就是给风机控制系统加上光影控制模块。该模块根据预先设定的光影模型，当预判到某敏感点会出现超标影响的时候，就会自动使风机短暂停机，待影响时间段结束后自动恢复运行。在评价时，需要写上需要安装该类控制系统的风机编号、控制阈值（一年累计不超过 30h、一天内不超过 30min）和相应的措施，保证光影的影响在可以接受的范围之内，使项目开发和和谐人居环境一致。

三、风电项目全生命周期碳评价

在“双碳”目标之下，对风电项目碳减排贡献进行量化也成了环评的内容之一。本文以全生命周期为视角来建立风电项目碳排放、碳减排效益核算与分析的方法。

（一）建设期与运营期碳排放核算

风电项目全生命周期碳评价，首先要对风电项目各个阶段的温室气体排放进行全面核算。核算边界一般是从原材料开采、设备制造、运输、项目施工、运营维护到最后拆除处理为止。环评中碳排放主要是核算建设期、运营期。建设期的

碳排放源有风机、塔筒、基础等主要设备生产制造过程中消耗能源和原材料产生的间接排放；大量水泥、钢材等建筑材料生产及运输过程中产生的排放；施工现场各种燃油机械设备运行产生的直接排放。

运营期碳排放较少，主要是由于定期的维护活动中交通工具、机械设备的运行以及更换零部件的制造、运输产生的排放。风电场自身运行所消耗的少量电能（即厂用电）、输变电线路的电能损失（折算为上游发电侧的碳排放）等也应该被计入核算范围。根据各个环节活动水平的数据（如材料用量、运输距离、燃料消耗量等），乘以对应的碳排放因子，可以系统计算出项目整个生命周期的碳足迹，为之后碳减排效益分析提供基础。

（二）项目碳减排效益与回收期分析

风电项目最大的环境效益就是可以替代化石能源发电，从而减少温室气体排放。项目碳减排效益的分析，本质上就是比较过程，即比较风电项目全生命周期的碳排放与等量电力的基准碳排放。基准碳排放的确定属于该分析的重要部分，它代表的是若无此风电项目，为达成相同电量需求所造成的温室气体排放总量。基准一般用项目所在区域电网的平均排放因子来计算，该因子代表区域电网发电结构的平均碳强度。

其主要核算要素及计算方法如碳减排效益与回收期核算要素表所示。

碳减排效益与回收期核算要素表

核算要素	说明及计算依据
基准线排放因子 (EF_{grid})	项目所在区域电网的平均二氧化碳排放因子，优先采用国家主管部门发布数据。
全生命周期碳排放 (E_{LCA})	项目从原材料获取到最终处置各阶段的温室气体排放总量。
年上网电量 (P_y)	风电场预计每年向电网输送的电量。
年均碳减排量 (ER_y)	项目替代化石能源发电所减少的温室气体排放量。 $ER_y = P_y \times EF_{grid}$ 。
碳回收期	项目运营产生碳减排效益抵消自身全生命周期碳排放所需的时间。 $CPP = E_{LCA} / ER_y$ 。

年碳减排量等于风电场年上网电量乘以区域电网供电平均排放因子。在此基础上可以对项目动态减排特性做进一步的分析。项目的总净碳减排量等于其在整个运营期内的总减排量减去其全生命周期的总碳排放量。净值为正且数值越大，说明项目的气候效益越明显。

在此基础上引入碳回收期这一概念到环评分析。碳回收期即风电项目通过产生碳减排效益，抵消自身全生命周期碳排放所需要的时间。它反映的是项目偿还碳债的能力。碳回收期短的项目一般碳减排效率高、环境效益好。经过这样的分析，环评既考虑到项目的环境影响，又从气候贡献的角度量化的项目绿色属性，给项目决策、绿色金融评价提供依据。

（三）碳减排效益与回收期核算规范

为了保证碳减排效益和回收期的分析具备规范性、可比性，必须要形成一个完整的核算框架和方法论。具体的核算步骤为如下所示。

1. 基准线排放因子的确定在碳减排效益和回收期核算要素表中已经给出，这是进行效益核算的重要参数。优先选用国家主管部门发布的最新的区域电网平均二氧化碳排放因子。在没有官方数据的时候，可以参照当地能源统计数据，采用相关的方法学进行测算。评价时要注明所用因子的来源、年份及适用性。

2. 全生命周期碳排放 (E_{LCA}) 的计算：在碳减排效益、回收期核算要素表中可以看出，项目从原材料获取到最终处置（即摇篮到坟墓）各个阶段的温室气体排放总量都需要准确计算出来，这是计算碳回收期的前提。

3. 年均碳减排量 (ER_y) 的计算，根据碳减排效益和回收期核算要素表中的数据，用项目预计年上网电量 (P_y) 乘以基准线排放因子 (EF_{grid})，即 $ER_y = P_y \times EF_{grid}$ 。

4. 碳回收期的计算：根据碳减排效益与回收期核算要素表可知，用项目全生命周期碳排放总量除以年均碳减排量，即 $CPP = E_{LCA} / ER_y$ 。该结果单位是年，直接体现了项目运营多少年可以完全抵消自身的碳足迹。

分析结果不仅可以用来判断环境影响，而且有重大的现实意义。一方面可以为项目在碳市场中的潜力做出初步的评价，也可以给业主参加温室气体自愿减排等机制提供数据支持。该分析结果也是 ESG 报告的主要绩效指标，可以改善项目的绿色形象以及融资能力。在双碳目标之下，把这种量化的碳评价深度嵌入到环评体系里，既是传统环评内容的拓展，也是促使能源项目真正实现绿色低碳转型的重要一步。

第二节 光伏发电项目全生命周期评价

一、光伏电站选址与生态影响评价

光伏电站选址的好坏，直接关系到它对当地生态环境的长期影响。科学的选址和生态影响评价，是实现清洁能源开发与生态保护相协调、相得益彰的前提和基础，对规避生态风险、优化项目布局起决定性的作用。

（一）对土地资源与生态系统的影响

大型地面光伏电站建设要占用大量土地资源，由于原始地貌及土地利用类型不同，环境影响也大相径庭。选址于优质耕地会直接产生粮能争地的矛盾，减少粮食的播种面积，威胁到粮食安全；施工、运营过程中还会破坏土壤理化结构，影响耕作层肥力以及持续利用。当电站建在草原、林地等生态功能区时，大规模的场平、基础浇筑、组件安装会直接清除原生植被，造成地表裸露，增大水土流失的风险。这样将会把野生动物的栖息地切断、迁徙通道封断，使生物多样性降低，造成区域内生态系统的完整性、稳定性受到破坏。

光伏阵列改变局地微气候。光伏组件在吸收太阳辐射并转化能量的时候，会对地表温度、土壤湿度、近地表风速等参数造成影响。在干旱地区由于太阳能组件遮挡而减少土壤蒸发，减小风速有利于植被恢复，称为“生态正效应”或者“逆向生态效应”。但是在湿润或者半湿润地区，长期遮挡会减少地表径流的汇集和下渗，改变土壤微生物群落结构，从而对某些植被的生长产生抑制作用。光伏组件清洗过程中如果使用化学清洗剂并且管理不当，产生的废水会对周围的土壤、水体造成二次污染。复杂、多维的影响，需要环境影响评价结合项目所在地具体的生态环境特点做精细化、差异化的评价。

因此在双碳目标的导向下，光伏电站选址环境影响评价更应该坚持生态优先的原则。评价体系要由单个环境要素的影响评价，转变为对生态系统服务功能影响的综合评价，量化项目对水源涵养、水土保持、生物多样性维护等主要生态功能的影响价值。采用地理信息系统、遥感等现代化技术手段，对区域生态敏感性做空间分析，找出生态红线、环境制约因素，引导光伏项目优先使用闲置土地、废弃矿区、荒漠化土地等边际性土地资源，从源头上避免和减缓重要生态系统和农业用地的负面影响，实现能源开发与生态环境保护协调发展。

（二）农光互补模式的环境效益

“农光互补”模式就是把光伏发电与农业种植结合在一起的一种新型土地利用方式，在光伏阵列下面或者间隙里进行农业生产，实现了“一地两用、农电双收”，极大提高了土地的复合利用效率和综合产出价值。该模式不但是解决光伏发展与耕地保护矛盾的有效途径，而且有明显的生态效益。它用立体化的空间布局来建立能源生产与农业生态协同发展的体系。

农光互补系统对农业微环境的改善是它环境效益的主要体现。光伏板遮蔽作用可以降低夏季土壤温度、减少水分蒸发量，给作物生长创造一个更凉爽湿润的环境。对于喜阴或者耐阴的经济作物，比如菌菇、中草药、部分蔬菜等，能够起到保护作用，防止强光灼伤，提高作物的品质和产量。干旱、半干旱地区节水效果更明显，可大幅降低农业灌溉用水需求，提高水资源利用率。冬季光伏板可以起到一定的保温作用，减小霜冻对作物的影响，延长作物生长期。

该模式的生态价值还表现在对农业生态系统正向干预上。合理的阵列设计以及作物的选择可以改善土壤健康状况，板下种植绿肥或特定的作物可以增加土壤有机质含量，促进有益微生物的活动，提高土壤肥力。光伏系统为灌溉泵、温控设备、农产品加工等农业生产设施提供清洁的电能，代替化石能源的使用，从而减少农业生产过程中产生的碳排放量及空气污染。既降低了农业生产的能源成本，又使农业朝向绿色、低碳的方向发展，提高了农业生态系统的可持续性，增强了农业对气候变化的应对能力。农光互补模式是现代农业和可再生能源相结合的一种典范，在乡村振兴、能源结构转型上起到双驱动力。

（三）渔光互补模式的环境效益

渔光互补模式就是将光伏发电设施架设在水面上，水面上方可发电，水面下可养鱼，形成立体化的生产方式。该模式充分地利用了广阔的水域空间，有效地扩大了光伏电站的建设范围，并且与水产养殖业形成了互利共生的关系，环境效益主要是对水生态系统保护以及水资源利用上的提高。

渔光互补项目的主要环境效益之一就是水体的生态调节功能。覆盖在水面上的光伏板可以有效地遮挡阳光，从而降低水体温度，在夏季高温的时候，可以给养殖鱼类提供一个凉爽舒适的生长环境，减少由于高温胁迫所造成的疾病和死亡。更重要的是，光照强度降低能有效抑制水体中藻类、特别是蓝藻等有害藻华的过度繁殖，从而改善水质、提高水体透明度，防止因藻类死亡分解消耗大量溶解氧

造成的水体富营养化、黑臭。既改善了水产养殖环境，也有利于区域水生态系统的健康和稳定。光伏板覆盖可以大幅度减少水面蒸发量，在水资源日益紧张的情况下，它所具有的节约水资源的功能具有不可估量的战略意义。电站产生的清洁电力可以直接为增氧机、投饵机等养殖设备供电，减少养殖成本，降低渔业对传统电网的依赖，从而降低渔业碳排放，促进水产养殖业的绿色发展。

二、光伏组件退役回收与循环利用评价

随着全球光伏产业的迅速发展，第一批商业化光伏电站即将达到设计寿命，未来几十年内将有大量的退役光伏组件。科学开展退役组件环境影响评价，建立高效环保的回收和循环利用体系，是光伏产业实现绿色闭环、保证可持续发展的必然要求和重大考验。

（一）退役光伏组件的环境风险

光伏组件在正常工作时稳定、环境友好，但是其主要的风险来自于退役后处置不当。晶硅光伏组件是由玻璃、铝边框、硅、铜、银等高价材料和乙烯-醋酸乙烯酯共聚物、背板等高分子材料组成的。废旧的部件如果不能按照规定进行回收，随意丢弃或者送入普通垃圾填埋场中就会造成长期的环境污染隐患。

环境风险主要是由于组件材料在自然环境中降解、浸出所造成的。金属元素，尤其是焊带中的铅，在风化、雨水冲刷的作用下，从破损的组件中慢慢渗出，渗透到土壤和地下水中，造成持久性的重金属污染，威胁生态安全和人体健康。尽管现代光伏组件含铅量已经大幅降低或者采用无铅技术，但是存量的老旧组件仍然是不能忽视的潜在污染源。

组件中 EVA 胶膜和含氟背板等高分子材料在自然条件下很难降解，容易造成长期塑料污染。采用不合适的焚烧方式处理含氟、含氯聚合物，在燃烧不完全的时候会生成二噁英、氟化氢等剧毒有害气体，严重污染大气环境。因此，对退役的光伏组件进行前瞻性的环境风险评价，并建立从收集、运输、处理的全过程规范化管理体系，是防止光伏资产变成环境负债的关键所在，也是全生命周期评价中特别关注的末端环节。

（二）回收处理技术与资源化潜力

光伏组件退役周期已到，发展高效环保的回收技术，发掘光伏组件资源化的潜力，化解环境风险，推动产业循环发展成为必然。光伏组件回收的主要目的就

是将各个组分材料分离出来，实现高值化再利用，尤其是高纯硅、银、铜等贵重材料。目前回收处理技术路线主要有物理法、热处理法和化学法。光伏组件的主要回收处理技术及其特性如下表所示。

光伏组件回收处理技术特性表

回收方法	原理	优点	缺点	主要回收物
物理法	机械拆解、破碎、分选	工艺简单，能耗低	精细材料分离差，纯度低	铝、玻璃
热处理法	高温热解封装材料	有效拆解层压结构，电池片分离	能耗高，可能产生有害气体	玻璃、硅片
化学法	化学溶剂溶解 / 蚀刻	回收率高，产品附加值高	工艺复杂，产生废液废渣，成本高	高纯硅、银、铜

物理法是目前应用最广泛、最成熟的技术，主要采用机械拆解、破碎、分选等方法对材料进行初步分离。先拆除接线盒、铝边框这两部分可以回收。接着使用破碎设备对剩余的层压板部分进行破碎，得到不同粒径的碎料，再利用密度、电选、涡流分选等物理原理将玻璃碎料、金属碎屑和含有硅片的聚合物混合物分离。物理法工艺简单、能耗低，能高效回收铝、玻璃，但是对 EVA 胶膜紧密包裹的硅片、金属电极等精细材料的分离效果不好，回收材料纯度不高。

热处理法一般作为物理法的补充或者前置步骤，主要依靠高温（500℃至600℃）的热解作用，使 EVA 等高分子封装材料燃烧或者裂解，从而把玻璃、硅片等脆性材料分离开来。该方法可以有效地将组件的层压结构拆解，使玻璃和电池片清洁地分离出来，为后面硅材料和金属的提纯创造了条件。但是能耗高，热解过程中会产生有害气体，因此必须配备高效的尾气处理系统以防止二次污染。

化学法是实现高价值材料回收的重要技术，主要用化学溶剂（有机溶剂、酸或碱）溶解 EVA 胶膜或者蚀刻金属电极。通过特定的化学反应，可以将银、铜等贵金属溶解提纯，得到高纯度的硅材料，再用于光伏或者电子产业。化学法回收率最高、产品附加值也最高，但是工艺流程复杂，会生成废液、废渣，对环保处理要求高，成本较高。由此可以看出，未来技术发展走向就是综合采用物理、热处理、化学等手段，实现低耗、高效、环保的综合工艺流程，从而最大程度地提高退役光伏组件的回收价值。

（三）回收处理面临的经济挑战与政策展望

尽管回收处理技术正在不断发展，但是它的大规模商业化应用仍然受到经济

性的很大影响。回收过程包含复杂的收集物流、精细的拆解处理、高昂的设备投入和环保成本，而回收所得材料的市场价值，尤其是大宗玻璃、铝等，很难完全覆盖其回收处理的全部成本。当原生材料价格处于低位时，回收材料在经济上没有竞争力，企业投资回收产业的积极性就会降低。这是光伏循环利用产业发展中最大的制约因素。

为了使光伏组件回收产业健康的发展，建立强有力的政策法规体系和商业模式就显得尤为重要。国际社会普遍认可并实行的生产者责任延伸制度，即光伏组件的生产者要对产品的整个生命周期负责，产品废弃时也必须承担回收处理的责任。通过设立专项回收基金、征收环境税费或者要求企业提供回收方案等方式，将末端处理成本内部化到产品价格当中，使生产商从源头上开展生态设计，开发出易于拆解和回收的组件结构和材料，为回收体系的运作提供稳定的资金来源。

光伏组件的回收与循环利用，才是形成太阳能产业循环经济闭环的最终目的。这不仅仅是末端废弃物处理的问题，而且是保障产业链、供应链安全的重要环节。高效的回收可以降低对原生硅、银等重要矿产资源的开采依赖，从而降低由于原料价格波动所造成的产业风险。把回收的材料再次用于新光伏产品的生产上，可以大幅度降低新产品的能源消耗和碳足迹，从而在全生命周期内继续改善光伏发电的绿色性以及环境净效益。这和双碳目标下深度脱碳、资源循环的本质要求完全一致，是能源革命向更高层次可持续发展必然选择。

第三节 氢能项目环境风险评价方法

一、制氢环节的环境影响与风险

制氢作为氢能产业链的起点，所采用的技术路线的好坏直接影响到氢能的“绿色”程度以及环境足迹。因此对不同的制氢方式进行准确的环境影响识别和量化，是评价其环境可行性的前提，尤其要在碳排放和水资源消耗这两个关键方面做详细的比较分析。

（一）灰氢、蓝氢、绿氢的碳排放对比

对不同氢气来源的碳排放强度做全生命周期评价，是环境影响评价的重要步骤。目前主流的制氢方式有灰氢、蓝氢和绿氢。灰氢主要依靠化石燃料（天然气、

煤等）重整或者气化制备，在生产过程中会释放大量的二氧化碳，其碳排放强度一般在 10 到 20 千克二氧化碳当量每千克氢气之间，是环境影响评价中需要重点考虑的基准情景。虽然成本低，但是与“双碳”目标相违背，项目环境影响评价重点是碳排放总量控制和对区域碳达峰目标的影响。

蓝氢是在灰氢的基础上，利用碳捕获、利用和封存技术，可以捕获生产过程中产生的大部分二氧化碳。蓝氢的碳排放强度大幅降低，一般在 1-4 千克二氧化碳当量 / 千克氢气之间，具体的数值要根据 CCUS 技术的效率和捕获率来确定。环境影响评价时，蓝氢项目要计算其残余的直接碳排放，还要评判 CCUS 单元的能耗，封存环节的长久稳定情况，潜在泄漏的风险，以及捕获，运输，封存全部过程的环境足迹。

绿氢是利用可再生能源（太阳能、风能等）电解水制得的，在理想状态下，其生产过程几乎不产生温室气体排放，是目前最清洁的氢源。绿氢的碳排放强度主要来自于电解槽等设备制造、运输过程中的间接排放以及所用可再生电力的全生命周期碳足迹，绿氢的碳排放强度一般小于 1 千克二氧化碳当量每千克氢气。对于绿氢项目，环境影响评价重点是论证所用的清洁、稳定的可再生能源电力来源，对项目建设、运行期间可能给当地生态环境造成的潜在危害进行全面的评估，保证其全生命周期的绿色属性。

不同制氢方式的碳排放强度及特点，见下表。

不同制氢方式碳排放强度对比表

氢气类型	主要制备方式	碳排放强度	环境影响特点
灰氢	化石燃料重整 / 气化	10-20	高碳排放，与“双碳”目标相悖，需严格管控
蓝氢	灰氢 + 碳捕集、利用与封存技术	1-4	显著降低碳排放，关注 CCUS 效率、能耗及长期风险
绿氢	可再生能源电解水	<1	生产过程清洁，重点论证可再生电力来源及全生命周期生态影响

（二）电解水制氢的水资源消耗评估

电解水制氢作为发展绿氢的关键技术，其水资源消耗问题也越来越受关注，在水资源短缺地区尤为突出。环境影响评价要创建详细的水资源消耗评价模型，对项目可能对区域水环境产生的影响进行核算。评价要遵照全生命周期原则，把水耗分为直接水耗和间接水耗。直接水耗主要是电解过程中被分解的纯水，以及

系统中其他工艺环节（冷却、清洗等）所用的水。理论上生产一千克氢气需要消耗 9 千克水，但是纯水的制备、设备的冷却、管道的冲洗等过程中也会产生额外的水耗。

评价方法应该以详细的水平衡分析为基础，对项目的取水量、耗水量、排水量做出准确的核算。评价模型要结合项目所在地区水资源禀赋、水文地质状况、区域水资源管理政策。对于采用地表水项目的取水行为对下游河流生态流量的影响进行分析，对采用地下水项目的长期影响进行评价。还要考虑废水处理及回用方案，把中水回用率作为重要的评价指标，鼓励项目使用节水技术和循环用水系统，最大程度地减少新水取用量和废水排放量，实现水资源的可持续利用。

（三）电力来源水足迹与区域水资源承载力评估

分析电解水制氢的水足迹，需要将它与电力来源联系起来。不同发电方式的水耗差别很大，这也是绿氢项目间接水耗的重要组成部分。如果绿氢项目所用的电力来自于火电，那么发电过程中的冷却塔蒸发耗水量就会远大于电解过程的直接水耗，以水换氢的模式在水资源敏感地区环境可行性存疑。因此环境影响评价要追溯到电力来源，把发电环节的水足迹纳入整个评价范围，建立源、网、荷、储、用全链条的水 - 能耦合评价体系。

区域水资源承载力属于影响电解水制氢项目选址的重要约束。环境影响评价时，应该加入区域水资源压力指数等指标，论证项目选址的合理性。在西北等风光资源丰富但是水资源匮乏的地区，大规模发展电解水制氢产业会加重区域水资源供需矛盾。评价应该提倡多水源，即优先使用海水淡化、矿井疏干水、城市再生水等非常规水源作为制氢原料，不仅能减轻淡水资源的压力，而且会产生环境协同效应。评价结论要给出项目水资源管理的要求和风险应对预案，保证项目建设与区域水资源可持续利用目标相符合。

二、储运环节的安全与环境风险

氢气有特殊的理化性质，储存、运输等环节的技术要求高，风险大。对高压气氢、液氢等主流储运方式进行系统的风险识别、模拟、评价，是保证氢能产业链安全完整的基础，也是环境影响评价中不可缺少的重要章节。

（一）高压气氢、液氢储运风险识别

高压气氢储运是最成熟、应用最广泛的一种方式，主要通过长管拖车或者管

道来运输。主要风险来源于高压特性。环境风险识别要考虑如下几个方面：

1. 物理爆炸风险：储氢容器（车载储氢瓶、管道等）由于材料缺陷、外部撞击或者操作失误等原因而造成破裂，高压氢气瞬间释放，产生强烈的物理爆炸，冲击波和碎片会对周围的人、设备和建筑物造成严重的破坏。

2. 氢气分子小，极易泄漏，储运单元的阀门、法兰等连接处容易发生。氢气与空气混合后，在 4% ~ 75% 的极宽浓度范围内都能燃烧，点火能量很低，静电火花就能点燃它。泄漏出的氢气在密闭或者半密闭空间里聚集，遇到点火源就会发生化学爆炸或者爆燃，产生高温高压。

3.3) 氢脆风险，高压氢气会造成某些金属材料出现氢脆情况，致使材料的力学性能变差，容器突然失效的风险增大。

液氢储运具有储氢密度大的特点，适合于大容量、长距离的运输。风险识别主要集中在它的低温特性以及相变行为上。液氢温度很低（-253℃），泄漏后会迅速气化，体积迅速增大，在密闭空间内泄漏会造成压力突然增大，使容器超压爆炸。液氢泄漏会造成严重的冻伤，还会使接触到普通金属的金属材料变脆，进而造成结构破坏。液氢蒸发产生的高密度低温氢蒸气云会聚集在地面附近，使气体云范围扩大，容易形成大面积可燃气体。被引燃后就会形成具有很大破坏力的蒸气云爆炸。

（二）氢泄漏扩散模型与后果模拟

为了定量评价氢泄漏带来的危害，环境影响评价要使用专业的扩散模型和后果模拟软件。氢气扩散的行为与一般重质气体有很大不同：它具有很强的浮力，在开放空间中一旦发生泄漏，就会快速向上抬升扩散，降低了地面形成高浓度可燃气体云的概率。但是，在高压射流泄漏的初期或者液氢泄漏形成的低温蒸气云中，其行为会表现出负浮力或者中性浮力。因此选择合适的扩散模型十分重要。

常用的模型有高斯模型、积分模型、CFD 模型。高斯模型操作简单，适合开阔平坦地形下远场扩散的模拟，但是不能很好地描述近场射流行为和复杂障碍物的影响。积分模型（SLAB、DEGADIS）考虑气云的密度、动量、能量变化，可以较好地模拟重气或者浮力气体的扩散过程。CFD 模型通过对流体力学基本方程组求解，可以对氢气在厂房内部、城市峡谷等复杂的三维空间中泄漏、扩散、混合的过程进行精细化模拟，是精细化风险评价的有效工具，但是计算成本较高。

（三）后果模拟与风险量化

后果模拟是环境影响评价操作中的主要部分，是风险评价的主要内容。模拟工作首先要确定科学合理的泄漏场景，泄漏场景根据项目危险与可操作性分析的结果来确定，不同的泄漏孔径、压力、位置、时间等参数。同时选择当地有代表性的气象条件，即主导风向、不同风速、大气稳定度等，分析不利气象条件下最坏的结果。

模拟输出的结果是评价危害范围的直接依据。关键输出参数为可燃气云范围，一般用达到爆炸下限和爆炸上限的区域来表示，也可以用 1/2 LFL 浓度的气云覆盖面积、影响距离等表示，还可以用热辐射、爆炸超压危害半径等表示。通过模拟可以确定，在何种泄漏和气象条件下，加氢站周围居民区或者敏感目标会处在火灾爆炸的风险之中。定量模拟结果可以为划定安全防护距离、优化厂区平面布置、设置气体探测器、通风系统等风险削减措施提供直接的科学依据，使环境风险评价由定性描述转变为定量分析，大大提高了环境影响评价的科学性、有效性。

三、加氢站与用氢环节的风险评价

加氢站以及各种用氢场景属于氢能产业链的末端，直接面对公众和工业用户，其安全风险和环境效益评价问题受到了公众的广泛关注。环境影响评价要使用定量的方法来评估潜在的风险，并对替代化石能源所带来的环境协同效益做全方位的分析。

（一）加氢站火灾爆炸风险定量评价

加氢站是氢气供给和应用之间的枢纽，集高压、易燃、易爆等多种危险因素于一身，因此必须对其进行定量风险评估。QRA 采用系统的方法，把风险表达为事故发生频率和后果严重程度的函数，使风险可以被度量，也可以被比较。评价过程大体可分为以下几个步骤：

1. 危险源识别，对加氢站内所有的氢气泄漏单元进行系统识别，即卸气柱、压缩机、储氢容器、加氢机及与之相连的管道、阀门、法兰等。
2. 根据历史事故数据、设备可靠性数据库、专家判断等，用事件树分析或者故障树分析等方法来分析不同的泄漏场景（小孔泄漏、管道断裂等）出现的概率。
3. 根据前面建立的泄漏扩散模型、火灾爆炸模型（射流火模型、火球模型、蒸气云爆炸模型）来模拟不同的泄漏情况下，火灾热辐射和爆炸冲击波强度、影

响范围。

4. 风险计算与评价：把各个场景发生频率和后果结合起来得出个人风险（站内工作人员或周围公众由于事故造成死亡的概率）和社会风险（多人伤亡事故的发生频率和伤亡人数关系曲线），再同国家或者行业的普遍接受的风险标准相比较，判断项目风险水平是否可以接受。QRA 的结果可以给加氢站的安全设计、应急预案的制定以及安全距离的确定提供强有力的量化依据。

（二）氢能应用的环境协同效益

氢能被应用在交通、工业、建筑等各个领域，其主要的环境价值就是取代化石能源，从而达到终端能源消费的深度脱碳。环境影响评价不能仅仅看它的直接碳减排效益，而应该全面评价它带来的协同效益，即在实现主要目标的同时，改善其他环境问题所产生的积极影响。最显著的好处就是改善环境空气质量。

氢燃料电池汽车行驶时只排放水，没有尾气污染物，与传统燃油车相比，可以完全消除氮氧化物、颗粒物、硫氧化物和挥发性有机物等排放。在城市区域内推广氢燃料电池公交车、物流车、重型卡车，对改善城市交通污染、减少雾霾形成、提高居民健康水平有重大意义。在工业领域，用氢代替煤炭、天然气作为燃料或者原料，可以大幅度减少工业生产过程中大气污染物的排放，在钢铁、化工等高污染行业，氢基冶金和绿色化工是实现清洁生产的关键途径。

（三）协同效益的量化评估与拓展

环境影响评价需要对这些协同效益做定量的评价和展示。利用排放清单对比模型计算一年内，氢燃料电池公交车相比同规模燃油公交车能削减多少吨 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物。采用大气扩散模型、暴露反应关系函数模拟、污染削减之后周供电气质空气改善程度、公众健康效应的货币价值，全面评价本项目的综合环境效益。

氢能的应用还会产生其它的协同效益。对能源系统而言，可以利用可再生能源制氢消减风能、光伏发电波动性大这一缺点，提高电网灵活性、稳定性，推动可再生能源的大规模利用。从水环境角度来说，燃料电池的产物是高纯度水，经过收集处理后可以再利用，在某些情况下可以有效地缓解水资源压力。环境影响评价报告应单独设立章节，对它的正向环境影响进行系统的论证并加以量化，给项目综合决策提供更为全面的视角，充分体现氢能在环境质量改善和碳中和目标协同增效中的作用。

第四节 多能互补系统综合环境影响评价技术

一、系统配置与运行优化评估

多能互补系统的环境效益不是各个单独的能源形式相加，而是和系统配置方案以及运行策略密切相关。因此对它配置的合理性和运行优化的程度进行评价，成为综合环境影响评价的前置性工作，也成了决定项目最终环境表现的关键因素。

（一）风光水火储多能互补模式剖析

风光水火储多能互补系统，意在把风能、太阳能等间歇性的可再生能源与水力、热力发电等其它能源形式进行时空上的互补协同，削弱风光出力的波动性，建立稳定可靠又经济的综合能源供应体系。在双碳目标的背景之下，系统的核心价值就是大幅度提高电网对于非化石能源的接受能力，是创建新型电力系统的重要环节。环境影响评价的切入点就是对特定区域资源禀赋下互补模式的分析。以水能资源丰富的西南地区为例，重点发展水光互补模式，利用水电站快速调节的优势来平滑光伏发电的日内波动，在丰水期蓄水、枯水期补水，实现水资源和太阳能资源的优化配置。在西北地区更注重“风光火储”一体化，依靠储能系统来实现短时能量的吐纳和填谷，在一定程度上保留部分高效、灵活的火电机组作为深度调峰和旋转备用电源，保证系统在极端天气或者故障情况下安全可靠运行。

但是对这些模式的评价不能只停留在技术可行性的层面，而应该从环境影响的角度进行全面的考察。环境影响评价工作要重视各种互补模式下系统的环境效应，即碳排放强度、污染物削减潜力，以及同传统以火电为主的能源结构（基准情景）相比所产生的净环境效益。设计合理的水光互补系统，既可以产生大量的绿色电力，又可以利用水库调度来满足下游生态流量的需求，达到发电和生态双赢的目的。反之，如果配置不当，就会造成水电站调节过频，对水生生态系统造成不良的影响。同样，风光储系统中的储能环节，在运行阶段实现了零排放，但是其环境评价必须包含电池全生命周期的影响，即从上游原材料开采、中游生产制造过程中资源消耗和污染排放，到下游报废后回收、处置和再生问题。因此环境影响评价要从单一能源技术的评价转变为对耦合系统 $1+1 > 2$ 的协同效益和可能存在的 $1+1 < 2$ 的环境风险的综合判断。

工程实践中模式分析要和具体的地理空间、电网结构相结合。环境影响评价

要采用地理信息系统等专业工具，对风电场、光伏电站、储能设施以及配套输变电工程的选址布局，对生态敏感区、土地利用格局、景观和谐度产生的累积影响做详细的分析。大规模地面光伏阵列可以改变局部地表反照率、影响微气候、占用大量的土地资源；风机噪声、叶片转动产生光影闪变效应，对周边居民、鸟类活动的影响也要进行量化的评估。对于包含火电的互补系统，环境影响评价的重点是核对其定位是否真正作为灵活性资源，而非基荷电源；并评价其年利用小时数、启停频率对自身能耗、水耗、污染物排放特性的影响。通过对各个模式以及其工程实践形态进行细致的剖析，环境影响评价可以为项目的方案选择与优化提供环境决策的依据，从而使多能互补系统实现能源目标的同时把其综合环境影响降到最低。

（二）系统稳定性与出力特性评估

多能互补系统大规模应用以后，尤其是大量的电力电子设备（逆变器、换流器等）接入以后，彻底改变了电力系统的动态特性。对系统稳定性和出力特性进行评价，是保证能源系统安全运行的基础，也是其环境效益得以实现的前提。环境影响评价工作必须把这个问题内化为核心的环境考量因素，因为不稳定的系统不能代替化石能源，其所声称的减排贡献也将变成空谈。

出力特性分析为稳定性分析打下了基础。它主要考查系统在不同的时间尺度上给电网所输功率的平滑性、可预见性以及可调度性。环境影响评价要按照项目所在地区长期气象数据（风速、光照强度、来水流量），采用高精度的时序仿真模型，对多能互补系统总出力的随机性、波动性进行量化评价。评价内容为功率预测精度、爬坡率分布、日内及季节性出力曲线、保证出力水平等。经过上述分析可知，系统在多大程度上可以模拟常规电源的友好并网特性。评估风光储系统时，要模拟其典型日、极端天气日等情景下充放电策略和联合出力曲线，评价它平抑功率波动的效果是否满足电网技术要求；在满足并网要求的基础上，储能系统的能量损失、效率衰减情况也要考虑在内，这些都会影响项目的整体能效和环境表现。

系统稳定性评价更复杂，它包含电力系统在受到扰动之后，保持同步运行、电压稳定的性能。在传统的环境影响评价中，该领域常常被视为纯技术问题；但是“双碳”目标之下，其与环境影响已经紧密联系在一起。随着以同步发电机为主的火电、水电占比不断降低，系统转动惯量、短路容量随之减小，频

率、电压稳定性降低。环境影响评价要使用电力系统仿真软件（PSASP、BPA、DIgSILENT/PowerFactory 等）来创建包含多能互补系统的区域电网模型，并进行机电暂态、电磁暂态仿真分析。评估的重点是，系统在发生线路故障、大容量机组或者电源脱网等严重扰动时，频率和电压的跌落幅度以及恢复速度是否符合安全标准，新能源场站是否具备必要的故障穿越能力，防止连锁脱网事故的发生。

稳定性分析的结果对于环境影响评价具有决定性的意义。稳定性不好的系统会迫使电网增加额外的旋转备用容量（一般为火电机组），来应对可能出现的功率短缺，从而削弱多能互补项目所实现的碳减排效益。更严重的是，系统设计不合理，在某些运行方式下会造成次同步振荡、谐波超标等新的稳定问题，既危及电网安全，又会造成设备损坏，增加资源消耗和环境足迹。因此，综合环境影响评价报告中应该有专门对稳定性进行评估的部分，明确项目所采用的各种稳定控制方法（虚拟同步机技术、构网型储能等）的有效性，并对整个生命周期内各个阶段对大电网安全稳定边界的影响作出评价。这表明环境影响评价已经从最初的只关注“静态”的污染物排放，发展到了要考虑系统的安全性和环境效益的可靠性。

二、综合环境影响评价指标体系构建

为了在双碳背景下对多能互补系统的综合价值和影响进行全方面、科学地衡量，必须建立一个不单单只是环境维度的评价指标体系。该体系要有机融合能源、环境、经济这三个主要方面，形成立体化、多层次的评价标准，给多维决策赋予结实的量化支撑。

（一）涵盖能源、环境、经济的指标体系

科学合理综合环境影响评价指标体系的建立，是对多能互补系统综合效益进行正确评价的前提。体系不能只局限在一个单一的环境维度里，而应该把能源效率、环境影响、经济可行性这三个方面有机地结合起来，构成一个可以体现系统内在复杂性和多重目标的评价体系。这套能源、环境、经济（简称“3E”）指标体系，用以度量不同技术方案在实现“双碳”目标中所产生的效益、所付出的代价、所承担的风险，给决策者提供全面的权衡依据。

在能源维度，指标设计的核心是评估系统对能源结构优化与供应可靠性的贡献。主要指标可包括：

1. 可再生能源消纳率反映的是系统的核心功能，也就是系统接受并使用风能、

太阳能等不稳定能源的程度，是衡量系统减排潜力的重要基础。

2. 一次能源利用效率是反映系统内全部的能源转换过程的效率，包含发电、输配、储存、释放等各个环节的能源损耗情况，体现系统的整体能源转化经济性。

3. 供电可靠性用缺电概率、期望缺供电量等参数来衡量系统满足负荷需求的可靠性，是对系统能源供给可靠性的一个重要的度量指标，对于能源安全和社会经济的稳定发展具有重大影响。

4. 系统调节能力及灵活性贡献：对系统提供调峰、调频、备用等辅助服务的能力进行量化，评价系统作为灵活性资源对新型电力系统建设的作用。

环境维度要将项目全生命周期和多环境要素都纳入进来，从宏观和微观两个方面全面描绘出它的环境足迹。这部分指标应该包括：指标 1，指标 2，指标 3

1. 全生命周期温室气体排放：核算设备制造、工程建设、运行维护、退役处置等全过程碳排放总量，得到单位发电量的碳足迹，是评价项目气候效益最基本的指标。

2. 常规污染物削减效益，即替代所用化石能源发电后系统运行过程中二氧化硫、氮氧化物、烟尘等常规污染物的减排效益，体现改善空气质量和保障公众健康所作出的贡献。

3. 生态足迹和资源消耗，对项目建设和运行所占土地、水资源、关键矿产（锂、钴、稀土）等自然资源的占用和消耗强度进行评价；并对区域生物多样性、生态系统服务功能可能产生的潜在影响进行评价。

4. 废弃物环境风险，主要是对储能电池、光伏组件、风机叶片等关键设备到达设计寿命后回收、处理、处置方案的分析，评价其可能造成的土壤、地下水污染风险和资源回收率。

经济指标用来衡量项目的经济可行性以及综合的社会经济价值，保证项目可以持续发展。主要指标为：

1. 全生命周期成本，即项目从开始到结束的总投资成本、运行维护成本、燃料成本（若有）、退役处置成本、环境外部成本（碳税、污染罚款等）等各项成本的总和。

2. 平准化度电成本就是把全生命周期的成本折算成单位发电量，形成可以横向比较各种发电技术经济性的标准化指标。

3. 用投资回收期、内部收益率等财务指标评价项目的盈利能力，用敏感性分

析来衡量项目由于电价、政策、技术参数等不确定因素的影响而产生的经济风险。

4. 社会经济贡献，量化项目对地方就业的促进作用，带动相关产业链的发展，提高区域能源自给率，改善环境和健康所造成的间接经济效益。

多能互补系统综合评价指标概览如下表所示，清晰地展示了“3E”框架下各维度的核心评估内容。

多能互补系统综合评价指标概览

维度	主要指标	核心评估内容
能源	可再生能源消纳率	系统接纳、利用不稳定可再生能源的程度，碳减排潜力基础
	一次能源利用效率	系统内各能源转换环节的效率及损失情况，整体能源转化经济性
	系统供电可靠性	衡量系统满足负荷需求的能力（缺电概率、期望缺供电量）
	系统调节能力与灵活性贡献	提供调峰、调频、备用等辅助服务的能力，对新型电力系统的作用
环境	全生命周期温室气体排放	设备制造、建设、运行、退役全过程碳排放，单位发电碳足迹
	常规污染物削减效益	相比化石能源发电，SO ₂ 、NO _x 、烟尘等排放减少量，空气质量改善
	生态足迹与资源消耗	占用土地、水、关键矿产资源强度，对生物多样性、生态系统影响
	废弃物环境风险	储能电池、光伏组件等退役后的回收、处理、处置风险及资源回收率
经济	全生命周期成本	项目初始投资、运行、维护、燃料、退役及环境外部成本
	平准化度电成本	单位发电量成本，用于横向比较不同发电技术经济性
	财务指标与风险	投资回收期、内部收益率，以及受电价、政策等影响的经济风险
	社会经济贡献	带动就业、产业链发展、区域能源自给，环境改善的间接经济效益

（二）多目标综合评估模型的应用

由于多能互补系统的评价涉及到能源、环境、经济等相互联系但又存在矛盾的多个目标，传统单目标评价方法已经不能胜任。因此应用多目标综合评价模型是必然。该类模型的核心思想就是对多个目标进行平衡、权衡，而不是片面追求某一个目标的极致，从而给复杂的决策过程提供科学、透明的支持。通过模型的应用，环境影响评价就会从最初的定性判断（即“是否符合”）变为更加深入的定量判断（即“最佳选择”）。

就评估模型来说，在运用的时候一般分为两类。第一类是多目标优化模型，

一般用在项目规划、设计阶段。该类模型把系统配置参数（风、光、储的容量配比）作为决策变量，用“3E”指标体系中的关键指标（成本最低、碳排放最少、可再生能源消纳率最高）作为目标函数，用智能优化算法（非支配排序遗传算法 NSGA-II、多目标粒子群算法）求解。其结果不是唯一的最优解，而是一个由许多帕累托最优解组成的集合，即帕累托前沿。帕累托前沿上的每一个点都表示一种系统配置方案，它所具有的特点就是，在不会使任何一个目标的表现受到损害的情况下，也不能够提高其他任何一个目标的表现。决策者可以直观地看到不同的目标之间量化的权衡关系，即为了使度电成本再降低一分钱，需要增加多少克碳排放。这种方法大大提高了方案比选的科学性。

另一类是多属性决策模型，更适合存在多个明确备选方案的情况。当项目有两到三种清晰的配置方案需要比选的时候，可以采用层次分析法、逼近理想解排序法、模糊综合评价法等模型。此类方法的使用步骤一般为：利用 AHP 等方法确定“3E”指标体系中各个指标的相对权重，此过程可以邀请技术、经济、环保等领域的专家共同参与，实现集思广益；计算或者模拟出每个备选方案在所有指标下具体的表现数值；用 TOPSIS 等模型的数学运算来计算出每个方案与正理想解（所有指标均最优）、负理想解（所有指标均最劣）之间的距离，从而得出一个综合的相对优越度排名。此方法结构清晰、逻辑性强，可以将复杂的、多维的比较问题转化为直观的排序结果，从而有效地减少决策过程中的主观随意性，使得环境影响评价的结论更有说服力。这些模型的应用使环境影响评价不再只是项目完工后的一个最终审查，而是贯穿于项目规划、设计、决策全过程之中，有力地推动了能源项目绿色化、高效化、经济化、可持续化的发展。

第五章 重点行业低碳环评实践

第一节 钢铁行业碳减排环评案例

一、钢铁生产流程碳排放特征分析

对钢铁生产流程的碳排放特征进行全方位、准确的分析，是开展低碳环评的前提。评价工作要深入剖析各种工艺路线的碳排放差别，准确找出关键工序的排放源，为之后的减排潜力评价和技术方案比选赋予可靠的数据支撑。

（一）长流程与短流程工艺碳排放对比

钢铁生产主要有长流程和短流程两种工艺。长流程工艺即“高炉-转炉”流程，以铁矿石为主要原料，焦炭作为主要的燃料和还原剂，能源结构以煤炭为主。其碳排放主要是化石燃料燃烧、含碳还原剂使用产生的，该环节能源消耗量大、碳排放强度高，一般占钢铁企业总排放的大部分。环评对于长流程项目要详细核算系统边界内所有的碳源，尤其是炼铁工序，它在这个流程中是碳排放最大的环节。

短流程工艺即电弧炉工艺，以废钢为主要原料、电力为主要能源。相较于长流程，短流程减少了铁矿石、焦炭的用量，从源头上避免了焦化、烧结、炼铁等高排放工序，因此其单位产品碳排放强度也大幅度降低。短流程的碳排放水平很大程度上取决于所用电源的来源，如果电网结构以清洁能源为主，其减碳优势会更加明显。环评对于短流程项目任务主要是对外购电力进行准确的碳排放评价，即使用所在区域电网的平均碳排放因子进行计算；同时还要论证项目的废钢资源保障能力，防止由于原料供应不足造成实际运行效益与预期有较大偏差。因此，在项目选址、方案比选阶段对两种流程生命周期碳足迹进行综合对比分析，就是环评工作的重点。

如钢铁生产主要工艺流程碳排放对比表所示，两种工艺在原料、能源及碳排放特征上存在显著差异。

钢铁生产主要工艺流程碳排放对比表

工艺流程	主要原料	主要能源
长流程（高炉-转炉）	铁矿石、焦炭	煤炭
短流程（电弧炉）	废钢	电力

（二）焦化、烧结、炼铁等关键工序排放源识别与核算

长流程钢铁生产中焦化、烧结、炼铁三个主要碳排放工序占全流程碳排放总量的 90% 以上，因此环评的重点也应该放在这三个工序上。分析这些重要的工序排放源不能只停留在识别阶段上，在环评中还需要建立起一个完善的碳排放核算和管理体系。

焦化工序指在隔绝空气，高温条件下把炼焦煤干馏生成焦炭及其副产品。其碳排放源主要有两方面：第一，煤料中的碳分在干馏过程中变成煤气，部分煤气逸散或者燃烧使用时会生成二氧化碳；第二，焦炉加热燃烧用的燃料气产生碳排放。这些排放源分布散落，情况繁杂，核算比较困难。环评重点是评价焦炉煤气的回收利用效率。煤气属于高价值的二次能源，其利用水平同工序乃至整个工厂的能源效率和碳排放绩效息息相关。因此需要评价煤气平衡方案，核查煤气净化、输送和利用各环节的技术可靠性，量化由于回收利用不充分或者逸散造成的碳损失。

烧结工序是将铁精矿、熔剂和燃料（主要是焦粉）混合后，在烧结机上点火燃烧，经过一系列物理化学反应，得到一定强度、粒度的烧结矿。烧结时消耗大量的含碳燃料，燃料燃烧是其最主要的直接碳排放源。熔剂（石灰石）在高温下分解会释放出大量的过程碳排放。对烧结工序的环评量化分析要区分燃料燃烧排放和原料分解排放。燃料燃烧排放量与焦粉消耗量、含碳量有关，原料分解排放量与所用熔剂种类及加入比例有关。评价时应采用基于实测数据的排放因子法或者物料衡算法进行核算，并对烧结机头、机尾烟气中二氧化碳的浓度、流量进行监测与核查，保证核算结果的准确性。

炼铁工序即高炉炼铁，是用焦炭作为燃料和还原剂，把铁矿石还原成铁水的过程。高炉本身就是巨大的化学反应器，焦炭燃烧作为还原剂被消耗，因此它成为钢铁生产流程中最大的单一碳排放源。炼铁工序碳排放核算要基于详细的铁元素和碳元素平衡。评价要详细检查高炉燃料比、焦比、煤比等主要运行参数，分析喷吹燃料种类（煤粉、天然气）对碳排放的影响，评价炉顶煤气回收利用方案。因为炉顶煤气是重要的内部能源载体，高效利用炉顶煤气是企业系统性节能降碳

的关键所在。环评要对这三个工序的物料平衡、能量平衡做精细的计算，找出所有的直接和间接排放点。

二、钢铁行业低碳技术评价与选择

在双碳目标的约束下，环评不能只做合规性的审查，更应该起到优化决策的作用。科学评价并引导企业选择先进的低碳技术，对钢铁行业深度脱碳有重大意义。评价要从技术成熟度、减排潜力、经济可行性、环境协同效益等各方面来综合考虑。

（一）氢冶金、电弧炉炼钢等前沿技术评估

氢冶金技术被视作钢铁行业完成彻底脱碳的重要途径。该技术用氢气代替碳做还原剂，理论上可以将炼铁过程的产物由二氧化碳变成水，从根本上消除该工序的碳排放。环评中对氢冶金项目进行评价的核心就是追溯氢的来源。评价必须明确项目使用的氢气是绿氢、蓝氢还是灰氢，即其是否使用可再生能源电解水制取的绿氢、化石燃料制氢配以碳捕集与封存的蓝氢，还是直接使用化石燃料制取的灰氢。只有使用绿氢的氢冶金才能实现全生命周期近零排放。环评需要对制氢、储氢、输氢等配套基础设施的建设要求和环境影响做详细的分析，并对该技术目前的成熟度、能耗水平、长期运行稳定性做深入的评价。

电弧炉炼钢技术属于成熟的低碳技术，减排潜力同废钢资源的可获得性、电网清洁化程度相关联。环评在评估电弧炉项目的时候要重点考虑区域废钢的供应能力，防止由于废钢供应不足，造成高比例铁水或直接还原铁掺混，从而削弱其低碳优势。另外要核算项目的电力消耗，按照当地电网的碳排放因子来科学预测项目的间接碳排放。评价还要重视电弧炉炼钢对电能质量的要求，及其与智能电网的互动潜力，鼓励项目利用谷段电力生产来改善能源消耗方式和碳排放状况。对这些前沿技术的评价，可以为项目的选择、本地区发展规划、能源结构调整找到最佳的技术方案。

（二）余热余能回收利用技术潜力与系统优化

钢铁生产过程中会产生大量的高品质余热余能，而对这些能源高效回收利用就是实现钢铁企业节能降碳最直接、最经济有效的办法之一。在环评工作当中，余热余能回收利用潜力的评价，是评判项目能效水平以及循环经济水平的重要指标。

主要回收利用技术为干熄焦技术，在焦化过程中回收红焦显热发电或者供热，

大大减少湿熄焦过程污染物排放，实现节能环保双赢。烧结工序中烧结矿冷却产生的巨大热量可以被烧结余热锅炉回收发电。炼铁工序的高炉炉顶煤气虽然属于低热值燃料，但其压力能可以被高炉煤气余压透平发电装置回收利用。炼钢工序产生的转炉煤气属于高热值气体，是企业重要的能源资源，回收效率关乎企业自发电比例和能源自给率。环评要对项目拟采用的各项余热余能回收技术进行梳理，建立全厂能源流图谱。经过详细的能量平衡计算，定量分析各个环节的可回收资源量、技术方案的回收效率、最终实现的节能量和碳减排量，将其作为评价项目能源利用先进性的主要指标。

余热余能回收利用潜力的环评不能只是技术清单的罗列、单一效率的计算，而应该深入到系统集成优化层面。评价应充分考虑各种回收技术之间的配合与协同，促使企业创建梯级利用的能源系统，高品位余热发电，中低品位余热生产蒸汽、供暖、驱动吸收式制冷设备，实现能源价值最大化利用。环评要审查项目是否对全厂范围内的蒸汽管网、热水管网进行了系统的规划，保证回收的能源能被高效、稳定的输送到用能端。

评价时还要考虑技术的经济性和运行的可靠性。即使某项技术理论的回收率很高，但是若投资大、运维成本高、运行稳定性差，那么它的工程实际应用价值就会大打折扣。因此环评要参考行业标杆数据和同类项目实际运行经验，对拟采用的技术做全生命周期的成本效益分析。同时还要对这些技术实施之后可能会产生的二次环境影响（新增噪声源、冷却水消耗等）进行评价，并提出相应的缓解措施。经过系统的、全方位的潜力评价之后，环评可以引导项目方选择最合适的能源回收综合方案，从而保证节能降碳措施的有效执行，并获得最大的经济效益。

三、钢铁超低排放改造项目环评要点

钢铁行业的超低排放改造对改善区域空气质量、促进行业绿色发展有重大意义。在双碳背景下，该类项目环评要加入碳排放控制的视角，达到减污与降碳协同增效的目的，保证改造项目在解决大气污染问题的同时不增加碳排放负担，甚至可以成为推动碳减排的契机。

（一）协同减污降碳方案评估

钢铁超低排放改造项目环评中最重要的就是协同减污降碳方案评估。传统的超低排放改造主要是对颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等常规污染物的末端治理。

湿法脱硫、选择性催化还原脱硝等治理技术在运行过程中要消耗额外的电能、水、化学药剂等，这样就会间接地增加项目的能源消耗和二氧化碳排放。环评需要对降污与增碳之间的矛盾进行定量分析。

评价工作要给项目方提供详细的物料消耗、能源消耗清单，核算治理设施投运后常规污染物削减量，还要核算运行后新增的能源消耗所折算的间接碳排放量。在此基础上，环评应该促使企业选用能耗低、资源循环利用率高的治理技术。采用活性炭/焦法一体化烟气净化技术，脱硫脱硝效率高，可去除二噁英等其他污染物，副产物可资源化利用，综合能耗和碳足迹比传统的烟气净化技术组合好。评价报告应该给出协同控制的**佳技术路线，比较不同技术方案的减污降碳综合效益，选择能够实现环境效益最大的方案。

（二）项目碳排放绩效水平对标与方法论

对标分析是评判项目碳排放绩效是否先进的一种有效方法。环评要将拟建项目的单位产品碳排放强度同国内外先进水平、行业基准值、相关政策标准进行对比，客观地判断项目在行业内所处的位置。既是项目技术水平的检验，也是项目是否符合区域碳达峰、碳中和战略要求的评价。

深入展开项目碳排放绩效水平对标工作，须要创建起一套规范化的、系统的评价方法论。在环评过程中可以按照以下步骤来保证对比标的科学性和公正性：

1. 确定对标边界：必须对项目碳排放核算的物理边界和时间边界做出明确的界定，使它与所选择的基准的核算口径一致。边界要包含主要生产系统、辅助生产系统、附属生产系统，包括直接排放和主要的间接排放。

2. 采用多元化基准：不能只用单一基准值。环评要创建起多层次的对标体系，把国家强制性标准当作底线、行业推荐性指南当作中线、国际最佳实践当作高线，塑造起多维度的评价尺度。

3. 参数修正，考虑各企业产品结构、地理位置（电网排放因子）等客观因素，在对标时采用合理的修正系数，去除不可比因素的影响，使比较结果更真实的反映项目的技术水平和管理水平。

4. 阐释和应用结果：对标结果不能仅仅是数值上的呈现。环评报告必须对项目存在的具体差距作出说明，并对工艺流程、技术装备、能源管理等各方面的差异进行分析。最后根据对标结果，针对项目的设计、建设、运营阶段提出具体的、可量化的碳减排优化措施，把对标分析转化为推动项目绿色升级的实际动力。

第二节 建材行业碳中和路径环评

一、水泥生产过程碳排放核算

水泥工业低碳转型过程中，碳排放的准确核算是开展减排工作、评判环境影响的前提。环评工作要以科学、准确的核算方法为前提，真实体现企业生产活动给气候环境造成的后果，为企业技术改造、政策制订给予可靠的支撑。

（一）原料分解碳排放与燃料燃烧排放

水泥生产中碳排放主要是原料分解、燃料燃烧。原料分解的碳排放，指石灰石在高温煅烧分解成氧化钙同时放出二氧化碳的过程，属于工艺过程排放，是水泥生产中固有的、不可避免的排放源，占总排放的 60% 左右。环评核算这部分排放时需要准确测量入窑生料中碳酸钙、碳酸镁的含量，然后结合熟料产量来计算，保证数据的准确性。

燃料燃烧排放就是指为了给水泥回转窑提供高温而燃烧化石燃料（主要是煤炭）所产生的二氧化碳。这部分排放量同燃料种类、消耗量以及含碳量有关，占总排放的 35%。进行环境影响评价时，要对各种燃料的消耗量和低位发热值做详细的记录，然后用相应的排放因子进行核算。评价的目的在于分析燃料利用率，促使企业采用高效的燃烧技术和设备来降低单位产品燃料消耗，进而减少碳排放强度。

对这两大部分排放源进行细致核算、分析，是水泥行业环评工作的重要组成部分。环评报告不能只呈现排放总量，还要剖析排放结构，从而找到关键的减排环节。用物料衡算、能量衡算来评价预热预分解系统、燃烧器、粉磨系统的效率，从而找到节能降碳的潜力点。为以后分析替代燃料、提高能效等减排方法的环境效益和可行性打下基础。

（二）替代燃料与替代原料的减排贡献

替代燃料、替代原料属于水泥行业开展源头减碳、协同治理污染的主要途径，也是环评所重视的减排措施。替代燃料主要是城市生活垃圾、工业固体废物、生物质燃料等。它们代替部分或者全部的化石燃料，减排效益在诸多方面体现。从碳排放核算的角度来看，生物质燃料由于碳的生物循环特性，燃烧产生的二氧化碳可以被看作是碳中性的，不计算在温室气体排放总量里。

环评分析时需要确定基准线情景，即不采用替代燃料时化石燃料的消耗量和碳排放量。用项目实施后化石燃料减少量减去非生物质来源替代燃料的碳排放量，

得到直接的减排效益。环评应该考虑到使用替代燃料所产生的协同环保效益，减少垃圾填埋、焚烧等二次污染，推动社会废弃物资源化利用，这是传统环评内容的扩展。

（三）替代燃料与替代原料方案的综合考量

对于替代燃料、替代原料减排贡献的评价不能只计算直接碳减排量，在环评中还需要对生产工艺、产品质量以及环境产生的综合影响做系统的分析。替代原料技术，用钢渣、电石渣、粉煤灰等工业固废代替部分石灰石，可以减少碳酸盐分解产生的过程排放。环评工作要准确评价替代原料的化学成分以及替代率，从而得出过程减排的正确数值。

评价替代方案的时候要考虑技术是否可行、成熟。不同的替代燃料热值、水分、灰分等性质不一样，会对窑内燃烧的稳定性以及熟料的质量造成影响。环评应分析出该技术具体的运行过程，判断其是否会对生产系统造成影响、有无新的污染风险发生以及需要什么样的预处理和污染控制措施。环评还要对替代原料所带入的微量有害元素进行评价，这些有害元素会对产品质量及环境造成长期的风险。因此，一个全面的环评不能只是减排量的简单加减，而应该对整个技术方案的系统性、全生命周期的风险和效益进行综合权衡，保证减排过程本身是绿色和可持续的。

水泥行业替代燃料与替代原料的减排路径及其协同效益可见下表：

水泥行业替代燃料与替代原料减排效益表

类型	具体材料	主要来源	主要减排机制	额外协同效益
替代燃料	城市生活垃圾	城市垃圾处理	替代化石燃料，实现能量回收	减少垃圾填埋，资源化利用
	工业固体废物	工业生产过程	替代化石燃料，实现能量回收	减少工业固废处置，资源化利用
	生物质燃料	农林废弃物	替代化石燃料，碳中性	废物利用，绿色能源
替代原料	粉煤灰	火力发电	替代石灰石，减少过程排放	工业固废利用，性能改善
	钢渣	钢铁冶炼	替代石灰石，减少过程排放	工业固废利用
	电石渣	电石化工	替代石灰石，减少过程排放	工业固废利用

二、玻璃、陶瓷等行业低碳转型评价

玻璃、陶瓷行业属于建材领域的另外两个主要能源消耗与碳排放单元，其核

心生产过程是高温熔窑。促使这些行业达成低碳转型，其环境影响评价的重点要放在能源结构调整，生产工艺能效改善，以及产品全生命周期碳足迹控制上。

（一）熔窑节能技术与清洁能源替代

玻璃、陶瓷生产的核心设备是熔窑，熔窑能耗占整个生产过程的绝大部分，因此熔窑的节能改造是行业降碳的关键。因此，在环境影响评价过程中重点是先进的节能技术的效果。全氧燃烧技术用纯氧代替空气助燃，可以大大减少烟气量和热损失，提高燃烧效率；窑炉余热回收发电技术可以把高温烟气废热转化为电能，达到能源梯级利用的目的。环评报告要对以上技术的节能减碳效益做定量分析，通过改造前后单位产品能耗和碳排放强度的对比来证明它的环境绩效。

清洁能源替代是达到深度脱碳的又一重要途径。采用天然气、电能或者绿氢等低碳或者零碳能源代替传统的煤或者重油，从源头上大幅度降低燃烧所产生出来的碳排放。在环评中，计算能源替代产生的直接减排量之外，还要评价能源供应是否稳定，经济上是否合理。煤改电项目环评要追溯外购电力来源，优先鼓励使用绿电，不能把碳排放简单地从企业端转移到发电端。另外，对电网容量是否满足改造要求、改造对企业生产成本的长期影响进行评价，从而保证低碳转型的可持续性。

（二）低碳产品开发与碳足迹认证

在双碳目标的背景之下，建材产品的市场竞争力会越来越突出地表现在其低碳属性上。玻璃、陶瓷行业正在积极推进低碳产品的研发，这也是该行业企业转型的重点。开发高性能节能产品，低辐射节能玻璃、真空玻璃、发泡陶瓷保温板等。建筑使用阶段能降低能耗，达到建筑全生命周期碳减排的目的。对于此类项目的环评，不能只考虑生产过程中的减排，而应该把评价的视角扩大到产品使用阶段，从整体上评价它所带来的节能降碳效果。

为了推进低碳产品的开发，就需要创建起一套科学的评价和激励体系。环境影响评价要鼓励企业采用生命周期评价的方法，对产品从原材料获取、生产、运输、使用、废弃处置全过程的环境影响进行分析。有利于找出产品生命周期中主要的碳排放环节，从而给产品的生态设计和工艺改进提供方向。环评报告可以对企业的重要环境指标作为产品设计标准提出建议，从而推动企业真正研发绿色低碳产品。

（三）碳足迹核算与认证的环评引导

碳足迹认证是低碳产品进入市场的绿色通行证，也是环评促使企业实现价值链碳减排的重要途径。产品碳足迹核算按照国际或者国家有关标准，对产品整个生命周期内温室气体排放量进行量化并报告。环评工作应积极引导、鼓励企业开展碳足迹核算与认证工作，这是对企业自身减排努力的一种肯定，也是满足下游客户和绿色供应链要求的重要环节。

在环评实践中，可采用分步走的方式推动碳足迹认证：

1. 引进方法学，使企业学会并采用碳足迹核算的基本方法和标准，创建原材料、生产、物流等各个环节的数据采集系统。

2. 基线核算和对标，完成标杆产品的碳足迹基线核算，与行业先进水平对标，找到差距和减排潜力。

3. 鼓励企业通过第三方机构开展产品碳足迹认证，取得碳标签，把产品的低碳优势公之于众，从而提高品牌价值和市场认同度。

环评报告中可以将产品碳足迹认证作为项目后评价的一项内容，通过持续监督，保证企业将低碳理念落实到产品开发、市场营销的全过程之中，实现经济效益和环境效益的双赢。

三、建材行业园区循环化改造环评

推动建材行业单个企业的绿色转型固然重要，但是从工业园区层面入手，通过循环化改造来构建产业生态系统，会释放出更大的节能降碳潜力。园区环境影响评价的创新之处就在于能够从系统优化的角度，对产业共生、能源综合利用所带来的整体环境效益进行全面评价。

（一）产业共生与资源循环利用模式

建材行业园区循环化改造的核心理念就是产业共生，即一家企业的废弃物成为另一家企业的原材料，在园区尺度上实现资源的闭环循环。典型模式有水泥厂消纳电厂的粉煤灰、脱硫石膏，或利用钢铁厂的矿渣；陶瓷企业回收利用生产过程中产生的废坯、废瓷。该模式可以削减原生资源的开采和消耗，也能明显减小废弃物处置带来的环境负担。

园区循环化改造的环评评价视角，由单个项目转向整个园区物质流的系统分析。评价工作要绘制园区的产业生态链图谱，识别出各个企业之间物质交换和循

循环利用的潜力以及途径。用物质流分析的方法定量评价园区尺度下的资源产出率、固体废弃物综合利用率等主要指标。环评的重点就是证实这些循环利用模式是否稳定、可靠，是否有有害物质富集的风险，建设好质量控制和环境监测体系。

园区整体运营成本会降低，碳排放量也会大幅度下降，这是由高效产业共生网络的形成所导致的。用工业固废代替原生石灰石原料，可以减少水泥生产过程中产生的过程碳排放。环评要量化协同减排效应，把其作为园区循环化改造方案环境正效应的主要依据，从而推动传统工业园区向生态工业园区转型。

（二）园区能源梯级利用与集中供热

建材工业园区一般会有大量的余热资源，水泥回转窑、玻璃熔窑等设备排出的高温烟气都属于余热资源。对这些余热资源实行梯级利用，已经成为园区实现节能减排的又一重要途径。能源梯级利用遵循温度对口、梯级利用的原则，把高品位余热用于发电，中低品位余热用于生产工艺加热或者提供蒸汽，更低品位余热用于园区及周边社区的集中供热。

园区环评在审查此类方案时，首先要对园区内各企业能源供需情况进行全面的盘点，绘制能源流图，准确识别出余热产生点、品位、数量、潜在用户和需求。评价的重点就是能源梯级利用系统整体能效的提高和碳减排的效果。需要构建包含所有企业的系统边界，并计算梯级利用后整个园区化石能源消耗减少量以及碳排放削减量。此种系统性评价方式可以避免单一企业视角下容易出现的片面性，更加科学地体现出整个园区的环境效益。

（三）能源梯级利用与集中供热方案的综合评估

对园区能源梯级利用、集中供热项目开展环评时，要对其中心的节能减碳效益展开评定的同时，还要全面顾及工程实际中的技术经济可行性以及潜藏的环境风险。环评要对热能交换网络的规划布局、建设成本、运营维护方式、热能输送过程中损失等做详细的分析。所以，评价工作不应该只停留在理论计算的层次上，应该结合具体的工程设计，对方案的可行性做出详细的分析。

集中供热系统的建设与运行也会产生新的环境影响。长距离供热管网的建设有可能对局部生态和土地利用造成影响，管网运行所产生的噪声和安全风险也应该考虑进去。环评应当要求建设单位编制详细的环境保护措施及应急预案。替代分散小锅炉的集中供热项目，环评要对其污染物削减效益做定量分析，即二氧化硫、氮氧化物、烟尘等具体减排量，来体现它在改善区域空气质量方面的协同作用。

一份高质量的园区能源梯级利用环评报告，最终就是一份技术、经济和环境可行性综合研究。它既可以肯定项目的节能降碳潜力，也可以给项目优化设计、风险控制、可持续发展提供科学指导，进而推动整个园区实现低碳发展，提高园区环境质量、能源安全水平。

第三节 化工行业低碳转型环评

一、重点化工产品碳足迹核算

对重点化工产品进行碳足迹核算，是从源头上识别、量化碳排放的重要手段，也是评价不同技术方案碳减排潜力、制定优化路径的基础。这就需要环评工作跳出传统的污染物评价范畴，创建起以生命周期思想为根基的温室气体排放评价体系。

（一）合成氨、甲醇、乙烯等产品碳足迹

对合成氨、甲醇、乙烯等大宗化工产品进行碳足迹核算，为低碳环评工作打下基础。产品碳足迹核算要遵循生命周期评价的原则，确定核算边界。一般指从原料开采、运输，到产品生产直至产品离开工厂大门的全部过程，即“从摇篮到大门”。碳排放主要是化石能源直接燃烧、生产过程化学反应工艺排放、输入电力和热力等能源间接排放。

合成氨的碳足迹很大程度上取决于氢气的制取方式。例如，在煤制合成氨路线上，碳排放主要来自煤气化过程生成的二氧化碳及大量的能源消耗；在天然气制合成氨路线上，碳足迹比较小，但在蒸汽重整过程中仍然会排放。未来如果采用可再生能源电解水制备“绿氢”合成氨，则可以达到近零碳排放。在环评审查项目的时候，对不同的路线碳排放量要进行精确的量化比较，找出主要的排放环节，给技术选择提供决策依据。乙烯生产中，传统的石脑油蒸汽裂解是碳排放密集型工艺，而乙烷裂解、甲醇制烯烃等路线的碳排放特征是不一样的，环评需要对这些路线的综合碳表现进行系统的评价。

核算结果的准确度同数据的质量有密切关系。环评工作要建立并使用符合中国国情的本土化排放因子数据库，鼓励企业开展实测，获得高质量的活动水平数据。经过细致的碳足迹核算，环评一方面可以评判单个项目的碳排放情况，另一方面

也可以给区域产业链的低碳改善赋予数据支撑，助力整个产业体系的脱碳进程。

（二）原料路线与工艺路线的碳影响

原料以及工艺路线的选择属于决定化工项目碳排放水平的关键性要素，会对整个项目的生命周期造成深远的影响。环评要以技术路线的碳影响分析为主，从源头上实现减碳。传统化工行业主要依靠煤、石油、天然气等化石资源做原料和燃料，这也是其主要碳排放源。环评工作要对各种原料路线的碳排放进行系统的比较分析，鼓励用生物质、废弃物等非化石原料来取代传统的化石原料，大大减少原料中的碳含量。生物基化学品开发、废塑料化学循环利用等，都是环评应当支持、鼓励的低碳发展方向。

工艺路线好坏直接影响能源效率和排放强度。环评应对比分析项目拟采用的工艺同国际国内最佳可行技术进行对比。氯碱行业所采用的离子膜法电解工艺与已经被淘汰的隔膜法相比，能耗、碳排放均低。乙烯生产过程中，从裂解炉的设计、热回收效率的提高、高效分离技术的应用等各方面入手，能够有效地降低单位产品能耗和碳排放。环评应该促使企业采用微反应器、膜分离等过程强化技术，提高反应效率，减少副产物的产生，从源头上减少系统能源需求和碳排放。

对于新建或者改建项目，环评必须强制要求对各种可能的技术路线进行碳影响比较分析。这样的比较不能只局限于项目边界内直接排放，还应该包括原料获取、能源供应等更广范围的系统边界。以化工项目为例，配套建设的碳捕集、利用和封存设施，环评要对自身能耗、捕集效率、封存长期安全性、环境风险等各方面进行全方位的评价，从而综合判断其净减排效益。评价结论应明确指出最佳的低碳技术方案，把关键的低碳技术指标（单位产品碳排放强度、能源利用率等）作为项目建设和运营的环境管理要求。因此环评方才有可能起到优化决策的作用，使资本、技术投向更加绿色、低碳的领域，从源头上避免高碳锁定效应。

典型化工产品生产路线碳排放特征表

产品	生产路线示例	碳排放主要来源	碳减排潜力方向
合成氨	煤制氨	煤气化、能源消耗	绿氢替代煤、CCUS
	天然气制氨	蒸汽重整、能源消耗	蓝氢 / 绿氢替代天然气
甲醇	煤制甲醇	煤气化、能源消耗	绿氢替代煤、CCUS
	天然气制甲醇	蒸汽重整、能源消耗	生物质 /CO2 制甲醇
乙烯	石脑油裂解	裂解炉燃料、原料分解	乙烷裂解、MTO、电加热炉

从上表可以看出不同的化工产品的生产路线碳排放特征不同。环评应该充分利用这样的分析来指导企业选择和优化生产工艺，从而获得最大的碳减排效果。

二、化工园区碳达峰方案环评

化工园区作为产业集聚发展的载体，整体低碳转型对于行业实现双碳目标起着举足轻重的作用。化工园区碳达峰方案环境影响评价属于一种在区域、系统层面推动减污降碳协同增效的创新实践，有利于统筹规划，实现园区整体绿色发展。

（一）园区层面碳排放总量与强度控制

化工园区环评的关键，就是从单个项目评价转向整个区域碳排放总量和强度的双重控制。这意味着环评要建立园区层面的碳排放核算账户，掌握园区内现有企业碳排放的家底，按照园区产业规划、发展定位和区域碳达峰目标，科学地确定园区未来碳排放总量上限、单位工业增加值碳排放强度下降目标。

在评价过程中要建立园区碳排放预测模型，考虑园区引进产业种类、规模、技术水平等因素，模拟园区各种发展情景下碳排放轨迹。环评报告要论证园区碳达峰方案的可行性，并评价它同所在省市碳达峰行动方案的协调性、一致性。评价重点在于考察园区是否建立起了有效的碳排放管理体系，即给入园项目设置明确的碳排放准入门槛，对现有的企业提出持续改进的减碳要求。采取增减挂钩、区域削减等总量控制措施，保证园区在承接新项目的同时实现区域碳排放总量的稳定或者减少，避免出现合成谬误。

（二）公用工程一体化与能源系统优化

公用工程一体化、能源系统优化是化工园区实现规模化降碳的主要途径，也是园区规划环评、碳达峰方案环评的重点内容。对园区内的能源、水、废弃物等公共资源实行统一规划、集中供给、系统优化，可以大大提升资源能源的利用率，从而大幅度降低整个园区的碳排放水平。

环评应重点评估园区在公用工程一体化方面的规划深度与实施力度：

1. 能源系统优化和梯级利用：园区是否有热电联产或者集中供热中心，用高参数、大容量的机组替代分散的小锅炉，实现热能梯级利用。对园区蒸汽管网的覆盖范围和优化调度能力进行审查，对企业生产过程中产生的余热、余压、余气的回收利用规划进行审查。

2. 物料循环利用网络的建立，即评价园区是否促使企业之间进行物质代谢、

循环链接，形成产业共生网络。上游企业的副产品（氢气、二氧化碳等）可经管道输送给下游企业用作原材料，建设氯碱、聚氯乙烯、炼化、合成材料等循环经济产业链条，降低原生资源消耗及末端废弃物处理所排放的二氧化碳量。

3. 水资源与污染物集中处理，园区集中建设的污水处理厂、危险废物处置中心，可以实现污染物的专业化、规模化处理，也可以通过优化工艺（厌氧消化产生生物沼气）、提高管理水平来降低处理过程中的能耗和温室气体逸散。

能源系统优化还要实现园区能源结构的脱碳化。对园区可再生能源开发利用规划进行评价，比如在厂房屋顶、闲置土地大面积建设分布式光伏发电，研究集中式风电、地热能等清洁能源的可行性。评价园区建设智慧能源管理体系的举措，用大数据、物联网等技术对园区内能源的生产、输送、使用实行实时跟踪、智能调度，从而提高能效。环评还应该推动园区在绿色电力采购、储能设施建设等各方面的探索，提高园区绿色能源消费比例，从供给侧对能源系统进行根本性的改变。评价结论要确定园区把公用工程一体化、能源系统优化的关键指标纳入招商引资和日常监管体系，使低碳规划蓝图真正落地见效。

三、化工项目温室气体泄漏与逸散评价

化工项目中设备的密封点泄漏、工艺过程中的无组织逸散，是温室气体排放中容易被忽视的一个来源，特别是对甲烷、氢氟碳化物等具有高全球增温潜能值的气体而言。在项目环评中对它进行精细化评价并加以控制，对减污降碳协同增效有特别的意义。

（一）挥发性有机物与温室气体协同控制

化工行业里的挥发性有机物和温室气体存在很高的同源性。许多的 VOCs 本身就是温室气体（例如甲烷），而对 VOCs 进行末端治理时（例如焚烧）又会产生二氧化碳。因此环评要树立协同控制的理念，在评价 VOCs 治理方案时，要同时考虑它对温室气体排放的影响，避免污染治理过程反而增加碳排放。

环评应该首先选用源头控制和过程回收技术。采用密闭、连续性较强的生产工艺代替开放式、间歇性的作业，可以有效减少 VOCs 和温室气体的无组织排放。工艺废气中的有机物可以利用冷凝、吸附、膜分离等方式回收再利用，既节约了资源，又避免了废气排放对环境的污染。当必须采用焚烧等末端销毁技术时，环评要要求有效回收余热，对不同的治理技术进行全生命周期碳足迹比较，选择综

合环境效益最好的方案。协同评价的思路使企业由“末端治理”变为“源头预防”、“循环利用”，达到经济效益和环境效益的双赢。

（二）设备密封点泄漏检测与修复

设备动静密封点的泄漏是化工装置温室气体逸散的主要来源，阀门、法兰、泵、压缩机、搅拌器、泄压装置等成千上万个潜在泄漏点。项目环评阶段要将建立科学高效的泄漏检测与修复计划作为强制性要求，并对 LDAR 计划的科学性、可行性进行评价。

环评报告中有关 LDAR 计划的表述不能是原则性、空洞的表述，而应是具体可操作的方案。确定项目装置所有潜在泄漏点的清单，按介质物理化学性质、操作参数（温度、压力）和设备类型等对密封点进行分类。根据风险等级，环评应该对不同等级的密封点的检测频率、检测方法、泄漏定义阈值做出规定。高风险密封点应做频繁检测，可以使用红外热像仪等先进技术快速筛查，提高检测效率和准确性。

环评还要对泄漏修复的闭环管理做出严格规定。方案中应明确修复时限，第一次修复尝试应在发现泄漏后在规定时间内完成，最终修复应在规定时间内完成；对于暂时不能修复的泄漏点要进行详细的跟踪管理，有替代性的控制措施。环评应当要求企业建立完善的 LDAR 信息管理平台，对检测、泄漏、维修全过程进行记录、存档、分析，将年度 LDAR 执行报告作为竣工环保验收和日常环境监管的重要内容。进一步地，环评要促使从被动修复向主动预防转变，在项目设计阶段就选用低泄漏或者无泄漏的设备，比如波纹管阀门、磁力泵、干气密封压缩机等先进技术。在环评中对设备选型的碳排放效果进行比较，可以促使企业从设计源头最大限度地减少逸散排放，达到更高的环境保护、温室气体控制水平。

第四节 交通基础设施碳评价实践

一、公路、铁路项目全生命周期碳评价

公路、铁路等线性工程一般都具有投资大、工期长、影响大的特点。从设计到废弃拆除全生命周期，这些工程都会有碳排放。对它进行全生命周期碳评价，可以发现关键排碳环节，为制定从源头到末端的综合减排措施提供科学的依据，

防止碳排放阶段间的转移。

（一）建材生产与施工阶段的碳排放

建材生产与施工阶段的碳排放通常被叫做项目物化碳或者隐含碳，是项目初期碳足迹的主要组成。该阶段的碳排放核算和评价为全生命周期评价打下基础。主要的排放源有水泥、钢材、沥青等建筑材料的生产过程。水泥生产中石灰石高温煅烧会产生大量的二氧化碳，钢铁生产主要依靠高炉、转炉等长流程工艺，化石燃料消耗和化学反应过程都是重要的碳源，沥青的生产及拌合过程也需要消耗大量的能源。高耗能、高排放的生产活动，就是基础设施建设阶段最主要的间接碳排放。

施工过程中直接排放也不可小视。挖掘机、推土机、装载机、压路机、沥青摊铺机等大型施工机械大多采用柴油作为动力，燃油消耗所造成的温室气体是施工现场主要的排放源。土地利用变化引起的碳排放也应包含在内。工程建设造成林地、草地等植被覆盖的永久性破坏，不仅会减少生态系统的碳汇能力，还会使原来固定的碳释放到大气里。

在此情况下，新的碳评价方法应运而生。实践中越来越多的评价项目使用本地化的排放因子数据库，而不是通用的数据，从而大大提高核算的准确性。数字化、智能化技术的应用，建筑信息模型加碳排放计算模块，使得在设计阶段就可以对不同的材料方案、施工工艺的碳排放进行模拟和优化，从而达到源头减碳的目的。评价重心也越来越偏向于对减排措施有效性的评价，比如对工业固废（粉煤灰、矿渣等）作为水泥替代品、温拌沥青、泡沫沥青等节能技术的碳减排潜力进行量化，进而推广绿色建材和低碳施工工艺。

（二）运营期能耗与养护排放

公路项目运营期碳排放主要是行驶在道路上的机动车燃料燃烧。这部分排放量一般要远远大于建设阶段的物化碳，是其生命周期碳足迹的主要部分。评价的主要目的就是准确预测交通流量、车型构成、行驶速度、道路纵坡、曲线半径等各方面因素对车辆耗油、尾气排放的影响。实践中一般会结合宏观交通模型或者微观交通仿真软件，用排放因子模型来计算。建立不同的交通情景，可以评价ETC不停车收费、可变限速、匝道控制等交通管理措施对减少车辆怠速、促进匀速行驶、缓解拥堵所取得的碳减排效益。

由于牵引方式不同，铁路项目运营期的能耗和排放特征也不同。电气化铁路

主要的碳排放来自于列车运行所消耗的电力，属于间接排放。这部分碳排放的核算同电力来源的清洁程度，也就是区域电网的平均碳排放因子，有着密切联系。因此评价的重点是电力消耗量准确预测和接入绿电潜力评价。非电气化线路上直接燃烧柴油的内燃机车为排放源，评价方法同公路交通相似，应考虑列车的编组、载重量、运行速度、线路条件等因素。车站、通信信号系统、隧道通风照明等附属设施的能耗也属于运营期碳排放。

养护阶段碳排放总量小于运营期交通排放，但是由于养护阶段周期性、持续性等特点，同样不可小视。公路路面周期性大修和预防性养护，包括旧路面材料铣刨、新沥青混合料生产摊铺、标线施划等工序，都伴随着材料生产、机械作业的碳排放。铁路的钢轨更换、道砟补充、桥隧维修等工作的能源和物料消耗也很大。

创新的评价实践正朝着精细化、动态化的方向发展。采用物联网、大数据技术对道路交通流进行实时监测分析，可以对由于拥堵造成的碳排放进行动态评价，也可以给智能交通诱导系统提供数据支持。养护评价主要考察长寿命路面材料、循环再生技术等对全生命周期碳减排的贡献。通过对比不同的养护策略的碳足迹，有利于使资产管理决策更加绿色、低碳，进而达到基础设施全生命周期可持续发展的目的。

二、机场、港口项目碳评价

机场、港口属于交通网络的重要枢纽，功能复杂，能源消耗集中，排放源种类繁多。它们既是飞机、船舶等高排放载运工具的集中地，又是其中运行大量地面设备和大型建筑设施的场所。因此枢纽型项目的碳评价要重视多方面、多方排放活动的考察，主要考察系统性的节能降碳技术的应用情况。

（一）航空、水运能源消耗与排放特征

机场碳排放评价要找到其特有的排放清单。核心排放源之一就是飞机在机场区域内的活动，在国际民航组织规定的着陆和起飞循环中，即进近、着陆滑行、起飞、初始爬升阶段的燃油消耗。飞机在停机位长时间等候的时候，使用自身的辅助动力装置供电、供冷，也是一种重要的排放源。地面交通以及各种地勤保障车辆，比如行李牵引车、客梯车、飞机拖车等，传统上多为燃油驱动，排放多在机坪。航站楼属于大型公共建筑，其供暖、通风、空调系统的能源消耗以及照明系统的能源消耗，都是机场运营过程中的主要碳排放源之一；进出港旅客和工作

人员的陆侧交通也会产生一部分碳排放。

港口碳排放特征同船舶活动、货物装卸作业有密切联系。船舶进出港操纵、靠泊、离泊时主机燃油消耗，以及港内停泊期间为了维持船上设备运转而使用的辅助发动机排放，是港区温室气体和大气污染物的主要来源。港区内的作业设备，集装箱岸桥、轮胎式龙门吊、正面吊、堆高机、集卡等，是货物装卸过程中的能源消耗大户，其中很多设备使用柴油发动机。冷藏集装箱的持续电力消耗、港区大面积堆场照明、办公建筑能耗等一起组成了港口复杂的碳排放图景。港口碳评价的难点就是活动水平数据(船舶在港时间、设备作业小时数)和排放因子的选取。

(二) 岸电使用与新能源装备应用评价

对于机场、港口等枢纽设施来说，碳评价的一项主要任务就是量化新型节能减排技术的应用效益，其中岸电系统和新能源装备的推广是目前的实践重点。评价这些措施有效性的方法一般采用基准线情景对比法，即核算并比较措施实施前后碳排放的差别。

评价实践中，对具体技术的评估方法日益成熟和标准化：

1. 岸电使用评价：岸电即船舶靠岸之后关闭自身的辅助发电机，转而使用陆地电网供电。对其减排效益的评价首先要确定基准线排放，即船舶没有岸电时使用船用燃油发电的排放量，需要船舶类型、停泊时间、辅机功率、燃油消耗率等数据。之后计算出项目的实际排放，就是岸电消耗的电量乘以当地电网的碳排放因子。两者之差就是岸电系统带来的净碳减排量。评价时还要考虑岸电设施覆盖率、船舶受电改造率和实际使用率等现实因素，避免高估岸电设施的减排潜力。

2. 新能源装备应用评价，即机场燃油地勤车辆、港口燃油装卸设备替换成电动或氢能设备。评价时要将两种设备全生命周期碳排放量进行对比。新能源设备的排放主要在电力或者氢气的生产阶段，即间接排放，以及电池或者燃料电池的制造阶段。而传统的燃油设备排放主要是燃油燃烧产生的。采用生命周期评价的方法，可以对替代技术的减排潜力进行全方位的衡量，找到产业链上游的减排重点，进而促进绿电、绿氢的使用。

3. 可再生能源集成评价，很多机场、港口在屋顶、空地上建成了分布式光伏电站。评价此类项目的碳减排效益，主要就是核算其年发电量，再根据年发电量计算出替代电网电力的碳排放量。这部分减排量可以直接抵消枢纽自身的碳排放，是实现碳中和路径中的重要组成。

综合性评价要考虑各种技术之间的协同作用。港口推广电动集卡，由于港区自建分布式光伏发电系统供电，减排效果会更好。因此未来的评价方法会更加重视系统边界的完整性，用一体化模型来评价一揽子减排技术组合的最佳配置方案，给机场、港口的低碳转型提供更具有操作性的决策支持。

三、交通规划环评中的碳评价方法

与只针对单个工程微观影响的项目环评不同的是，交通规划环评处于决策链的前端，评价对象是区域性或者城市性的综合交通发展规划。从宏观层面开展碳评价，可以从根本上改变交通系统结构与效率，也是实现交通领域碳达峰、碳中和最有效的方式之一。

（一）不同交通方式的碳排放强度比较

规划环评中碳评价的基础性核心工作，就是对不同交通方式的碳排放强度做科学的对比分析。碳排放强度是反映交通方式碳效率的指标，一般用每乘客公里或者每吨公里二氧化碳当量的排放量来表示。标准化的度量衡可以使得不同的交通方式的环境影响进行比较，从而给交通结构优化的选择提供依据。

不同交通方式典型碳排放强度比较表

交通方式	典型碳排放强度 (gCO ₂ e/ 人公里)	备注
航空运输	100-250	受航班距离、载客率影响大
私家车 (汽油)	80-180	受车型、路况、载客数影响
公共汽车	20-80	受载客率、运营效率影响
轨道交通 (电力)	5-35	取决于电网清洁度、载客率
自行车 / 步行	0	仅计算交通工具运行排放
交通方式	典型碳排放强度 (gCO ₂ e/ 吨公里)	备注
公路货运	50-200	受车型、载重率、路况影响
铁路货运	10-40	效率较高，受电力清洁度影响
水路货运	5-30	远洋运输效率更高

一般而言，各种交通方式的碳排放强度相差很大。航空运输单位碳排放量最大，小型私人汽车次之，公共汽车、轨道交通、非机动车（步行、自行车）单位碳排放量最小。公路货运的碳排放强度也远高于铁路和水路运输，具体的可从不同的交通方式典型碳排放强度比较表中看出。这些比较的结论就是引导交通规划走向绿色低碳发展的最基本认识。但是规划评价不能简单地套用普适性的结论，

必须分析具体情境下的影响因素。排放强度值不是固定不变的，它受到载运工具技术水平、能源种类、实际客座率或者实载率、运行组织效率和能源碳密度等众多因素的影响。满载公共汽车的人均碳排放量比空载私家车低得多，电动汽车的碳排放强度完全取决于为它充电的电网清洁程度。因此，在规划环评实践中必须使用体现区域技术、能源特点的、动态的、本地化的碳排放强度因子来保证评价结果的准确性、政策建议的针对性。

（二）引导绿色出行结构的规划方案评估

交通规划环评中碳评价的核心目标，就是定量评价不同规划方案对未来交通出行结构的影响，预测其造成的碳排放总量变化。该过程在于找到可以促使居民转向公共交通、慢行交通等绿色出行方式的规划方案，从而控制或者削减交通碳排放总量。评估过程一般用基准线与替代方案对比的方法，以无规划或者保持现状的发展趋势为基准情景，将后一个或者多个旨在改善交通结构状况的规划情景与之比较。

核心就是交通需求预测模型，其中四阶段法最经典，也是使用最广泛的工具。碳评价与该模型结合最紧密的地方就是方式选择阶段。本阶段利用效用函数模拟出行者在小汽车、公交、地铁、自行车等不同的交通方式之间做出选择，出行时间、费用、便捷性、舒适度等都会影响出行方式的选择。规划方案通过改变这些因素（新建地铁线缩短公共交通时间，设置公交专用道提高公交可靠性）来影响方式选择的结果。

碳排放核算在模型预测出各种交通方式的交通量之后进行。将各个交通方式的总里程乘以其对应的单位里程碳排放因子，再相加，就得到该规划方案下交通系统的总碳排放量。通过对比规划方案和基准情景的碳排放量，就可以清楚地得出规划方案的碳减排或者碳增量效应。量化结果会直接用来做规划调整以及最终的决策。

面向未来进行的创新实践，努力提高评价过程的科学性、前瞻性。在方式选择模型里加入复杂行为经济学理论，就可以更加准确地反映非经济因素对出行决策的影响。利用手机信令、GPS 轨迹等时空大数据可以更加准确的反映出当前出行特征，也可以对模型参数进行检验和修正。更重要的是将交通规划和城市土地利用规划（提倡公交引导发展）的碳效应一起评估，从源头上减少出行需求、缩短出行距离，被认为是实现交通深度脱碳最根本的路径，也对规划环评的综合性、

整合性提出了更高的要求。

第五节 工业园区碳达峰环评体系

一、工业园区碳排放清单编制

编制一份准确完整的碳排放清单，是进行园区碳管理、制定碳达峰路径规划的前提和数据基础。用系统的办法发现园区内所有的温室气体排放源、量化、报告，并得到一个标准化的数据资产来支撑以后环评分析、减排潜力评估、政策制定，使碳减排工作更有针对性、有效。

（一）园区边界内企业排放数据整合

对园区边界内所有的企业碳排放数据进行全方位的整合，是清单编制工作的核心和首要工作。该项工作要形成统一的数据上报标准和核算规范，保证来自不同渠道、不同口径的数据可以进行比较。数据整合包括企业生产过程中化石燃料燃烧产生的直接排放，外购电力、热力等能源产生的间接排放，水泥、化工、电石生产等特定工业过程因为化学反应产生的过程排放。园区企业主要碳排放类型以及核算方法如表所示。

园区企业主要碳排放类型及核算方法

排放类型	定义	排放源示例	核算方法举例
直接排放	设施边界内拥有或控制的排放源产生的温室气体排放。	化石燃料燃烧（锅炉、工业炉窑）、自有车辆燃料消耗、工业生产过程（水泥生产中的碳酸钙分解）。	燃料消耗量 × 排放因子；过程排放量。
间接排放	购入电力、热力或蒸汽等能源所产生的温室气体排放，但排放源不在企业边界内。	购入的市电、集中供热、集中供蒸汽。	购入电量 / 热量 × 电网 / 热力排放因子。
其他间接排放	价值链中上游或下游产生的其他排放，通常不强制核算但鼓励。	员工通勤、商务差旅、废弃物处理、产品使用及处置。	难以统一，通常需进行生命周期评估。

整合时遇到的主要难题就是数据的完整、准确、及时。因此企业要建立完善的内部碳排放监测和报告体系，用自动化、信息化手段采集数据。园区管理机构要发挥好协调、监督作用，同生态环境、统计、能源等有关部门联动，对企业上

报的数据开展交叉验证、审核，剔除异常数据，填补数据空白，创建起覆盖全面、质量可靠的园区企业级碳排放数据库，为精准描绘园区整体碳排放图景筑牢根基。

（二）公共设施与基础设施排放核算

工业园区的碳排放除了生产企业之外，维持其正常运转的各种公共设施和基础设施也是不能忽视的排放源。公共设施是为园区企业、员工提供公共服务的建筑及系统，包括行政办公楼、公共食堂、员工宿舍、路灯照明系统、集中供热供水及污水处理厂等。设施运行消耗的能源主要是电力和热能，其碳排放核算一般用能源消耗量乘以相应的排放因子完成。

核算这些设施的排放要先界定好核算边界，即哪些设施由园区统一管理、运营。需要用能源账单、计量仪表读数等方式准确获取各类设施的电力、天然气、热力等能源消耗量。园区路灯总耗电量、办公楼采暖用热量等都要被系统正确地采集。

数据的准确性是进行核算的前提。园区管理部门应该设专门的能源消耗统计台账，定时对公共设施用能情况进行记录、汇总。对于没有直接计量数据的部分，可以采用模型估算或者物料衡算的方法进行估算，并注明其不确定性。把这些排放量加入到总清单里，可以更加完整的体现园区的总碳排放量，不会因为忽略公共部门排放而造成对园区整体碳排放量的低估。

（三）交通与废弃物处理系统排放核算

公共设施之外，对园区基础设施中的交通运输系统、废弃物处理系统做精细的碳排放核算也十分重要。园区内部交通活动，即员工通勤班车、内部物流运输车辆、公务用车等的燃料消耗，属于直接排放的重要组成。核算时应统计各类型的车辆保有量、年运行里程、单位里程燃料消耗，根据不同的燃料的排放系数得出交通活动所产生的温室气体总量。

废弃物处理环节的碳排放核算较为复杂，包括园区生活垃圾以及部分工业固体废物的处理。如果园区内有垃圾焚烧厂或者填埋场，则要根据废弃物的处理量、成分、处理工艺分别计算焚烧过程产生的二氧化碳，填埋过程中有机物厌氧分解产生的甲烷。甲烷是强效温室气体，甲烷排放量的准确核算就显得尤为重要。对于运到园区外处理的废弃物，在处理过程中产生的排放也应该追溯并计入园区核算范围，体现全生命周期管理思想。对交通、废弃物这两个主要的基础设施环节分别进行详细的碳排放核算，可以找到具体的减排热点，从而给园区交通电气化、

提高废弃物资源化利用率等具体的减排措施提供数据支撑。

二、园区碳达峰路径规划环评

把碳达峰目标融入到园区规划环境影响评价当中，就是将园区由被动履行环保要求变为积极推进绿色发展的战略举措。这就要求环评不仅要考察规划执行可能引发的环境影响，还要预见到园区在各种发展情形下碳排放的发展走向，找到减排的重点所在，给出系统性的低碳发展途径及政策提议，保证经济前行的同时，碳排放渐渐趋于最高点并不断下滑。

（一）能源结构优化与产业转型升级

能源结构深度优化，成了园区实现碳达峰的主要驱动力。规划环评要全面分析园区目前的能源消费情况，主要看对煤炭等高碳化石能源的依赖程度，找出可再生能源的应用潜力。评价要突出能源消费侧的变革，推进以电代煤、以电代气等措施，提高工业生产、交通运输、建筑供暖等领域电气化水平。根据实际情况合理开发分布式光伏、分散式风电等清洁能源，提高园区绿色能源消费比重。对热电联产、评价能源梯级利用项目的热电联产、余热余压回收利用等能源梯级利用项目的环境效益和减碳效益，也是能源系统优化的重要环节。

能源结构优化同时进行的是产业转型和升级。环评应该按照碳排放强度、环境影响程度来实行严格的产业准入、退出清单制度。这就意味着要坚决遏制高耗能、高排放项目盲目扩张，用政策引导和技术支持，促使现有传统产业清洁生产、节能降碳改造。评价工作另一项重要的任务就是分析引入新能源、新材料、高端装备制造等绿色新兴产业对园区整体碳排放水平的积极影响，引导园区逐步淘汰落后产能，构建技术含量高、资源消耗低、环境污染少的现代化绿色产业体系，从根上实现经济发展与碳排放的脱钩。

（二）园区循环经济与产业链延伸

创建循环经济体系，是工业园区达到减污降碳协同增效的一种有效方式。规划环评应该重点评价园区物质流管理的循环化程度，促进企业、产业、基础设施之间循环链接。核心就是促进园区企业之间产业共生，即一家企业的副产品或者废物可以成为另一家企业的生产原料，在源头上减少资源消耗和废物产生。评价内容应该全面分析工业固体废物、废水、余热余能等资源的循环利用潜力。

化工园区的评价要考虑到各个生产装置之间物料的闭路循环方案；综合性工

业园区应分析建立集中废弃物资源化利用中心的可行性，实现跨行业物料交换。加强水资源循环利用、推广中水回用和废水资源化技术等也属于评价的内容。在规划阶段就确定循环经济的布局要求和关键项目，规划环评可以引导园区从线性消耗模式转变为循环型发展模式，最大限度地提高资源产出率，达到经济效益和环境效益的双赢。

（三）产业链纵向延伸与横向耦合

循环经济模式加深了产业链纵向延伸、横向耦合，形成了紧密高效生态工业网。规划环评要对产业链的完整性、闭合性做专项评价，找到产业链的薄弱环节和断点，提出补链、延链、强链的具体措施。不仅园区内部要联动，还要考虑同周边区域产业的联动，共同形成更大的产业生态集群。

具体的实践路径可分为以下几点：

1. 以龙头企业为牵引进行产业链延伸。环评应该引导、鼓励园区内龙头企业向上游发展原材料绿色化替代，或者向下游延伸发展高附加值的精深加工产品。冶金园区可以规划冶炼副产工业气体生产高纯度工业气体或者化学品；农产品加工园区可以推动利用加工废弃物生产生物饲料、有机肥料或者生物质能源，形成完整的绿色产业链条。

2. 创造一个各产业间横向耦合共生的网络。环评要打破行业壁垒，探求各个产业之间物质、能量交换的可能性。发电厂余热可以供给纺织、食品等企业蒸汽，建材企业可用钢铁厂钢渣、电厂粉煤灰做生产原料。这样就形成了一种互相依存、互相支撑的复杂生态系统，从而极大地提高了整个园区的资源利用效率。

三、园区智慧化碳管理平台建设评价

在数字化大潮的驱动下，建设智慧化的碳管理平台成为工业园区进行精细化、动态化碳排放管理的必然趋势。对该平台的建设进行环评，不单是对它的技术先进性做评判，更是对园区治理能力现代化水平的一种整体评价。评价主要看平台的数据支撑能力、管理决策功能和服务创新潜力，保证平台可以成为园区向碳中和目标迈进的“智慧大脑”和“神经中枢”。

（一）碳排放实时监测与数据融合

智慧化碳管理平台的基础就是搭建起全方位、动态化的实时碳排放监测网络。评价首先要考察平台在数据采集方面的能力，即是否能够通过在重点排放源（烟

囱、排污口）、关键用能设备（锅炉、电机）和能源管网节点上安装物联网传感器、智能电表等设备，对企业的生产数据、能源消耗数据、污染物排放数据进行高频次、自动化采集。彻底改变了过去依靠企业定期上报、数据严重滞后的问题，为园区动态化碳管理奠定了坚实基础。

平台主要的价值在数据的融合以及分析上。评价要考察平台是否具备强大的数据处理能力，可以把企业内部系统数据、在线监测设备数据、政府监管平台数据、电网、热力公司等多源异构数据整合、清洗、标准化。依靠大数据分析和人工智能算法，平台对融合后的数据加以深入挖掘，创建起园区、企业、设施、产线等各方面的碳排放核算模型，实时计算并动态显示碳排放量、碳强度等重要指标。可视化碳地图可以让管理者对园区碳排放的空间、时间分布情况一目了然，找到减排的重点区域、关键环节，为碳排放预警、预测、决策优化打下坚实的基础。

（二）碳资产管理与交易服务功能

伴随着全国碳排放权交易市场日趋成熟，碳排放权也已经逐渐成为企业重要的资产。智慧化碳管理平台应该具有完善的碳资产管理功能，这是评价其先进性的主要标准。平台要为园区内每一家被纳入碳交易管控的企业创建碳资产账户，记录企业获得碳排放配额、实施减排项目产生的核证自愿减排量以及实际排放量。

平台的价值并不只是记录，更在于给企业赋予智能管理及决策支撑。评价应考察平台是否可以依据企业的生产计划以及实时排放数据，对企业在履约周期内碳排放盈亏状况进行动态预测，并在必要的时候发出预警。同时平台需要具备模拟分析的功能，企业可以运用此功能来对各种生产方案、节能技术改造途径做碳成本、碳收益的测算，进而确定出最优的碳资产管理策略。企业可以利用平台来进行模拟决策，权衡采用技术改造的方式实现自身的减排目标，还是在市场上购买配额来完成履约，从而达到经济效益最大化的目的。

（四）碳交易促进与金融服务延伸

在基本的碳资产管理之上，平台还要进一步扩大服务范围，以促进碳交易、盘活碳资产。评价要考察平台是否能够建立一个服务于园区内部的微型碳交易市场，为企业间开展碳排放权撮合交易提供信息发布、询价、议价和交易记录等全链条的服务。内部交易机制可以降低企业交易成本、提高碳资产流动性，促使减排成本低的企业超额减排并出售富余配额给减排成本高的企业，从而改善整个园区的减排资源配置。

功能完备的平台还要成为“碳金融服务中心”。评价需要看其是否能够整合碳市场行情、政策法规、绿色金融产品等信息，为企业的碳交易和投融资提供一站式、全方位的咨询服务。平台可以发布碳价预测分析报告，帮助企业准确把握交易时机；可以对接银行、投资机构等金融机构，为企业节能降碳项目提供绿色信贷、绿色债券等多方面的融资渠道信息。当智慧化平台把上述高级服务功能集于一身的时候，它就不再只是一个普通的管理工具，而是一个能够促进园区企业绿色低碳发展、提高区域绿色竞争力的综合性的绿色服务生态系统。

第六章 环评大数据技术应用

第一节 环境大数据采集与处理技术

一、多源异构环境数据融合技术

环评工作所用数据来源广泛、格式多样，包含环境监测、遥感探测、社会经济等各个方面。有效融合多源异构数据可以打破数据孤岛，对整个区域进行立体的、全面的认识，为精准区域以及项目决策提供技术支持。

（一）地面监测、遥感、社会经济数据融合

双碳背景下，环境影响评价仅依靠一个数据来源的话，就会产生局限性，不能全面地反映复杂的环境相互作用。地面监测站可以得到精度较高、时间分辨率强的定点观测数据，包括空气质量中的 SO_2 、 NO_x 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO_2 等，水质中的 COD 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等，但是空间覆盖范围小，不能反映区域环境质量的总体分布状况。卫星遥感技术很好地弥补了这一不足，可以获取大范围、周期性的地表信息，比如土地利用变化、植被覆盖度、地表温度、气溶胶光学厚度等，这对于评价区域生态系统碳汇能力、识别宏观层面的人类活动环境影响来说非常重要。社会经济数据包含能源消耗统计、产业结构、交通流量、人口分布等，能体现环境压力的来源，是探究污染成因、预测未来排放情景、评价减排政策效果的重要依据。

多源数据融合的目的就是把具有不同空间、时间、语义特征的数据有机地结合起来，发挥各自的优势，产生比单一数据源更全面、准确、有价值的信息产品。可利用遥感反演得到的 NDVI 与地面观测的碳通量数据，用机器学习的方法建立高分辨率区域碳汇估算模型。将地面监测的污染物浓度、遥感观测到的工业热异常点、企业排污许可、能源消耗等社会经济数据融合在一起，可以更加准确地识别、溯源污染事件，给环境监管和决策提供有力的支撑。

融合技术并不是简单的将数据相加，而是在数据内部所包含的关系上做更深层次的挖掘。利用复杂的融合算法，例如地理加权回归模型、时空克里金插值、

深度神经网络等，把不同的数据作为输入特征，构建时空连续的环境质量场或者碳排放清单。这就使环评工作由点状评价变为面状评价，可以对环境影响范围和程度进行动态、三维地刻画，大大提高了环评的科学性、前瞻性。

（二）数据清洗、标准化与时空对齐

从各种渠道得到的原始环境数据往往是粗糙、无序的，直接进行分析容易得出错误结论。常见的质量问题有数据缺失，异常值，格式不统一，基准不一致等。数据清洗、标准化、时空对齐为数据预处理的主要环节，也是保证后续分析结果可靠的基础，目的是创建高质量、一致、可用的清洁数据集。

数据清洗的主要任务就是处理数据噪声。传感器故障、网络传输错误或者人为录入失误都会造成数据集中出现异常值、缺失值。异常值可以采用 3σ 原则、箱线图法等统计学方法或者孤立森林等机器学习算法进行识别与处理，实现剔除、修正或者标记。对于缺失值，根据数据的特性选择均值/中位数填充、前后值填充等插补方法，也可以使用时序数据插值算法（线性插值、样条插值）或者基于模型的预测填充。标准化的目的就是消除不同变量由于量纲、数值范围的不同而产生的影响。PM2.5 浓度数值范围远大于 pH 值，如果不做标准化处理，PM2.5 在多变量分析模型中的影响权重就会被不合理地放大。常用的方法有最小最大标准化（把数据映射到 0 到 1 之间）和 Z 分标准化（把数据转换成均值为 0，方差为 1 的分布）来使所有的特征在模型训练的时候都同等重要。时空对齐主要是对数据的时间、空间一致性进行处理，是多源数据融合之前不可缺少的一个步骤。不同监测设备采集频率不同（分钟级、小时级、天级），空间参考系和分辨率也不同（点状监测站、面状遥感影像栅格）。所有数据都要统一到同一个时间、空间基准上，即把所有的时序数据重采样为统一的时间间隔（小时平均），把所有的空间数据投影到统一的坐标系和空间分辨率网格上，才能进行关联分析和融合建模。

（三）高级数据预处理策略与实践

数据清洗、标准化、时空对齐具体的操作，在工程实践中更加复杂，需要根据数据的特点和最终的应用目的，灵活地使用各种技术手段，并进行组合，构建起自动化数据预处理流程。这既是数据质量的提高，又是对数据内在价值的初步挖掘。

高级数据清洗阶段在处理明显的异常、缺失之后还要考虑数据的一致性、逻

辑性。水质监测数据中总磷的数值理论上不应该小于正磷酸盐的数值。用逻辑规则校验，发现和修正数据质量问题。时间序列数据的周期性、趋势性等特点可以发现隐藏起来的异常。利用时间序列分解模型（STL 分解）可以将季节性波动和随机噪声分离出来，使数据中的真实异常点更容易识别。

选择标准化的方法也要慎重。最小 - 最大规范化方法对异常值比较敏感，极端的最大值或者最小值会影响其它数据的缩放效果。当数据中有较多离群点的时候，使用 Z-score 标准化或者稳健的 RobustScaler（中位数和四分位数的组合）会更好。生态学等特殊领域里有时还需要做对数转换或者平方根转换等，使数据分布更接近正态分布，满足某种统计模型的前提条件。

时空对齐的技术实现涉及地理信息系统和信号处理领域各种算法。空间对齐常用的技术有坐标系转换、投影变换、空间插值等。若要将点状监测数据扩展成面状数据，一般采用克里金插值、反距离权重插值等方法。不同的分辨率遥感影像对齐要用重采样。最近邻法可以保留原始像元值，双线性插值法可以得到平滑的结果，三次卷积插值法虽然精度更高但是计算量大。时间对齐就是对时间序列进行聚合（比如把分钟级的数据聚合成小时级），或者插值（在低频率序列里估算高频时点值），从而让不同的数据源时间分辨率相互匹配。数据预处理的主要过程大体上可以分为如下几个步骤，见下表：

数据预处理核心步骤

步骤	描述	目的
数据质量探查与诊断	运用自动化脚本和可视化工具，对原始数据进行全面探索性分析，生成质量报告，确定问题分布及严重程度。	了解数据现状，发现潜在问题，为后续处理提供依据。
异常值处理与缺失值插补	根据诊断结果，组合多种算法进行异常值处理、缺失值插补及逻辑校验。	获得初步“干净”数据，提高数据完整性和准确性。
特征标准化与变换	根据后续分析模型要求，选择适宜的标准化或变换方法。	统一数值型特征尺度，满足模型输入条件，消除量纲影响。
时空基准统一与对齐	确定统一时空分辨率，利用插值、重采样、聚合等技术对齐数据。	使多源数据在时间和空间上保持一致，支持融合建模。

二、环境大数据存储与管理平台

环评工作当中环境数据量、增速、种类不断增多，传统的单台服务器关系型

数据库存储管理方式已经不能满足需求。所以建设现代化、可扩展、高效能的环境大数据存储与管理平台，是保证数据资产安全、提高共享利用率、支撑复杂环境模型运行的重要基础设施。

（一）分布式存储与云计算技术应用

传统的集中式数据库服务器存储架构，在遇到 PB 级的遥感影像数据、数以亿计的物联网传感器实时数据流的时候，就会遇到存储容量、计算能力以及 I/O 吞吐量的瓶颈。分布式存储技术可以提供解决途径。基本原理就是把大数据集分成若干个块，存入由很多普通计算机或者服务器组成的集群中。以 Hadoop 分布式文件系统为代表的技术，采用的是分而治之的方法，可以实现存储容量的横向无限扩展。采用数据副本的方式，对每一个数据块做多个副本，将副本分散存放到不同的节点上，即使部分硬件发生故障，也不会造成数据丢失，因此可靠性高、容错性好。该架构很好地解决了数据存不下的难题，为之后分布式计算（MapReduce、Spark 等）打下基础，从而实现海量数据的并行处理。

利用云计算技术创建起来的环境大数据平台更灵活、更具有扩展性、节约成本。主流的云计算服务商（如阿里云、腾讯云、AWS 等）给用户提供基础设施即服务、平台即服务等不同的服务。环评机构不需要花费大量的资金购买昂贵的硬件设备以及维护费用，只需要根据需要租赁云端的存储资源和计算能力。其弹性伸缩特性尤为重要，在大规模气候模型模拟或者区域空气质量预测的时候，可以临时调用成百上千个计算核心，任务完成后立即释放资源，大大提高了资源利用率，降低了成本。云平台还提供了许多托管式大数据服务，比如对象存储、大数据计算服务、流计算服务等，这些服务很好地隐藏了底层的复杂细节，让开发人员可以将精力放在业务逻辑的开发上，从而大大缩短了环评大数据应用的开发和部署时间。

（二）环境数据仓库与数据湖构建

在创建大数据管理平台的时候，环境数据仓库和环境数据湖是两种主流的，互相补充的架构范式。它们分别服务于不同的应用场景，但是又共同组成了现代环境数据平台的主要部分。环境数据仓库是高度结构化、以主题为组织中心的数据集。其目的在于支持业务智能、决策分析。数据在进入仓库之前要经过抽取、转换、加载的 ETL 过程，即对来自不同业务系统（污染源监测、环境质量监测）的原始数据进行清洗、整合、转换，按照事先设计好的数据模型（星型模型、雪

花模型)组织。仓库中数据干净、一致、易于理解,适合做常规的统计报表、多维分析、长期趋势分析等工作,例如生成区域年度污染物减排绩效报告、分析各个行业对碳排放的贡献等。

环境数据湖是一种更加灵活、包容性更强的存储方式。其理念就是所有的原始数据,不论是结构化的(监测站数据表)、半结构化的(日志文件),还是非结构化的(环评报告文档、遥感影像、视频监控录像),都应当以原始的形式完整地保存下来。数据湖采用抽取、加载、转换的方法,即把原始数据原封不动地加载到数据湖中,只在需要做某种分析的时候才对数据进行转换和处理。给数据科学家、分析师提供高度自由的空间进行原始数据的挖掘、机器学习模型的训练,还可以开展文本挖掘等先进的研究活动。研究人员可以自由地在数据湖中对气象数据、社交媒体文本数据和空气污染事件三者之间的相关性进行研究。

在双碳目标导向的环评实践当中,数据仓库和数据湖不是互相替代的关系,而是出现了融合的趋势。因此产生了“湖仓一体”的架构。它把数据湖的低成本、高弹性存储和数据仓库强大的数据管理、高性能查询能力结合起来。在数据湖的开放数据格式(Parquet、ORC等)之上,建立一个事务性元数据层(Delta Lake、Iceberg等),使数据湖也可以实现事务一致性、数据版本控制、模式演化等传统数据仓库特有的功能。既可以满足传统业务智能报表的需求,又可以支持高级的人工智能应用,为数据采集、存储、治理、分析应用的全过程提供统一高效的平台,有效支撑从宏观碳中和路径规划到微观项目碳足迹核算的环评工作。

(三)数据湖仓一体的工程实践与治理

环境数据仓库和数据湖的工程实践当中,其创建包含诸多技术选择、平台搭建以及运维治理的工作,属于一项系统工程。平台的技术栈选型要从数据量、实时性、分析负载、团队技术背景等诸多方面进行考虑。数据湖的底层存储一般用Hadoop分布式文件系统或者云厂商提供的对象存储服务。数据处理和计算引擎上,Apache Spark由于内存计算的优势以及统一的编程接口(批处理、流处理、查询、机器学习),已经成为事实上的行业标准。数据仓库可以使用传统的MPP数据库,也可以使用现代的云原生数据仓库(Snowflake、Google BigQuery),后者在弹性伸缩和运维管理上更具有优势。

数据治理、元数据管理是保证数据湖不变成数据沼泽的关键环节。需要建立集中式元数据目录(Apache Atlas、AWS Glue Data Catalog等),对数据湖、数

据仓库中所有的数据资产进行统一管理。元数据应该包含数据物理位置、数据结构、数据来源及血缘关系、数据质量评分、数据所有者、访问权限等必要信息。完善的元数据系统可以方便数据消费者发现、理解、信任数据，是实现数据民主化、价值最大化的前提。数据质量监控体系的创建也十分重要，需要定义关键数据质量指标，并且布置自动化监控脚本，持续度量数据的完整性、准确性、一致性和及时性，一发现问题就触发告警和修复流程。

数据管道是数据源与数据存储平台之间的桥梁。这些管道完成数据采集、传输、清洗、转换、加载等一切自动化的工作。根据数据源的特点选择合适的工具创建数据管道。对于批量数据可以使用 Sqoop、DataX 等工具从关系型数据库抽取；对于实时数据流要通过消息队列以及流处理引擎（Flink、Spark Streaming）来构建实时采集处理链路。数据平台的搭建和运维还要充分考虑数据安全和合规性的要求，建立完善的用户认证和权限控制机制，对敏感数据实施脱敏或者加密处理，记录所有数据访问日志，保证数据全生命周期的安全可控，并符合国家相关法律法规的要求。

第二节 遥感技术在环评中的应用

一、高分辨率遥感在生态现状调查中的应用

高分辨率遥感影像由于地物细节丰富、空间信息量大，在生态现状调查中所起的作用也越来越大。它可以准确地绘制出地表单元属性和分布情况，给环评提供准确的地表环境信息，在碳源碳汇核算所需的土地利用、植被参数等信息提取方面具有不可替代的技术优势，是构建精细化生态基线的主要方法。

（一）土地利用 / 覆盖类型精细分类

土地利用和覆盖变化是决定陆地生态系统碳循环的重要驱动力，对其准确分类和识别，是进行碳排放和碳汇效应评价的前提。传统的环评调查方法大都采用小范围抽样、人工判读，不能满足大尺度、高精度评价的要求。高分辨率遥感技术的引入，用我国高分系列、资源三号以及国际上的世界视图、Pleiades 等卫星影像，可以获取亚米级甚至更高的精度数据源，极大地提高了地物识别的精细度。利用这些数据可以清楚地划分出森林、草地、湿地、农田、建设用地等地表覆盖

类型的边界，也可以识别图斑内部异质性以及小微地块。

在双碳目标的引领下，土地利用分类不能只停留在传统的初级或者二级分类上，而应该细化到可以直接关联到碳储量估算的具体类型。林地再进一步分成常绿针叶林、落叶阔叶林、针阔混交林等亚类，因为不同的林分类型固碳效率差别很大。草地按照覆盖度分成三级来确定碳汇能力。高分辨率的影像配合先进的分类算法，给精细化分类创造了有利的条件。

目前，面向对象的多尺度分割分类方法以及基于深度学习的语义分割技术，都是进行精细分类的主要方法。面向对象的分类方法把影像分割成有相似特征的对象，然后利用光谱、纹理、形状、空间邻域关系等多维特征进行分类，有效地解决了传统像元级分类方法容易出现椒盐效应的问题，同时又可以保持图斑的完整性。U-Net、DeepLab 等深度学习模型因为有很强的特征学习和抽象能力，可以自行从大量的遥感数据中提取出深层次的语义信息，对复杂的城乡结合部、破碎的林区等地物环境下的分类精度和自动化水平都有所提高，给环评中碳源 / 汇单元的准确识别和空间定位提供前所未有的技术支持。

（二）植被覆盖度参数反演

植被覆盖度是反映地表植被状况的指标，也是反映区域光合作用潜力和生态系统健康状况的指标。植被覆盖度反演一般使用各种植被指数，其中归一化植被指数使用最广。归一化植被指数是根据植被在近红外波段高反射、红光波段强吸收的特性建立起来的，数值和植被覆盖度有明显的正相关关系。用高分辨率卫星影像计算得到的归一化植被指数，可以对区域内植被覆盖的细微特征有细致的反映。

像元二分模型是目前最常用、最成熟的植被覆盖度估算模型。该模型假定像元的地表由植被覆盖部分和无植被覆盖部分组成，其光谱信息是这两部分的线性加权组合。植被覆盖度值可由像元的归一化植被指数值、区域内纯植被像元的归一化植被指数值、纯裸土像元的归一化植被指数值计算得到。物理意义清楚，计算简便，可以快速得到大范围、高精度的植被覆盖度空间分布图。

得到的植被覆盖度数据对环境影响评价有诸多意义。它是评价项目建设区及周边生态环境质量的基础数据，也是评价工程占地、施工扰动等活动对生态系统造成的影响的直接依据。通过项目建设前后植被覆盖度的变化，可以定量地评价

生态损失或者生态恢复的效果。在双碳背景下，植被覆盖度数据成了区域碳汇估算模型里的关键输入参数，它同植被光合有效辐射吸收比例有着密切联系，这会干扰到生态系统初级生产力估算的精确度，进而左右整个区域碳收支核算结果的可信度。

（三）植被生物量参数反演

植被生物量，特别是地上生物量，是陆地生态系统碳储量的主要构成部分。对它进行准确估算并动态监测，对于实现“双碳”目标、开展碳汇计量和核查有极其重要的意义。遥感技术的发展使得传统的‘点’状样地调查变成了‘面’状生物量制图。基于光学遥感的生物量反演，主要是通过建立遥感信息（光谱反射率、植被指数、纹理特征等）与地面实测生物量数据的统计模型来实现的。

实践中，常用的方法包括以下几种：

1. 经验统计模型法，即通过采集项目区内有代表性的样地生物量数据，同时采集与样地相对应的遥感影像特征，采用线性回归、多元线性回归、非线性回归等方法，建立生物量与一个或者多个遥感变量（归一化植被指数、增强型植被指数、纹理分析中提取的均值、对比度等）之间的回归方程。模型建立之后就可以应用于整个研究区，得到生物量的空间分布图。该方法比较简单，但是在植被覆盖度很高的地方容易出现饱和现象，估算精度受到影响。

2. 机器学习算法，为了克服传统统计模型的局限性，随机森林、支持向量机、人工神经网络等机器学习算法在生物量反演中被越来越广泛地使用。这些算法可以处理高维的输入数据，可以很好地捕捉生物量和众多遥感变量之间复杂的非线性关系，一般能得到比传统回归模型更高的估算精度。

3. 将激光雷达和高光谱数据结合起来，激光雷达技术主动发射激光脉冲，可以得到森林的三维结构信息，例如树高、冠层高度、冠幅等，这些结构参数和生物量之间有明显的相关性。将激光雷达提供的准确垂直信息和高分辨率、高光谱影像提供的丰富光谱信息结合起来，构建更加稳定准确的生物量反演模型，成为目前遥感生物量估算技术的重要发展方向。

生物量反演方法的特点和适用性可见下表。

植被生物量反演方法比较表

方法	基本原理	优点	局限性	适用场景
经验统计模型法	基于实测生物量与遥感变量的统计回归关系	简单易行，计算速度快	易饱和，精度受样本影响大，泛化能力弱	中低覆盖度植被，数据获取成本低
机器学习算法	通过算法学习遥感变量与生物量间的非线性复杂关系	可处理高维数据，捕捉复杂关系，精度高	需大量训练数据，模型可解释性差，计算资源消耗大	复杂植被类型，对精度要求高
LiDAR 与高光谱结合	利用激光雷达获取三维结构，高光谱获取光谱信息，融合反演	精度最高，能反演垂直结构信息，克服饱和效应	成本高，数据处理复杂，专业性强	森林、复杂地貌，对三维结构和精度要求极高

通过上述方法得到的生物量数据，可以为环评提供项目建设区域详细的碳储量基线，也可以为预测和评价项目活动（林地占用、植被清除）引起的碳排放量提供直接的数据支持，使环评结论更加科学、量化。

二、环境遥感动态监测与变化分析

环境遥感动态监测就是对同一区域的多时相遥感影像进行分析，目的是揭示环境要素、生态状况随时间变化的规律、趋势和突变，是推动环评从事后评估转向事中监管、预测预警的关键技术。双碳目标之下，动态监测能力对于探究重大工程从规划、实施到后期影响的全过程，以及评价区域生态系统对气候变化和人类活动的响应都显得十分关键。

（一）地表水环境质量遥感监测

地表水属于生态系统的重要组成，地表水水质状况同区域水安全息息相关，而且间接体现流域内污染排放及生态健康状况。传统的水质监测依靠现场采样、实验室分析，虽然精度高，但是监测点位少、频率低，不能反映水体污染的时空动态变化过程。遥感技术给大范围、高频率的水环境监测提供有效的补充。

水质遥感监测的物理基础是水中不同物质成分对太阳辐射的光谱响应特征存在差异。水体中叶绿素 a、悬浮物浓度、有色可溶性有机物等是反映水体富营养化、污染程度的指标，它们的存在会使水体的后向散射、吸收特性发生改变，在遥感影像上表现出不同的颜色、亮度特征。建立水质参数浓度与水体表现反射率之间的定量关系模型，就可以实现水质参数的遥感反演。

目前利用 Sentinel2、Sentinel3、Landsat、高分等系列卫星的多光谱或高光谱数据，已经发展出多种水质参数反演算法，主要有经验模型、半经验模型、半分

析模型和分析模型。经验模型直接利用水质参数实测浓度和遥感反射率的统计关系建立,简单易行;分析模型基于辐射传输理论,物理意义清楚,但过程复杂;半分析/半经验模型介于两者之间,是当前应用研究的热点。环评工作当中,经由对项目建设前后多时相遥感影像实施分析,反演重要水质参数的空间分布及变化趋向,可以直截了当评判工程排污、水土流失等对下游河流、湖库水环境产生的累积影响,辨别污染扩散的范围和强度,进而给制订并调整水环境保护举措赋予科学支撑。

(二) 区域生态质量变化遥感评估

单一的环境指标不能完全、全面地反映区域生态环境的整体情况。为了对生态质量进行宏观、快速、量化的评价,研究者们提出了许多综合性的生态指数。遥感生态指数因为指标选取直观、完全依靠遥感数据、计算过程标准化等特点,近些年来被广泛使用和认可。在双碳目标之下,该指数被用来评价区域生态背景以及动态变化。

遥感生态指数模型将与人类生存环境质量有关的四个生态因子,即绿度、湿度、热度、干度进行整合。这四个因子都可以直接从遥感影像中计算得到。绿度一般用归一化植被指数来表示,反映植被覆盖和生长状况;湿度一般用遥感缨帽变换的湿度分量来表示,反映地表水分状况;热度一般用地表温度来表示,与城市热岛效应等环境问题有关;干度一般用裸土指数和建筑指数合成的指数来表示,反映地表裸露和硬化程度。

这四个指标分别代表生态系统不同方面的信息,用主成分分析法可以将这些指标包含的主要信息耦合成一个综合指数。主成分分析可以自动客观的确定各个指标的权重,从而避免了主观人为赋权的情况。最终得到的第一主成分就是初始的遥感生态指数。将第一主成分归一化之后,就得到一个介于0到1之间的遥感生态指数值,数值越接近1,生态环境质量越好。遥感生态指数的提出,使生态质量评价由定性描述变为定量分析,不同地区、不同时段生态状况可以进行对比。

(三) 基于遥感生态指数的动态评估与驱动力分析

基于遥感生态指数评价生态质量变化,主要是通过对多时相的遥感生态指数结果进行对比分析来实现。用不同年份或季节的遥感生态指数空间分布图做差值运算或趋势分析,可以揭示研究区生态质量改善、退化或保持稳定的空间格局以及变化过程。该种时空动态评价方法,在双碳背景下的环境影响评价中有着非常高的应用价值。

在工程实践中可以生成项目建设前、建设期间和运营后等各个时间节点的遥感生态指数专题图。经过对比分析可以清楚地发现由于工程建设（大规模的土地开发、交通廊道建设等）所造成的生态质量下降的区域，并且可以定量地评价出影响的范围以及程度。可以很好地检测生态恢复工程的效果，包括矿山复绿、边坡植被恢复等，并以此来评判其是否达到预期的生态改善目的。逐像元变化监测比传统的行政单元统计评价更细、更准。

除此之外，用地理探测器等空间统计模型，还可以探究遥感生态指数变化的自然和人为驱动因素。分析因子对遥感生态指数空间分异的解释力，找到造成生态退化的主导驱动力。不但能加深对于工程环境影响的机理了解，也能够给项目选址、制定出更有针对性的生态补偿措施提供科学的理论支持。将遥感生态指数动态评价纳入环评体系，有利于对项目整个生命周期生态影响进行持续追踪和闭环管理，保证重大工程在创造经济效益的同时，也能很好地协同区域碳减排和生态保护目标。

第三节 地理信息系统空间分析方法

在双碳目标之下，环境影响评价对于空间分析的精度和深度有着更高的需求。地理信息系统依靠强大的空间数据处理、分析和可视化功能，给精准识别环境制约因素、优化项目布局、科学预测环境效应赋予了核心技术支撑。

GIS 空间分析方法及其应用概览

方法类型	核心功能 / 分析内容	在双碳背景下的应用体现
生态敏感性评价	识别生态脆弱区，评估区域承载力	为国土空间规划提供生态底线约束
生态保护红线划定	确定国家生态安全底线与保护边界	保护重要自然碳库，维持生态系统服务
空间管制区划	差异化管控开发活动，分级管理	防止生态红线受损，保障碳汇功能稳定
环境风险事故模拟	预测污染物扩散范围与时空变化	为新能源项目风险防范和应急预案提供依据
风险区划与避难选址	划分风险等级，规划应急避难场所	优化区域规划，保障人员安全疏散
动态应急决策系统	集成实时数据与动态模型，快速响应	提升应急决策时效性，实现运营期风险闭环

如上表所示,地理信息系统在环境影响评价中发挥着多方面作用,尤其在以下几个关键领域。

一、基于 GIS 的生态敏感性评价

生态敏感性评价可以找出区域生态系统的薄弱环节,确定出需要进行生态保护的空间。利用地理信息系统进行生态敏感性评价,可以把生态保护要求与双碳目标结合起来,给国土空间开发活动划定科学的生态底线约束。

(一) 单因子与多因子叠加分析

单因子生态敏感性评价,是对某一特定生态胁迫或环境要素开展的专项评价。在双碳目标的背景下,评价因子的选择不能只考虑传统的水土流失、土地沙化、生物多样性保护等因素,而应该更侧重与碳循环有关的因子,即林地、草地、湿地等重要碳汇区的分布和质量、土壤有机碳含量等。GIS 可以把各个单一评价因子用独立的专题图层表示出来,采用分级、赋值的方式,清晰地显示出各个因子在空间上敏感性的分布情况,为之后的综合评价打下了数据基础。每一个图层都是对某种生态压力的反映,精细度直接影响最终评价结果的科学性。

多因子叠加分析就是将多个单因子评价图层进行空间叠加,得到综合性的生态敏感性评价结果。该方法重点是确定各个评价因子的权重,一般用层次分析法、专家咨询法等定性定量方法来确定。在双碳导向下,直接或者间接影响区域碳收支平衡的因子,例如植被覆盖度、生态系统碳储量、水源涵养能力等应该赋予较高权重。用 GIS 平台加权叠加或者逻辑运算的方式来融合计算各个单因子图层,最后得到一个区域生态敏感程度的空间分布图。一般把该图分为不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感、极敏感等几个等级。

综合生态敏感性评价结果可以给国土空间规划、建设项目选址提供科学依据。环境影响评价工作当中,评价人员可以把项目规划区域范围同综合生态敏感性分布图叠加起来,来判断项目是否碰上了生态敏感区。有利于提前避开重大生态风险,促使项目先选择生态环境承载力较好的地方。既可以有效保护脆弱的生态环境,又可以维持区域重要碳汇功能的稳定性,避免由于不合理的开发活动所造成的碳汇功能下降。它保证双碳目标从项目决策之初就得以贯彻,实现了发展和保护的有机协调。

（二）生态保护红线与空间管制区划

生态保护红线是国家生态安全的底线和生命线，是用法律手段划定、严格保护的生态功能区、生态环境敏感区和脆弱区的边界。主要目的是保持生态系统的服务完整性、持续性，即水源涵养、生物多样性维持、水土保持、固碳释氧等主要功能。在双碳目标的背景下，生态保护红线区域是重要的自然碳库，其保护价值愈加突出。地理信息系统是划定生态保护红线的主要技术手段，它把土地利用现状、植被覆盖、生物多样性调查、土壤类型、水文分布和社会经济等多源异构数据融合起来，按照科学的评价指标体系，准确识别出需要实行最严格保护的生态空间，形成具有法律效力的空间矢量数据。

根据生态保护红线划定成果实行空间管制，是保证红线“划得实、守得住”的重要环节。空间管制区划就是利用 GIS 的空间分析功能，以生态保护红线为圆心，向外层层展开，设立不同等级的管控区，即核心保护区、缓冲区、试验区等等，对各个层级区域内的开发建设活动制定不同的准入清单和管控要求。在核心区不得开展任何开发建设活动，在缓冲区限制对生态系统功能造成破坏的人类活动，在试验区内可进行不影响主导生态功能的适度活动。这种从内向外、由严到松的圈层式管理模式，把宏观生态保护原则转化为微观空间管理措施，给各级政府和项目建设单位指明了行动方向，有效地防止了生态红线被蚕食、被破坏。

（三）生态保护红线在环评中的应用与实践

生态保护红线、空间管制区划在具体的建设项目环境影响评价中运用，就成为一项带有强制性约束的审查要点。环评工作根据官方发布的生态保护红线矢量数据，对项目选址、线路走向、占地范围等做空间叠加对比判断，是否碰到生态保护红线。该过程对空间数据精度以及分析严谨性要求很高，任何占压、穿越或者对红线内生态环境造成较大影响的行为，都会成为项目审批过程中无法逾越的障碍。

当项目选址不可避免地靠近生态保护红线的时候，环评工作就要利用 GIS 做更深入的影响预测和评价。可以通过建立缓冲区来分析施工期扬尘、噪声对红线内生态系统扩散的影响和累积效应，分析运营期废水、废气排放对红线内生态系统扩散的影响。对项目可能引起的水文情势改变、生物廊道阻隔等间接生态影响也要做专题论证。这些分析可以给评价项目与生态保护红线之间的关系提供定量依据，也是判断项目可行性和制定生态保护措施的前提。

环评报告要根据 GIS 分析结果提出切实可行的生态保护对策和补偿措施，形成一个系统的工作流程。

1. 数据匹配与合规性审查，首先要取得国家或者地方权威部门发布的最新生态保护红线管控数据，采用坐标转换、投影匹配等方法，使项目范围与红线数据处于同一空间基准上，然后进行精准无误的叠加分析，最后出具项目与红线的空间位置关系专题图件。

2. 利用 GIS 模型模拟项目在红线区建设、运营后，道路建设造成动物迁徙廊道被切断的效应，工业项目排放造成的临近水源涵养林的影响等。

3. 规避、减缓、补偿措施的制定，根据影响评价结果，首先应该考虑通过优化项目设计、调整布局等方式来避免或者减轻项目对红线的直接或者间接影响。对无法规避的负面影响要制定严格的减缓措施，按照占补平衡原则提出生态补偿方案，利用 GIS 对补偿地块进行适宜性评价，在其他区域实施生态修复或者功能重建。

长效监管机制的建立同样离不开 GIS 技术。项目建成后，利用高分辨率遥感影像、无人机监测等手段，依靠 GIS 平台开展时序变化分析，可以实现对项目周边生态保护红线区域生态环境状况的动态监测，评价生态补偿措施的落实效果。这套天地一体化的监测系统，可以保证环评阶段所做的各项生态保护承诺得以落实，给坚守生态红线、保持区域碳汇能力提供技术保障。

二、环境风险事故模拟与扩散路径分析

双碳背景下，新能源、储能、碳捕集、利用、封存等项目会带来新的环境风险类型。使用 GIS 进行风险事故模拟和扩散分析，可以直观地表现出潜在事故的影响范围、时空变化过程，给科学有效的风险防范和应急预案的制定提供决策支持。

（一）大气、水体污染扩散模型与 GIS 集成

大气和水体污染扩散模型属于环境风险评价领域里，用来预估污染物迁移转化规律的数学工具，高斯烟羽模型常被用来模拟点源大气污染物的扩散，MIKE、EFDC 等水环境模型可以模拟污染物在河流、湖库中输移衰减的过程。这些模型本身就在做复杂的物理化学方程的计算。将专业模型同 GIS 深度整合，可以明显改善风险评价的直观性、精确性以及空间分析水平，达成由抽象数值运

算到空间化决策支撑的飞跃。

GIS 在这两个重要的阶段里起的作用是不同的。模型计算之前 GIS 可以提供详细的参数支持。在大气扩散模型中, GIS 利用高程数据生成的数字地形模型, 充分考虑地形起伏对气流的影响, 用土地利用分类数据确定不同下垫面的地表粗糙度, 准确找到污染源及周边敏感目标的空间坐标。水体扩散模型用 GIS 可以得到河网水系、断面形态、水文站点等关键的地理信息。空间化的输入数据更能反映现实环境的情况, 可以提高模拟的准确性。

模型运算结束后, 就会产生大量的时空数据, 也就是每个时刻、每个空间位置的污染物浓度值被导入到 GIS 平台。这时 GIS 强大的空间分析和可视化功能就发挥了关键作用。可以将分散的、大量的数据点转换成易于理解的图形信息, 产生动态的污染物浓度等值线图、三维扩散云图、影响范围包络线等可视化成果, 形象地表现出事故发生后污染团移动路径、影响半径及浓度峰值出现时间、地点等。可视化结果一方面可以给环评报告提供有力的技术图件支持, 另一方面可以为风险管理及应急响应部门提供战场态势图, 使应急人员、物资的调配以及污染控制等重要决策获得重要的信息。

（二）风险区划与应急避难场所选址

环境风险区划是以风险事故模拟结果为依据, 对可能发生事故影响的区域按照安全等级进行划分, 是实现差异化风险管理与土地利用管制的前提。在 GIS 平台上可以将多种可信事故情景下的最大影响范围叠加起来, 考虑事故发生概率、后果严重程度、环境敏感目标分布等各因素, 把风险区域划分成重大风险区 E、较大风险区、一般风险区等等级。化工厂周围地区可以依照有毒气体泄漏后形成的较大影响区域及浓度、人口密度和生态敏感区分布情况, 来确定需要严格控制开发或者划出隔离带的核心风险区。无形风险因此被具象化、空间化, 为区域规划、项目布局的风险规避提供了明确空间指导。

应急避难场所的选址属于应急预案的重要内容, 它的好坏直接影响到公众的生命安全。GIS 是解决这类复杂的空间决策问题的最佳工具。选址过程一般被视作一个多准则的地理空间分析任务。根据风险区划结果, 候选避难场所必须位于风险区范围之外, 保证自身安全。可以利用 GIS 网络分析功能对候选点进行可达性分析, 计算居民区到避难所的疏散时间, 从而选择交通便利、疏散路径通畅的位置。叠加学校、体育馆等公共设施、供水供电等基础设施及医疗资源分布图层,

保证避难场所有必要的服务保障能力以及容纳能力。根据这些准则来赋予不同的权重，进行空间叠加分析，从而得出综合条件最好的应急避难场所，并规划出最佳的疏散路径。

（三）GIS 在动态应急决策中的应用

静态风险区划、预设避难所属于风险管理的基础环节，但实战当中对应急响应的时效性、动态适应性要求越来越高。因此，创建集成实时数据与动态模型的 GIS 应急决策支持系统，成了环境影响评价后期设计和风险控制措施的重要发展方向。该系统冲破了传统环评报告里固定风险图件的局限，能够依照实际事故状况以及环境状况，实时评判风险并调度应急资源，达成从预见性规划到现场化动态应对的转变。

高效 GIS 应急决策支持系统的核心就是实时接入数据以及快速响应模型。它同气象站即时气象数据（风向，风速，气压），水文监测数据（流速，流量），交通路况等信息实现直连。当环境风险事故（化学品泄漏等）发生时，现场信息立刻输入系统，系统立即调用内置扩散模型，根据最新的环境参数重新计算，在很短的时间内得到当前条件下污染物扩散的预测结果，并以动态地图的形式推送给指挥人员。即时演算、动态可视化能力大大提高了应急决策的针对性、时效性，有效地防止了因为过度依赖静态预案而造成的误判。

在此基础上系统可以对应急避难、救援路径进行动态规划。传统的避难场所位置及疏散路线多是按照一般情况而设计的，在真实的事故中，道路由于事故本身或者次生灾害等原因可能会被阻断，或者出现严重的交通拥堵。动态应急系统根据实时路况信息以及新生成的污染扩散范围，自动规避危险区域、避开拥堵路段，给各个区域的民众规划出当前最优、最安全的疏散路线，引导他们到没有被污染、容量充足的避难场所。系统可以给消防、医疗等救援队伍规划出最快的救援进入路线。智能化的路径规划会大大缩短应急响应时间，提高疏散和救援的成功率，从而实现项目从环评风险预测到运营期风险控制的闭环管理。

第四节 人工智能环评预测模型

一、机器学习在环境质量预测中的应用

机器学习属于人工智能的一个重要分支，通过建立算法使得计算机能够从大量的数据中自学习规律和模式，给环境质量的动态预测提供了强有力的技术支持。在环境影响评价方面，机器学习模型可以对建设项目所造成的环境要素变化进行定量预测，使得项目对于环境的影响程度及范围更加准确地被评价出来，进而帮助决策者制定出更为有效的污染防控以及碳减排策略。

（一）基于神经网络的大气污染物浓度预测

神经网络，尤其是人工神经网络，模仿人脑神经元连接的方式处理信息，非常适合解决大气污染这类复杂的非线性问题。在双碳目标之下，正确预估大气污染物浓度对区域空气质量达标十分重要，而且和温室气体协同减排存在关联。基于神经网络的预测模型可以将气象数据（风速、温度、湿度）、污染源排放清单、地理信息、历史污染物浓度等数据融合在一起，经过训练后学习这些数据之间复杂的内在关系。

该模型最大的优点就是具有很强的自适应学习能力。经过对大量的历史数据进行训练之后，神经网络可以找到传统统计模型所不能发现的非线性动态关系，即在不同的气象条件下，污染物的生成、输送和扩散的规律。因此模型可以预测出未来某一时刻（小时、日、周）PM_{2.5}、O₃、SO₂、NO_x等主要污染物的浓度水平，也可以模拟产业结构调整、能源替代、交通管制等各种减排情景下空气质量改善的效果。

神经网络模型已经成为了工程实践当中重污染天气预警、环评大气环境影响预测的重要辅助手段。可以对某一工业项目或者城市发展规划，给周边及区域空气质量造成的影响进行长期累积性的评价，并且可以量化其与碳排放之间的协同变化。拿新建热电厂项目来讲，采用神经网络模型可预估不同运行负荷以及环保措施之下，污染物浓度与碳排放总量对于周边区域产生的影响，从而给环评决策和后续监管赋予精细的数据支撑。

（二）支持向量机在水环境影响预测中的应用

支持向量机是基于统计学习理论的一种机器学习方法，它的主要思想就是寻

找一个最优超平面，在高维空间里完成数据的分类或者回归。对小样本、非线性、高维问题，支持向量机有独特的优势，在水环境影响预测方面得到广泛应用。水环评中对建设项目排污对受纳水体水质的影响进行预测，是水环评的重要内容之一，而支持向量机为解决这一问题提供了一种有效的、可靠的方法。

支持向量机模型在工程中常被用来预测重要的水质指标，比如化学需氧量、生化需氧量、氨氮、总磷等。其输入数据一般包含上游水质背景值、水文条件（流量、流速）、排污口排放浓度和排放量、相关气象因素等。用历史监测数据来训练支持向量机，就可以得到输入变量和下游某个断面水质指标之间的非线性映射关系。相对于传统的物理模型，支持向量机不需要复杂的机理分析、参数校准，建模过程比较简单，而且预测精度高。在评价某化工园区废水排放对河流影响时，环评工程师可以利用训练好的支持向量机模型，快速预测不同排放标准、事故风险情景下下游饮用水源保护区水质的响应情况，为排污许可量确定和应急预案制定提供科学依据。

二、深度学习在复杂环境系统模拟中的应用

深度学习属于机器学习中的一个前沿研究领域，它用建立的更深层次的神经网络结构，大大提高从数据中抽取更高级、更高层次特征的能力。环境科学领域中，生态系统、气候系统等都是高度复杂的系统，它们具有时空变化性、多种因素相互关联等特点，传统的算法难以解决这些问题，而深度学习模型可以很好地克服这些难题，为“双碳”目标下的精细化环境管理提供全新的技术途径。

（一）循环神经网络在时序数据预测中的优势

环境系统中的污染物浓度、温室气体排放量、河流径流量、气象要素等很多数据都具有很强的时序性。循环神经网络是一种专门处理序列数据的神经网络，它内部的循环结构可以“记住”过去的信息，因此能够很好地捕捉到数据在时间上所表现出的依赖关系。因此循环神经网络以及它的变种（LSTM、GRU）在环境时序数据预测中具有明显的优势。

循环神经网络对于非线性、非平稳动态过程的处理能力比传统的时间序列分析模型要强。在预测区域未来碳排放趋势的时候，循环神经网络模型可以学习历史排放数据的周期性和趋势性，也可以把宏观经济指标、能源消费结构、技术进步等当作外部输入，对这些因素随时间变化而产生的复杂影响加以综合分析。这

对评价碳达峰路径和碳中和策略的长期有效性来说十分重要。

循环神经网络模型在水文方面也有很好的表现。利用降雨量、蒸发量、上游来水等历史序列数据进行学习，可以对水库的入库流量或者城市内涝风险点的水位变化进行预测，给水资源优化调度以及防洪预警提供强有力的支撑。在全球气候变化的背景下，极端天气事件频繁出现，循环神经网络可以学习到历史数据中这些极端天气事件的模式，提高对未来突发水环境事件的预测能力。

循环神经网络依靠它特有的记忆机制，给环境系统动态变化的研究提供了一种强大的分析手段。它可以把历史经验融入到对未来判断当中，使环境影响评价工作不再只是静态的评价，而可以对项目全生命周期内产生的动态环境影响做更深刻、更长远的模拟预测。

（二）卷积神经网络在图像识别与分类中的应用

卷积神经网络属于针对阵列状数据的深度学习网络架构，它依靠卷积与池化的运作方式层层剖析出图像数据所蕴含的边沿、纹理及复杂形体等特性，进而完成对图片内容做精准识别以及进行分类的任务。其在图像识别、分类方面取得的成功应用，给环境监测和评价开辟了一条新途径。卷积神经网络可以自动提取图像的空间层次特征，因此可以从卫星遥感影像、无人机航拍照片、地面监控视频中识别和分类地物、判断污染源、监测生态变化，给环境影响评价提供直观、宏观、动态的证据。

在双碳目标之下，土地利用变化以及生态系统碳汇能力的监测变得愈加关键，而卷积神经网络在此方面有着独特的优势。

CNN 在环境影响评价中的应用

应用领域	具体功能	环评价值
生态系统与土地利用监测	对森林、草地、湿地、农田等生态系统进行自动分类和动态监测；准确计算各类生态系统面积变化；评估碳汇能力；识别毁林、开垦、城市扩张等负面人类活动；自动检测地表扰动范围、植被破坏情况、土地利用类型变化；分析区域卫星影像，识别生态保护红线、基本农田、自然保护区等敏感区域。	提高监测效率和精度；为碳汇评估、生态影响定量评价提供视觉证据；辅助项目选址避让敏感区域；监测施工运营期环境影响。
污染源与环境事件识别	分析工业区遥感影像，自动识别疑似非法排污口、固废堆放点；分析水体影像，快速定位蓝藻水华爆发区域及严重程度；交通流量观测，估算移动源污染物排放量和碳排放量。	提升污染源发现和事件响应速度；为城市交通规划管理提供科学依据；有助于环境执法与监管。

上表汇总了卷积神经网络在环境影响评价中的主要应用及其价值。

卷积神经网络可以把非结构化的图像信息转换成结构化的环境信息，给评价提供客观的依据。相比传统的定性描述来说，用视觉证据进行评价更加直观可信。

三、AI 辅助环评报告编制与审查

传统的环境影响评价报告编制审查工作程序很复杂，数据核实、法规匹配等工作需要花费很大的人力物力，容易受到主观因素的影响。以自然语言处理和知识图谱为技术核心的人工智能，正在改变环评工作模式，目的在于使环评全过程实现自动化、标准化、智能化，从而大大提高工作效率和审查准确率。

（一）自然语言处理在报告信息提取中的应用

环境影响评价报告、技术标准、法律法规、科研文献等一起组成了环评工作海量的文本依据。自然语言处理技术使计算机可以阅读文本、理解文本并且从中提取关键信息。该技术用命名实体识别、关系抽取、文本分类等任务自动识别出文本中所提项目名称、地点、污染物种类、排放标准、工艺参数、环保措施等重要实体以及它们之间关系。

环评报告的编写中，自然语言处理技术可以协助编写者从大量背景材料中检索、整合出需要的信息，获取地方环境规划文件里有关管制标准，也可以借鉴同类项目的环评报告中的污染治理技术和经验。不但可以大大减少资料查阅的工作量，而且能够保证信息的完整性、准确性。环评工程师因此可以把更多的精力用在影响分析和判断上，而不是繁琐的文本整理。

对环评管理部门来说，自然语言处理的应用价值也很大。审查人员面对大量的报告时可以利用自然语言处理工具做预处理，自动提取出报告的核心信息，形成结构化的摘要或者数据表。因此系统能够立即判断出污染物排放总量是否超标、预测模型是否合规、环保措施是否明确等等重要问题，给下一步专家深度审核指明方向。

（二）基于知识库的环评合规性智能审查

为了达到更高层次的智能审查，就要把分散的法律法规、环境标准、行业准则、专家经验等整合成系统的知识库或者知识图谱。知识库以结构化的形式存储环评所用的各种规则、知识，是智能审查系统的核心。根据知识库，人工智能系统可以对环评报告进行深层次的合规性自动校验，它所采用的逻辑远远大于简单

的关键词匹配。

智能审查系统用自然语言处理技术提取环评报告的项目特点、污染物排放数据、评价结果等信息，然后与知识库规则进行推理。系统可以按照项目所在行业、建设地点自动匹配相应的国家、地方排放标准；检查报告中所用的预测模型是否符合相关技术导则推荐的规范；根据项目产生的污染物特性，从知识库中检索并推荐最佳可行治理技术；并对报告中选择的技术方案是否合理进行评价。系统检测到报告内容与规则库不匹配或者不一致的时候，就会自动生成审查意见，高亮标示出问题章节并提示。

第五节 数字孪生技术在环评中的应用

一、环评数字孪生体构建框架

要建构精准、高效、实用的环评数字孪生体，充分发挥它在双碳目标下环境管理的价值，就必须要有有一个系统化的框架。该框架要将复杂的物理环境和项目活动转化成可以计算、可以推演的虚拟空间，实现数据驱动的环境影响智能分析和决策支持，核心就是建立物理和虚拟之间双向动态交互的机制。

（一）物理实体与虚拟模型的交互映射

环评数字孪生体核心在于物理实体与虚拟模型之间实时双向交互映射。物理实体可以是单个污染源、建设项目、工业园区、城市等复杂的环评对象。虚拟模型是物理实体在数字空间中高保真的镜像，不单是静态三维几何模型，而且是带有各种数据的动态过程模型。映射建立依靠物联网、传感器网络、卫星遥感等先进的技术实现对环境要素、能源消耗、物料流转、污染物排放等实时的在线监测数据采集。

海量数据依靠 5G 等高速通信网络及时传递，带动虚拟模型的动态变化，使虚拟空间的状态同物理世界保持同步。虚拟模型仿真、预测、优化的结果可以转化成指令或者控制参数，反馈给物理实体管理者或者自动化控制系统，形成感知、分析、决策、控制的闭环。以某化工企业生产为例，在数字孪生之后就可以对碳排放以及污染物的产生情况实时监测。当虚拟模型预测排放会超标的时候，可以提前对物理生产线的工艺参数进行调整，从而达到污染源头防控、碳排放精细化

管控的目的。

（二）多尺度、多物理场融合建模

环境影响的发生和发展是多尺度、多物理场耦合的复杂过程，所以环评数字孪生体要具备多尺度、多物理场融合建模的能力。这就要求模型可以对微观物理化学反应做准确的描述，也能对宏观环境效应做精确的模拟，不同尺度的模型之间要无缝衔接，才能构成统一、系统化的仿真环境。

多尺度特征在空间和时间两个方面都存在。模型要包含单个设备（锅炉、反应釜）的排放特性、整个厂区的污染物扩散、区域尺度（城市、流域）的环境质量演变。时间上要模拟秒级的瞬时排放事件、小时级的生产波动影响、天级的累积环境效应和碳足迹。评价新建数据中心环境影响的时候，数字孪生模型要融合机架级能耗散热模型、建筑级暖通空调系统能效模型、区域电网碳排放因子模型，才能达成项目全生命周期碳排放跨尺度精确核算。

多物理场融合属于环评数字孪生体的技术难点。环境系统内部大气、水、土壤、生态等不同的圈层之间，热力学、流体力学、电磁学、化学反应动力学等不同的物理过程之间，都存在着复杂的相互作用。高保真的环评数字孪生体要能耦合这些物理模型。在火电厂环评中，需要把燃烧过程的热力学、化学反应模型同烟气排放的计算流体力学模型、污染物在大气中扩散和化学转化模型、温排水对水体环境的热污染模型等耦合起来进行仿真。由此可以完成链式环境效应融合建模，使项目建设所引发的链式环境效应得到更全面系统的体现，克服传统单一因子评价的局限性，给双碳目标下的协同减污降碳决策提供科学依据。

二、数字孪生在项目环评方案比选中的应用

在项目前期决策阶段选择环境友好、低碳高效的建设方案，属于落实双碳目标的重要环节。数字孪生技术用创建项目各个方案的虚拟副本，在虚拟空间里进行“预演”，把方案比选从依靠静态数据、经验判断转变为动态仿真、量化分析的科学决策，大大提高了环评的科学性、前瞻性。

（一）不同工艺方案的环境影响虚拟仿真

传统的项目环评方案比选大多采用物料衡算、产污系数法等静态、粗略的估算方法，不能很好地反映不同的工艺方案在实际运行条件下动态的环境表现，在碳排放核算方面存在较大的不确定性。数字孪生技术出现之后改变了这一局面。

根据拟建项目不同的工艺路线、设备选型、污染治理技术、资源能源利用方案等，分别建立数字孪生模型。

工程师和环评人员在虚拟仿真环境中输入方案设计参数、预计生产负荷、原辅材料性质、本地区的气象和水文等边界条件到模型里。数字孪生模型会使用内嵌的机理模型以及算法，对于每一个方案的全流程做动态的模拟。过程可以精细到每一个关键设备单元的能源消耗、化学反应产生的温室气体量、末端治理设施的污染物削减率。运行仿真之后，系统可以得到高精度、高时空分辨率的环境影响数据，即不同生产工况下碳排放曲线、各类污染物排放通量及时空分布、综合能源和水资源消耗变化。

虚拟仿真不仅可以给出各个方案环境影响的量化比较结果，也可以揭示出其背后的影响机理。决策者可以清楚地看到某种先进工艺怎样实现更低的碳排放，或者某种循环利用方案在减少物料消耗的同时怎样降低固体废物产生。“所见即所得”的深刻认识，使得方案比选依据更加充分、透明、科学，有利于在项目设计之初就将双碳目标深度融入，保证项目设计阶段就实现绿色低碳发展。

（二）实时、动态、可视化的环境影响评估

数字孪生技术把环评由一份静态的报告文本，变为一个可以实时、动态、交互的可视化评价平台。由此转变使环评结论变得更加直观、可理解，给项目各方利益相关者赋予了共同的沟通语言和决策平台，达成环境影响评价进程的透明化、民主化。

实时性、动态性就是数字孪生评价的最大特点。方案比选阶段的评价不再是静态的一次性计算，而是一个可以反复推演的过程。决策者可以对虚拟模型的参数进行调整，做各种假设情景分析。可以模拟原料价格波动对生产成本、碳排放的影响，测试不同的环保投入水平下污染控制效果的差异，也可以预演极端天气（暴雨、持续高温）下生产系统环境风险及应急响应能力。交互式动态演算使得环评不再是按照固定的设计工况来进行，可以考虑到各种不确定因素，从而制定出更具适应性的环境管理方案。

可视化是把复杂的数据转换成直观的决策。数字孪生平台一般会配备强大的三维可视化引擎，可以将抽象的环境影响数据用直观的图形方式表现出来。

1. 空间可视化，把污染物扩散模型的结果和项目周边三维地理信息模型叠加，得到动态的污染云图或者浓度等值线图，形象地表现出污染物对周围敏感目标的

影响范围和程度。碳排放可以通过建立碳足迹地图来体现，动态展示项目内各个单元的碳排放贡献。

2. 多维度数据仪表盘：可以对单位产品碳排放强度、能源回收率、水循环利用率等重要环境绩效指标进行实时展示，也可以与行业基准或者政策目标进行比较。图表、曲线、热力图等可视化手段使决策者可以一眼看出各种方案的好坏。沉浸式、交互式的可视化评价体验可以提高决策效率，也可以使公众更多的参与到环评中来，使环评过程更加科学、公正、高效，为双碳目标下高质量项目的落地打下基础。

三、数字孪生在规划环评与智慧城市管理中的应用

从项目环评发展到现在区域规划环评，其复杂性成指数级增长。数字孪生技术依靠宏观尺度的整合与模拟能力，给破解规划环评难题、助力智慧城市可持续发展赋予了革命性手段，在城市整体碳达峰、碳中和路径规划方面，体现出无法比拟的潜力。

（一）城市碳排放数字孪生系统构建

创建城市级碳排放数字孪生系统，是实现区域碳管理精细化、智能化的前提。该系统目的在于创建一个与真实城市同步运行的虚拟城市，全面、动态、准确地反映城市社会经济活动和碳排放之间复杂的关系。这就需要把城市各处大量的异构数据整合在一起，形成一个庞大的、互相联系的模型簇。

系统建立之初就对城市碳排放源进行全方位的数字化。工业园区内重点企业的生产线、能源系统建模；城市交通网络中车流量、车型结构、道路拥堵状况的实时模拟；数以万计的公共与民用建筑的能源消耗动态监测与建模；城市电网、热力管网的能源供给结构及输配效率仿真。数据源是分布在城市各个角落的物联网传感器、智能电表、交通监控摄像头、企业在线监测系统、政务数据共享平台等汇集起来的城市碳排放的神经网络。

在数据的基础上，系统利用机理模型和数据驱动模型，建立能源、工业、建筑、交通、废弃物处理等各个主要领域的碳排放核算与预测模型。用交通碳排放模型，结合实时路况数据计算每条路的碳排放；建筑碳排放模型可以利用天气预报、建筑围护结构参数预估未来用能需求。所有的子模型都是同一套地理信息系统平台中创建而成的，这样就可以共同形成体现城市碳循环全过程、动态发展

的数字孪生体。该系统既是碳排放的“会计账本”，又是可以推演未来的“碳排放实验室”。

（二）规划方案实施效果的预评估与优化

城市碳排放数字孪生系统最核心的应用价值，就是对未来的规划方案效果做科学的预评估，并不断优化。城市管理者在对产业结构调整、能源结构转型、城市空间布局优化、交通基础设施建设等重大规划进行决策的时候，可以借助数字孪生系统做前瞻性的模拟推演，对各个规划方案给城市整体碳排放轨迹带来的影响进行量化分析。

预评估阶段规划者把待选的规划方案参数化之后输入数字孪生系统。新区开发规划中土地利用类型、建筑密度、产业准入清单、交通网络设计等都可以作为输入。系统会对规划执行后几十年内该区域和城市碳排放增量进行预测，即未来几十年该地区和城市的增长、产业活动、交通流量、能源需求变化情况的预估。通过对不同的规划方案（紧凑型发展、摊大饼式扩张等）进行模拟，决策者可以清楚地看到哪种方案有利于城市早日实现碳达峰，距离碳中和目标还剩多少。

数字孪生能够对规划方案进行迭代优化。模拟结果显示，该产业园规划的经济效益虽然较好，但是其耗能、碳排放增加，会造成全市减排目标无法实现。此时规划者可以在虚拟系统中进行调整和试验，提高园区内企业能效准入门槛、规划分布式可再生能源设施、优化公共交通接驳方案。经过持续模拟、评价、调整，可以找到一个既可实现经济发展和社会民生，又可达成双碳目标的最佳平衡点。用数字孪生来完成规划环评，将传统的滞后评估方式转变为贯穿规划全过程的动态、交互式的决策支持，使城市发展每一步都走在绿色低碳的道路上，为智慧城市的可持续治理和双碳目标的实现提供强有力的科学支撑。

第七章 生命周期评价方法创新

第一节 生命周期评价理论框架

一、生命周期评价的四个阶段与技术框架

生命周期评价依照国际标准化组织制定的 ISO 14040 系列标准，技术架构被分为目标和范围的确定、清单分析、影响评价、结果解释四个互相联系的阶段。理解并正确使用这个框架是进行任何生命周期评价的前提和保证，保证评价过程的系统性、透明度。

（一）目标与范围定义的关键要素

生命周期评价的第一阶段是目标和范围的确定。它给整个评价过程指明方向、确定边界，保证研究的科学性、相关性和一致性。该阶段的成果直接决定了后面所有步骤是否有效。清晰的目标和范围可以防止研究偏离、结果误读，是建立可信的生命周期评价研究的基础。该阶段的主要任务是确定研究目的，即内部产品改进、外部环境声明或者政策支持决策等。

此阶段的关键要素很多，其中功能单位的确定最为重要。功能单位是对研究产品系统性能的量化描述，它给不同的系统间比较提供了一个统一的标准，保证了不同系统间的比较公平合理。以比较不同种类饮料包装为例，功能单位是“容纳并保护一升饮料直到饮用完毕”，而不是只比较单位质量的包装材料。系统边界的划定也属于关键环节，它确定了应该包含在评价范围内的单元过程。系统边界可以分为从原材料开采到产品出厂的“从摇篮到大门”模式，也可以是包含产品整个生命周期的“从摇篮到坟墓”模式。

系统边界的选取既要考虑研究目的，也要考虑实际操作的可性。边界过宽会导致数据收集的工作量非常大，难以完成，边界过窄则会忽略重要的上游或者下游环境影响，从而得出片面的结论。还要确定分配原则，即一个生产过程产出多种有价值的产品时，怎样合理地把环境负荷在这些产品之间进行分配。数据质量要求属于范围定义的一部分，它对研究所需数据的精度、时间代表性、地理代

表性、技术代表性做了规定，为下一步数据采集工作指明了方向。

（二）生命周期清单分析方法

生命周期清单分析在生命周期评价中最繁杂、耗时最长，因为需要的数据量最多。本步骤的目的是对系统边界内所有的单元过程的输入输出进行量化，编制一份详细的“环境账单”。清单上列出的是从环境中取得的原材料、能源，以及向环境中排放的各种污染物。清单的准确性、完整性直接影响整个生命周期评价研究的质量，是后面影响评价的基础。

清单分析的过程通常涉及以下几个关键环节：

1. 绘制产品系统流程图，清楚地表现出所有的单元过程以及它们之间的关系。有利于对所有的数据采集环节进行系统性的识别，不会遗漏。

2. 数据来源有两个方面，即一手数据和二手数据。一手数据是通过现场测量、企业调研等方式直接获得的，准确率高、代表性也强，但是获取成本也较高。二手数据来源于公开发布的生命周期评价数据库（Ecoinvent、中国本土化数据库 CLCD 等）、文献、行业报告等，虽然获取方便，但是可能存在代表性不足的问题。在双碳背景之下，得到高质量的本土化能源、交通以及原材料生产数据就变得非常关键。

3. 数据汇总与关联，将所有的单元过程数据汇总、关联到功能单位上，就是清单分析的核心计算环节。处理多功能过程的分配问题属于一大难题。分配的方法有按照物理关系（质量、能量）的分配和按照经济价值的分配。数据汇总后还要对数据进行验证，保证数据的完整性、一致性和合理性，从而保证清单结果的可靠性。

二、生命周期影响评价方法

生命周期影响评价阶段的主要任务，就是对生命周期清单分析所识别出的资源消耗、环境排放有多大程度上造成潜在环境影响进行理解和评价。其目的是把冗长的清单数据变成数量较少的环境影响指标，使决策者更容易地把握住产品系统主要的环境问题，为优化设计和管理提供科学依据。

（一）特征化、归一化与加权步骤

特征化是生命周期影响评价的重要步骤，其主要目的是把清单分析中众多的物质、能量流转化成有限的环境影响潜力。用特征化因子来实现，即把不同的

温室气体排放量乘以各自的全球变暖潜能值，从而统一换算成二氧化碳当量。如此一来，成百上千种清单物质就被归类为全球变暖、酸化、富营养化等具体环境影响类别中，使复杂的数字信息变得易于理解和比较。

特征化之后可以继续进行归一化的操作。归一化就是将不同的影响因素的指标值同某个参考值做比较，从而得到它的相对重要性。参考值一般是指某一国家或者全球范围内某一特定时期内（比如一年）所有活动所产生的总环境影响。经过归一化之后，研究者可以知道产品系统在哪些环境影响方面比社会总体背景更突出。如某产品碳排放量仅占区域总量的万分之一，但水体富营养化影响却占到万分之一，说明水体富营养化问题更应引起重视。

加权是生命周期影响评价中一个可选的带有主观性的步骤。给不同的环境影响类别赋予权重系数，然后将各个标准化值进行加权求和，得到综合环境指数或者多个环境指数的叠加。权重一般采用专家判断法、社会调查法或者政策目标（即距离目标法）来确定。在“双碳”目标的引领下，气候变化的影响一般会得到较高的权重。加权之后不同产品的好坏比较就会变得简单明了。虽然单一指标比较直观易解，但是也有可能因为隐藏某一类环境负荷而得出误导性的结论。因此在使用时需要格外小心，要充分说明所依据的价值判断。

（二）中间点法与终点法对比

在特征化阶段，生命周期影响评价模型主要有中间点法和终点法两种方法学途径。这两种方式在环境机理链中处于不同的位置，各有利弊。选择哪一条路径，要看研究目的和沟通对象。

中间点法是在环境因果链的中间环节上对影响进行量化的。它所关注的是可能产生的环境问题，而不是最终造成的损害。气候变化影响类别的中间点指标一般就是辐射强迫或全球变暖潜能值，酸化影响类别的中间点指标是酸沉降潜能值。这些指标和清单数据（温室气体排放量）的关系更加直接，科学模型比较成熟，不确定性小。因此中间点法在学术界和专业技术人员中被广泛使用，因为中间点法的结果更稳健、更易于检验。常用的中间点法有 CML、TRACI 等。

终点法就是沿着因果链追溯到最底层的保护对象，也就是所谓的“保护领域”。这些保护领域一般被定义为人类健康、生态系统质量、资源可用性这三个方面。它用来衡量温室气体排放最终给人类健康（热浪引发的疾病）和生态系统（生物多样性丧失）带来的危害。终点法结果常用残疾调整生命年、物种消失年等容易

理解的单位来表示，这使环境影响最终严重性的传达更加有效。但是从中间点到终点的建模过程要更多的环境模型和价值判断，因此其不确定性通常比中间点法大。代表性的终点法有 Eco-indicator 99、IMPACT 2002+ 等。

中间点法和终点法的核心区别，可见下表：

中间点法与终点法对比表

特性	中间点法	终点法
评估位置	环境因果链中间环节	环境因果链末端，底层保护对象
关注点	潜在的环境问题，如辐射强迫、酸化潜能值	最终的损害结果，如对人类健康、生态系统质量、资源可用性的危害
指标示例	全球变暖潜能值、酸沉降潜能值	残疾调整生命年、物种消失年、资源耗竭量
模型成熟度	科学模型相对成熟，不确定性较小	需要更多环境模型和价值判断，不确定性较高
结果稳健性	结果更为稳健且易于验证	结果易受主观判断影响，稳健性相对较低
适用对象	学术界、专业技术人员	公众、非专业决策者（更易理解）
代表方法	CML、TRACI 等	Eco-indicator 99、IMPACT 2002+ 等

三、生命周期评价的局限性与发展方向

虽然生命周期评价是现在公认最全面的一种环境评价方法，但同样存在一些固有的不足。认识清楚这些不足，并积极寻找解决办法，是推进生命周期评价方法学不断进步、更好地服务于“双碳”目标等复杂的环保管理需求的有效途径。

（一）数据可获得性与不确定性问题

数据是生命周期评价的血液，高质量的数据获取是目前生命周期评价实践所面临的主要难题之一。生命周期清单分析阶段要大量数据，能源、原材料、生产工艺、运输、废物处理等各个环节的数据。在很多情况下，尤其是对于新兴技术或者特定区域的供应链来说，准确的一手数据很难取得。研究者常常要依靠普适性但是准确性有待考证的二手数据库。就中国而言，创建符合本国产业结构和能源结构、技术水平的本地化生命周期评价数据库，才是实现准确碳核算和环境评价的关键。数据缺失或者低质量都会造成不确定性，从而影响评价结果的可靠性。

不确定性存在于生命周期评价的全过程之中，它产生的原因有测量误差、数据样本代表性不够、分配方法的选择以及影响评价模型中的科学假设等。忽略不确定性会造成生命周期评价结果精确，实际上却有较大偏差。因此，不确定性量

化的管理就显得尤为重要。目前常用的方法有敏感性分析来识别对结果影响较大的参数,用蒙特卡洛模拟等方法分析最终结果的分布范围和置信区间。生命周期评价报告中对不确定性的来源要进行透明化的表达,并且对敏感性分析的结果要做出说明,这是保证研究结论可信度的重要环节。

（二）与空间、时间维度结合的挑战

传统生命周期评价方法的一个明显不足就是没有考虑到空间维度。大多数影响评价模型使用的是全球或者区域平均的特征化因子,也就是说,一千克污染物无论在人口稠密的城市还是偏远的乡村排放,计算出的环境影响被看作是一样的。对光化学烟雾、水体富营养化、颗粒物对人体健康的影响等具有明显地域性的环境影响来说,这样的处理方式显然不准确。为了克服上述局限性,地理信息系统正在被逐渐融合进生命周期评价中,从而发展出区域化的生命周期影响评价方法。因此评价结果能更好地反映排放地特有的环境敏感性和人口暴露水平,给出更具有决策相关性的信息。

时间维度在传统的生命周期评价中并没有被充分地体现出来。生命周期评价一般给出的是静态的、累积的影响总和,假设背景系统(电力结构、技术效率)在整个产品生命周期内保持不变,不区分排放发生的时间点。忽略了环境影响随时间变化的特性,短期气候污染物和长期温室气体的时间效应存在较大差异。一个生命周期长达几十年的产品,其背景能源系统很可能会从以化石能源为主转为以可再生能源为主。动态生命周期评价是一种新型的解决方法,把时间变量加入清单分析、影响评价当中,使环境影响随时间变化的过程更加真实地被模拟出来,给长期规划和技术转型评估提供了更准确的支持。

第二节 产品碳足迹核算标准

一、产品碳足迹核算的原则与要求

产品碳足迹核算要遵照生命周期评价的基本架构,保证核算过程的科学性、一致性、透明度。为了保证结果的可靠性和可比性,必须严格按照国际公认的准则,确定核算的前提和范围,保证数据质量,选择合适的核算方法。

（一）功能性单位与系统边界设定

功能性单位的确定是产品碳足迹核算的基础，它用数量化的方法来描述产品的功能，为不同的产品或者服务提供一个可以比较的共同基础。它回答的是“产品提供了什么样的功能，功能水平如何”这样的问题。涂料的功能性单位可以定义为，在一定基材上可以提供 10 年保护和装饰效果的 10 平方米涂层；饮料的功能性单位可以定义为提供 500 毫升液体以解渴的功能。一个明确的功能性单位可以保证比较的公平性，避免了仅以重量或者体积来做出误导性的判断，使得不同的技术路径或者材料选择的环保效益可以被准确地衡量。

系统边界的确定，决定着哪些生命周期阶段、过程被纳入核算范围，系统的完整性、一致性影响最终结果是否准确。常用的系统边界有摇篮到坟墓（即从原材料获取、生产制造、分销运输、使用阶段到废弃处置的全过程）、摇篮到大门（即产品出厂前所包含的阶段，常用于中间产品的核算）和大门到大门（范围更小，只关注特定的生产环节）。边界的选择要和研究目标、范围相适应。设定边界时必须明确所有纳入和排除的过程，并对排除部分给出合理的解释，尤其是对那些看似很小但累积效应很大的输入（生产设备的资本品折旧、员工通勤等），应该按照 ISO 14067 等标准的截断准则来判断，一般以质量、能源或者环境相关性的贡献度为阈值，从而保证核算范围的完整性，不遗漏任何关键排放源。

（二）分配原则与分配方法

在产品碳足迹核算时，分配要解决多产品共生过程（即一个生产单元同时产出多种产品或者功能）中的环境负荷分摊难题。当一个生产流程同时产生主产品和副产品（例如炼油过程会产出汽油、柴油和石化原料）时，就要把该流程的总输入和排放合理地分配给各个联产品。国际标准 ISO 14044 给出了分层解决分配问题的方法，即核算人员应当选择能够最好地反映系统内在物理关系的方法，以最大程度地减少主观判断带来的不确定性。

该层级化原则具体建议如下：

1. 尽量避免分配：首选方案就是流程细分，即将多产出过程拆分为若干独立子过程；或者系统扩展，把副产品的功能并入系统边界内进行核算，从而规避分配问题。如果副产品可以替代市场上的其他产品生产，则可以采用减法的方式，从系统总排放中扣除被替代产品的环境负荷。

2. 不能避免的情况下，应采用能够反映潜在物理因果关系的方式进行分配。

即按产品物理性质（质量、体积、能量含量等）来分摊。木材加工时可以按质量把上游环境负荷分配给锯材和锯末。

3. 如果物理关系不能确定或者不适用，则可以采用其他的分配关系。最常用的是经济分配法，即按照不同的联产品市场销售价格或者经济价值比例分摊环境负荷。该方法认为产品经济价值可以体现其所承载环境负荷的驱动力，但在市场价格波动大或者部分产品没有市场定价的时候，其稳定性就会受到挑战。无论采取何种分配方法，都必须对核算过程进行说明并加以论证，保证核算过程的透明度。

二、不同类别产品碳足迹核算要点

因为各行业、各类产品的生命周期特征、主要排放源和数据获取难度存在着明显的差别，下表给出了各类产品碳足迹核算的关键要点。

不同类别产品碳足迹核算要点表

产品类别	生命周期特征	主要排放源	核算难点
工业制成品	供应链复杂、环节长	原材料获取、制造能耗、工业过程排放、产品使用阶段	初级数据获取难、供应链沟通、背景数据不确定性、末端处置复杂
农产品	与自然生态系统紧密关联	农业投入品（化肥）、生物过程（反刍动物肠发酵、水稻种植）、土地利用变化	非二氧化碳温室气体量化、生物地球化学过程复杂性
服务	无形、边界模糊	基础设施、消耗品、能源、人员交通、数据中心	功能单位和系统边界定义、运营模式识别、数据收集整理

（一）工业制成品碳足迹核算

工业制成品碳足迹核算复杂，它有着长链条、多环节的全球供应链。核算的关键就是准确地反映从原材料开采、加工、零部件制造、产品组装、物流运输、产品使用到最终废弃回收的全过程。原材料获取阶段的排放是主要排放源，特别是对于钢铁、水泥、铝、塑料等高耗能建材来说。制造阶段的电力、热力消耗，生产过程中的工业过程排放（化工反应）等属于核算的重点。对于电子产品等在使用过程中消耗能源的产品，其使用阶段的碳排放量甚至会超过生产阶段。

数据质量是工业品核算遇到的主要问题。企业应当尽可能取得供应商提供的初级数据（即特定场地的实测数据），从而提高准确性，但是常常会遇到数据保密以及供应链沟通障碍的情况。当初级数据无法获得时，只能用生命周期评价数

据库（Ecoinvent、GaBi）的背景数据或行业平均水平数据，存在一定的不确定性。因此对关键参数和数据的选择做敏感性分析，考察它们对最终结果的影响，是保证核算结果稳健性的必要步骤。产品末端处置阶段的回收利用率、不同处置方式（填埋、焚烧等）所占比例以及排放因子等都会对最终碳足迹数值产生影响。

（二）农产品与服务碳足迹核算

农产品碳足迹核算有自身的特点，其排放源和工业品不同。农业生产活动直接和自然生态系统发生相互作用，温室气体排放不单单来自于化石燃料燃烧所产生出的二氧化碳，更主要的是来自农业投入品和生产过程中产生的非二氧化碳温室气体。化肥施用会生成大量的氧化亚氮，它的百年尺度上的全球增温潜力是二氧化碳的近三百倍。水稻种植、反刍动物（牛羊）肠发酵都会产生大量的甲烷。土地利用方式的改变，比如毁林开荒，会造成土壤和植被中储存的碳大量释放，是农业碳足迹的重要组成部分。因此农产品碳足迹核算要准确地量化这些独特的生物地球化学过程。

而服务类产品碳足迹则更加无形，核算边界、功能单位定义也更加困难。服务本身没有物理形态，它对环境的影响主要体现在支撑服务所需要的基础设施、消耗品、能源和人员活动上。一次金融咨询服务产生的碳足迹，即咨询顾问办公室能源消耗、出差交通、数据中心服务器运行、纸张文具的生产及废弃处理。对于数字服务来说，主要的碳排放源为数据中心的巨额电力消耗以及网络传输设备的能耗。核算时需要把总体运营排放（企业层面的碳排放核算结果）按照合理的分配方式，分配到单位服务功能上，即每笔交易处理量或者每小时在线流媒体播放量。

服务碳足迹核算需要对运营模式有深刻的认识，也需要准确的活动水平数据。因为服务链条中包含众多的供应商和服务提供商，所以数据的收集和整合也十分麻烦。因此，给服务产品确定一个清晰的、可以量化的、有代表性的功能单位，并建立一个反映服务交付全过程的系统边界模型，是保证服务碳足迹核算科学性、可比性的前提。

三、碳足迹标识与认证体系

消费者环保意识提高，绿色供应链的压力不断增大，量化之后的产品碳足迹信息需要有一个有效的载体来传递给市场。碳足迹标识和认证体系应运而生，它把复杂的技术核算结果转化为易于理解、可信的标签，从而引导绿色消费和生产。

（一）国际碳足迹标签制度比较

世界各国都诞生出不同的产品碳足迹标签制度，核算标准、展示方式、推广策略等都有各自的特点。英国的碳信托标签是国际上最早开展，影响最大的一种，提供碳足迹核算、认证、标签服务，脚印形状的标签易读易懂。日本碳足迹产品制度重视生命周期各个阶段排放的详细展示，用图表的形式向消费者展示从原料到废弃各个阶段的碳排放构成，其教育意义更强。法国按照格勒内尔环境法案实行的环保标签制度，把碳足迹作为产品综合环境信息的一部分，和水足迹、生物多样性影响等指标一起展示出来，给消费者提供更全面的决策依据。

这些制度有利于企业开展碳足迹核算，也有利于提高消费者低碳意识。大多是以 ISO 14067 等国际标准为依据，但是在具体规则（数据要求、分配方法）上存在差异，给跨国企业的统一管理以及产品国际贸易带来一定困难。未来促使不同的标签制度互相承认、方法论相互协调统一，将会成为推动全球绿色贸易、促使消费者有效选择的主要方向。另外，如何简化标签信息、防止消费者信息过载、保证信息的科学性、透明度是所有碳标签制度都遇到的问题。

（二）企业产品碳足迹管理实践

企业开展产品碳足迹核算与管理，已经由原来的单纯社会责任展示转变为获取竞争优势、应对风险的核心战略工具。对产品全生命周期的碳排放进行精细化盘查，可以准确地找到供应链及生产过程中的主要排放源（即碳热点），为企业减碳指明方向。促使企业把技术改造、节能降耗、材料替换等措施投入到最有效的环节上，用较低的成本达到更好的减排效果，直接提高运营效率。

产品研发设计阶段碳足迹核算属于生态设计的重要输入。设计人员可以在产品概念阶段就对不同的材料、工艺方案的碳排放影响进行评价，把低碳理念融入到产品开发的源头。有利于企业开发出具有较强的市场竞争力、满足不断增加的绿色消费需求的绿色产品，并抢占未来低碳市场的先机。包装企业利用碳足迹分析可以发现，使用再生材料或者改善包装结构，可以大大降低产品的碳排放，从而指导新产品开发方向。

对外沟通与市场营销方面，经过第三方认证的产品碳足迹标签，是企业对外展示自己环保承诺与行动的有力凭证。可以有效地应对投资者、客户、监管机构等各方面的对企业环境绩效的质疑，提高企业品牌形象和声誉。在参与绿色采购、国际招标的时候，具有明确碳足迹信息的产品一般会更占优势。大多数大型跨国

公司把供应链碳排放量看作采购时考虑的因素之一，要求供应商提供产品的碳足迹数据。

系统产品碳足迹的管理实践已经成了企业整体碳管理战略的基础。它把宏观减排目标分解到具体的每一个产品和服务单元，使战略目标得以落实。企业对于产品碳足迹的持续跟踪与分析，可以有效地评判出自身减排举措是否有效，从而及时作出调整，为企业更高层次的碳中和路径规划给予可靠的依据，保证企业在双碳目标达成之路上稳健前行。

第三节 过程型 LCA 方法与应用

一、过程型 LCA 数据收集与建模

过程型 LCA 的关键就是严格的数据收集和模型建立。把复杂的系统分解成一系列相互关联的单元过程，对每一个单元过程都做精确的描述，最后形成完整的生命周期环境影响图景，为后面分析、优化打下坚实的基础。

（一）单元过程与系统流图构建

单元过程是过程型 LCA 模型最基本的组成单元，即产品生命周期中最小的分析步骤。这既可以是原材料的开采、零部件的加工、产品的组装，也可以是废弃物的处理。每一个单元过程的输入、能源、原料、水等都是明了的，而产出即产品、副产品和污染排放物及废物也是清楚的。构建模型的第一步就是确定产品系统中所有的单元过程，并清楚地划定边界。

将所有的单元过程识别出来之后，按照物质流、能量流传递的途径把这些单元过程连接起来，就构成了完整的系统流图。该流图清楚地表现出从摇篮（原材料获取）到坟墓（废弃处置）整个生命周期中各个环节是如何互相影响、互相作用的。塑料瓶的系统流图从原油开采开始，经炼制、聚合、注塑成型、运输、使用、回收或者废弃等过程，在图中清晰地表现出了各个阶段的物质和能源流动关系，为清单分析提供了一个清晰的框架。

（二）前景与背景数据处理

LCA 数据被分成前景数据和背景数据。前景数据是与评价目标产品直接相关、具有特定性的数据，一般是评价实施者通过实地测量、企业调研、查阅文献

等方式直接获得的数据。数据组成模型的主体，数据准确与否决定评价结果是否可靠。对某款手机进行 LCA 时，其组装工厂的电耗、特定零部件供应商生产工艺的数据等都属于前景数据。

背景数据为通用性，非特异性的数据，一般来自于专业的 LCA 数据库。它们反映的是产品系统上游或者下游的通用性过程，如电力生产、大宗化学品制造、交通运输、废物处理等。由于直接收集这些数据成本高且不切实际，因此研究者一般会使用 Ecoinvent、GaBi 等国际或者国内权威数据库来获取。

处理这两种数据的关键就是保证数据的一致性、兼容性。前景数据要经过严格的质量评价，保证它的代表性和准确性。在背景数据的选取上要兼顾地域、技术水平、时间等各方面因素的匹配度，选择最符合研究系统要求的数据集。建模的时候前景系统和背景系统通过物质或者能量流联系起来，形成完整的、可以计算的生命周期模型，保证最后评价结果具有针对性和全面性。

二、过程型 LCA 在产品生态设计中的应用

过程型 LCA 利用详细的模型、定量的结果，给产品生态设计提供强有力的决策支持。它冲破了传统设计只重视功能和成本的局限，把环境维度加入到产品开发的全部流程当中，促使设计师从源头削减产品的环境影响，助力企业达成经济效益与环境效益的双赢。

（一）识别产品生命周期的关键环境环节

过程型 LCA 最直接的应用就是找出产品生命周期中环境热点，即对总体环境影响贡献最大的阶段或过程。通过贡献度分析可以清楚的反映出原材料获取、生产制造、交通运输、产品使用、废弃处理各个环节的环境负荷情况。以家用冰箱为例，研究表明，它的主要碳排放源并不是生产环节，而是长达十多年的使用过程中所消耗的电能。

该发现为生态设计提供了一条道路。设计师、工程师可以把有限的研发资源集中到这些关键环节的改进上。一旦明确使用阶段是主要的环境负荷点，设计重心就应该转向提高能源效率，例如采用更高效压缩机、改善保温材料、优化制冷系统等。如果发现某种原材料的开采、加工等过程是主要污染源，设计团队就可以研究回收材料或者环境友好型替代材料的应用潜力。依靠数据支撑的精准定位，生态设计的投入事半功倍。

（二）材料替代与工艺优化的 LCA 评估

过程型 LCA 是评价不同设计方案环境效益的工具。设计师提出材料替代或者工艺改进方案的时候，LCA 能够对改进前后两种情景下的环境影响展开量化比较，得出结果，给决策赋予科学支撑。该评价方法具有前瞻性，在产品上市前就可以预判出产品的环保表现，避免后期改进所造成的巨大成本。

利用 LCA 进行方案比选时，通常遵循以下步骤：

1. 建立基准模型，对现有产品或传统工艺进行完整的生命周期评价，得到环境影响的基准值。

2. 构建备选方案模型，在基准模型中修改新提出的新材料或者新工艺单元过程数据。如果计划用再生铝代替原生铝生产产品外壳，则要将模型中原生铝生产过程的数据替换为再生铝生产过程的数据。

- 3.3 运行备选方案模型，得到新的环境影响结果，和基准值做详细的比较。可以比较的维度有全球变暖潜能值（碳足迹）、资源消耗、富营养化、酸化等环境影响类目。量化对比可以发现新方案在哪些方面改善了环境，又可能引起哪些新的环境问题（即环境负担转移）。这样全方位的评估方式，更利于做出合理而负责任的设计决定。

三、过程型 LCA 案例分析

通过对实际案例的分析，可以看出过程型 LCA 是如何在工程中操作，深入程度以及绿色低碳发展的价值。本节案例选择的是复杂产品系统和基础材料的比较分析，来体现该方法广泛的适用性以及深刻的洞察力。

（一）某家电产品生命周期评价

本案例以一台典型的家用电冰箱为研究对象，系统边界设为从摇篮到坟墓，包含原材料获取、零部件制造、产品组装、分销运输、消费者使用、产品报废处置等全过程。评价目标是对生命周期碳足迹进行全方位的评价，找出主要的减排潜力环节。前景数据来源于冰箱制造商以及核心零部件供应商，主要是生产线能耗、物耗、组装工艺参数等一手资料。背景数据主要是中国本土化 LCA 数据库所提供的电力结构、大宗材料生产、交通运输模式等通用过程数据。

建模过程按照 ISO 14040、ISO 14044 标准，把冰箱系统分为压缩机、箱体、制冷剂、电路板等上百个单元过程，并创建出详细的系统流图。从清单中可以看

出，生产一台冰箱使用多种金属、塑料和化工原料，伴随有相应的能源消耗。影响评价阶段主要是对全球变暖潜能值的影响。

根据研究结果可知，该型号冰箱全生命周期碳排放总量的 75% 来自于长达 12 年的使用阶段，主要是由于电力消耗。原材料获取和制造阶段的碳排放占总排放量的 20%，制冷剂生产与逸散、钢材、塑料等主体材料的生产是主要的排放源。运输、废弃处置阶段的贡献很小，两者合计贡献不到 5%。

根据上述的研究结果，给出相应的生态设计建议。提高产品能源效率等级、采用变频压缩机、真空绝热板等技术，可以大大降低产品使用阶段的碳排放。在制造过程中推广使用再生塑料、低碳钢，探索使用全球变暖潜能值更低的环保制冷剂。该 LCA 研究给企业制订产品碳中和路线图提供数据支撑和明确行动方向。

（二）某包装材料的环境影响比较

本案例主要对原生 PET 塑料瓶、100% 再生纸板复合包装、生物基 PLA 塑料瓶这三种饮料瓶包装材料的环境性能进行比较。功能单位为包装并运输 1000 升饮品，保证比较的公平性。系统边界同样包含从原材料获取到废弃处置的全生命周期过程，主要考察碳足迹、化石能源消耗、水资源消耗这三个环境影响类别。

数据收集方式有文献查阅、数据库信息和部分行业调研。原生 PET 瓶的生产数据包含石油开采以及复杂的化工过程。纸板包装的源头环节有林木砍伐、纸浆制造、复合膜生产等。PLA 瓶数据包含玉米等生物质原料种植、发酵、聚合过程。废弃阶段模型考虑了目前主流的处理方式，即 PET 瓶的部分回收再利用、纸板包装的回收和焚烧，以及 PLA 在工业堆肥条件下和被错误送入填埋场两种废弃情景。

包装材料环境影响对比表

包装材料类型	碳足迹	化石能源消耗	水资源消耗	主要优点	主要挑战
原生 PET 塑料瓶	最高	最高	最低	生产技术成熟，强度高	碳排高，资源消耗大，依赖化石燃料
100% 再生纸板复合包装	居中	居中	较高	资源循环性好，可再生	复合结构回收困难，生产需水
生物基 PLA 塑料瓶	生产阶段低（有条件）	最低	很高	碳减排潜力，摆脱化石依赖	占用土地水资源，回收体系不兼容，填埋后 GWP 风险

从表中可以看出评价的结果是复杂的、多维的。从碳足迹上看，PLA 瓶在

生产阶段有优势，因为原料来自植物，在生长过程中吸收二氧化碳。但是，如果最终填埋并产生甲烷，其总的全球变暖潜能值优势就会大打折扣。再生纸板包装碳足迹居中，原生 PET 瓶最高。化石能源消耗上原生 PET 瓶最高，再生纸板次之，PLA 最低。就水资源消耗而言，由于生物质原料种植阶段需要大量的灌溉用水，PLA 瓶和纸板包装的耗水量比 PET 瓶大得多。

该案例说明，不存在绝对的环保材料，最优方案的选择要进行权衡取舍。PLA 材料在碳减排、摆脱化石能源方面有潜力，但是其占用土地、水资源、与现有回收体系不兼容等问题使其推广受到阻碍。再生纸板包装在资源循环方面表现良好，但是其复合结构给回收带来了困难。因此，在选择包装材料的时候要综合考虑产品的具体需求、目标市场环境侧重、当地废物管理设施等各方面的因素。

第四节 投入产出 LCA 模型构建

一、投入产出分析基本原理

投入产出分析是由美国经济学家瓦西里·列昂惕夫创立的一种经济数量分析法。用编制投入产出表、建立数学模型的方式系统地反映国民经济各部门之间错综复杂、相互依赖的生产技术联系。该方法是宏观经济分析的重要手段，也是投入产出生命周期评价模型进行经济核算的基础。

（一）投入产出表的结构与平衡关系

投入产出表又叫部门联系平衡表，它以矩阵的形式表示棋盘式的经济平衡关系，全面反映了某一时期内国民经济各部门产品或服务投入和产出的关系。从结构上讲，价值型投入产出表一般分成三个象限。第一象限为重点部分，用相同的部门分类做行和列，具体地表现各部门在生产过程中互相消耗的中间产品价值，从而显示部门之间直接的技术经济联系。第二象限在水平方向上列出各个部门的产品最终用于消费、资本形成总额和出口的价值量，代表总产出最终的使用结构。第三象限在垂直方向上延伸，主栏列举出劳动者报酬、生产税净额、固定资产折旧、营业盈余等增加值项目，体现各部门在生产过程中新创造的价值。

内部存在着严格平衡的投入产出表。从行的方向看，一个部门的总产出等于其对其他所有部门的中间投入之和加上其最终使用量。这就清楚地展现了产品从

经济系统中的分配到使用所经过的路径。从列的方向看,一个部门的总投入等于其消耗的所有其他部门的中间产品价值之和加上本部门的增加值。它体现的是产品价值的构成及形成过程。最终整个经济体的总投入必须等于总产出,中间投入合计应等于中间使用合计,增加值合计也应等于最终使用合计。内在的平衡关系一起形成了投入产出分析严谨的核算基础。

棋盘式的结构以及内部平衡的关系,使投入产出表可以全面地反映国民经济的全貌,并能为分析最终需求变化怎样沿着产业链逐级传导,最后影响到各个部门的总产出提供准确的数据支持。正是因为有这样严谨的核算框架,才使得将环境的影响因素纳入到经济系统中进行考虑成为可能。

(二) Leontief 逆矩阵与经济影响计算

投入产出分析的精髓并不在于它的表格描述性,而是在于它强大的分析功能,其核心就是 Leontief 逆矩阵。该矩阵是根据投入产出表中的直接消耗系数矩阵计算出来的,用来衡量某一最终需求变动对整个经济体系各部门总产出的全部影响,即直接影响和间接影响之和。

计算过程首先要建立直接消耗系数矩阵 A 。矩阵中每一个元素代表的是某部门每生产一个单位总产出时,需要直接消耗其他各部门产品的价值量。接着用单位矩阵和直接消耗系数矩阵相减,得到矩阵。Leontief 逆矩阵一般记为 $L=\{I-A\}^{-1}$ 。逆矩阵的每一个元素表示的是某个部门多生产一个单位最终产品时,对其他各个部门(包括自身)产生的总需求拉动量,即完全消耗系数。

Leontief 逆矩阵应用范围很广,是进行经济预测、政策模拟的重要工具。政府加大新能源汽车产业投资时,分析人员可以利用 Leontief 逆矩阵来准确计算最终需求的增加会带动多少钢铁、化工、电子、电力等上游产业的生产扩大。该计算不但是直接供应商的需求,更是供应商的供应商,乃至整个产业链上所有的间接联动需求。这样就可以预见政策对整个经济的影响,评估它对整体经济增长的贡献率,发现可能存在的供应链瓶颈。穿透产业链的分析能力,给宏观经济调控、产业发展规划提供科学的定量依据。

二、IO-LCA 模型构建与数据处理

将投入产出分析的经济核算框架和生命周期评价的环境视角结合起来,就形成了投入产出生命周期评价模型。该模型的核心就是把各个经济部门生产活动和

对应的环境影响（碳排放）直接量化地联系起来，从而可以追踪并核算出最终消费驱动下的全经济系统隐含环境负荷。建立有效的投入产出生命周期评价模型的关键是数据处理，即经济部门和环境部门的准确联系，以及环境卫星账户的科学编制。

（一）经济部门与环境部门的关联

投入产出生命周期评价模型建立的基础，是以环境排放数据和投入产出表中经济部门数据相匹配、整合为基础的。此过程的核心任务，就是给投入产出表中的每一个经济部门（农业、电力生产、钢铁工业、交通运输业等）匹配一个环境影响强度向量。以碳排放为例，即计算各个经济部门单位产出（一般用货币价值来表示）直接排放的二氧化碳量，这就是部门的直接碳排放强度或者碳排放系数。

关联过程首先要对数据进行统一口径的匹配。投入产出表中部门的分类要与能源平衡表、环境统计年鉴等环境统计数据中的部门分类标准相协调。这就需要做繁杂的部门拆分、合并和数据填补工作，保证经济活动数据和环境排放数据可以进行有效的分类体系对接。部门分类匹配完成后，用各部门总碳排放量除以对应总产出，就可以得到各部门的直接碳排放强度向量。

排放强度向量就成为环境标签，被加进投入产出模型经济核算体系当中。用 Leontief 逆矩阵求出最终需求对各个部门完全产出的拉动，再将完全产出向量和排放强度向量相乘，就可以得到该最终需求引起的各个部门的总碳排放量（包括直接排放和间接排放）。因此，投入产出生命周期评价模型把宏观经济活动同具体环境影响联系起来，分析员可以清楚地知道哪些最终消费活动是碳排放的主要驱动因素，这些排放又是通过什么样的产业间链条被传导放大。

（二）环境卫星账户的编制方法

为了对环境和经济数据进行系统的整合，国际上发展出了一套环境与经济核算体系，环境卫星账户就是该体系的重要组成部分。环境卫星账户在国民经济核算体系的基本框架上进行拓展，目的是清楚地表现环境和经济之间相互影响的关系，为投入产出生命周期评价模型提供基础数据。因此，编制与碳排放有关的环境卫星账户，是实现“双碳”目标下环境影响评价创新的基础性工作。其核心步骤如下表所示，供查阅。

环境卫星账户编制核心步骤表

步骤一：明确核算边界与分类	确定账户核算范围（温室气体种类），并统一产业分类标准。
步骤二：基础数据收集与整理	收集能源消费数据、发热量、含碳量、氧化率等参数。
步骤三：碳排放量计算	采用 IPCC 排放因子法，计算各部门直接碳排放量，并处理非能源排放。
步骤四：编制环境卫星账户表	将计算出的各部门排放数据，按匹配的投入产出表部门分类编制。

环境卫星账户的编制一般要经过如下几个步骤，首先要确定账户的核算范围，即核算所有温室气体（二氧化碳、甲烷等），还是只核算能源燃烧产生的二氧化碳。同时需要使用国民经济核算中的一致产业分类，对所有产生排放的经济活动进行分类。收集、整理基础数据，数据来源主要是能源统计、环境统计。能源消费数据是计算燃烧源碳排放的基础，需要从能源平衡表中取得各个行业、各种类型化石能源的消费实物量。同时还需要搜集各种燃料的平均低位发热量、单位热值含碳量、碳氧化率等参数，这些参数一般来自于官方推荐值或者权威的研究成果。第三，按照政府间气候变化专门委员会的排放因子法，把各部门的能源消耗量乘以对应的排放因子，得出各部门的直接碳排放量。对工业生产过程等非能源相关排放，则需要另外的统计数据和特殊的计算方法。根据计算出的各部门排放数据，按照与投入产出表相匹配的部门分类，编制成环境卫星账户表。表中清楚地列出了每一个经济部门碳排放的来源和总量，是投入产出生命周期评价模型中环境排放向量的基础。这样建立了卫星账户之后，环境因素就能无缝地嵌入到宏观经济模型中，为以后隐含碳分析、政策模拟提供统一可靠可追溯的数据支撑。

三、IO-LCA 在政策与宏观层面的应用

投入产出生命周期评价模型由于自身独有的宏观系统性视角，在服务“双碳”目标政策制定与评价方面具有巨大的应用潜力。它能冲破传统生产核算的束缚，从最终需求和供应链的角度，表现出经济增长同碳排放更为深层次的内在联系，进而给产业结构调整、贸易政策调整等给予决策支撑。

（一）区域产业结构的隐含碳分析

不同区域的产业结构是决定碳排放特征的主要因素。投入产出生命周期评价模型可以精准识别、量化出区域产业体系里的隐含碳，即产生本地区最终消费（居民消费、政府消费、资本形成）的直接或间接全部碳排放。该种分析可以真实的

反映出一个地区真实的碳足迹，而不是只局限于本地生产排放的传统视角。以服务业为主的地区，本地生产产生的碳排放量较少，但是该地区居民消费的许多工业产品都是在其他高碳排放地区生产的。

采用投入产出生命周期评价模型分析，可以发现区域经济对高碳产业的依赖程度。对本地最终需求拉动的全部碳排放进行分解，可以识别出最终消费类别（食品、交通、住房等）中哪些是主要的碳排放驱动力，以及这些排放主要由哪些上游产业部门（电力、钢铁、化工等）所贡献。结构洞察力给区域差异化的产业转型升级、需求端管理政策的制定提供科学依据。分析结果会显示，推动建筑节能、推广绿色建材，比限制某个地区的少数工厂排放更能有效地减少整个区域碳足迹，因为从根本上说，它能减少对上游高碳产业的需求。

（二）贸易隐含碳与碳泄漏研究

在全世界化以及区域经济一体化的背景下，商品和服务在各国、各地区之间流动，其中也存在着大量的碳排放转移。一般称之为贸易隐含碳。其中，投入产出生命周期评价模型，尤其是多区域投入产出模型，就是研究此问题的主要工具。多区域投入产出模型把各国或者地区的投入产出表联系起来，可以追踪一个国家或地区的最终消费引发的整个供应链的碳排放。

研究贸易隐含碳有重大的政策意义。它表明发达地区或者国家，通过从欠发达地区进口高碳密集型产品，在不降低自身消费水平的情况下，可以将碳排放责任“外包”或者“泄漏”出去。因此单纯的生产端减排政策会失效，甚至造成全球总排放量上升。投入产出生命周期评价分析可以准确量化碳转移的规模和路径，可以识别出主要的碳净出口地区和净进口地区。

这对创建公平合理的全球和区域气候治理体系有着十分重要的意义。为消费侧责任、共同但有区别的责任等原则提供定量证据，并促进碳关税、碳补偿机制等政策工具的讨论。经过确定贸易中碳流动的路径和主要商品之后，决策者就可以制订出相应的贸易政策与产业合作方案，比如推动绿色供应链的发展、促使高碳产品走向低碳发展等手段，实现共同减排的目标，从而避免产生“以邻为壑”式的减排难题。

第五节 LCA 在政策制定中的应用

一、LCA 在环境标志与认证中的应用

环境标志、认证体系是推进绿色生产、绿色消费的重要市场化手段，核心就是创建一套科学、可靠的产品环境绩效评价标准。LCA 方法论渗透到环境标志标准的制定、实施的全过程之中，给识别真正的“绿色产品”提供重要的技术支持，促进了市场的良性发展。

（一）中国环境标志产品标准制定

中国环境标志，简称十环认证，是我国最具权威性的官方环保产品认证标志。技术要求的确立就体现了生命周期的思想。在为某一产品类别制定环境标志标准的时候，LCA 用来找出该产品从取得原料、生产加工、运输分销、使用到废弃处置等各个阶段中，对环境造成重大影响的关键环节和关键环境问题。利用 LCA 分析可以得出主要的资源消耗、能源消耗、污染物排放清单，进而设定有针对性、科学性的控制指标。

在制定涂料产品环境标志标准的时候，研究者会用 LCA 的方法，对从原材料（树脂、颜料、助剂等）的开采和合成开始，经过生产过程中的能源消耗和挥发性有机物排放，再到使用阶段的室内空气质量影响，最后到废弃涂料桶处理为止的全生命周期的环境负荷进行评估。分析结果会显示生产、使用阶段的挥发性有机物排放是主要的环境影响。因此，核心指标就会把重点放在严格控制产品中挥发性有机物的含量上，对生产过程中所耗的能源、所产生出的废弃物提出要求。

根据 LCA 为依据的标准制定方法，保证环境标志认证不能只关注产品的某一个属性或末端处理，而应该从系统角度引导企业进行全方位的绿色设计和清洁生产。它使企业重新审视自己供应链上下游的环境表现，促使全产业链的绿色转型，使经过认证的产品在环境友好性方面具有真实领先性，给消费者提供可靠的选择依据。

（二）绿色政府采购标准的技术支撑

绿色政府采购是用政府的采购能力引导、激励产业走向可持续发展的一种重要政策手段。为了使采购决策真正达到环保的效果，采购标准的技术规范必须建立在科学评价的基础上，而 LCA 就是不可缺少的技术支撑。LCA 的应用使政府

采购标准由以前只考虑产品是否节能、节水、使用再生材料等单一维度，转变为对产品的整个生命周期环境影响进行综合考虑。

制定计算机、打印机等电子产品政府采购清单技术要求时，用 LCA 方法对它们的环境绩效做全面的评价。评价范围覆盖稀有金属的开采、零部件制造、产品组装过程中的高能耗、化学品使用，产品使用阶段的电力消耗，产品报废后电子废物管理等各个环节。根据 LCA 分析来确定具体的量化指标，即产品待机功耗、再生塑料使用比例、有害物质限量、产品可拆解性及可回收性设计要求等。这些指标一起构成了对产品生命周期环境表现的综合评价，有效地防止了企业只优化某一个环节，将污染转移到其它环节的“漂绿”行为。将 LCA 的结论有效转化为具体的采购规范，政府采购环境影响更小的产品，也向市场发出清晰的信号，激励制造商在产品设计之初就融入生态设计理念，从而推动整个行业的技术进步和绿色升级。

二、LCA 在行业绿色发展政策中的应用

从整个行业绿色转型的宏观政策角度来讲，LCA 的应用给政府决策提供量化的依据。可以发现行业发展中的重要环境限制因素，为制定行业发展准入门槛、淘汰落后产能、创建科学、公正、前瞻性的绿色制造业体系提供科学、公正、前瞻性的技术支持。

（一）行业准入与落后产能淘汰的依据

双碳目标之下，对高耗能、高排放行业实行管理成为政策重点。LCA 给行业准入标准、落后产能淘汰目录的制定赋予了强有效的手段。通过对某一行业内不同技术水平产品或者生产工艺进行生命周期评价，可以得到该行业环境绩效的基准线，从而找到最佳可行技术的环境表现水平。

以 LCA 为基础的行业基准分析可以跳出传统的用规模、装备、单一污染物排放浓度等为标准来评价的方式，转而以单位产品生命周期资源消耗、能源消耗、环境排放为依据来进行评价。具体操作过程可归纳如下：

LCA 在行业基准分析中的应用流程

步骤	具体操作	目的
1. 建立基准模型	选择行业内具代表性的企业及工艺，进行详细 LCA 研究，建立环境影响数据库和模型，获得可比较的绩效指标，例如单位产品碳足迹、水足迹、生态毒性影响等。	确定行业环境绩效的参考体系。
2. 设定准入门槛	把行业内环境绩效前 10% 或 25% 的企业 LCA 数据作为标杆，确定新建项目的准入标准。新的项目应使用先进清洁生产技术，并保证单位产品生命周期环境负荷小于规定数值。	引导新建项目采用先进技术，避免增量污染。
3. 识别落后产能	以行业平均水平或特定百分位的 LCA 绩效为依据，确定落后产能的界限。对单位产品生命周期内资源环境代价过高、已存在的产能，采取政策引导、经济杠杆等多种行之有效的手段，推动技术改造或实施有序淘汰。	精准淘汰高污染、高碳排放产能，优化产业结构。

从上表可以得知，LCA 把宏观的绿色发展要求转化成了微观企业层面具体可量化的技术指标，从而使得产业政策制定和执行更具科学性、公信力，精准引导产业结构优化升级，从源头上防止高污染、高碳排放项目盲目扩张。

（二）绿色制造体系建设的技术支撑

绿色制造体系建设是我国推进工业绿色发展的重要战略手段，包含绿色工厂、绿色产品、绿色园区、绿色供应链等各个方面。LCA 是整个体系建立、评价和认证所采用的统一的技术语言和科学框架。它保证绿色制造的评价不是孤立看待工厂或者园区边界内部，而是把其放在整个产品生命周期和产业链系统之中进行全面考虑。

在绿色工厂评价中应用 LCA，评价指标由原来的末端治理绩效（只考察废水、废气达标排放）扩展为整个生产过程的资源能源效率和环境影响。评价不但考虑工厂的能耗总量，而且用 LCA 分析追踪工厂所用的原材料和能源在上游生产阶段的环境足迹，促使工厂购买绿色电力、再生原料，从而降低整个供应链的环境负荷。绿色产品认证中 LCA 是最基本的，申请认证的产品生命周期评价报告要证明其在设计、生产、使用、回收等各个环节比同类产品环境优势更明显。绿色供应链的建设需要 LCA 找到供应链上主要的环境影响源，然后同上下游供应商一起减排，从而实现从“点”上绿色到“链”上绿色的转变。LCA 应用之后，绿色制造体系的评价标准更加系统、全面，有效地促使工业企业由被动符合环保法规，转变为主动开展全生命周期环境管理，实现持续改进的根本性转变。

三、LCA 在应对气候变化政策中的应用

在全球气候治理以及我国双碳目标实现的背景下，生命周期评价，尤其是以温室气体排放为中心的子集——碳足迹分析的方法，已经成为应对气候变化相关政策制定的重要科学依据。它为量化产品、服务以及消费行为的“含碳量”提供了一个标准的方法，是联系生产端减排和消费端引导的纽带。

（一）碳足迹标准与碳标签制度设计

产品碳足迹核算为应对气候变化政策体系打下了基础，LCA 是被公认的国际标准核算方法。为了建立一个统一的、透明的、可比的碳足迹核算和披露体系，制定详细的碳足迹标准就显得十分重要。LCA 给这项工作赋予了完备的理论架构和技术途径。国家以及行业主管部门可以参照 ISO14067 等国际标准，根据本国产业的特点来制定出适合于不同产品种类的具体规定。文件对某一产品碳足迹核算时所应遵循的系统边界、功能单位、数据采集要求、分配原则、计算模型等做了详细规定，保证不同企业对于同一产品进行核算时结果的一致性、可比性。

以扎实的碳足迹核算标准为基础建立碳标签制度就成为可能。碳标签就是将产品全生命周期的温室气体排放信息，以标签的形式直接展示给消费者，是一种沟通工具。LCA 的应用可以保证标签背后的数据是科学的、可靠的。一个设计良好的碳标签制度，不能仅仅依靠清晰的视觉设计，还需要有强大的 LCA 数据库和认证体系作支撑。政府可以主导创建国家层面的生命周期基础数据库，给企业进行 LCA 核算提供优质的本土化背景数据，降低企业的核算成本。

建立 LCA 方法论、产品碳足迹标准、认证、标签发布完整的制度链条，可以有效地管理并规范市场上的碳信息披露，防止碳漂绿行为的发生。为以后碳税、碳交易等市场机制把产品纳入管理范围打下了数据基础，也为欧盟碳边境调节机制等国际间的绿色贸易壁垒做好技术储备，对我国产品的国际市场绿色竞争力有深远的战略意义。

（二）低碳产品推广与消费引导

有效的气候政策既不能缺少生产侧的深度脱碳，也不能缺少消费侧的积极参与。以 LCA 为基础的碳足迹信息以及碳标签，可以激发消费端的减排潜力。当消费者能清楚地看到产品上气候影响量化信息的时候，他们的购买决策就会自然地引导到更低碳的选择上，从而通过市场力量倒逼生产企业进行减碳创新。政府

在低碳产品的推广、绿色消费的引导方面可以起到重要的作用，LCA 给政府提供精准施策的科学依据。

政策制定者可以根据 LCA 核算结果来创建低碳产品推广目录，配合实行消费补贴、税收优惠、政府优先采购等各种激励政策，对获得认证的低碳产品进行市场扶持，提高其市场占有率。结合碳标签展开广泛的宣传和教育，提高消费者对产品碳足迹的认知程度和关注度，把低碳消费的理念融入到人们的生活中，树立起绿色消费的新风尚。由于信息透明化而引发的消费模式转变，会创造出巨大的市场需求，促使企业投入更多的资源去开展低碳技术的研发和供应链碳管理，从而形成一个从生产到消费再到生产的良性减碳循环。最后 LCA 作为连接生产与消费的桥梁，把宏观减排目标转化为具体的产品、具体的每次购买行为，使每一个消费者都成为碳中和目标的实现者，汇聚起全社会共同应对气候变化的磅礴力量。

第八章 环境风险预警与管控

第一节 环境风险识别与评估方法

一、危险源与风险因子识别技术

危险源和风险因子的全面识别是环境风险评价的起点和基础，质量好坏直接影响后面的风险分析深度和控制措施的有效性。双碳目标下新能源、新材料等领域的风险因子识别成了新的难题，急需借鉴并革新传统工业已经成熟的识别技术。

（一）危险与可操作性分析

危险与可操作性分析，简称 HAZOP 分析，是一种结构化、系统化的审查方法，用以发现设计及操作中潜在的危险和可操作性问题。此方法把引导词（无、更多、部分、反向等）同工艺参数（流量、压力、温度、组分等）相联系，针对工艺流程里每一个节点可能产生的偏差及其造成的后果加以剖析。分析过程一般是由一个跨专业团队来完成的，成员包含工艺、设备、仪表、操作等各个方面的人员，可以对系统设计中出现的问题、潜在的操作错误、控制系统可能发生的故障进行深入的挖掘，从而在项目初期就发现潜在的环境风险事件，比如有毒有害物质的非正常泄漏、火灾爆炸等。

双碳目标之下，危险和可操作性分析的应用范围也被扩大了。用本方法来分析二氧化碳捕集、利用和封存项目中高压二氧化碳管道泄漏、封存系统完整性、输送过程中相变等风险。对于氢能、储能等新型能源系统，HAZOP 分析也是发现其高压、易燃、腐蚀等特有风险的重要手段。对这些偏差进行分析，在设计阶段就可以优化工艺方案、增加安全屏障，从源头上控制和预防低碳转型伴随产生的新环境风险，保证能源系统在全生命周期内安全、稳定、环保。

HAZOP 分析结果一般以表格的形式表现出来，对偏差、原因、后果、现有的保护措施和建议采取的措施都有详细的记录，为之后定量的风险评价和安全措施的制定提供清晰具体的数据支撑。它所推崇的预防性、系统化思维促使工程师和管理者跳出常规，预见并评判出那些“意料之外、情理之中”的风险情景，这

对于保证复杂化工系统、新型能源设施在双碳转型期间的环境安全有着无法替代的重要作用。

（二）检查表法与故障树分析

检查表法为环境风险识别最常用、最基本的方法之一。它把已有的标准、规范、法规、历史事故经验等编撰成一系列具体的、明确的检查项目，对评价对象的工艺、设备、管理等各个方面进行逐项核对，从而迅速发现潜在的危险源和系统缺陷。此方法操作简便直观、操作性强、覆盖面大，适合做工业项目的初步风险筛查和合规性检查。双碳背景下检查表内容要不断更新，增加针对节能降碳改造项目、新能源设施安全、温室气体泄漏等特殊检查要求，提高其时代性、针对性。

故障树分析属于演绎式的系统安全分析手段。它以不希望发生的顶事件（有毒气体大量泄漏等）为起点，用逻辑门（与门、或门等）逐级向下分析，找到所有导致顶事件发生的基本事件组合（设备故障、人为失误等）。此分析过程有如下显著特点：

1. 逻辑性强、层次分明，故障树图清楚地表现出了事件间的因果联系，可以直观地体现出系统中薄弱之处以及重要的故障途径。

2. 定性与定量相结合：定性分析可以找出所有的可能引发事故的原因组合；若能获得各个基本事件的发生概率，就可以进行定量计算，得出顶事件的发生概率以及各个基本事件的重要性，为风险控制决策提供量化依据。

故障树分析在环境风险评价中使用较多，对分析复杂系统突发事故的原因有优势。以化工装置爆炸风险为例，把“储罐爆炸”设为顶事件，向下分析导致超压、超温、物料泄漏遇点火源等中间事件，最后追溯到仪表失灵、阀门误操作、冷却系统故障等具体的基本事件，从而找到需要重点监控和改进的关键环节。

二、环境风险评估模型与方法

危险源识别之后，就要用科学的方法分析风险的大小，也就是评估潜在事故发生的可能性以及造成的危害程度，最后判断风险水平是否在可接受范围内。此环节把风险识别同风险控制衔接起来，给制定差异化、精细化的管控策略赋予决策依据。

（一）风险矩阵法与概率风险评估

风险矩阵法属于简单快速的半定量风险评价方法，用二维矩阵划分风险等级。

横轴和纵轴一般是事故发生的概率和事故的后果严重度。一般情况下，这两个维度都会被分成若干个等级，可能性分为极不可能、不可能、可能、很可能等，后果严重性分为轻微、一般、严重、灾难性等。将评价对象的可能性等级与严重性等级相乘，就可以得到矩阵中对应的风险等级，即低风险、中风险、高风险或不可接受风险。

该方法概念清楚、易于理解、沟通，可以对大量的风险进行排序，找出需要优先处理的重大风险源。它被广泛地用作环境风险初步评价和动态管理的工具，给管理者提供直观的决策支持。但是风险矩阵法的等级划分带有主观性，评估结果的精确度不高。

概率风险评估是一种更加复杂和精确的定量风险评价方法，它起源于核电行业，现在也被广泛应用于航空、化工等高风险行业。概率风险评价的基本思路就是建立事故场景的事件树、故障树模型，对各种初始事件、安全系统失效组合做全面的系统分析。通过设备可靠性数据、人为失误率等定量计算出各种事故序列的发生频率和后果，最后得到风险的量化指标，即特定事故年发生频率、个人风险、社会风险等。

概率风险评估比风险矩阵法能提供更多的风险信息，可以对风险进行整体评价，也能找到对风险贡献最大的设备、环节、人员操作，为风险控制资源的优化配置提供准确的指导。双碳目标之下，CCUS封存系统长期泄漏风险，大规模储能电站热失控等新型复杂风险当中，概率风险评价法的应用变得越发重要，能够给这些前沿技术的安全论证以及风险接受度判定赋予量化的根基。

（二）环境风险等级划分标准

为了规范、统一环境风险评价工作，保证风险管控的科学性、一致性，国家以及行业一般会制定环境风险等级划分标准。这些标准为判断建设项目环境风险水平是否可接受，应该采取怎样的防控措施提供法定准则。中国环境影响评价体系中环境风险等级的划分，主要是根据潜在的环境危害后果的严重程度以及发生的可能性。

划分标准一般把环境风险等级分为重大、较大、一般和较小这四个等级。其评判过程是以建设项目所含危险物质数量与临界量的比值（Q值）为基准，结合对周围环境敏感目标的分析来综合评定，得出工程对环境的潜在危害程度，即后果严重性。同时按照所处区域的自然条件、社会经济状况、企业的安全管理水平

等进行分析，得出事故发生的可能性。将后果严重性与发生可能性的分析结果综合起来，对照标准中给出的判定准则来确定最终的环境风险等级。这就是一种从源头（危险物质的数量）、后果（对敏感目标的影响）、可能性（现实条件）三方面进行系统评价的方法。标准化的划分使不同项目之间的风险评价可以进行比较，也为以后的环境管理和应急预案制定指明了重点。

环境风险等级划分示例表

风险等级	后果严重性	发生可能性	典型情景（示例）
重大风险	灾难性	很高 / 可能	剧毒物质泄漏致大范围人员伤亡或生态系统崩溃
较大风险	严重	可能 / 中等	有害物质泄漏致局部环境污染和健康损害
一般风险	一般	中等 / 较低	轻微泄漏，经处理后可控，影响有限
较小风险	轻微	较低 / 极低	极少量泄漏，无明显环境或健康影响

从上表可以看出，环境风险等级的划分综合考虑了事故的潜在影响和发生概率。

三、重点行业环境风险特征分析

各个行业的生产工艺、物质属性、厂区布局千差万别，使得它们的环境风险的种类、来源、影响方式也各不相同。双碳目标之下，探究高风险行业的环境风险特性，乃是达成精准治污、科学降碳以及安全发展三者相互协调统一的基础。

（一）化工园区环境风险源分布

化工园区是现代化学工业的主要载体，由于企业集中、物质危险、工艺复杂等特点，环境风险最大。化工园区环境风险源具有集聚性、关联性。风险源既包含单个企业的生产装置、储罐区、装卸站台等，也包含园区共用的管廊、污水处理厂、危险废物处置中心等公共设施。这些风险源在空间上高度聚集，一旦某一个单元发生事故，很容易引起多米诺效应而导致事故规模和危害性急剧增大。

从风险类型上看，化工园区环境风险主要有有毒有害气体泄漏扩散、易燃易爆物质火灾爆炸、危险化学品泄漏造成的水体和土壤污染。氯化、硝化、聚合等高危工艺以及重点监管危险化学品的企业风险更为突出。双碳转型给化工园区带来新的要求，一方面高碳工艺被低碳或者零碳工艺所取代，引入新的风险因子；另一方面园区内循环经济体系的建立，例如物料循环利用、能源梯级利用等，提高了资源利用率，但是会加大系统间的耦合度，使风险传递路径更加复杂。

因此，化工园区的环境风险评价不能只针对单个企业，而应该进行区域整体性的风险评价。采用 GIS 等技术绘制出园区风险源空间分布图，确定重大危险源及相互影响，用事故模拟的方法推断事故扩散的区域范围，评价区域性、流域性的累积环境风险。还要加大园区一体化应急联动机制的建设力度，创建起统一的风险预警平台以及应急物资储备库，从而实现信息互通、协同应对，提升整个园区风险抵御的综合能力。

（二）尾矿库溃坝等突发性风险

尾矿库是矿山选矿后存放尾矿浆和水的地方，常常被比喻为悬在下游居民头顶的“达摩克利斯之剑”。尾矿库主要的环境风险来源于溃坝的可能。一旦溃坝，大量的尾矿浆和废水会以很快的速度下泄，冲击力足以冲毁沿途的村庄、农田、道路、桥梁，造成严重的人员伤亡和财产损失。另外尾矿中常含有重金属、选矿药剂等有毒有害物质，溃坝之后会对下游河流水系和土壤造成长期、严重的生态污染。

导致尾矿库溃坝的因素复杂多样，主要可以归纳为以下几类：

1. 自然因素：强降雨、洪水、地震等极端的自然灾害是造成溃坝的外部原因。在气候变化越来越严重的情况下，极端天气事件出现的频率越来越高，强度越来越大，给尾矿库的安全运行带来了更大的考验。

2. 工程技术因素：勘察设计缺陷、施工质量问题、坝体渗漏、浸润线过高。这些内部病害会逐渐破坏坝体稳定性，在一定的条件下造成失稳。

3. 管理因素：日常巡查不到位、监测数据分析不及时、应急预案不健全、闭库不规范等人为管理疏忽，都会使隐患变成事故。

对于尾矿库的突发性风险，环境影响评价要重视选址的合理性，严禁在下游有重要居民区、饮用水源地等环境敏感目标的地方设置尾矿库。评价时要详细论证坝体的稳定性，对不同降雨重现期的洪水进行调蓄计算，保证防洪能力足够。最重要的是强制建设单位建设坝体位移、浸润线、库水位等在线监测系统，并将它与地方政府应急管理部门联网，实现风险实时预警。双碳目标之下，废弃矿山综合治理与生态修复被提上议程，遗留尾矿库风险评估与管控成了保证区域环境安全、达成绿色转型的基础性工作。

第二节 突发环境事件应急评价

一、突发环境事件情景构建

科学的情景创建就是应急评价逻辑的开端。只有对可能出现的事故源项进行全面的辨析、深入地剖析之后，才能为以后的预测风险、分析影响、编制应急预案打下良好的基础，让评价工作有针对性地开展并且能够发挥实际的指导作用。

（一）火灾、爆炸、泄漏等典型事故情景

突发环境事件情景构建要以项目存在的风险源为中心。在“双碳”背景下，储能电站、氢能制储运、生物质利用等新兴业态的风险源项也表现出新的特点，其火灾、爆炸机理同传统化工过程有很大不同。因此评价工作要准确地识别出危险物质的种类、数量、分布、理化性质等，并结合工艺流程、设备状况、管理水平等因素，科学地选择出风险最大、最容易发生的事故情景，即最大可信事故，作为评价的重点。

不同的事故类型评价重点也不一样。火灾情况下要重点考虑热辐射对周边设备、人员、环境敏感目标的影响，伴生有毒有害烟气（二噁英、氰化物等）的扩散范围和浓度。爆炸情景主要是针对冲击波超压的破坏效应、碎片散落范围和次生火灾或者泄漏。在泄漏情景下，评价要区分气体、液体、液化气体等不同的扩散模式，正确模拟有毒有害物质在大气或者水体中的迁移转化规律，进而确定其影响边界。

评价工作要与时俱进，要与双碳目标下新兴产业的风险特点相结合。锂电池储能站火灾具有复燃性、扑救难、会产生含氟有毒气体等特点，高压氢气泄漏容易造成喷射火或者蒸气云爆炸，扩散速度快、爆炸极限宽。因此评价时必须充分考虑到新兴领域事故的独特性，创建出符合其特征的事故情景，而不能套用传统模式简单地做出判断，从而避免对风险的低估。

（二）事故链与多米诺效应分析

事故链、多米诺效应分析属于情景构建的深化，目的在于探究初始事件怎样经由一系列连锁反应，变成更大规模、更繁杂、危害更严重的灾难。现代化工园区、能源基地等产业集聚区设施间距小、物料关联度高，一个装置发生火灾或爆炸很容易通过热辐射、冲击波、飞溅物等方式引燃或者损坏相邻装置，造成灾难

性的升级。在以“双碳”战略为驱动的循环经济产业园里，上下游企业物料经由管廊直接输送，物理上、工艺上的紧密耦合，无疑会增大多米诺效应的风险。

评价时常常会用到故障树分析和事件树分析等逻辑方法，从结果反推或者从起因顺推，系统地列出事故发展的一切可能途径，进而找到关键的薄弱环节和主要的风险源。利用 QRA 的方法对各种事故链发生的可能性以及后果的严重程度进行定量分析，可以得出需要重点控制的关键路径。这样的分析可以预测最坏的情况，也可以为区域产业布局、防火间距设置、消防设施配置提供科学依据，从源头上切断事故链，防止局部风险变成全局性灾难。

事故链与多米诺效应分析常用方法

分析方法	描述	应用场景	优点
故障树分析	自上而下，通过逻辑门（与门、或门）表示事件因果关系，找出导致顶事件发生的所有可能基本事件组合。	系统失效分析、风险源识别、设计优化	直观、结构化、能找出多种失效模式组合
事件树分析	自下而上，从初始事件开始，沿着不同的事件路径，分析系统或设备的可能响应及最终后果。	事故后果预测、应急预案评估、系统可靠性分析	全面展现事故发展路径、便于风险管理决策
定量风险评价	结合事故发生概率和后果严重性，对风险进行量化评估，通常结合 FTA 和 ETA 结果。	高风险行业安全评估、应急响应规划、投资决策	结果量化、可比较、为决策提供数据支持

从上表可以看出，故障树分析、事件树分析、定量风险评价是事故链与多米诺效应分析中经常用到的重要工具。采用这些方法可以对事故的演化过程有更加全面深入的认识，从而给风险管理、应急响应提供有力的支持。

二、应急监测与快速评估技术

事故发生后，及时准确的掌握污染情况是做出科学决策的前提。现代信息技术同监测设备的融合，给实现由被动应对变为积极预警，由粗放估算转为精确评判赋予了强大的技术支持。

（一）便携式仪器与无人机应急监测

应急监测的核心就是“快”、“准”。突发环境事件具有瞬时性、动态性、不确定性，传统的定点采样、实验室分析方法已经远远不能满足应急处置的时效性要求。因此，发展并应用现场化快速监测技术，是应急评价能力建设的重要组

成部分，也是获取第一手污染数据、掌握事态发展走向的关键。

便携式仪器属于地面快速侦察的主要仪器。光离子化检测器、便携式气相色谱-质谱联用仪、傅里叶变换红外光谱仪等设备，可以对空气、水体中的特征污染物进行快速的定性与定量分析，从而可以判定出污染中心区以及扩散边界。体积小、响应快、操作简单的仪器可以深入到事故现场，做移动式的、网格化的实时监测，给初步划定警戒区、疏散范围提供直接的数据支撑。

无人机技术的应用给空中监测开辟了新的领域。搭载不同传感器的无人机可以克服地面监测的局限性，在危险化学品泄漏、火灾烟气扩散等应急人员难以到达的地方发挥巨大的作用：

1. 配备电化学或者光学传感器的无人机可以快速绘制出污染羽的形状、走向、污染物三维浓度分布图。
2. 使用红外热像仪的无人机能够穿透烟雾找到火源中心，发现隐藏的火点或者追踪液体泄漏的方向。
3. 装备高清摄像头的无人机则能提供宏观现场影像，评估设备毁坏状况及环境影响的总体态势。

空地一体化监测网络属于应急监测的新发展趋向。将无人机获取的宏观、立体数据和地面便携式仪器得到的精确、点位数据进行融合，可以形成动态、全方位的环境风险一张图，给后续模型预测和应急决策提供更加全面、可靠的信息输入，从而大大提高应急响应的科学性和效率。

（二）模型快速预测与影响范围研判

模型预测赋予了应急评价以大脑的功能，可以利用少量的现场数据对污染物的未来扩散趋势、影响范围做快速的推测。虽然传统的精细化模型精度高，但是计算时间长，不适合在时间紧张的应急情况下使用。因此应急评价一般用简化高效的预测模型，如高斯烟羽模型、拉格朗日粒子扩散模型、重气体扩散模型等。这些模型可以很快地给出污染物浓度随时间、空间变化的初步结果，给应急指挥部门判断下风向影响区域、确定保护目标和疏散路线提供宝贵的决策窗口期。

只有将模型预测同地理信息系统充分融合起来，才能对影响范围做出准确的研判。GIS平台叠加实时气象数据（风向、风速、大气稳定度等）、地形地貌数据、污染源强信息之后，模型可以模拟出污染带的迁移路径。平台把预测出的污染范围和事先设置好的环境敏感目标图层（居民区、学校、医院、水源地等）进行叠

加分析,找出受影响的敏感点,量化受影响的人口数量和环境要素,生成可视化的风险评估报告。这代表着应急工作的技术从污染物扩散预测发展到环境风险后果研判,使应急响应更加有针对性、有预见性。

三、应急预案与响应能力评估

完备的应急预案、强有力的应急能力,就是对抗突发环境事件最后一道防线。评价不单要考查预案的文本内容,还要考查预案在实际情况下的执行效果和区域协同作战能力。

(一) 应急预案的科学性与可操作性评价

应急预案的科学性来源于前期做足的应急预案。一份好的预案,其设定的应急组织架构、响应分级标准、处置程序等都应该与之前建立的事故情景一一对应。在评价时需要考察应急预案是否为最大可信事故、多米诺效应等复杂情况设立了单独的应对方案,并且对于各种情况下的控制参数和触发条件都做了明确的规定。预案中涉及到的污染物扩散范围、人员疏散距离、环境恢复措施等都应当有模型预测和专业分析作为依据,不能出现经验主义、想当然的设定。

可操作性是评价预案能否“落地”的重要标准。评价要从实践的角度出发,对预案的每一个环节进行考察,应急通讯录是否实时更新?在断电、断网等极端情况下通讯是否能够保持畅通?应急物资清单是否完整,存储地点、数量、规格、型号是否清楚,能否在最短的时间内调集到位?人员职责划分是否落实到人、到岗,避免推诿扯皮、指令不明。评价可以采用桌面推演、实战演练等形式来检验预案在模拟情景下执行流程是否顺畅、各个环节之间是否紧密衔接,从而发现并且纠正其中不切实际或者难以执行的部分。

预案的动态修订、持续改进机制也被当作评价的重点。环境风险是动态变化的,由于生产工艺的调整、周边环境的变化、双碳背景下新技术的引入等原因,应急预案要具有自我完善的能力。评价应该考察企业或者园区是否建立了定期的预案评审和修订制度,日常演练和真实事件应对中发现的问题能否及时反馈到预案更新当中,形成一个闭环的管理,即评估、演练、修订、再评估的闭环管理,保证预案一直具有科学性和现实指导意义。

(二) 区域应急联动与资源调配能力

现代突发环境事件的影响不再只是某一个企业或者某一个问题,而是需要多

个区域、多个部门联合应对。区域应急联动能力评价主要是考察政府、企业、社会应急力量三者之间协同机制是否健全，即统一指挥体系的建立，确保突发事件发生后能迅速形成以政府为主导、多方参与的应急指挥部；信息共享平台的建立，实现气象、水文、污染源、敏感点等信息在各部门之间实时共享；跨区域联防联控协议的签订，明确邻近地区在应急资源、专家团队、救援力量等方面相互支援的责任和流程。联动能力是解决重大、复杂的生态环境事件的重要因素，可以调动社会各方面力量形成合力。

应急资源是否充足以及调配的效率，就是响应能力的物质基础。评价不能只统计区域内应急队伍数量、应急装备种类、储备物资规模，还要分析其布局是否合理、调配是否机动。对大型化工园区来说，根据风险评估结果，重要位置是否已经预置了消防、堵漏、洗消等专业设备和物资？应急资源是否存在过度集中或者盲区？在双碳目标之下，区域内对于液氢泄漏、储能电站火灾等特殊风险是否有相应的特种装备和专业队伍储备？利用物资调配模拟、响应时间分析，可以定量评价应急资源接到指令以后到达指定地点的能力，从而优化资源布局，全面提高整个区域的应急保障水平。

第三节 环境健康风险评估技术

一、污染物暴露途径与剂量－效应评估

准确评价健康风险首先要清楚污染物进入人体的途径和作用机理，这是定量分析的前提。经过暴露情景的建立、关键路径的确定之后，再联系毒理学数据建立起剂量与健康效应之间的联系，才能正确地衡量出建设项目可能会造成的健康风险。

（一）呼吸、饮食、皮肤接触等暴露途径

环境中的污染物会通过各种途径进入人体，对人体健康造成危害。呼吸暴露是大气污染健康风险的主要途径，工业排放的颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物等经由呼吸系统进入人体，影响程度同污染物浓度、暴露时间、个体呼吸频率、生理状况等有关。在工业园区周边，长期低剂量的呼吸暴露成了区域居民健康风险的主要来源。

饮食暴露是指污染物通过食物链富集到人体中的主要途径。土壤、水体中的重金属、持久性有机污染物等，可以通过农作物吸收、水产养殖等方式进入食物链，最后经膳食摄入人体。若饮用水源受到污染，居民在日常饮水时就会直接摄入有害物质。因此评价饮食暴露要考虑当地居民的饮食结构、食物来源、污染物在不同介质中的迁移转化规律等各方面复杂的因素。

皮肤接触暴露在一般人群中所占的比例比前两者要小，但是在某些职业环境或者生活场景中不能被忽视。化工、农药生产等行业工人会因为接触高浓度的化学品而直接接触到皮肤，儿童在受污染的土壤、水体中玩耍也会通过皮肤吸收一些有害物质。确定并量化重要的暴露途径，是建立准确的健康风险评估模型的基础，也是实施有效的防护措施的依据。

（二）致癌与非致癌物健康风险评估模型

识别暴露途径、计算出暴露剂量之后，再利用剂量效应关系预测健康风险大小。污染物按毒理学性质可以分为致癌物和非致癌物，所以风险评估模型也有所不同。将抽象的污染物浓度转化成与公众健康有关、可以直接评价风险的指标，就是它的关键环节。致癌物与非致癌物健康风险评估模型的主要差异见下表

致癌与非致癌物健康风险评估模型对比表

特征	非致癌风险评估	致癌风险评估
毒理学特性	存在安全阈值	通常无绝对安全阈值
风险表征	风险熵 / 危害指数	终生超额致癌风险
核心参数	参考剂量 / 参考浓度	致癌斜率因子 / 单位风险因子
可接受风险水平	$HQ/HI \leq 1$	通常为 10^{-6} (百万分之一)
评估目的	预防不良健康效应	评估患癌概率增量

对于非致癌物来说，一般认为存在一个健康危害的阈值，低于这个阈值时，不会出现可以观察到的不良健康效应。该阈值称为参考剂量或者参考浓度。非致癌风险评估一般用风险熵法，计算公式为：风险熵 = 日均暴露剂量 / 参考剂量。风险熵小于或者等于 1 时，认为健康风险处于可接受的范围内；当大于 1 的时候，则存在潜在的健康风险，需要引起重视并采取控制措施。

致癌物没有绝对安全阈值，任何剂量暴露都会增加患癌的概率。风险评估一般采用非阈值模型，主要参数有致癌斜率因子、单位风险因子等，用以表征在给定的暴露剂量下人群终生的超额患病风险。用终生平均日暴露剂量乘上致癌斜

率因子,就得到个体的终生超额致癌风险值。国际上一般把百万分之一 (10^{-6}) 作为可接受或者可忽略的风险水平,这是环评中判断项目致癌风险是否显著的重要依据。

1. 非致癌风险评估模型:主要采用参考剂量或参考浓度的概念,用风险熵来表示。对多种非致癌物或者多种暴露途径,则用风险指数来评价累积效应。

2. 致癌风险评估模型,用线性或者非线性外推模型,用致癌斜率因子或者单位风险因子来衡量终生超额致癌风险。用概率性的方式可以给环境管理决策提供量化的标准。

二、区域环境健康风险综合评价

单一项目健康风险评价固然重要,但是在现实中,健康风险是由区域内众多污染源、多种污染物共同造成的。因此开展区域环境健康风险综合评价,充分考虑复合污染的叠加效应以及特定人群的脆弱性,就成为实现精准、有效的环境健康管理的主要要求。

(一) 多种污染物复合暴露风险

现实生活中人体接触到的污染物是混合物,不是单一的物质。污染物之间存在复杂的相互作用,产生相加、协同或者拮抗效应,使复合暴露的总体健康风险不是各组分风险的简单相加。传统环境影响评价一般只考虑单个污染物的浓度是否达标,忽略了污染物之间的协同毒性,因此会严重低估区域整体健康风险。尤其在化工园区、重工业基地等污染物种类繁多的地方,复合暴露的问题就更加突出。

评价多种污染物复合暴露的健康风险,是目前环境科学研究的难点和前沿。目前常用的方法是对具有相似毒性作用机制或靶器官的非致癌物,采用风险指数法进行评价。将各种污染物风险熵相加,如果总和大于1,就认为存在不可忽视的累积风险。对多环芳烃类化合物等特定污染物组合,采用毒性当量因子法,将它们的毒性统一换算成代表性物质的毒性当量叠加计算。

随着污染物联合作用机理研究的深入,更加复杂的生物动力学模型以及系统毒理学方法也被引入进来,目的是更准确地模拟和预测复合暴露的健康效应。在“双碳”的背景下,能源结构、产业布局的调整会改变区域污染物排放谱,开展前瞻性的复合暴露风险研究,对识别新的健康风险、优化减污降碳协同增效路径

有十分重要的意义。这就需要环评工作既考虑现有的污染源，又预测未来发展格局下污染物间的相互作用。

（二）敏感人群健康保护与风险评估

人群中不同的个体对于环境污染物的易感性不同，儿童、孕妇、老年人和有基础性疾病的人属于敏感人群。生理构造、代谢能力以及行为方式不同于一般的成年人，因此同等污染水平下他们的健康风险更高。儿童的单位体重呼吸量和食量远大于成人，他们的器官和系统还在发育之中，对神经毒物、内分泌干扰物等更加敏感，儿童是环境健康风险评价中必须特别注意的对象。

环境健康风险评价时必须考虑敏感人群的特点，保证评价结果的保护性。一般而言，可以通过在评估模型中使用针对敏感人群的参数来实现。对致癌物的终生风险而言，美国环保署一般会采用“年龄依赖修正系数”，来反映儿童时期接触致癌物所造成的终生致癌风险较高的情况。此外还应该根据敏感人群的行为特征来建立相应的暴露情景，例如儿童的土壤吮吸行为、户外活动时间等，从而得到更符合实际情况的暴露剂量。把敏感人群的健康保护作为风险管理决策的优先目标，是环境公平、社会正义的体现，也是预防性原则在环境管理中的具体运用。

三、环评中健康风险评价的引入

将健康风险评价系统地纳入到环境影响评价体系中，是将环评由过程管理转变为效果管理、由环境质量控制转变为健康结果导向的重要步骤。一方面可以提高环评的科学内涵，另一方面也能更好地回应社会公众对健康权益的关注，推动环境决策民主化、科学化。

（一）将健康风险作为环评重点内容

传统的环境影响评价体系，其主要目的一般是评价建设项目对水、气、声、土壤等环境要素的影响，保证污染物排放符合国家或地方排放标准。以浓度控制为核心的模式虽然在一定程度上控制了污染，但是没有直接回答公众最关心的一个问题，即项目建设和运营对我健康的影响有多大？健康风险评价被正式纳入环评并成为其重要的组成，是对最后环节缺失的补充。

在环评报告里，应该专门设立一章来开展健康风险评价工作。对涉及到有毒有害物质排放的石化、化工、医药、垃圾焚烧等重点行业，应把健康风险评价作为强制性的内容。评价过程要确定评价范围，找出主要的风险源和污染物，选择

合适的评价模型，对评价结果的不确定性进行分析。评价结果不是简单的达标排放，而是具体的量化的风险值。项目运营之后周边敏感点居民终生超额致癌风险为百万分之零点五，直观的结果更有利于决策者和公众。

将健康风险作为环评的硬性要求，可以促使企业采用环保型的生产工艺和高效的处理技术。当一个项目的健康风险评价结果超出可接受水平时，就要依靠改进设计、调整布局、加强污染控制等手段，从源头上削减风险，直到符合健康保护标准为止。这样环评由传统的被动合规性审查转变为以预防、保护公众健康为目标的主动风险管理工具，真正实现了环境保护的目的。

（二）公众健康风险沟通与信息公开

健康风险评估本身就具有很强的技术性、不确定性，百万分之一的致癌风险对于非专业人士来说很难理解，甚至会引起不必要的恐慌。因此伴随着健康风险评估在环评中的使用，建立一套科学、透明、有效的公众健康风险沟通和信息公开机制就显得更加重要。风险沟通不仅仅是信息的传递，也是和利益相关方特别是受影响的社区居民进行双向交流、建立信任的过程。

有效的风险沟通，需要把复杂的科学概念用通俗易懂的语言表述出来。要将专业风险评估结果转化为公众能够理解的文字，并附上足够的背景材料供其比较，把项目带来的风险同日常生活中吸烟、交通事故等其他风险作类比，从而使公众正确认识风险。同时也要坦然承认评估中的不确定性，比如模型的假设、参数的选取、数据的限制等等，承认科学的边界来提高沟通的可信度。

信息公开是风险沟通的基础，环评报告中有关健康风险评价的内容应该全部公开，并且需要编制面向公众的简要版本。采用社区听证会、专家咨询会、在线问答等不同的形式，给公众提供提问、表达关切、提出建议的平台。让公众参与风险评价初步范围确定阶段，共同来决定要关注的健康问题及保护目标，明显提高环评的针对性和公信力。开放包容的风险沟通和参与过程，一方面可以消除可能存在的社会矛盾，另一方面也能收集集体智慧，在项目规划阶段就考虑健康因素，从而实现环境、经济、社会三者之间的统一。

第四节 气候变化风险评价体系

一、气候变化对项目影响的识别

识别气候变化会带来的哪些潜在影响，就是风险评价过程开始的步骤。这就需要气候因子和项目全生命周期各个阶段进行系统的分析，重点放在物理风险上，即极端天气事件和渐进性气候变化带来的挑战。这就对评价工作提出要求，评价工作要具有较强的预见性和综合性。

（一）极端天气事件风险

强降雨、高温热浪、干旱、台风等极端天气事件，在全球气候变暖的大背景下，发生得越来越频繁，强度越来越大。这些事件给工程项目造成了巨大的直接物理冲击，会造成结构受损、设备失效、运营中断、人员伤亡。强降雨造成的洪水、城市内涝会直接淹没厂区、冲毁交通干线，严重威胁能源、水利、市政等重要基础设施的正常运行。

高温热浪会对能源需求、户外作业安全、设备性能等造成明显的影响。夏季高峰期电力系统负荷增大，关键设备过热就会降低效率甚至完全失效。建筑施工中高温持续，混凝土浇筑质量受到影响，户外施工人员中暑风险也大大增加。干旱直接对高度依赖水资源的行业，即农业、火电以及部分制造业造成生产受限或者成本增加，从而影响项目的经济可行性。

因此环境影响评价要充分认识这些风险，综合考虑项目所在地区的历史气象数据以及未来的气候预测模型，判断出不同重现期的极端事件出现的强度。工程在规划、设计、施工、运行等全生命周期风险暴露程度、脆弱性也会被考虑在内。该项识别工作为之后制定有效的应对措施打下了基础，可以保证项目具有抵御突发气候灾害的能力，从而保证其长期稳定运行。

（二）海平面上升对沿海项目的影响

全球变暖引发的海平面上升属于典型的渐进性气候变化，它长久地、不断地上演着对沿海港口、能源设施和滨海城市基础设施的威胁。其主要影响有增加永久性淹没的风险、增大风暴潮、咸潮入侵的破坏性及影响范围、造成已有的防护标准失效。平均海平面较高时，同等级别的风暴潮造成的危害就越大，同时也会引发河口地区咸潮上溯，对淡水资源供应以及沿岸生态系统健康造成严重威胁。

此类影响识别工作要依靠高精度地形数据和区域海平面上升预测情景。评价时要重点考察项目重要设施的海拔高度，分析在不同的时间尺度、不同的排放情景下所面临的风险。对于地下管线、地铁等基础设施还要考虑地下水位上升、土壤盐碱化所引起的腐蚀以及结构稳定问题。前瞻性识别工作，可以使得项目规划、设计阶段就留出足够安全裕度，或者提前采取迁移、加高（加固）等适应性措施，从而有效地避免以后可能会发生不可逆转的重大损失。

二、项目气候脆弱性与适应性评价

在识别出潜在的气候风险之后，下一步就要评估项目面对这些风险时的脆弱性以及适应性，也就是气候脆弱性与适应性评价。它是风险识别和适应措施之间的核心环节，它的评估结果的好坏直接决定着项目能否成功应对气候变化的挑战。

（一）关键基础设施的气候韧性评估

气候韧性，就是指基础设施系统在受到气候扰动的时候，能吸收冲击、维持核心功能、适应变化并快速恢复的能力。对能源、交通、供水、通信等重要基础设施的韧性进行评价就显得十分重要。评估时不能只考虑单个设施的物理强度，应该更加重视整个系统冗余设计、潜在的关联效应和应急恢复能力。

评估方法可以采用定性与定量相结合的方式。定性评价主要是用专家讨论、情景分析等方法找出系统的薄弱环节和潜在的级联失效的风险。一次区域性的强降雨可能会造成交通堵塞、电力供应中断、通讯障碍等一系列问题。因此有必要对各类基础设施之间错综复杂的相互依赖关系进行分析，以找到可能会造成连锁反应的潜在链条。

定量评价就是建立数学模型，模拟不同的气候灾害情景下系统的表现。通常由以下几步组成：

1. 构建设施网络模型，明确节点功能。
2. 输入气候灾害情景，分析组件失效情况。
3. 评估系统服务水平下降程度及恢复时间与成本。

评估结果一般用韧性指数、恢复曲线等直观的形式表现出来，给决策者指明提高系统气候韧性具体的方向，例如增加备用设施、建立替代路线、加固关键点等。这些量化指标使韧性提升工作更有针对性，更易操作。

（二）项目选址与设计的气候适应性标准

项目选址及设计从一开始就决定了项目先天的气候适应性。所以，在环境影响评价阶段把气候适应性作为重要的考量标准是必要的。选址时要避开气候风险高敏感区，也就是洪泛区、地质灾害易发区、海平面上升明显受其影响的地区。需要利用气候风险图等工具对备选场址进行严格的筛查，选择风险暴露度最低的场址，从源头上降低项目风险。

工程设计上适应性标准要由以往依靠历史数据的静态方式，变成依照未来气候预估的动态、前瞻性标准。防洪设计不能只参考历史最高水位，还要考虑未来降雨变化所造成的极端洪峰流量。建筑通风制冷系统设计要考虑未来高温热浪出现的频率和强度，保证室内环境舒适安全，降低能耗。

推广基于自然的解决方案，也是提高设计适应性的有效途径。城市开发过程中建设透水铺装、绿色屋顶等海绵城市设施，可以大幅度提高暴雨径流消纳能力。海岸防护工程保护和恢复红树林、珊瑚礁等自然生态系统，可有效削弱波浪能量，减轻风暴潮的冲击。该方案既可以提高气候适应性，也可以产生生物多样性保护、碳汇增加等种种生态效益。

三、气候变化风险的定量化评价

为了保证决策的科学性和准确性，有必要把气候风险由定性的描述转变为可以量化的指标。定量化评价既可以体现风险的严重程度，又可以给适应性方案的选择赋予扎实的经济支撑，进而让风险管理由模糊的概念转变为精确的计算与比较。

（一）基于情景的风险损失评估

情景风险损失评价属于定量评价的主要部分。它用未来气候情景来分析项目所承受的经济损失。该过程包括危害性、暴露度、脆弱性这三个要素的深入分析。危害性指的是气候事件本身的特性，暴露度指的是受其影响的资产和经济活动，脆弱性则是指暴露对象面对危害时所遭受的损失程度。这三者一起决定风险最终的大小。

评估过程首先需选择合适的未来气候情景，通常会采用政府间气候变化专门委员会发布的共享社会经济路径或典型浓度路径组合情景。然后，利用气候模型、水文地质等专业模型把宏观的气候情景降尺度到具体的本地指标上，如推算未来

的暴雨强度、潜在淹没范围等。该步骤就是联系宏观气候预测和微观项目影响的纽带。

然后将项目的资产清单、地理信息与灾害影响范围进行叠加分析，就可以识别出暴露资产。然后，根据各个资产的脆弱性曲线计算出直接经济损失。对于生产中断、供应链受阻等造成的间接经济损失，用投入产出模型等方法来估算。最后将不同情景下预期损失用概率加权，就可以得到项目综合气候风险值，以货币化的形式直观地表现风险的大小。

（二）气候风险成本效益分析

气候风险成本效益分析是在风险损失评价的基础上，用来评价各种气候适应措施经济可行性的工具。其基本思想就是比较采取适应措施所要付出的成本，与不采取措施可能导致的未来气候风险损失。如果一项适应措施所获得的效益（即减少的损失）大于其成本，那么从经济的角度看，这项措施就是合理的。这样的分析给决策者在众多备选适应方案中进行权衡、排序赋予了量化的准则。

成本效益分析要充分考虑适应措施全生命周期内所有的成本，即建设初期投资成本以及后期运行维护成本。同时要准确地估计采取措施后可以避免的潜在损失，必须与风险损失评价相结合，通过比较有无适应措施两种情境下预期损失的差别来确定效益。由于成本和效益在不同的时间点发生，所以需要贴现率把未来的价值折算成现值来进行比较，也可以用净现值、效益成本比等指标来评价其经济效率。这样才能保证投入的资源能取得最大的风险削减效果，实现适应投资的精细化、高效化。

第五节 环境风险分级管控策略

一、环境风险分区与分级管理

环境风险在空间上分布不是均质的，所以分区分级管理是实现精准化、差异化管控的前提。依据科学的风险单元分类和明确风险等级的方法，可以把有限的监管资源重点用在关键的地方，使环境管理工作发挥最大效果，为区域的可持续发展筑牢安全防线。

（一）基于网格化的环境风险“一张图”

建立以网格化为基础的环境风险“一张图”，是实现环境风险精细化管理的关键技术支撑。该方法论把复杂的地理空间、环境要素信息系统地整合到一个统一的数字化平台中。它以地理信息系统为基础，将整个评估区划分为若干个网格单元。对于每一个网格单元来说，固定污染源的位置、类型、污染物排放清单、碳排放数据、重大危险源分布、储存物质种类和数量，再叠加人口密度、学校、医院、饮用水源地等环境敏感目标信息、区域水文、气象、地质等自然背景数据、实时更新的环境质量监测数据进行融合。

通过大数据分析以及空间插值算法，对各种风险因素进行量化评价，并赋予权重，然后计算出每个网格单元的综合环境风险指数。这些指数用不同的颜色或者图例在电子地图上直观地表现出来，形成动态的风险等级空间分布图谱。该动态风险图不仅是一个静态的风险展示工具，更是一个强有力的决策支持平台。它能够模拟出各种情形下的污染物扩散路径和影响范围，有利于发现潜在的风险链条、关键控制节点，为产业布局优化、项目选址、环境监管执法以及应急预案制定提供直观而科学的依据。在双碳背景下，把高耗能、高排放企业碳足迹数据加入这张“一张图”中，就可以实现环境风险和碳排放的协同管控，精准识别出既是环境风险高发区又是碳减排关键区的“双高”网格，为区域性的减污降碳协同增效策略提供数据支撑。

（二）不同风险等级区域的差异化管控

根据环境风险一张图来实施不同等级区域差异化、精细化的管控措施，是提高环境管理效率和效果的必然要求。其要义就是合理分配监管资源，对重点区域实行最严格的保护和监管，对一般区域以引导规范为主，避免“一刀切”的管理方式，真正实现科学施策、精准发力。

高风险区一般是指工业企业集中、重大危险源密度大、临近重要的环境敏感目标的地方，应该采取严格的环保准入及监管措施。

1. 严格项目准入，原则上不得新建、扩建高风险、高碳排放的“两高”项目。对于那些直接关系到国家经济命脉与人民生活安全、社会和谐稳定的重大工程项目，必须严格采用国际上最新的绿色生产工艺及相应的污染管控技术手段，并实行专门的风险评价。

2.2 加强日常监管，大幅度提高监督性监测和现场检查的频率，使用无人机、

在线监测等现代技术手段实施全天候监管，保证企业治污设施正常运行，各项风险防范措施落实到位。

3. 强制开展环境风险评估、隐患排查并公布区域内企业所涉及到的风险特征、防范措施、应急预案等信息，接受社会监督。

对中风险等级的区域，管控的重点应该是促使企业转型升级，提高企业内部风险管理能力。这就意味着企业需要开展技术改造，使用清洁能源、清洁原材料，从源头上控制污染物、温室气体排放。同时还要促使企业建立环境风险管理体系，完善操作规程，加强员工培训，保证生产活动在安全可控的状态下进行。政府层面要给予相应的政策扶持和技术引领，助力企业达成绿色低碳转型，进而慢慢削减区域整体环境风险水平。

低风险等级的区域主要是保护、预防。在保证生态功能不降低、环境质量不恶化的基础上，可以适度发展生态旅游、绿色农业、高新技术产业等环境友好型产业。管理上主要是建立长期的生态环境监测网络，对区域内环境质量变化情况进行长期跟踪，及时发现环境问题，保证区域的环境风险等级一直保持在较低的水平上，为区域留下宝贵的生态空间和环境容量。

二、风险源头预防与过程控制措施

只依靠末端治理和应急响应，是无法从根本上消除环境风险的。将风险管理的关口前移，实行严格的源头控制和全过程管理，是降低事故发生的概率、减轻事故后果的最有效的方法。这就要求环境影响评价不能只考虑项目建成后的环境影响，而应该深入到生产工艺的全流程当中，发现并控制可能存在的风险点。

（一）重大危险源监控与预警系统

重大危险源是环境风险的主要来源，对它实施动态、实时的监测与预测，属于源头预防的重要环节。建立先进的监控预警系统，运用现代信息技术手段对危险源状态进行全时、全域、全过程感知，目的是将事故扼杀在萌芽之中。

该系统把物联网、传感器技术、大数据分析、人工智能算法融合在一起。在重大危险源所在的位置，比如大型储罐区、高危工艺生产装置等重点区域，布置一些高精度的传感器，对重要的参数实施监测，包含化学品的温度，压力，液位，浓度以及周边环境中的有毒有害气体浓度等等。这些传感器通过无线或者有线网络把大量的数据传送到中央控制平台。

中央控制平台就是整个系统的“大脑”。不仅可以直观地显示出各个监控点的实时数据以及设备运行的情况，它的强大的数据分析预警能力更是十分重要。平台内部嵌入了依靠历史数据以及物理模型创建起来的预测算法，可以不断对数据流的变动趋向加以剖析。当监测数据出现异常波动或者接近设定的安全阈值的时候，系统不会仅仅发出报警，它还会对异常的严重程度以及可能的发展趋势做多方面的关联分析。

系统能够区分出来参数微小变动是因为设备正常变化，还是由于事故征兆引起的。初级预警以声光信号告警现场工人，高级预警可以联动启动应急喷淋、切断进料阀并发送企业管理员和政府监管手机或 APP 报警信息来获得应急反应时间。从被动应对到主动预判的转变，使风险防控由原来的被动变为主动，科学性大为提高，大大降低了由于人为疏忽或者设备故障而引发突发环境事件的可能性，是保障生产安全和环境安全的“智慧防线”。

（二）企业环境风险隐患排查治理

企业是环境风险的产生主体，健全环境风险隐患排查治理长效机制，是落实企业主体责任、构建风险防控内部防线的必要之举。依靠系统的自查自纠、闭环管理来发现并消除生产经营活动中的各种环境安全隐患，最终达到风险动态清零的目的。

机制运行的第一步就是一份详细的、周密的检查清单。该清单的制定要以国家法律法规、行业标准规范为依据，结合企业生产工艺、原辅材料特性、产排污环节、环境管理现状等实际情况。排查内容要覆盖原料采购、存储、生产使用、产品产出、废物处理等全部环节，主要对环保设施运行状况、危险化学品和危险废物管理、应急设施和物资配备、有关场所合规性、环境管理制度落实情况等开展排查。排查不能只局限于硬件设施上的缺陷，还要深入挖掘管理制度上的漏洞、人员操作上的不规范行为，做到横向到边、纵向到底，不留死角。

隐患排查制度化，定时开展全面体检式的排查，在工艺变动、设备修理、季节更替等重要节点还要做专项排查。排查出的隐患无论大小都要建立台账，详细记录隐患的具体情况、责任部门、整改措施、整改时限、责任人。治理过程实行闭环管理，即整改完毕后，需要经过相关部门验收销号，保证问题得到彻底解决。对重大隐患，企业主要负责人应当挂牌督办。排查治理全过程都应留下痕迹，有关记录归档保存备查，定期向生态环境部门报告。系统内部管理可以有效地防止

环境污染、生态破坏事件的发生，同时也可以提高企业的精细化管理水平，通过改进工艺、减少泄漏等方式间接实现节能减排的目的，从而与双碳目标同向而行。

三、环境风险应急能力建设

即使采取了多种预防手段，突发环境事件的风险也不能被彻底清除。因此加强环境风险应急能力建设，建立反应迅速、处置高效的应急体系，就是守护环境安全底线的最后一道防线。不单是对物资、队伍的准备，而且是在跨区域协同作战能力建设上下功夫。

（一）区域环境应急物资储备库建设

区域环境应急物资储备库是突发环境事件的物质保障，其建设水平以及管理好坏直接影响应急响应的成败。在“双碳”目标之下，储备库的创建不能只满足“储得足、调得动、用得上”的基本要求，还应该融入绿色、智能、协同的现代化理念。

储备库布局规划为第一项要完成的工作。在选址时，应参照前面制定出的环境风险一张图，根据区域内各种危险源分布情况和事故后果影响范围来确定选址方式。同时还要考虑交通状况、气候条件等各方面因素进行科学战略性选址。高风险工业园区、重要饮用水源地上游、交通枢纽等是重点布局区域，由此形成布局合理、覆盖面广、重点突出的区域性储备网络。储备物资的种类和数量要精准测算，按照区域主要风险类型（化学品泄漏、水体污染、大气污染等）实行“菜单式”储备，既要储备围油栏、吸附毡、活性炭等常规通用物资，也要储备针对性的专用化学品中和剂、特种防护装备、便携式快速监测仪器等。

现代仓储管理的方向就是智能化和数字化。创建应急物资信息化管理平台，采用物联网、二维码技术对所有的物资实行电子标识、动态管理。平台可以显示物资种类、数量、位置、保质期等信息，可以进行库存动态盘点，自动预警补货。应急事件发生时，指挥中心可以借助平台快速定位到距离最近、种类最匹配的应急物资，大大提高了物资调运效率。“双碳”理念也要渗透到物资储备中，即优先采购和使用可降解、可循环的绿色环保型应急材料，减少应急处置过程中的二次污染。并推动企业自身储备应急物资，将企业的储备纳入区域统一调度体系中，形成政府和社会互相补充的保障机制。

（二）跨区域应急演练与协同处置

环境污染事件，尤其是大气污染、水体污染等具有很强的跨区域传播性，污染影响范围一般会超出单一行政管辖区域。因此，创建出高效率的多区域联合应急演练与协同处置机制，就显得非常必要，以应对流域性的、区域的突发环境事件。核心内容就是打破行政界限，实现信息、资源、力量的共享共通，从而建立区域环境安全共同体。

跨区域协同处置能力的好坏，必须依靠实战化的应急演练来检验和提高。应急演练不能是走过场的“脚本式”表演，而应该设计出复杂的、接近实战的模拟情景，比如上游地区化工企业有毒物质泄漏顺流而下，对下游多个城市的饮用水源造成威胁。演练的主要目的在于检验应急响应链条的协同作用，即：

1. 事故发生后，事发地发生的情况可以及时准确的上报给上级、下游单位、通知到相邻地区吗？相关的地区之间是否可以依靠同一个平台来对监测数据实现实时共享，污染团迁移预测模型所得结果能否实现共享呢？

2. 联合指挥与决策，在短时间内能否调动各区域联防联控指挥部共同分析状况，制订统一的应急方案，例如联合构筑堤坝拦截、排水、增加监测力度等等。

3. 资源调配和协同行动，根据统一指令能否高效跨区域调度应急监测队伍、处置专家小组、应急物资，实现优势互补、协同作战？

定期开展多样化的联合演练可以磨合不同地区、部门之间协作的流程，发现并解决协同过程中存在的体制机制障碍，完善应急预案的衔接性、可操作性。在此基础上要固化并形成一套标准的跨区域协同处置工作规程，明确各方责任、沟通渠道、行为准则。跨越行政边界协同作战的能力，是防控系统性环境风险，共同守护区域“山水林田湖草沙”生命共同体安全的必要条件。

第九章 绿色低碳规划环评

第一节 国土空间规划环评方法

一、国土空间规划“双评价”中的碳考量

双评价即资源环境承载能力评价、国土空间开发适宜性评价，是国土空间规划编制的基础。把碳约束、碳导向融入其中，是从源头上控制区域碳排放、优化空间开发格局的重要措施。

（一）资源环境承载能力评价的碳约束

资源环境承载能力评价为区域发展规模和强度的确定打下了基础。在“双碳”目标之下，必须加入碳排放约束条件，形成区域碳承载力的概念。包括区域内的生态系统（森林、草地、湿地、海洋）的碳汇能力，即自然生态系统吸收和储存二氧化碳的能力，也包括按照国家和地方减排目标分配给碳排放空间总量。把碳排放总量变成硬性约束指标加入承载能力评价体系之中，就会促使规划制定者面对区域碳平衡问题。

核算区域碳承载力要科学地对已有的生态系统的碳储量、年均碳汇增量进行评价，根据区域的发展定位以及减排责任来确定合理的碳排放配额。当规划的产业规模、人口规模造成的预测碳排放量超过了承载力阈值的时候，说明规划方案有不可持续的风险，需要及时调整发展目标、产业结构或者能源方案。该方法把宏观减排目标细化到具体的空间单元，给国土空间用途管制和资源配置提供清晰的碳基准，防止规划不当造成的碳排放失控。

（二）国土空间开发适宜性评价的碳导向

国土空间开发适宜性评价是确定各个地域单元最适宜的开发利用方向，传统上大多关注地质安全、水土资源、生态敏感性等自然地理因素。引入碳导向就是，在评价体系中增加碳排放强度和碳汇功能两类重要的指标，使土地开发的价值同碳足迹直接挂钩，从而促使低碳、零碳乃至负碳的空间开发模式形成。

在评价时，应该给不同的土地利用类型赋予不同的碳排放系数。规划为重化

工业园区的地块，单位面积碳排放强度较高，开发适宜性等级应相应降低，或者附加严格的碳减排前置条件；规划为高密度、公交导向的综合功能区，由于土地集约利用、居民绿色出行，可以获得较高的开发适宜性评价。

利用叠加分析得到一份区域“碳效空间地图”，清楚地标示出高碳排放风险区、低碳发展潜力区和碳汇功能核心区。这份地图可以直观指导城镇建设、产业布局、基础设施选址，把开发活动引导到碳排放影响较小的地区，不侵占重要的生态碳汇空间，从源头上塑造紧凑、高效、绿色的国土空间开发格局。

（三）碳汇增益的积极考量

开发适宜性评价中强调碳导向，也意味着把土地的固碳能力当作一项重要的正向价值来评价。既是对高碳活动的限制，也是积极发掘和推广能够增加生态系统碳汇功能的土地利用方式。评价体系要充分体现对现有森林、草地、湿地等高质量碳汇空间的保护价值，把这些区域列为不适宜或者限制进行高强度开发的区域。

因此评价方法要融合遥感影像、生态模型、地面调查数据，对区域内植被净初级生产力、土壤有机碳储量、湿地生态状况等指标进行空间化评价和量化分级。在此基础上创建碳汇潜力评价专题图，再和传统的建设用地适宜性评价结果做耦合分析。耦合分析可以发现开发需求和碳汇保护之间可能存在的矛盾，给规划决策提供权衡依据，促使形成既能够实现经济社会发展，又能达成增汇减排双重目标的国土空间开发新范式。

二、“三区三线”划定的碳效应评价

三区三线是国土空间管控的刚性约束。对它的划定方案对碳汇增长、碳排放减少的影响进行评价，对保障区域生态安全、推进绿色低碳转型有重大意义。

（一）生态保护红线的碳汇保护功能

生态保护红线是国家生态安全的底线和生命线，也是保障和维护生态安全底线与生命线。在双碳战略中，它的主要价值就是对关键碳汇资源进行刚性保护。这些被划入红线范围的区域一般是森林、草原、湿地、冰川、海洋等生态功能极为重要、生态环境极为脆弱的区域，它们是国土空间中最重要碳储存库和碳吸收器。

进行规划环评的时候，要对生态保护红线的碳效应展开评价。依靠模型和数

据来准确计算出红线范围内碳储量基数和年固碳速率，这就为衡量保护效果提供了量化标准。进一步的评价要分析红线划定对阻止生态空间被侵占、减少植被破坏、土壤退化等活动的有效性，进而估算出由于严格保护而避免的碳排放量以及维持和增强的碳汇量。

评价还需要考虑红线内外人类活动之间的相互影响。分析红线周边区域开发建设活动是否会对红线内生态系统健康、固碳效率造成间接影响，途径有边缘效应、环境污染等。经由系统评价，可以证明生态保护红线划定的合理性，为之后的生态保护修复工程提供科学的指导，保证这片“绿色财富”可以持续稳定地发挥气候调节功能。

（二）城镇开发边界的碳锁定效应

城镇开发边界划定属于国土空间规划当中具有深远影响的决策之一，对城市未来形态、基础设施布置、居民生活方式等都会产生直接影响，从而产生明显的碳锁定效应。碳锁定指高碳排放的基础设施、建筑、城市形态一旦建成以后，运行模式和能源消耗在接下来的几十年内被固定下来，即使技术进步也无法在短期内完全改变其高碳排放轨迹。

如果城镇开发边界划定过宽，就会造成城市摊大饼式地向外蔓延，形成低密度、功能单一的社区。这样的布局方式必然造成长距离通勤，增加小汽车的依赖，使交通领域的碳排放居高不下。分散的布局还要修建更多的道路、管网等基础设施，在建设、维护过程中消耗更多的能源和碳排放。规划环评要体现出空间扩张模式背后隐藏的长期碳成本，给决策者发出警示，防止陷入高碳发展路径的锁定陷阱。

（三）城镇开发边界方案的碳效应评估

城镇开发边界碳锁定效应的评价，核心是对不同的边界划定方案进行情景模拟和比较分析。环评工作要建立综合的城市发展模型，在“紧凑集约”和“松散蔓延”这两种不同的边界约束下模拟城市未来交通流量、建筑能耗、产业分布、居民生活碳足迹的变化趋势。量化比较各种方案长期累计碳排放的差别，给决策提供依据。

评价的重点还要看边界内土地利用效率和空间组织结构。具有低碳潜力的城镇开发边界方案一般会引导形成多中心、组团式、产城融合的空间结构，鼓励土地混合利用，把居住、就业、公共服务设施集中布置在公共交通廊道周围。环评

要评价规划方案在多大程度上促进了以公共交通为导向开发（TOD 模式），并保证步行、自行车等绿色出行有足够、连续的空间。环评不仅可以评判边界划定的好坏，还可以提出优化建议，引导城市走向资源节约、环境友好、碳排放更低的未来。

三、区域空间规划的碳达峰路径评估

规划环评既是约束手段，又是引导手段。本节主要进行区域空间规划评价的模拟，各种发展情景下的碳排放路径，从而给碳达峰路线图及行动计划的制定提供科学依据。

（一）优化区域产业与能源布局

产业结构、能源结构决定着区域碳排放水平。区域空间规划中产业和能源布局的碳效应评价，属于规划环评的主要工作。评价的目的在于发现规划方案中促进或者阻碍低碳转型的关键环节，提出改善建议，保证空间布局能够支撑区域碳达峰目标的实现。评估时需要综合考虑以下方面：

1. 产业结构调整要分析规划中提出的产业发展导向，量化评价它对区域整体碳排放强度的影响。这指的是在规划期内，由于淘汰落后产能、限制高耗能高排放项目、培育战略性新兴产业和现代服务业等途径而产生的减排量。利用产业关联模型可以找到碳排放对各个行业间的影响传导途径，确定减碳的重点产业链环节，给精准施策提供依据。

2. 能源系统转型即评价规划对于区域能源基础设施布局的引导作用。重点在于考察规划是否给风电、光伏、生物质能等可再生能源的发展留有足够且适宜的空间，分析新能源设施布局同电网规划、负荷中心的匹配情况。同时还要考察规划对化石能源消费的控制措施，以及热电联产、分布式能源等提高能源利用效率的方式。

3. 循环经济和产业集聚，评价规划对产业园区化、生态化发展的促进作用。主要研究规划怎样引导关联企业空间集聚，为创建物质能量循环利用的工业共生体系创造条件。用物质流分析法可以模拟出园区企业间废物交换、能量梯级利用的可能性，并把其转化成具体的碳减排效益。

优化区域产业与能源布局评估要素表

评估方面	核心内容	评价指标示例	目的
产业结构调整	产业发展导向对碳排放强度的影响	落后产能淘汰率、新兴产业产值占比、单位 GDP 碳排放	识别减碳重点，制定精准施策
能源系统转型	可再生能源发展空间、化石能源控制、能效提升	可再生能源装机容量、非化石能源占比、单位能耗	确保能源清洁低碳转型
循环经济	产业共生体系构建、资源循环利用	物质循环利用率、固体废物减量率	促进资源高效利用，降低碳排放

从表中可以看出，优化区域产业与能源布局的评价包含宏观产业结构、具体能源技术选择、微观循环经济模式等各方面，保证规划方案可以全面支撑区域碳达峰目标。

（二）构建蓝绿交织的生态碳汇网络

建立功能齐全、结构牢固的生态碳汇网络，是抵消部分不可避免的碳排放、迈向碳中和的必然途径。规划环评要从系统、网络的角度出发，对规划方案对区域生态碳汇能力的总体提升效果进行评价，不能只看单个生态地块的得失。评价重点就是规划所形成的绿色网络是否连通、完整。该网络是由大型森林公园、自然保护区、郊野公园等生态斑块以及连接这些生态斑块的生态廊道、绿道等线性要素共同构成的。

环评应使用景观生态学原理，分析规划方案是否能够修复被城镇、交通干线等分割的生态斑块，提高景观的连通性，保证物种迁移、基因交流，从而保证整个生态系统健康稳定，持续发挥碳汇功能。经过精心设计的绿色网络可以产生明显的降温增湿气候调节效应，间接减少城市建筑空调制冷用电。比较不同的空间布局方案下景观格局指数，选择出最有利于形成高效碳汇网络的规划方案。

（三）复合生态系统中的碳汇增益

在绿色网络的基础上，将河流、湖泊、水库、近海湿地等“蓝色网络”要素也一并考虑进去，形成蓝绿交织、协同增效的复合生态系统，是规划环评在碳汇评估方面的又一创新方向。水体以及滨水地带，尤其是红树林、盐沼等“蓝碳”生态系统，有很高的固碳效率和巨大的碳储量，是全球碳循环中不可缺少的一部分。因此环评要严格审查规划中各项活动对蓝碳生态系统造成的破坏影响，坚决反对任何会使其退化的开发行为。

评价的重点在于规划中是否把水系廊道和陆地绿廊有效衔接，整合成互联互通的生态基础设施网络。沿江、沿河、沿湖地带的生态缓冲带、绿化建设一方面可以保护水质、水生生物多样性，另一方面植被本身也是重要的碳汇载体。通过对于规划方案中水系连通性、岸线自然化率、滨水植被恢复等指标的评价，可以促使规划由单一的绿地建设向水陆复合、功能多元的生态网络转变，给城市和区域提供更强、更韧性的碳汇服务和生态安全保障。

第二节 城市低碳发展规划环评

一、城市总体规划的碳排放预测与评估

城市总体规划是绘制未来城市发展蓝图的指引，碳排放预测和评估必须前置。既符合双碳目标的政策要求，又是控制城市碳排放增长的源头之法、优化空间和产业布局的主要方式，同时也是为规划科学决策提供碳数据支撑的重要途径。

（一）基于城市人口与经济发 展的碳排放情景

城市碳排放预测的关键就是建立和城市发 展动态联系紧密的情景模型。一般要联系城市未来的人口规模、结构变化、经济增长速度、产业转型趋向等主要推动力量。根据不同的情景发 展，即基准情景（维持现行政策）、强化低碳情景（实行积极减排政策）和深度脱碳情景（按碳中和目标设定），可以预测分析得出不同的发 展路径下碳排放的轨迹。此法可以清楚地体现各种政策选择对城市长期碳排放造成的影响，从而为规划方案的选择提供量化的依据。以下城市碳排放情景分析表中列出的主要特点和目标。

城市碳排放情景分析表

情景类型	主要政策假设	排放轨迹特征
基准情景	维持现有政策不变，无额外积极减排措施。	碳排放量持续增长或缓慢达峰，与历史趋势类似。
强化低碳情景	实施积极的低碳政策和技术措施，但非强制性达到碳中和。	碳排放增速放缓，或在特定年份较早达峰，峰值水平降低。
深度脱碳情景	围绕碳中和目标，设定激进的减排路径和转型策略。	碳排放量在短期内迅速下降，并最终实现净零排放。

实践中一般用能源环境系统分析平台或者 IPCC 清单方法学，根据城市本地

化参数进行校准。模型建立不但要包含能源活动、工业生产过程、农业、土地利用变化和废弃物处理等主要排放源，而且还要考虑技术进步、能源效率提高、居民消费模式变化等社会经济因素的影响。通过不同情景下碳排放总量的预测，可以确定城市达到碳达峰的大致时间窗口和峰值水平，进而评价总体规划方案的环境合理性以及气候目标的可行性，根据需要提出相应的改善建议，保证城市发展路径符合低碳转型的要求。

（二）城市能源系统与交通系统碳排放

城市能源系统、交通系统为碳排放的两个主要领域，精细化评价是规划环评的重点。能源系统碳排放评价要分析城市能源消费结构，即电力、热力、燃气等终端能源来源及构成。主要考查规划中能源供应的低碳化程度，即可再生能源（风能、太阳能）规划装机容量、外调绿电比例、分布式能源系统布局、传统化石能源替代计划。同时也要关注工业、建筑等重点部门能效提升的目标，智慧电网建设对能源优化配置的贡献也要加以考虑。

交通系统的碳排放评价就是对城市交通基础设施网络布局、公共交通发展规划、交通需求管理政策等进行的评价。内容有道路网密度、轨道交通线网规划、公交优先车道设置、慢行系统（步行和自行车）建设等。交通模型可以预测出在规划方案下居民的出行方式构成、机动车保有量、行驶里程，进而计算交通系统的碳排放量。评价的核心就是判断规划能否促使居民从私家车出行转向公共交通、慢行交通等低碳出行方式，以及新能源汽车推广对交通部门碳减排的潜力。

（三）城市能源与交通系统碳排放的综合评价

对城市能源和交通系统碳排放进行综合评价时，应该考虑到二者之间存在耦合效应以及协同减排的可能性。随着电动汽车的普及，交通系统成了电力系统新增负荷，这种“交能融合”的趋势给规划环评提出了新的要求。评价要考虑到电动汽车作为移动储能单元参与电网削峰填谷的可能性，也就是车网互动技术的应用前景。规划良好的城市，充电桩网络布局要与电网承载能力、可再生能源发电出力特性相匹配，从而达到交通电动化、能源绿色化良性互动的目的。

评价方法由原来的一个系统独立核算变成了跨系统的综合建模。城市综合能源系统模型把电力、热力、燃气网络同交通网络一起模拟。该模型可以评价热电联产、综合能源站等项目推广时，怎样同时满足建筑供暖、工业用能、交通充电等需求，实现能源梯级利用和整体能效最优化。环评还要考察城市空间布局对于

能源、交通碳排放的长远影响。紧凑型、多中心的城市空间结构可以缩短居民通勤距离,减少交通能耗,也利于区域集中供能,提高能源利用效率。空间、能源、交通一体化的协同减排效益要在规划环评中量化、突出。系统评价的方法冲破了传统环评的束缚,给城市规划提供更加完善的、更具前瞻性的低碳决策支撑,促使城市基础设施总体上向着绿色化发展。

二、城市更新行动的低碳环评

城市更新是提升城市品质的重要途径,在存量发展时代,城市更新环境影响评价要与时俱进,把低碳理念贯穿始终。评价城市更新行动的碳效应不能只看改造过程中的节能减排,还要看更新后城市功能的长期低碳运行,使之成为实现城市碳减排目标的重要手段。

(一) 老旧小区改造的节能减碳效益

老旧小区改造属于城市更新的一部分,低碳环评的重点就是量化改造措施带来的节能减碳效果。评价工作要建立科学的核算方法学,对比分析改造前后建筑能耗和碳排放。改造措施主要是建筑围护结构的优化,增加外墙保温层、更换节能门窗;供热和空调系统的能效提高,用热泵技术代替传统的燃煤锅炉;可再生能源的利用,在屋顶、立面安装分布式光伏发电系统。

环评报告不能只计算直接节能措施造成的运营阶段碳减排量,还要考虑它的全生命周期碳足迹。保温材料生产、运输过程中隐含的碳排放、光伏组件制造、废弃处置的环境影响等都应该被包含进来。通过建筑能耗模拟软件来对不同的改造方案进行情景分析,找出成本效益最好的低碳改造方式。评价还要考虑到改造带来的协同效益,即室内热舒适度提高、居民用电费用降低、社区公共空间品质改善等,这些都是老旧小区低碳改造的综合价值,也是政策推行、社会参与的动因。

(二) 城市工业用地转型的碳影响

城市工业用地转型是改善城市空间格局、推进产业升级的重要途径,其产生的碳影响是复杂的、长期的。评价应从全链条视角入手,对工业企业搬迁、土地再利用链条的碳排放变化做系统的分析。一方面要核算原有高耗能、高排放工业企业迁出后给城市带来的直接碳减排量。另一方面还要审慎地评价土地转型后碳排放效应。

工业用地转为商业、住宅或公共服务设施时,评价的重点就是新建设建筑的

能源消耗、交通可达性和配套基础设施的能源消耗。转型项目如果能与轨道交通站点衔接好,引导绿色出行,那么其交通碳排放就会远远低于依靠小汽车出行的郊区开发项目。评价中还要考虑到土地清理、土壤修复、新建筑施工过程中的隐含碳排放。通过比较不同的再开发方案的碳足迹来指导城市决策者,使城市工业用地转型真正服务于城市低碳发展的目标,避免产生污染转移或者碳泄漏等问题,从而实现经济效益、社会效益和环境效益三者的统一。

（三）城市工业用地转型碳影响的深化评估

深度评价城市工业用地转型碳影响,需要用到全生命周期评估、物质流分析等新的方法。这就意味着评价不能只停留在运营阶段的碳排放核算上,还要追溯到建筑材料的生产、运输以及未来建筑拆除和废弃物处理等环节。转型方案中提出对原有的工业厂房进行适应性再利用,而不是全部拆除重建,这样可以大大减少建筑垃圾的产生和新材料消耗带来的巨大隐含碳。环评要定量地比较两种途径的碳排放差异,在政策上推动循环经济原则的应用。

评价体系中还要加入土地利用变化所引起的生态系统碳汇能力的影响。工业用地经过生态修复,转为城市公园、绿地或者湿地,可以明显提高该地块的碳汇能力。环评要创建有效的生态碳汇核算模型,评判各种转型方案(高密度开发与保留生态空间)给城市整体碳平衡带来的影响。

1. 核算转型后绿地、水体等生态空间的碳封存潜力,把碳封存潜力作为一项正向的环境效益加入到综合评价里。

2. 对区域微气候进行评估,看其对城市热岛效应的调节作用,间接减少建筑空调能耗和碳排放。

经过这样综合性、跨学科的评价,城市工业用地转型环评就可以冲破传统污染物控制的束缚,成为引领城市形态向更加可持续、更具韧性迈进的重要规划工具。

三、海绵城市建设与低碳协同效应评价

海绵城市建设的主要目的就是提高城市雨水的吸纳、蓄滞、净化、利用能力,核心是创建绿色雨水基础设施。在“双碳”目标之下,评价海绵城市建设的环境效益时,要充分挖掘海绵城市建设与城市低碳发展的协同效应,给规划环评赋予新的维度和视角。

（一）海绵设施的碳汇与碳减排贡献

海绵城市建设的主要载体绿色屋顶、雨水花园、植草沟、下沉式绿地等，本质上就是城市中的小型生态系统。绿色基础设施依靠植被的光合作用、土壤的固碳作用，可以直接吸收封存大气中的二氧化碳，成为城市重要的碳汇。在环评过程中要建立城市尺度上绿色基础设施的碳汇计量方法，根据植被类型、土壤条件、管理方式等来定量评价海绵设施年均碳汇增量。增量应当被看作海绵城市建设直接为碳中和目标所做的贡献。

除了直接碳汇外，海绵设施还存在着非常大的间接碳减排效应。源头削减雨水径流，海绵城市减小了城市排水管网的压力，从而减少了市政雨水泵站的电能消耗。雨水经过自然净化之后，可以减少进入污水处理厂的水量和污染物负荷，进而降低污水处理过程中能耗和温室气体排放。环评需要针对这些环节的节能减排效果进行量化，将传统的水务工程评价同能源消耗、碳排放评价相结合，从全流程上体现海绵城市建设在水务系统全链条中的低碳价值。

（二）城市内涝防治与气候适应性协同

海绵城市建设首要目标就是防治城市内涝，而防治城市内涝本身就是应对气候变化的重要措施。气候变化造成极端降雨事件频发，传统的“快排”模式灰色排水设施已经不能满足要求。海绵城市用慢排缓释、源头分散的思路来提高城市的抗洪能力。规划环评时需要评价海绵城市建设对提高城市气候适应性的作用，利用模型模拟，在不同的重现期暴雨情景下，评价海绵设施降低内涝风险、减少灾害损失的作用。

气候适应性同减缓气候变化（碳减排）有深刻的协同关系。绿色基础设施在调节雨洪的同时，也会因为植被蒸腾和水体蒸发而起到缓解城市热岛效应的作用。城市温度的降低可以直接减少夏季空调的耗能，取得明显的碳减排效果。环评要创建水热碳耦合分析框架，对海绵城市建设在降温减碳方面的协同效应进行量化。评价报告要清楚地说明投资海绵城市等基于自然的解决方案，不但是解决眼前内涝问题的手段，更是应对气候变化长期挑战、具有减缓和适应双重作用的手段。

（三）内涝防治与气候适应性的协同评价方法

评价城市内涝防治和气候适应性协同效应，急需创建新的评价指标体系和技术方法。传统的环评将水、气、声、渣等要素割裂开来，不能体现系统间的相互影响。新一代的规划环评应该建立综合性的评价体系，把海绵城市生态、社会、

经济效益结合起来,尤其是其在气候行动中所起到的双重作用。评价可以采用“协同效益货币化”等手段,对海绵城市在减少洪涝损失、节约能源、提高公共健康、增加地产价值等各方面的综合效益进行量化,并与传统的灰色基础设施方案做成本效益对比。

遥感、地理信息系统、城市气候模型三者融合,可以给协同效应精细化评价带来可能。高分辨率遥感影像可以对城市绿地、水体进行动态监测, GIS 可以进行空间叠加分析,找出内涝高风险区和热岛效应核心区,气候模型可以模拟不同的海绵城市布局方案对区域微气候、能源消耗的影响。

1. 创建包含适应性指标(内涝点削减率、城市降温幅度)和减缓性指标(碳汇增量、节能减碳量)的综合指数。

2. 用模拟的方法比较不同的海绵设施组合(以绿色屋顶为主、透水铺装为主)的综合效益,提出海绵设施方案的优化建议。

这样一套系统化、量化的评价方式使海绵城市建设的低碳贡献不再是模糊的概念,而变成了可度量、可管理的事物,从而使得气候适应性投资和碳中和战略紧密结合在一起,形成新的城市发展模式。

第三节 产业园区规划环评创新

一、园区产业准入的碳门槛设置

从源头上控制园区碳排放增量,在产业准入环节要明确清晰的碳门槛。这是筛选优质项目的一种有效方式,也是形成园区长期低碳竞争力的基础,可以引导资本和技术向绿色低碳领域聚集,从而优化整个产业结构。

(一) 基于碳排放强度的项目准入标准

碳排放强度就是单位产品或者单位增加值的碳排放量,是评价项目碳效率的主要指标。用碳排放强度作为准入门槛,可以将碳约束同经济效益直接联系起来,进而达到发展和减排的协同。标准的制定要考虑到行业的特性、技术的发展水平,参照国内外先进水平来确定不同行业的准入标准,并且设定具有引领作用的准入阈值。高耗能行业强度要求高,战略性新兴产业强度要求低,以促进其发展。

规划环评阶段应对拟入园产业进行清单化管理,确定各个行业的碳排放强度

基准值和先进值。申请入园的项目必须强制核算设计碳排放强度，与园区标准进行对比。项目强度超过准入标准的原则上不予批准；或者要求它必须采用最佳可行技术、碳捕集利用与封存等减排措施，使其碳排放水平达到要求。将压力转嫁给项目投资方，在设计之初促使园区整体绿色化水平提升，避免项目出现先污染后治理的被动局面，从根本上解决环境污染问题。

碳排放强度因此既成了环境约束指标，又成了市场化手段，促使产业技术升级和产业结构优化。可以有效地筛选出技术先进、管理高效、附加值高的优质企业，淘汰落后产能，实现优胜劣汰的良性循环。这有利于园区从要素驱动型向创新驱动型转变，实现经济高质量发展目标和碳达峰、碳中和目标同向同频。

（二）鼓励低碳产业与循环经济产业链

设置严格的准入门槛的同时，规划环评还要发挥引导作用，积极鼓励和吸引低碳产业入驻。低碳产业是指能耗低、污染小、排放少的产业，新能源、新材料、节能环保、新一代信息技术等都属于低碳产业。规划环评应该在区域产业布局中给这些产业预留发展空间，在审批流程、配套服务等各方面给予倾斜，形成政策洼地，吸引相关龙头企业、创新项目落地，逐步形成以低碳产业为支柱的现代化产业集群。

鼓励发展低碳产业，规划环评要对区域资源禀赋、产业基础做深入的分析，找到最有发展潜力的低碳产业方向。在有足够可再生能源的地方优先发展光伏、风电装备制造和下游产业，在有丰富生物质资源的地区规划生物质能源、生物基材料产业发展。经过环评的科学论证，保证产业选择同区域生态环境承载力相匹配，防止跟风，达到经济效益与环境效益的统一。前瞻性的产业引导有利于园区抢占未来产业的制高点。

（三）推动构建循环经济产业链

构建循环经济产业链是园区实现物质闭路循环、能量梯级利用、废弃物资源化利用的主要方式，也是深度减碳的重要手段。规划环评不能只对单个项目进行评价，而应该从整个园区物质流、能量流的高度出发，从系统上设计、推进企业间的共生耦合。这就意味着要找出不同行业企业之间在原材料、产品、副产品、废弃物、能源、水资源等方面的潜在联系，通过优化空间布局，使上下游企业或者不同行业企业形成生态工业网络。

具体操作时，规划环评可以提出创建废物交换信息平台、创建公用工程岛等

建议。发电厂的余热可以给附近化工、纺织企业供汽供暖，化工厂的副产品氢气可以供给燃料电池企业，冶炼过程中产生的炉渣可以作为建材企业的原料。环评要对循环利用链条所创造的资源节约和碳减排效益加以量化，把这种量化后的效益当作园区规划方案比选的准则。

为促使企业参加循环经济实践，规划环评应该提出一些激励政策供园区管理方参考。可以对实施循环化改造的企业给予专项补贴，对参与物料交换的企业给予税收优惠，在环保、土地等资源要素的分配上给予优先考虑。采用市场化与行政化相结合的办法，调动企业参与构建循环经济产业链的积极性。

依靠规划环评的顶层设计，把园区从简单的企业聚集地变为高效、清洁、循环的有机生态系统。在这里，一个企业的废物变成另一个企业的资源，实现了资源的最大利用效率和最小碳排放，从根本上提高了整个园区的可持续发展能力以及环境竞争力。

二、园区基础设施一体化低碳环评

园区基础设施是保证企业正常生产运营的公共支撑系统，它的能源消耗和运行方式直接关系到整个园区碳排放量。因此，从系统层面出发对基础设施进行一体化的低碳环评，改进设计和运行方案来达到园区整体减碳的目的。

（一）集中供热、供冷与能源梯级利用

推动能源供应方式变革，就是园区基础设施低碳化的中心环节。规划环评应当优先选择、论证集中供热、供冷系统。与分散在各个企业的小型锅炉、制冷机组相比，集中式能源站一般具有较高的能源转换效率，可以采用大功率、高效率的清洁能源技术，如大型燃气轮机、生物质锅炉、地源热泵等，大幅度降低单位能源供应的碳排放因子。

规划环评还要对能源梯级利用潜力进行详细的考察，推动建设综合能源系统。该系统通过优化配置各种不同的能源，达到温度对口、梯级利用的目的。常见的实践模式为：

1. 利用热电联产或者冷热电三联供系统，在发电之后，优先将产生的高温蒸汽供给工业生产的高品位用热需求。
2. 生产过程中产生的余热、余压，通过回收技术用于中低品位的生产加热、办公楼和生活区采暖，或者通过吸收式制冷技术满足夏季供冷需求。

能源梯级利用策略及效益表

能源供应系统	主要技术示例	碳排放因子对比	主要效益
分散式（传统）	小型燃煤锅炉、独立制冷机	较高	投资成本相对低
集中式（初步优化）	大型燃气轮机、生物质锅炉	中等	规模效应、清洁化
综合能源系统（梯级利用）	热电联产、冷热电三联供、余热回收	较低	能源利用效率高、减排显著

通过对园区内企业用能需求的详细调查以及模拟分析，可以对园区能源梯级利用的节能减碳效益进行准确的计算，给园区选择最优方案提供有力的数据支撑，从源头上降低园区化石能源消耗和温室气体排放。从表中可以发现能源梯级利用策略及效益表，系统性的能源规划所取得的减排效果，远远大于单个企业节能改造。

（二）园区污水与固废处理系统碳评价

传统的末端治理设施一般成为园区能耗大户、碳排放源。污水处理厂中的曝气风机、水泵等设备耗电量较大，污泥处理不善还会产生甲烷等温室气体。因此规划环评要将污水处理系统的碳足迹纳入评价范围，促使污水处理系统向低碳化、资源化方向发展。这就要求环评不能只看出水水质是否达标，还要核算、评价不同的处理工艺路线的能耗和温室气体排放量。

评价要突出各种技术碳排放绩效。可以推广能耗更低的厌氧氨氧化技术代替传统的硝化反硝化工艺，也可以使用好氧颗粒污泥技术来减少曝气需求。更重要的是，应该使污水处理厂成为能源工厂、再生水厂。利用厌氧消化污泥产生沼气，沼气可以用来发电或者提纯成生物天然气以实现能源回收。处理过的中水经深度净化后可再次用于工业生产及绿化浇灌，从而减少新鲜水的取用和输送能耗，达到水资源循环利用和关联碳减排的目的。

（三）园区固废处理系统碳评价

固体废物处理系统规划环评的碳评价要冲破传统的无害化处置观念，全方位融入减量化、资源化、再利用的循环经济思想。评价的第一步就是核算不同的固废管理情景下的温室气体排放。例如以填埋为主的传统模式会产生大量甲烷，它的温室效应是二氧化碳的几十倍。环评需要量化这部分排放，并与更好的替代方案比如焚烧发电或者资源化利用做对比。

规划环评要积极倡导建立园区级综合性固废管理体系，核心就是构建一个功

能完善的资源循环利用中心。该中心对园区里所有的工业固体废物和生活垃圾进行集中分类、分拣、处理和再利用。对于金属、塑料、纸张等可回收物进行高效分离和预处理，给下游再生产业提供高质量的再生原料。对有机废弃物进行堆肥或者厌氧消化，转化为有机肥料或者生物能源。热值高的不可回收废物应建设高标准垃圾焚烧发电厂，用燃烧产生的热能供电或者供园区使用，这样既能避免填埋产生的甲烷，又能替代一部分化石燃料发电，具有双重碳减排的效果。环评报告要对各种方案做生命周期碳足迹分析，给园区选择净碳排放最小的固废综合管理途径提供决策依据。

三、园区绿色低碳发展指标体系构建

为了保证园区低碳转型路径的科学性以及可衡量性，规划环评要创建起一套系统的、动态的绿色低碳发展指标体系。该体系既是评价园区规划环境合理性的一个标准，又是未来园区运营管理过程中持续引领和监督其绿色发展绩效的工具。

（一）碳排放总量与强度双控指标

构建指标体系的关键就是确定碳排放总量和碳排放强度的“双控”目标。这两项指标互相配合，不能缺一。碳排放总量指标为园区碳排放划定了绝对的“天花板”，是保证区域完成减排任务的底线要求。规划环评要以上级政府下达的碳排放配额为依据，根据园区产业发展规划、能源结构、技术水平等进行合理的测算并决定分阶段、可实现的总量控制目标。

碳排放强度指标把碳排放同经济增长联系起来，体现经济活动的“含碳量”，是衡量发展质量和效率的重要指标。设定逐年递减的强度目标，可以促使园区在经济总量扩大的同时，产业结构不断改善、技术创新不断发展，实现经济增长和碳排放逐步脱钩。这是防止总量控制影响发展的一种方法，促使园区走向更加可持续的发展模式。

规划环评要确定两类指标的核算边界、核算方法、数据来源、监测考核等。明确只核算范围一、范围二的直接和间接排放，还是把范围三的供应链排放也考虑进去。建议建立园区和企业的两层碳账户体系，用信息化技术开展碳排放数据的实时监测、报告、核查等工作来达成双控的目标并实行动态化管理。

建立的“双控”指标体系把园区低碳发展具体化为可以量化的、可以考核的任务，为园区绿色转型指明了方向、明确了标准，保证减碳行动的准确性、有效性。

（二）资源产出率与循环化水平指标

除了碳排放以外，评价资源使用效率的指标也十分重要，因为资源消耗和碳排放存在着密切的关系。资源产出率一般用单位资源消耗所创造的工业增加值来表示，是衡量园区经济效益和资源效率的综合指标。规划环评应该分别就能源、水、土地等主要资源，提出具体的产出率提高目标。提高资源产出率，即用较少的资源产生更多的经济价值，这也是一种深层次的减碳行为。

循环化水平指标是反映园区内部物质循环程度的指标，是循环经济理念在园区层面上的具体体现。规划环评要建立能够反映园区循环化改造效果的指标体系，例如

1. 工业固体废物综合利用率，该指标体现园区把生产过程中产生的固体废物转变为资源的能力，是衡量固废资源化水平的重要指标。
2. 工业用水重复利用率，是反映园区内部水资源循环利用程度的指标，直接影响取用新水所造成的能源消耗和碳排放。
3. 产业链关联度或者物质交换率，该指标反映园区内企业之间由于废物交换、能量梯级利用等形成的共生关系的强弱，也是判断一个园区是否形成生态工业网络的重要标志。

（三）通过指标体系促进园区循环发展

将资源产出率和循环化水平指标加入到园区规划环评体系之中，并且使之充分融入到管理实践当中，是促使园区由线性经济模式转向循环经济模式的可行办法。这些指标不能只存在于报告文本中，应该成为园区日常管理和企业绩效评价的硬约束。规划环评可以提出将土地出让、能源分配、财政补贴等优惠政策同企业、园区的资源产出率和循环化水平挂钩，形成正向激励机制。

为了使这些指标更加具体可操作、准确，规划环评要推动园区建设智慧化的资源能源管理平台。用物联网、大数据、云计算等技术实时、精细化地监测和采集园区内各个企业能源流、物流、水流动的实时数据。该数字化平台可以自动计算并显示各项效率指标，用数据分析来发现资源浪费和循环利用的机会，从而给园区持续改进、精细化管理提供决策支持。

资源产出率、循环化水平指标会成为“双控”指标体系有力的补充和支撑。从过程效率的角度来展示碳减排的巨大潜力。资源产出率高、循环化程度高的园区，必然能源消耗少、原生资源依赖低、废弃物排放少，碳排放强度和总量自然

也会得到有效控制。这套指标体系一起构成了园区绿色低碳发展全景图，指导园区在追求经济增长的同时实现资源可持续利用、环境质量根本改善。

第四节 交通体系规划碳评价

一、综合交通规划碳排放总量预测

对区域综合交通规划碳排放总量进行预测，是评价区域综合交通规划环境影响、挖掘其减排潜力的前提。这就需要创建精确的预测模型，全面考虑经济社会发展、人口流动、技术进步等要素，合理预估未来交通系统碳排放走向，给规划方案的比选和改良赋予量化依据。

（一）不同交通方式分担率与碳排放强度

精准预估综合交通规划的碳排放总量，核心就是科学确定各种交通方式的碳排放强度，并且准确预测出未来出行结构中各种交通方式所占比例。私人燃油车、纯电动汽车、公共汽车、轨道交通、自行车、步行等交通方式的单位周转量（人公里或者吨公里）碳排放因子差别很大。评价工作要创建起全生命周期交通方式碳排放强度数据库，包含车辆运行的直接排放，还要把能源生产、交通工具制造和报废、基础设施建管养等间接排放纳入进来，从而形成更为全面的核算边界。

主要交通方式单位周转量碳排放因子

交通方式	单位周转量碳排放因子 (gCO ₂ e/pkm 或 tkm)	备注
私家燃油车	120 - 180	视车型、拥堵情况而异
纯电动汽车	30 - 70	考虑电网结构，全生命周期排放
公共汽车	50 - 100	视载客率、燃料类型而异
轨道交通	5 - 30	视电网结构、线路繁忙程度而异
自行车	0	考虑少量食物碳足迹可忽略
步行	0	考虑少量食物碳足迹可忽略

从上表可以看出，不同交通方式的碳排放强度存在显著差异，这对碳评价工作的准确性至关重要。

预测模型一般用活动水平乘以排放因子的方式来建立。活动水平准确预测，才会影响交通方式分担率。环境影响评价要结合土地利用规划、人口增长预测、

经济发展水平和居民出行行为特征，用四阶段法或者先进活动模型，预测不同情景下交通总需求及各种交通方式周转量。城市蔓延式发展当中，若规划不能引导紧凑型布局，私人小汽车出行分担率就会增加，碳排放总量也会随之增加。相反，采用以公共交通为导向的发展模式的话，可以明显提升公共交通比例，改善出行结构。因此，环境影响评价应该重点分析规划方案对交通方式分担率的引导作用，用敏感性分析来揭示不同分担率组合下碳排放总量的差异，从而找到实现碳减排目标的最佳交通结构。

（二）交通需求管理政策工具与低碳出行引导

交通需求管理属于交通领域减少碳排放的手段。其主要思想就是从源头上抑制不合理交通需求，通过改变出行行为来主动干预，而不是被动地增加供给。规划环境影响评价应对交通需求管理措施的碳减排潜力做前瞻性分析。从经济、行政、技术等各个方面来影响居民出行决策链，促使出行者由传统出行方式向绿色低碳出行方式转变。

经济性管理措施，即区域拥堵收费、差异化停车收费、低排放区政策等，目的是提高个人化机动出行的经济成本，从而影响出行者选择什么样的路径、采用什么样的方式。环境影响评价要创建相应的经济模型，对不同的收费标准和覆盖范围下小汽车使用强度的抑制效果展开分析，再量化碳减排贡献。行政、规划类措施，即实行严格的停车位配建标准、推行错峰通勤、远程办公制度、优化城市功能布局以减少长距离通勤等，从根本上减少了机动化出行的必要性。评价时需要依靠空间分析和行为调查数据，模拟这些措施对于职住平衡、出行距离和出行频率的影响。

技术类措施主要是通过信息技术提高出行效率和体验，发展一体化出行服务平台，把公共交通、共享单车、网约车等各种出行方式无缝融合，给用户提供最优、透明、低碳的出行方案。环境影响评价需要判断这种智慧出行服务在提高公共交通吸引力、减少信息不对称、促进多方式联运等方面的实际效果，然后把它的碳减排效益量化。综合考虑各种交通需求管理措施的协同效应，可以为企业或者规划者提出一系列有效的低碳政策建议，帮助达到交通规划预期的环保目标。

（三）社会文化与城市空间对低碳出行的塑造

深入探究交通需求管理及低碳出行引导之时，同样不能忽略社会文化层面的塑造。成功的需求管理不能单靠强制性政策法规，还需要得到公众对于低碳出行

的普遍认同和自觉实践。因此规划环境影响评价的视角不应该只停留在单纯的技术、经济分析上，而应该扩展到对社会动员和文化塑造策略的评价。这指的是对规划中所提出的关于人文环境的营造、社区参与机制、绿色交通激励等非物理形态政策预期效果的预判。创建碳普惠机制，把个人低碳出行行为（乘坐公交、骑自行车）量化成碳积分，给市民以物质或者服务上的奖励，可以极大地调动公众参与的积极性。环境影响评价要考察此种激励机制的设计是否合理、覆盖面广不广、预期参与率高低，及其在促进行为转变方面所能产生的碳减排效益。

规划方案对城市空间品质的塑造，也间接起到交通需求管理的作用。一个步行友好的、充满活力的城市公共空间本身就是最好的低碳出行引导。环境影响评价应该考虑规划中是否考虑到了街道网络密度、步行道和自行车道的连续性、安全性、沿街商业及公共设施的合理布局等关键问题。这些因素一起决定了居民是否选择步行或者骑行来完成短途出行。采用空间句法、步行指数等量化分析手段，可以对规划方案中的“适宜步行”环境加以评判，再将评判结果同居民出行方式选择的概率模型联系起来，进而得出削减短途机动车出行的碳减排效益。把空间设计和行为引导结合起来进行评价的方法，体现出了更深层次的系统思维，有利于从源头上培养城市的低碳基因。

二、公共交通优先发展的碳减排效益评价

确定公共交通在城市交通体系中处于主导地位，是达成交通领域碳达峰、碳中和的重要途径。评价公共交通优先发展战略碳减排效果时，不能只考虑它直接替代高碳出行方式所减少的碳量，还要系统分析它对城市形态、土地利用、居民生活方式等产生的长远影响。

（一）轨道交通、快速公交等大容量公交系统

大容量公共交通系统，主要是轨道交通和快速公交系统，是城市交通低碳转型的主要力量。对其碳减排效益进行评价，是一个涉及建设、运行、系统性影响等诸多方面的复杂过程，必须做全面的量化分析。

1. 直接替代效益的核算最直接。评价工作要准确预估轨道交通或者快速公交线路开通之后，所吸引的客流量，并对客流来源进行结构分析，即区分出高碳小汽车、出租车等哪些客流来源于此，常规公交、自行车等又有哪些，以及新增需求。用转移来的高碳出行方式客流周转量乘以相应的单位碳排放强度差值，就可

以直接得到其碳减排量。这个过程准确性的好坏，很大程度上取决于居民出行调查数据的质量以及交通模型的支持。

2. 能源效率和规模效益：大容量公共交通系统有明显的能源效率优势。轨道交通依靠电力驱动，利用再生制动能量回收技术，单位人公里能耗比个体机动交通低得多。快速公交依靠专用路权、信号优先等手段，可以缩减车辆怠速时间以及频繁加减速的情况，进而改善燃油或者电能的利用效率。这些技术和运行上的节能效果要准确地量化出来，然后转化为具体的碳减排贡献。其巨大的客运能力带来的规模效益，就意味着在满足同样出行需求的时候，社会总体上消耗能源和产生碳排放都会大幅度下降。

3. 大容量公共交通系统对于城市空间结构有很强的塑造力，间接促进城市空间优化。沿线站点形成以公共交通为导向的发展模式，可以把高密度居住、就业、商业功能集聚到公交走廊周边，促进紧凑型城市形态。缩短居民平均通勤距离，提高公共交通和慢行交通可达性，从根本上减少对小汽车的依赖。环境影响评价要采用土地利用和交通一体化模型，模拟 TOD 模式发展所造成的长远城市就业居住分布、出行距离、出行方式改变以及由此产生的深远碳减排效益。这部分效益虽间接，但是量级巨大，持续时间长。

（二）慢行交通系统的直接与协同减排效益

慢行交通系统，即以步行、自行车为主要交通方式的网络，是城市交通体系中实现零碳或者近零碳目标的重要部分，环境效益多维。建设高品质的慢行交通系统，不但是解决最后一公里出行问题的有效途径，也是提高城市宜居性、促进公众健康、实现深度碳减排的重要策略。慢行系统首要的环境效益就是对短距离机动化出行的直接替代。城市中大量 5 公里以内出行如果能够被有效引导去用步行、自行车来承担，那么会直接大幅度地减少化石能源的消耗和温室气体的排放。规划环境影响评价要依靠现状出行结构数据，确定出慢行方式替代潜力所占机动车出行的比例，结合规划期内慢行基础设施改善情况（专用自行车道里程、步行网络连通性等），预测未来方式转移量，准确计算其碳减排贡献。

慢行交通系统的发展，除了直接的替代效益之外，还存在着很大的协同减排潜力。它可以有效提升公共交通吸引力，一个连贯、安全、舒适的慢行网络可以将居民区、公交站点、地铁站无缝衔接起来，大大提高公共交通的便利性，使更多的居民选择使用“慢行 + 公交”的方式出行，进一步放大了公共交通的碳减排

效果。评价时要考虑多方式联运协同效益。慢行交通的发展有利于缓解城市车辆拥挤状况、降低车流产生的噪音和改善局部的空气质量。这些环境效益不能直接量化成碳减排量，但是共同构成低碳城市生态环境的重要基础，大大提高城市环境承载力。

（三）慢行交通系统对城市发展与生活方式的影响

审视慢行交通系统环境效益的价值，核心就是其对于城市发展模式和居民生活方式的深刻改变。把慢行理念放在第一位上的城市，其空间资源配置一定会向以人为中心倾斜，完成从以车为本到以人为中心的根本转变。这意味着道路断面重新设计，给行人、骑行者更多的空间；城市公共空间的营造，更重视步行体验和社交功能。该转变将会打破长久以来形成的汽车依赖文化，塑造起绿色、健康的城市生活新风尚。因此，规划环境影响评价不能只依靠传统的工程量化分析，而应该把社会学、城市设计领域评价指标，比如街道活力指数、公共空间满意度等，全面、深入地评价慢行系统规划在提高城市可持续发展软实力方面的作用。

完善慢行交通系统，是创建“15 分钟社区生活圈”的主要支撑。按照这个理念来指导居民在步行或者骑车 15 分钟以内就能满足大部分的生活需求，包括购物、教育、医疗、休闲等。这样就可以大大减少跨区域、长距离的机动化出行。环境影响评价要重点分析交通规划同城市功能布局规划的耦合情况，评判慢行系统规划是否很好地支撑起“15 分钟社区生活圈”的达成。运用 GIS 空间分析技术，可以量化规划实施以后居民区各类公共设施的慢行可达性的提升程度，进而将它作为判断未来出行模式的变化和碳排放削减的关键输入参数。

这样的评价视角把慢行交通系统由原来的单纯交通工具，提升到城市空间组织和社会治理的战略高度。它所带来的环境效益是系统性的、根本性的。不仅可以削减存量碳排放，有效地控制未来碳排放增量，而且可以塑造紧凑、多元、高效的城镇形态，为城市深度脱碳和高质量发展奠定坚实的基础。

三、新能源交通基础设施规划环评

伴随着交通领域能源革命的不断深入，充电桩、加氢站等新能源基础设施也成了规划中的主要因素。环境影响评价的关注点由原来的对传统交通设施生态影响的关注，转为对它和能源系统耦合关系、全生命周期碳足迹、智能化管理带来的新机遇的分析。

（一）充电桩、加氢站布局与电网影响

新能源交通基础设施的规划环境影响评价要重点考虑布局的合理性，以及它对能源系统可能产生的影响。充电桩、加氢站的选址布点既要符合新能源汽车用户便捷性的需求，又要和交通流量、停车热点区域分布、城市电网、氢能供应网络的承载能力相协调。评价工作应使用空间大数据分析，预测未来各区域新能源汽车保有量、充电、加氢需求，考察规划布局方案是否能很好地满足时空不均的需求，防止出现一些区域设备闲置、另一些区域一桩难求的现象。

但是大量电动汽车没有有序充电就会造成电网冲击，在用电高峰时段容易出现局部电网过载、电压不稳的现象。环境影响评价要对这一风险做专项的评估。评价内容应该包括：预测规划情景下充电负荷峰值、峰谷差以及和城市总体用电负荷叠加后的结果；分析现有配电网裕度能否支撑规划充电设施容量；评估为满足充电需求而进行的电网升级改造所消耗的资源与环境影响。评价过程中还要积极提出并推广缓解措施，推动智能有序充电技术的应用，利用市场价格信号或者行政命令引导用户在电网低谷时段充电；前瞻性研究车网互动技术，即将电动汽车作为分布式储能单元，在电网高峰时段反向供电，提高电网的灵活性和稳定性。对加氢站来说，要对氢气制取、储存、运输过程中的能耗和碳排放进行评价，重点考察“绿氢”供应的可行性，保证全产业链的低碳属性。

（二）智慧交通在提升效率与个体出行中的减排贡献

智慧交通系统把信息、通信、传感、控制等前沿技术有机结合在一起，给提高交通运输效率、降低能源消耗、减少碳排放开辟了一条新的途径。在规划环境影响评价当中，对碳减排贡献的评价，已经成为评判规划前瞻性与创新性的重要指标。智慧交通系统的核心贡献就是全面提升交通网络的运行效率，从而大幅度减少不必要的能源消耗。

最直接的体现就是对交通流的精细化管理。传统的交通信号控制系统大多采用固定的配时方案，不能很好地适应交通需求的变化，容易造成交叉口频繁启停和不必要的延误，从而增加车辆燃油消耗和碳排放。基于大数据、人工智能的智能信号控制系统可以对路口车流量进行实时感知，根据车流状况来调整信号配时方案从而实现区域交通流的协调控制，进而有效减少车辆等待时间和怠速。规划环境影响评价要定量评估该系统在规划区内覆盖范围及预期效果，采用交通微观仿真模型模拟该系统在减缓车辆延误、提高道路通行能力方面起到的作用，然后

将它的作用转化为具体的碳减排量。

智慧交通系统可以给出行者提供实时、准确的交通信息，使出行者做出更好的出行决策。动态导航系统依据当前的交通状况给出最优且速度最快的行驶路线，有效避免堵车。智慧停车诱导系统可以指引驾驶员去寻找空闲的车位，大大减少驾驶员到达目的地后寻找车位的无效绕行。综合各种措施的作用可达到缩短汽车行驶里程和运行时间的目的，从而减少汽车碳排放。环境影响评价要考察规划中信息发布渠道的建设情况和信息覆盖范围，用行为模型预测这些要素对驾驶行为的引导效果及其产生的环境效益。

（三）智慧交通在公共出行与未来技术融合中的潜力

智慧交通系统减少碳排放除了优化私家车出行的方式，更重要的是它对公共交通、共享出行深层次的赋能。智能公交调度系统按照实际客流量随时改变发车间隔、线路走向，提高车辆满载率、减少空驶里程，从而达到节约能源、降低碳排放的目的。精确的公交实时位置信息以及到站时间的预估服务，明显改善了乘客的候车体验，提升了公共交通的吸引力，有利于引导更多的居民从私家车转移到公共交通上。规划环境影响评价要对提升公共交通服务水平的量化指标进行评价，并对促进交通方式转变所产生的间接碳减排效益做进一步分析。

从长远看，智慧交通系统最终的形态将会同车路协同、自动驾驶技术深度结合，具有革命性的碳减排潜力。

1. 车辆和车辆、车辆和路侧单元等基础设施之间实时交流信息，可以实现车辆编队行驶，从而有效降低风阻以达到节能的目的。车辆可以提前得到前方的信号灯状态、交通事件等各类信息，并且根据这些信息来做出最好的行驶决策，从而有效避免急刹车或者突然加速等行为。环境影响评价要具备前瞻性，路侧单元等车路协同基础设施的规划布局要充分考虑，并引用相关研究成果来预测该技术在交通场景下具体的节能能力。

2. 高级自动驾驶车辆可以依靠精准的算法来控制，实现比人类驾驶员更平稳、节能的驾驶行为。从宏观上讲，自动驾驶车队可以集中调度、路径优化，大大提高道路容量和运行效率，从根子上解决交通拥堵这个碳排放的主要源头。评价工作要研究规划方案对自动驾驶技术发展是否适应，预留了哪些相关的测试和运营空间，在大范围应用之后会对系统碳减排产生怎样的影响。

第五节 区域生态安全格局评价

一、生态源地识别与生态廊道构建

创建稳定的生态安全格局,主要在于精准辨别出那些具有关键生态功能的“源地”,并搭建起联系这些“源地”的“廊道”,从而构成完整的生态网络。这是保证区域生态系统完整性,碳汇功能长久发挥作用的基础。

(一) 基于生态系统服务功能的源地识别

生态源地是生态产品、生态服务功能的重要来源,是区域生态安全的根基,也是碳汇的主要承载区。识别这些源地要综合评价其生态系统服务能力,特别是与碳循环有关的生态服务功能。评价指标一般有固碳释氧、水源涵养、土壤保持、生物多样性保护等。净初级生产力、土壤有机碳密度是直接体现生态系统碳汇能力的指标,生境质量会间接影响生态系统的稳定程度和长期固碳潜力。

在具体的实践中,经常用地理信息系统技术,利用遥感影像数据和地面监测数据,对区域的各项生态系统服务功能进行量化和空间化评价。可以利用InVEST模型等集成评估工具得到各类服务功能的重要性格局图。之后利用空间叠加分析以及阈值设定,确定对区域生态健康和碳汇保持起决定性作用的斑块为生态源地。保证了源地选择科学、客观,为后续的生态保护修复工作指明方向,把有限的资源用在最重要的生态区上,获得最大的碳汇效益。

以生态系统服务功能为依据的源地识别方法,已经不再像以前那样只根据植被覆盖度或者土地利用类型来划分。其本质就是生态过程和功能本身的内在价值,能更好的反映区域内重要的生态功能区。环境影响评价把项目建设区同识别出的生态源地做空间对比,就能直接判定项目对区域核心碳汇功能可能造成的潜在影响程度,给项目选址的生态适宜性分析提供有力支持,从源头上防止对关键碳库和碳汇区造成破坏。

(二) 保障碳汇功能的生态廊道连通性评价

生态廊道是联系孤立的生态源地的线性或者带状生态要素,是物质、能量、物种流动的重要通道,对保持生态网络的完整性、提高生态系统韧性、保障区域整体碳汇功能的协同发挥起着不可替代的作用。保障碳汇功能的廊道连通性评价,主要是对生态流在不同的源地斑块之间移动是否顺畅进行评价。连通性好的生态

网络可以促进碳循环过程的衔接,使整个区域的碳汇能力得到充分的发挥,避免生态系统碎片化所造成的碳汇功能衰减。

评价廊道连通性最常用的方法就是 MCR 最小累积阻力模型。该模型用综合阻力面来模拟生态流在景观中移动遇到的阻力。阻力面考虑到了土地利用类型、地形地貌、人类活动强度、交通网络分割等许多因素。森林、湿地等自然生态系统阻力小,利于生态流通过;城镇建设用地、工矿用地、高速公路等阻力大,成为生态流动的障碍。通过计算从某个源地到另一个源地所要克服的最小累积阻力路径,就可以找到最有可能成为生态廊道的路线。连通性评价不单单是找出廊道,还要评价廊道现有的通行情况,找出网络中的断点或者瓶颈,为后期的廊道修复或者创建提供准确的指导。

(三) 生态廊道连通性评价的深化与多功能协同

生态廊道连通性评价不能只做静态分析,应该用动态视角来考虑未来发展情景对廊道功能的影响。在快速城镇化与气候变化的影响下,区域土地利用格局、生态环境条件会持续改变,直接导致景观阻力面的变化,进而影响廊道的有效性。因此,在环境影响评价中要根据区域发展规划和气候变化预测模型,模拟高增长模式、绿色发展模式等不同的发展情景下景观阻力的变化,对景观阻力对生态廊道连通性产生的长期影响做出评价。前瞻性评价可以提前发现廊道中断的风险,为制定更加适应、鲁棒的区域空间管控策略提供支持。

进一步深化连通性评价,可以采用图论的方法,把生态源地当作“节点”,生态廊道当作“边”,创建区域生态网络图。用网络结构指数来度量网络的复杂性以及稳定性,网络结构指数包括网络连接度、节点度、聚集系数等。可以找出网络中的枢纽性源地、结构性连接通道,这些要素的保护或者破坏都会对整个网络的稳定性造成巨大影响。项目环评时,如果拟建项目正好处于或者切割了这些重要的结构要素,就应当被视为重大生态风险,需要采取更加严格的规避或者补偿措施,来保证整个碳汇网络系统的功能。

廊道的功能不应当是单一物种的迁移,而应该从多功能协同的角度来进行评价。保证碳汇功能的廊道,也可以作为水源涵养、生物多样性保护、休闲游憩等功能的空间载体。评价时可以建立森林依赖物种、湿地依赖物种、水流等不同的阻力面,找出能够满足多种生态过程的复合型生态廊道。多功能廊道的识别与构建可以提高生态保护投资的综合效益,实现碳汇提升和区域生态环境质量改善共

同目标，也是生态安全格局规划从单一目标向综合目标转变的重要体现。

二、生态安全格局的碳汇功能评估

确定了生态源地和廊道构成的空间格局后，就需要对其进行碳汇功能的定量评价。这是评价生态安全格局有效性的准则，也是将其纳入区域碳平衡核算体系，服务于“双碳”目标管理决策的科学依据。

（一）区域生态系统碳储量与碳汇总量

对生态安全格局的碳功能进行评价，首先要对生态安全格局内的碳储量和碳汇总量进行准确核算。区域生态系统碳储量就是在某个时刻，生态系统的各个部分（植被、凋落物、土壤等）中储存的有机碳总量。它是区域碳库的静态表现，是生态系统长期积累碳的能力。植被碳储量一般用遥感数据估算生物量，再结合不同植被类型碳含量系数计算。土壤有机碳储量依靠土壤类型图、土地利用数据和大量的样点实测数据，通过空间插值或者模型模拟的方法获得。把植被碳库和土壤碳库叠加起来，就可以得到区域总碳储量的空间分布图，清楚地显示高密度碳库所在的位置。

碳汇总量是动态的概念，指生态系统在一定时期内从大气中净吸收的二氧化碳量，即总光合作用固定的碳量减去生态系统总呼吸消耗的碳量。它直接体现的是生态系统减缓大气温室气体浓度上升的作用。碳汇估算一般使用生态系统过程模型，CASA 模型、Biome-BGC 模型等。这些模型把气象数据、遥感植被指数、土地利用类型等输入参数融合起来，模拟生态系统净初级生产力和土壤异养呼吸，最后得到净生态系统生产力，宏观尺度上可以看成是区域的净碳汇量。

采用上述方法，就可以分别得到区域内生态源地、生态廊道的碳储量大小以及年均碳汇能力。该组数据给环境影响评价提供重要的背景值。评价一个开发项目占用的碳储量、减少的年碳汇量等，都需要以此背景数据为基础。

将碳储量、碳汇能力进行空间化表达，就可以找出区域内的碳汇热点区，也就是单位面积固碳能力最强的地区。这些区域一般是生态安全格局的重要组成部分，也是生态保护和管理的重点。在区域发展规划、项目选址中，应该把碳汇热点区列为严格的保护区，保证碳汇功能的完整性，为区域碳中和目标的实现打下坚实的基础。

（二）生态安全格局对区域碳平衡的贡献

区域碳平衡指一个行政或者自然地理单元内所有碳源（主要是化石能源燃烧以及土地利用变化所产生出的排放）与所有碳汇（主要是生态系统固碳）之间的收支平衡状况。生态安全格局作为区域内最大的碳汇载体，对区域碳平衡的贡献是决定该区域是碳源还是碳汇的关键因素。评价它的贡献，需要把生态系统的碳汇量和区域的碳排放量做对比分析。

就具体而言，首先要核算区域的碳排放清单，即工业、农业、交通、建筑、居民生活等各个部门的温室气体排放量。然后将上一节计算出的生态安全格局总碳汇量与此进行比较。总碳汇量大于总排放量的地区为净碳汇，总碳汇量小于总排放量的地区为净碳源。生态安全格局的贡献度，可以用它所占的碳汇量与区域总排放量的比例来表示。该比例直接体现区域生态系统可以“中和”自身经济社会活动所排放的碳排放的程度，是评价区域可持续发展水平、生态文明建设成效的重要指标。在环境影响评价中，分析拟建项目对这种平衡关系的潜在影响，就成为评价其环境可接受性的一个新角度。

（三）生态安全格局对区域碳平衡的贡献

分析生态安全格局对区域碳平衡的贡献，还要考虑空间耦合关系，即碳源和碳汇在空间上的配置是否合理。理想的布局就是碳汇功能强的生态源地环绕或者靠近主要碳排放源区（城市群、工业园区），形成有效的就近吸收和净化效果。通过地理信息系统平台将碳排放强度分布图与生态安全格局碳汇能力分布图叠加分析，可以识别出碳汇盈余区、碳汇赤字区和碳平衡区三种类型。空间化的分析有利于发现区域碳循环内部的矛盾，为之后碳空间优化布局提供靶向性的指导。碳汇赤字严重的地方应该严格控制新增高耗能项目，优先实施增汇措施。

评价生态安全格局对碳平衡的贡献，还应该包括它对碳排放活动产生的调节服务价值。该价值可以使用替代成本法或者市场价值法进行货币化评估。用当前碳市场交易价格来计算生态安全格局每年固定碳量的经济价值。将生态价值纳入区域国民经济核算体系或者重大项目成本效益分析，能更加全面的体现出生态保护的经济收益，为政府制定生态补偿政策、推进绿色金融产品创新提供理论支持。生态保护不再只是成本支出，而是一种明确产生经济效益的战略投资，从而提高全社会保护生态安全格局的积极性。

最后还要考虑贡献的时间尺度。生态安全格局的碳汇能力不是固定不变的，

它会随着林木生长、植被演替、土壤改良等过程的变化而变化。完整的评估体系应该包含对未来的碳汇潜力（即碳汇增量）的预测。模拟生态修复工程、森林经营管理等措施实施效果，可以预测未来几十年生态安全格局碳汇能力提升曲线。动态碳汇增量与区域规划能源消费、产业结构调整路径相结合，形成区域碳达峰、碳中和路线图，就可以对生态安全格局在其中所起的作用和贡献进行动态评价。

三、基于生态安全格局的碳优化策略

根据前面识别、评价的结果，环境影响评价的最终目的就是提出切实可行的碳优化策略，把生态安全格局从被动保护的对象，转变为积极引导区域碳平衡、绿色发展的主动调控工具。这就要求环评不能只是“评”，还要“导”。

（一）提升区域碳汇能力的生态修复工程

生态安全格局评价可以找出生态系统功能衰退的生态源地、连通性降低的生态廊道等薄弱之处。为了解决上述问题，采取精准的生态修复工程是最直接、最有效的提高区域总体碳汇能力的方法。这些工程措施应该被纳入重大建设项目环境影响评价报告中，作为生态补偿或者环境影响减缓的主要内容。区域生态修复工程类型繁多，其主要措施、碳汇效益、适用场景见下表

生态修复工程与碳汇效益提升策略表

工程类型	主要措施	碳汇效益	适用场景
森林碳汇提升	在退化林地或宜林荒山荒地，科学选择乡土树种，调整林分结构，实施森林抚育，开展植树造林和质量提升。	迅速增加植被生物量碳储；改善土壤环境，促进土壤有机碳积累。	退化林地、宜林荒山荒地
湿地与草地固碳	对萎缩退化湿地，通过退耕还湿、水源补给、植被恢复提升固碳能力。对退化草地，实行禁牧、轮牧、补播等管理。	提高蓝碳生态系统固碳能力；增加根系和土壤碳存储。	萎缩退化湿地、退化草地
生态廊道连通性修复	对交通线或城市扩张造成的廊道割裂，通过生态涵洞、动物通道修复。营造小微湿地、公园、街头绿地等“踏脚石”斑块。	恢复生态连通性，增强碳汇协同效应，为生态流扩散提供中继站。	交通线或城市扩张造成的廊道割裂区域

生态修复工程设计要根据之前评估的结果，做到有的放矢。优先修复处在关键廊道瓶颈处或者碳汇潜力大但现状差的源地。同时环评要对修复工程的长期碳

汇效益进行监测和核查，保证修复工程真正实现预期的增汇目标，达到对项目碳排放的有效抵消。

（二）协调发展与保护的碳空间优化布局

区域生态安全格局给国土空间规划赋予了刚性的生态底线，碳平衡目标又给它增添了新的约束条件。协调发展和保护，本质上就是对碳源（发展建设）和碳汇（生态空间）在有限的国土空间内进行合理布局的优化问题。环境影响评价要从宏观上参与空间优化布局的制定，引导新增建设项目走向碳平衡影响最小的路径。

优化布局的核心思想就是把生态安全格局识别出的生态源地、廊道作为禁止开发区或者限制开发区，把高强度开发建设活动引导到生态阻力大、碳汇功能低的区域。可以利用多目标规划模型将生态适宜性、开发建设适宜性、碳排放强度、碳汇潜力等空间数据图层综合起来，模拟出不同的空间布局方案对于区域碳平衡、经济发展、生态保护这三个目标的影响。经过迭代计算，找到使区域综合效益最大的帕累托最优解。成果将会是一张详细的生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态空间、农业空间、城镇空间的管控图，该图内有碳约束。

（三）碳空间优化布局的微观实践与政策创新

在宏观优化布局的框架之下，微观层面项目的选址以及设计也要体现出碳优化的思想。环境影响评价要推进“碳中和园区”“低碳社区”等模式的实践。产业园区规划环评中必须强制保留园区内一定比例的绿地、水体等生态空间，形成内嵌式碳汇，与区域大型生态廊道相连。同时应该采用循环经济设计理念，减少园区整体物质、能源消耗，从源头上降低碳排放强度。将碳汇功能同产业布局结合起来，就是实现生产空间内部碳循环优化的重要途径。

政策工具创新给碳空间优化布局推行提供必要的保障。环评可以提出建立区域性碳汇银行或者生态补偿基金。即规定在生态敏感性较低的地区进行开发的项目，必须缴纳资金或者购买碳汇来支持生态安全格局内增汇项目的实施，实现从土地面积平衡到碳收支平衡的转变。通过市场化的方式把外部生态成本内化到开发项目的成本中，使资本流向更加符合碳中和目标的空间区位，在经济上达到发展和保护的内在协调。

最终碳空间优化布局成果应该转化为有法律效力的规划语言、管控指标。环评应将区域碳排放总量和强度控制目标、生态空间碳汇保持与提升目标等分解落

实到各个行政单元、规划地块的控制性详细规划中。通过给地块设置一个“碳排放容积率”，即每平方米土地所允许的最大碳排放配额，来刚性控制土地开发强度和产业类型。当一个区域开发达到碳排放上限时，就必须依靠区域内部碳汇提升或区域间碳交易来获得新的发展空间，从而建立起一个自我调节、动态平衡的国土空间碳管理体系。

第十章 环评制度改革与实践展望

第一节 环评法律法规体系完善

一、《环境影响评价法》修订方向探讨

环境影响评价法是我国环境管理领域的一部基本法，对它的适应性修改是深化制度改革的“牛鼻子”。修订方向要紧紧围绕服务国家“双碳”战略，不仅要应对气候变化的法律要求写入制度，更要重构评价内容和程序，给引导、约束各类开发建设活动低碳转型提供坚强有力的法律支撑和制度保障。

（一）明确碳排放评价的法律地位

在目前的环境影响评价法中，评价内容主要是水、气、声、渣等常规环境要素和生态影响，对于以二氧化碳为主的温室气体排放没有明确的、强制性的法律规定。虽然部分地区和行业环评实践已经开始尝试性地将碳排放纳入其中，但由于缺少上位法的强力支撑，这些探索大多只停留在估算和建议的层面，评价的深度、广度和约束力都很弱，不能对高碳项目形成有效制约。缺少法律地位，环评在推进减污降碳协同治理上就无能为力。

为了改变这种状况，在修订环境影响评价法时必须从根本上提高碳排放评价的法律地位。总则部分就应当明确把应对气候变化、控制温室气体排放作为环境影响评价的重要目标之一。在评价内容章节中加入专门的条款，把碳排放的影响作为一个独立的评价专题来与生态影响、环境质量影响等并列，对特定行业和特定规模的规划和建设项目强制进行碳排放影响评价。这不仅可以满足国家的战略要求，也可以与主流环评制度接轨，使碳评价获得一个合法的身份。

进一步确定其法律地位，还要明确相应的法律责任。对未按要求开展碳排放评价、评价报告存在重大缺陷或者弄虚作假的建设单位、环评机构及人员，应当设定相应的法律罚则，保证评价工作的严肃性、科学性。同时，法律应该把碳排放评价结论作为项目环评审批的主要依据，建立与区域、行业碳排放总量控制、碳强度控制目标相挂钩的审批机制。只有这样才能通过环评制度把“双碳”目标

自上而下、刚性地传导到每一个微观经济活动单元。

（二）强化规划环评的法律效力

规划环境影响评价是实现源头预防环境影响的战略性手段，在双碳目标实现路径中起着非常重要的作用。项目环评是针对一个具体的建设项目进行的“点”状控制，规划环评是对区域、流域、行业发展等宏观层面的产业结构、能源体系、空间布局、交通网络等进行前瞻性、系统性的绿色低碳引导。但目前规划环评的法律效力比较弱，其审查意见常被当作软约束，从而给一些高碳、高耗能规划的通过埋下了隐患。

因此加强规划环评的法律效力就成为落实碳达峰、碳中和战略的一个重要条件。法律修订的关键就是确定规划环评的刚性约束力。应规定各类法定规划编制时必须同步进行环境影响评价，把应对气候变化、控制碳排放作为评价的重点内容。核心在于建立实质性的环评否决机制，即未依法开展规划环评或者规划环评文件未经审查通过的，规划审批机关一律不得批准该规划。对环评结论明确不符合区域碳达峰目标、碳排放总量或者强度控制要求的规划，审批机关应当要求规划编制机关对规划进行重大修改或者不予批准。

要加强规划环评和项目环评的深度联动。法律条文应该明确规定，项目环评必须把经过审查通过的规划环评结论及其审查意见，当作重要的甚至是决定性的审批依据。不符合有关规划环评要求的项目，环评主管部门不予受理或者不予批准，从而形成了规划管总、项目落地的层级管理体系。还要健全规划实施后碳排放跟踪评价和监督问责机制，对规划实施造成的实际碳排放效果进行评价并向社会公布，接受公众监督，保证规划环评确定的碳减排蓝图真正落地见效，不成为空文。

二、碳排放评价技术导则与标准体系建设

如果说法律法规是环评制度的骨架，那么科学、规范、统一的技术体系就是它的血肉。建立一套要素完备、方法先进、操作性强的碳排放评价技术导则和标准，是保证评价工作质量、保证评价结果具有可比性和公信力的前提，也是环评技术能力建设的重点。

常见碳排放评价技术导则与标准要素

类别	关键内容	示例
核算标准	明确评价边界、核算范围、排放因子、方法学	ISO 14064 系列，GHG 协议
监测标准	排放源监测要求、设备安装与维护、数据质控	CEMS 技术规范
报告标准	报告模板、内容要求（数据来源、不确定性分析等）	温室气体排放报告指南
技术规范	分行业特点、预测模型、基准体系、减排技术融合	钢铁行业碳排放核算指南

健全的技术标准体系对于碳排放评价来说非常重要。这些技术规范的制定要深入研究各个行业的特点，做到“量体裁衣”。

1. 核心就是确定清晰的评价边界和核算范围。对于电力、石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、航空等重点排放行业，应分别对直接排放（范围一）、间接排放（范围二、范围三）的核算方法和具体要求做出规定，特别是供应链上下游的排放责任要进行合理的界定。

2. 规范中应该给出符合行业实际的碳排放预测模型和情景分析方法。产能扩张项目要以先进的物料衡算、能量平衡模型为基础进行预测；区域开发规划要结合土地利用变化、交通流量模型等进行综合评价。

3. 关键就是创建动态更新的行业碳排放绩效基准体系。确定先进、合理、有引导性的单位产品或单位产值碳排放强度基准值，并按技术进步和产业升级适时修订，用此作为判断项目碳排放水平是否先进的重要标准。

4. 规范整合行业最佳可行减排技术、最佳环境实践，创建动态更新的技术库，给建设单位制定减碳方案提供权威参考，给环评机构判断技术可行性提供参考。

（二）碳排放核算、监测与报告标准

碳排放数据的真实性、准确性、完整性是碳评价、碳交易、国家碳战略决策的生命线。建立与国际接轨、符合国情的碳排放核算、监测、报告标准体系，是所有涉碳工作的“基础设施”建设。目前我国已经出台了一系列温室气体核算方法和报告指南，但这些主要是面向企业年度盘查的，而服务于事前决策的环评制度在目的、精度、时效性等方面与之不同，需要专门化、标准化的衔接和整合。

核算标准的建立是重中之重，应在已有基础上加快制定涵盖所有关键领域的项目级、规划级碳排放核算技术标准。标准不仅要化石燃料燃烧、工业生产、土地利用变化、废弃物处理等各方面进行核算方法的规定，还要建立统一、权威、动态更新的本土化排放因子数据库，特别是对于我国复杂的煤种、复杂的电力区

域电网的排放因子要进行精细化的研究并发布，提高核算结果的准确性。标准体系要解决不同尺度（项目、园区、城市、区域）核算之间衔接、一致的问题，不能出现重复计算或者核算空白。

监测和报告标准的完善刻不容缓。重点排放源要推广使用 CEMS 等在线连续监测系统，同时还要制订严格的设备安装、运行、维护、数据质控技术规范。对不能直接监测的排放活动，应规定物料衡算、抽样检测等替代方法。报告标准应就报告的模板、报告中必须包含的核算边界、所用的方法学、数据来源（主要是活动水平数据和排放因子）、不确定性分析、减排措施效果量化等内容做出统一的规定。还需要创建起国家、地方、企业三者共同参与的碳排放数据信息平台，推行第三方独立认证制度，保证环评管理、政策评价、市场机制所需数据的透明、可靠、可追溯性。

三、环评与气候变化相关法律法规衔接

环评制度属于综合性管理手段，其发挥效能需要与其它有关法律法规相互配合。在“双碳”目标大背景之下，使环评制度同能源、工业、交通、建筑、专门气候变化立法等形成制度合力，构建目标一致、功能互补、程序协调的政策法规体系，是系统推进经济社会绿色低碳转型的必然选择。

（一）与《可再生能源法》、《节约能源法》的协同

节约能源法、可再生能源法是支撑我国能源供给侧结构性改革、需求侧效率提升的两部重要法律，也是实现我国双碳目标在能源方面的直接法律依据。环评制度属于项目准入的前置性关口，须同这两大法律实施“握手”并产生联动效应，从而塑造起牢固的绿色能源防线。环评实践中应当将节能审查要求融入到评价过程中。对于年综合能源消耗量达到一定规模的固定资产投资项，节能报告和审查意见应当作为环评文件的重要附件，也是环评审批的实质性前置条件。

环评报告不能只评价项目能效水平是否达到国内或者国际先进水平，还应该评价它对所在区域能源消费总量和强度“双控”目标的影响。对高耗能项目，环评要从源头上提出更高的用能标准和节能技术改造要求。环评还要成为推广可再生能源利用的强大助推器。在规划环评上要强制要求区域能源、产业、城镇发展等规划对可再生能源开发利用潜力和目标充分论证。项目环评中应当把可再生能源利用水平作为重要的评价指标，在条件允许的情况下强制要求新建工业园区、

大型公共建筑、交通枢纽等项目同步设计、建设分布式光伏、地热能等清洁能源系统，明确其在项目总能耗中所占比例，以此来通过环评这个抓手促进能源消费结构的绿色化转型。

（二）推动应对气候变化立法与环评融合

制定一部统领性的应对气候变化法，已经成了完善我国气候治理体系、体现大国担当的迫切需要。这部备受期待的法律，将会给国家应对气候变化的一系列工作提供顶层设计、根本遵循。环境影响评价属于预防性环境管理的重要制度，其未来的发展方向要同这部“气候母法”展开前瞻性设计、系统性融合，从而保证它在国家气候战略中找到自己的位置，发挥重要作用。未来的气候变化法应在宏观层面明确环评制度在落实温室气体排放控制目标中的法律地位和核心职责。

融合要双向深入，一方面应对气候变化法应当对环评制度气候维度的上位法授权，即规定国家和省级重大战略规划、重点领域专项规划以及对温室气体排放有重大影响的建设项目，应当开展气候影响评价。另一方面，环境影响评价法修订要具体承接这些要求，把气候变化法规定的国家碳达峰、碳中和愿景，分解到地方和行业的碳排放总量和强度控制目标，转化为环评审批具体的技术标准和规定，形成一个从宏观战略到微观项目的完整责任传导链条。

融合不能只停留在减缓碳排放上，还要扩展到适应气候变化。未来法律体系应该要求环评同步进行气候变化风险评价，即评价项目所在地未来可能会遭遇的海平面上升、极端高温、暴雨洪涝等气候风险，评价项目本身的脆弱性以及对于区域适应能力的影响，进而要求项目的设计和建设中必须包含必要的气候适应性措施。依靠减缓和适应相辅相成的双轮驱动模式，环评制度将会由单一的污染控制手段变为推动可持续发展、建立气候韧性社会的综合型战略决策工具，为“双碳”目标顺利达成筑牢全方位、强有力的法治防护网。

第二节 环评与排污许可制度衔接

一、环评与排污许可的“两证合一”改革

推进环评和排污许可制度深度融合属于改善营商环境，深化简政放权的服务改革的途径。经过流程再造和管理协同之后，能够创建起更为高效、统一、权威

的环境准入以及监管体系，从而给减污降碳协同增效赋予坚实的制度保证。

（一）环评审批与排污许可证核发一体化管理

环评审批与排污许可证核发一体化管理，是对长期以来的两张皮问题的制度创新。传统模式下环评审批和排污许可是分开的，环评审批在前，主要对项目准入前的环境可行性进行论证，排污许可在后，主要对项目运行期的排污行为进行规范。这就造成了管理时间、内容、效力上的脱节，容易造成监管重复或者出现监管空白。一体化管理是把这两个独立的行政许可事项合并起来，实行一次申请、并联审批、一次办结，从而大幅缩减企业办事时间、制度性交易成本的一种优化审批流程的方式。

该模式的主要特点就是信息共享、程序衔接。项目建设前期，在环评报告编制阶段就要同步考虑排污许可证的申请要求，将污染物排放标准、总量控制指标、自行监测方案等内容提前纳入环评文件，为后续许可证的发放打下基础。审批部门在环评审批时，对排污许可证申请材料进行技术审查，使环评文件中确定的各项环保要求能够与排污许可证的法律文书对接。一体化管理可以提高行政审批的效率，但是最主要的还是能加大环评制度的刚性约束力。环评批复中关于污染防治设施建设、排放口规范化设置、环境风险防范措施等主要要求，会通过排污许可证的法定形式被固定下来并延续下去，从而保证项目从建设到运营阶段环境管理要求的连续性、一致性。

一体化管理有利于监管资源的合理分配。创建统一的管理平台，整合环评、排污许可等各类信息，可以创建起包含企业全生命周期的环境管理档案。从而使得监管部门可以精准地识别出环境风险点，实行差异化的、精细化的环境监管。同时企业的环境管理合规性、连续性、可追溯性也得到很大提升，将环保责任从源头上落实到企业主体，促使企业由被动接受监管转变为主动承担环保责任，为现代化环境治理体系的构建提供有力支撑。

（二）统一污染物与碳排放管理要求

在双碳目标之下，环境管理的内涵已经由原来的单个污染物控制发展为温室气体减排。环评和排污许可一体化改革深化之后，其管理内容必然要将污染物和碳排放统筹考虑。以前污染物管理、碳排放管理分属不同的体系，污染物管理以环境保护法律法规为依据，碳排放管理更多地与能源、气候变化政策相关。二者在核算方法、报告体系、监管机制等各方面存在的差异，不利于企业统筹做好减

污降碳工作。统一管理要求，即把碳排放因子、核算边界、排放量计算等纳入环境管理的统一框架，使它与主要污染物的管理标准、规范相协调。

统一主要表现在技术规范上。国家和地方要加快制定污染物和碳排放的行业环评技术导则、排污许可申请与核发技术规范。环评阶段除了对项目建设的环境质量影响进行评价之外，还要对项目建设的碳排放水平进行全方位的评价，分析所采用的节能降碳技术在国内或者国际上的先进性，并提出具体的碳减排目标和举措。这些碳排放要求会和污染物控制要求一起成为环评审批的前置条件。企业在排污许可申请时，要同时填报主要污染物预计排放情况和温室气体排放信息，保证两类信息来源一致、口径一致。管理部门在核发许可证的时候，会把审批通过的污染物许可排放量和碳排放控制要求一起写入，形成一证式的法律约束文件。从根本上推动了减污降碳的协同规划、一体化部署，使企业在工艺选择、能源利用、废物处理等各方面都考虑综合环境效益，避免了“按下葫芦浮起瓢”的环境管理难题。

二、排污许可证中碳排放管理要求

把碳排放管理融合到排污许可制度里，是执行双碳目标、加重企业减排责任的手段。这标志着我国固定污染源环境管理由单一污染物控制向污染物、温室气体协同控制的新阶段迈进，也给碳市场有效运行奠定了基础数据和监管依据。

（一）将碳排放总量与强度纳入许可管理

将碳排放总量和强度指标纳入排污许可证管理范畴之中，成为企业开展碳排放精细化、法治化管理的一种途径。这就意味着企业的碳排放行为不再只是道德倡导或者政策要求，而是具有法律强制性的许可要求。许可的碳排放总量一般根据项目的环境影响评价文件、行业排放标准、区域碳排放总量控制目标和企业自身生产工艺、技术水平等综合确定。环评阶段对于项目碳排放水平的预测和评价，成为核定许可排放总量的重要依据，保证新建或者改扩建项目从源头上就符合区域碳减排规划。对于已经存在的企业，许可总量的核定更多地会参考企业的历史排放数据、行业基准线 and 企业的减排义务。

许可排放强度即单位产品或者单位产值的碳排放量，也是重要的管理指标。可以更加直接地反映企业的能源利用效率和绿色生产水平，促使企业依靠技术革新与管理的改进来减少碳排放。把强度指标加入到许可证中，有利于在保证经济

发展的同时，促使产业结构向绿色低碳方向转型。当企业扩大生产规模时，其许可排放总量可以相应增加，但是其排放强度必须符合许可证中规定的先进性要求，从而实现增产不增污、增产减碳的良性发展。

排污许可证对碳排放总量、碳排放强度进行双重控制，可给不同发展阶段、不同类型的企业制定不同的管理目标。对高耗能、高排放行业的企业来说，许可制度会设置更为严格的总量上限、强度标准，逐步递减，从而产生倒逼转型升级的强大压力。对新兴产业、绿色技术企业实行较为宽松的许可条件，有利于新兴产业、绿色技术企业的创新发展。以许可证为依据的精细化管理，给后续的碳排放权交易、环境税费征收、绿色金融等政策工具的推行，提供明确、可操作的企业级管理边界和法律依据。

（二）碳排放执行报告与合规性审核

企业取得载有碳排放要求的排污许可证之后，就应当履行按时提交碳排放执行报告的法定义务。这是联系许可要求与实际排放行为的桥梁，也是监管部门判定企业是否履行承诺的基础。执行报告应包含企业在一个周期（一般是一年或者一个季度）内实际排放的温室气体总量，并且要对核算的方法、数据来源、活动水平数据（燃料消耗量、原材料使用量）以及排放因子等进行详细的说明。报告内容要真实、准确、完整，可以清楚地反映企业碳排放轨迹以及减排效果。

环境管理部门对碳排放执行报告合规性的审核，是保证后面监管有效性的关键环节。审核过程是多维、系统的，主要有以下几点。

1. 数据质量审核：审核人员对企业的报告中所用的数据来源、监测设备、核算方法等进行核查，看其是否符合国家或者行业发布的技术指南、标准。对企业的重要数据要提供原始台账、能源审计报告或者第三方监测数据作为证明，保证数据的真实性以及可追溯性。

2. 排放限值比对：把报告中实际排放总量、排放强度和排污许可证上的许可限值对比，这是判断企业是否达标排放最直接的方式。超标排放的，由环保部门依法启动行政强制程序，责令限期改正并处罚款。

3. 减排措施核实，审核也会对企业为控制碳排放而采取的管理、技术措施落实情况核实。报告中要详细说明各项减排措施的运行情况和减排效果，监管部门可以通过现场检查等方式进行核实，评价企业减排承诺的履行情况，保证企业减排行动落到实处。

碳排放执行报告合规性审核重点

审核内容	描述	目的
数据来源与方法	核查数据来源、监测设备、核算方法是否符合技术指南和标准，要求原始凭证。	确保数据真实、准确、可追溯
实际排放与限值	对比实际排放总量、强度与许可证规定的限值，判断是否超标。	判定企业是否达标排放并启动相应处理
减排措施落实	核实各项减排措施的运行、效果，通过现场检查等方式验证。	评估企业减排承诺履行情况，确保行动落地

从碳排放执行报告合规性审核重点可知，经过上述三个方面的审核，监管部门可以对企业的碳排放报告的真实性、合规性进行全方位、深层次的评价。

三、构建以排污许可为核心的固定源监管制度

以排污许可制度为主，整合各种固定源环境管理制度，是建立一个一体化、高效能的现代环境治理体系的必然要求。它把企业所有的排污行为，无论污染物还是温室气体都放在同一个法律框架、同一管理平台之下实行一证式管理，全面提高监管效能。

（一）环评结论在许可证中的落实

环评制度是项目环境准入的第一道关口，环评结论能否得到有效落实，直接影响到源头防控能否真正实现。以排污许可为核心的监管制度，其要义之一就是 把环评报告书（表）及批复文件中确定的各项环境保护要求，全部、准确地转化为排污许可证中的具体条款内容，实现从“审批”到“监管”的无缝对接。转化过程有法律上的承继性、强制性。环评批复中规定的污染防治设施、工艺技术、清洁能源替代方案、生态保护措施等都会成为核发许可证的前提条件及主要内容。

环评要求某企业采用低氮燃烧技术来控制氮氧化物排放，并配建高效除尘设施，那么排污许可证上不仅会规定氮氧化物、颗粒物的许可排放浓度和总量，还会把“保证低氮燃烧器及高效除尘设施正常运转”作为一项具体管理要求写入其中。环评中提出的特征污染物监测、环境风险应急预案、厂区绿化等生态环境保护措施，会具体化为许可证中的自行监测要求、环境管理台账记录内容、其它环境管理义务。由此环评中原则性的、纲领性的要求便具体化、条款化，并具有了持久法律效力。从而让环境监管部门在日常执法时，可以依据排污许可证的规定去核查企业的环保措施落实情况，使执法更加明确和可操作，有效避免建设项目

建设期和运营期的环保要求出现“两张皮”的现象。

（二）证后监管与碳排放数据核查

排污许可证一经颁发，环境管理工作的重心就转到证后监管。以许可证为核心的监管体系是指所有的现场检查、监督性监测、执法处罚都必须严格按照许可证上所记载的内容来执行。碳排放管理中证后监管遇到的最主要问题就是数据质量的保证。与传统污染物多可以利用在线监测设备实现实时监测不同，温室气体排放主要是企业根据物料衡算和排放因子法进行核算，数据的真实性、准确性直接关系到碳排放管理的效果。

因此加强碳排放数据的核查成了证后监管的重中之重。监管部门要创建起一套科学严谨的数据核查体系，一般会包含企业自查、监管部门抽查、聘请第三方机构专业审查这三个环节。现场检查时执法人员要核对企业生产台账、能源消耗记录、执行报告数据是否一致，还要查看采集数据的计量器具是否合规校验。对重点排放单位，监管部门会委托有资质的第三方机构对其年度碳排放进行独立核查，对企业核算边界、活动数据、排放因子选择、最终排放量计算过程进行全方位的审计，出具核查报告。核查结果将成为判断企业是否达到许可要求，是否需要对企业排放数据进行处罚或者修正的重要依据。建立这样一套多层次、交叉检验的数据质量控制体系，可以有效地提高企业碳排放数据的可测量性、可报告性、可核查性，为碳排放权交易市场平稳运行、国家“双碳”目标顺利实现打下坚实的数据基础。

第三节 公众参与机制创新

一、双碳背景下公众参与的新内涵

在碳达峰、碳中和的战略目标之下，公众参与的内涵被极大地丰富并加深了，以往只是对传统污染物排放的重视，现在则是对温室气体排放和气候变化的长期关注，这就对参与的广度、深度以及专业性提出了更高的要求。

（一）碳排放信息公开与公众知情权

双碳目标的实现是场深刻而广泛的社会经济系统性变革，艰巨性决定了不能只依靠政府和企业，必须充分调动全社会的力量。公众是碳排放最终影响承受者，

也是低碳生活方式的践行者，保证公众知情权就成为公众参与环境治理的前提。将碳排放信息纳入环境信息公开的范围里，是保证公众的知情权、激起公众的参与热情的重要举措。这就要求重点排碳单位、重大基础设施项目、地方政府等主体，必须以易于理解的方式主动公布碳排放数据、减排目标和行动计划。

信息透明度的好坏直接关系到公众参与的程度以及效果。传统的环境信息公开以常规污染物为主，而在双碳背景下，信息公开的重点应该扩展到项目的全生命周期碳足迹、能源消耗结构、使用的低碳技术及其对区域碳达峰、碳中和目标的贡献或影响。系统性的公开可以使得公众对项目的环境影响有更全面的认识，也给专家学者和社会组织提供独立评估和监督的数据基础，有利于遏制漂绿行为，保证减排承诺的落实。

保障公众的碳信息知情权，就要创建起规范化的信息发布平台以及标准化的核算报告体系。政府要主导建设一个权威的碳信息披露平台，要求相关主体按周期更新数据，简化复杂的碳核算方法，给公众提供解读指南和比对工具。将专业温室气体清单数据转化成与日常生活有关的直观指标，如“相当于多少家庭一年的用电碳排放”，可以降低公众理解门槛，使公众由被动接收者变为主动监督者，为构建全民参与的绿色低碳治理新格局打下坚实的基础。

（二）引导公众参与低碳决策与监督

在信息充分公开的基础上，引导公众由“知情”走向“参与”，就是公众参与机制创新的主要目的。双碳背景下的环境影响评价，常常牵涉能源结构调整、产业布局优化、交通规划等宏观战略决策，而这些决策同公众的生产生活息息相关。因此，在项目环评的关键节点，即规划环评草案编制、重大项目的选址论证等环节，应当通过听证会、论证会、座谈会等形式主动吸纳社区居民、行业协会、环保组织等各方面的代表参与讨论，使他们的诉求与智慧融入决策之中。前置性参与可以提高决策的科学性、社会可接受度，也可以减少项目后期出现的社会矛盾。

公众的监督对于减排目标的实现具有很重要的作用。在项目建设和运营过程中，公众就是监督碳排放承诺、减排措施落实情况的“千里眼”和“顺风耳”。必须建立方便的举报和反馈渠道，使公众对企业超标的排放、数据造假、减排措施不力等行为进行监督。政府与环保部门要高度重视群众举报，建立快速响应和核查机制，把处理结果公之于众。自下而上的社会监督同自上而下的政府监管相

融合，就能形成起一张严密的碳排放监管网，促使企业自觉践行低碳发展理念。

二、数字化公众参与平台建设

信息技术迅猛发展给公众参与环评赋予了前所未有的良机。建设便捷高效的数字化公众参与平台，使全民从现实到虚拟的空间被纳入环境治理的过程之中，是打破时空限制、降低参与门槛、提高参与效率，从而推进环境治理体系和治理能力现代化的一种途径。

（一）线上环评公示与意见征集

传统的张贴公告、报纸公示等传统方式，其覆盖面小、时效性差已经不能适应现代社会快节奏、信息化的发展需要了。创建一个集信息发布、报告查阅、意见提交、进度查询、结果反馈等功能于一身的线上环评公示与意见征集平台，已是大势所趋。项目建设单位和环评机构要在该平台上发布环评报告书全本或者简本，以通俗易懂、形象直观的方式呈现碳排放核算、减排路径、环境影响等内容，使非专业公众也能够理解。

平台要设计标准的意见提交表单，引导公众就主要环境问题提出具体、有建设性的意见，防止出现情绪化、无焦点的评论。为了保证意见的真实性，可以实行实名认证并且做好个人信息保护。线上平台可运用大数据技术对收集到的公众意见进行分类、汇总、分析，自动生成意见统计报告，发现公众关注的热点问题及普遍诉求，为环评机构及审批部门提供决策参考，极大提高公众意见处理的效率与科学性。这种数字化方式既使公众的参与过程更加透明、规范，也给以后的意见采纳情况的说明留下了可追溯的依据。

线上平台的创建还要重视用户体验和可及性，保证各个年龄段、各个知识层次的民众都能方便地使用。开发适配移动端的应用程序，给用户语音阅读、关键词检索等功能。把复杂的环评参与过程简化成指尖上的操作，真正实现数据多跑路、群众少跑腿，吸引更多的社会公众参与到双碳目标的环评实践当中，并提供便捷的反馈渠道。

（二）利用社交媒体扩大公众参与范围

随着社交媒体的普及，它在信息传播、舆论形成方面的作用也越来越明显。善用微信、微博等平台，可以打破传统环评公示的圈层限制，用更加有创意的方式将环评信息传递给更广大的社会公众，尤其是年轻人。环评信息不能只停留在

枯燥的报告文本上，要采取更加生动活泼的形式。社交媒体在环评信息传播中主要的应用方式见下表。

社交媒体在环评公众参与中的应用方式表

应用方式	具体内容	目标与优势
内容可视化呈现	将碳排放数据、工艺流程、环境影响等，制作成长图、信息图表或短视频。	降低理解门槛，增强信息传播的吸引力与广度。
互动式沟通	举办线上直播答疑会，邀请专家与项目方直接回应公众疑问与关切。	建立信任，消解误解与对立情绪，提升沟通效率。
精准化推送	利用社交媒体算法，向特定地理位置或关注环保议题的用户推送环评信息。	提高信息触达的精准性，激发相关群体的参与热情。

利用社交媒体也有信息碎片化、讨论非理性化、网络谣言等挑战。这就要求环评公示主体具有较高的媒介素养、舆情应对能力，建立快速反应机制，对不实信息进行纠正，引导舆论，保证公众的参与活动能够在一个理性有序的轨道上进行。

三、公众参与意见的有效性保障机制

公众参与的最终目的就是影响决策。公众意见被收而不理、收而不用，会极大挫伤公众参与的积极性，使公众参与形同虚设。因此，建立一套能够保证公众意见被有效处理和回应的保障机制，才是公众参与发挥实际效用的根本所在。

（一）意见反馈与采纳情况说明

强制性意见反馈、采纳说明制度的创建，属于保障公众参与有效性的关键条件。环评报告在报送审批之前，必须附上对公众意见是否采纳的说明，向社会公开。说明不能含糊其辞、敷衍了事，而应该对公众提出的主要意见逐条回答。对采纳的意见要说明在环评文件、项目设计或者环保措施中怎样体现；对未采纳的意见必须说明理由，如与现行法规冲突、技术上无法实现或者超出本次环评范围等。

说明文件应和环评报告一起，在政府网站或者专门公示平台公布，接受公众的再监督。件件有回应、事事有交代的机制，是对公众意见的尊重，也是对公众监督权的保障。可以倒逼建设单位、环评机构认真对待每一条公众意见，审慎地评价其合理性、可行性，从而提高环评质量。透明的反馈过程本身就是一次有效的沟通，可以消除分歧、增进理解，有利于项目顺利实施，并为和谐的社会环境的营造提供了一个闭环。

还可以设立第三方评价机构，即由与建设单位、环评机构无关的社会团体或者专家组成的第三方评价机构，对公众意见采纳情况做出评价并发布评价报告。引进独立的监督力量可以提升反馈机制的公信力和权威性，让公众参与产生的成果成为改善决策、保护环境的行动。

（二）环境公益诉讼对环评的监督作用

环境公益诉讼是保障公众环境权益、监督环境决策的最后司法救济途径，也是保证环评公众参与有效性的最后一道防线。当环评过程中出现程序违法、公众参与权利被剥夺、环评结论存在重大瑕疵，尤其是不能充分考虑项目碳排放影响时，相关行政机关仍然批准的情况下，符合法定条件的社会组织可以依法提起环境公益诉讼，请求法院撤销环评批复或者确认其违法。

双碳背景下，环境公益诉讼的监督作用越发明显。公益诉讼可以将项目的碳排放问题纳入司法审查的范畴，对环评报告中碳排放预测是否科学、减排措施是否充分有效、项目建设是否符合区域碳达峰、碳中和规划进行审查。依靠司法判决来纠正错误的环评决策，阻止高碳、高污染项目盲目上马，给国家双碳目标构筑起牢固的司法屏障。成功的环境公益诉讼案例会产生很大的示范和震慑作用，可以警示建设单位和环评机构重视公众参与以及碳排放评估，从而从源头上提高环评质量与决策的审慎性，给公众参与提供最终的权利救济保障。

第四节 环评监管体系优化

一、构建“互联网+监管”新模式

信息技术的迅速发展给环评监管带来了前所未有的机遇。深度融合互联网、大数据、人工智能等现代技术，创建起智慧化、精准化的“互联网+监管”新方式，是提升监管效率和透明度、达成环评全过程动态监管的必然途径，也是符合双碳目标下精细化管理的现实需求。

（一）全国环评审批与监管信息平台

全国环评审批和监管信息平台的建立和完善，给环评监管的现代化打下了基础。该平台要打破各个部门、各个地方之间的信息壁垒，把分散在各个部门、各个地方的环评受理、审批、验收和后续监管的数据整合集成起来，形成国家级统

一开放共享的信息枢纽。平台可以实现环评全过程的网上办理和公示，各个环节如从项目的受理、报告编制、专家评审、审批决定等各个方面都可做到可查、可溯，大大提高行政审批过程的透明度，有效遏制了以权谋私的土壤，保障社会公众的知情权、监督权。

在双碳目标之下，该平台的功能有了新的内涵。除一般环境影响信息之外，平台还要对项目的碳排放量、碳足迹核算、减排承诺以及技术方案等各方面信息进行采集与管理。因此，监管部门可以及时获取新增项目的碳排放增量，判断其给所在区域碳达峰、碳中和路径带来的影响。借助数据互联，平台可以对环评审批期间所承诺的碳减排举措，同项目建成投产之后实际排放的数据加以联系并对比，达成从“承诺”到“兑现”的闭环监管。依靠数据进行精准监管，保证环评提出的低碳发展要求不是一纸空文，而是企业实际的减排行动。

平台累积起来的大量项目数据，也给区域性的以及行业的碳排放趋势分析，以及环境政策的制定提供有力的数据支撑。决策者凭借平台数据宏观掌控区域内产业结构调整生态效应，评价各个行业绿色低碳转型的完成程度，从而有目的、有预见性地制定出碳减排政策和规划。平台创建把环评数据由单一的项目审批依据，变为国家宏观决策、区域可持续发展战略的重要资源。

（二）利用大数据进行环评质量智能复核

传统的环评文件质量审查大多依靠人工，效率低、标准不一、主观性强、很难发现深层次的问题。利用大数据、人工智能技术进行环评质量智能复核，是对人工审查短板的补充，也是提高监管精度的一种新方法。智能复核系统可以对大量的环评文件实行自动化、全方面地扫描和比对分析，从而有效地找出质量问题。

智能复核系统依靠创建起庞大的环评基础数据库和案例库，采用自然语言处理，数据挖掘等技术，可以实施多维度的文本以及数据筛查。该系统可以有效地识别环评报告中内容抄袭、套用模板、关键信息回避等各方面的形式主义问题。同时系统还可以对报告主要数据进行逻辑一致性检验，即对项目产污环节、污染物产生量、治理措施效率、排放量等计算关系是否合理，有无数据矛盾或者异常波动进行检验。双碳目标之下，智能复核的价值更加突出，其主要应用点主要体现在以下几个方面：

1. 碳排放核算校核，系统按照项目所处的行业、生产工艺、能源消耗结构等信息，同国家或者行业发布的碳排放核算指南、排放因子数据库进行对比，自动

校验项目碳排放核算边界的完整性、活动水平数据的真实性、排放因子选取的准确性，快速找出核算过程中存在的重大偏差或者错误。

2. 减排措施合理性评价，对环评报告中所提出的减排措施与行业节能降碳先进技术进行比较，判断减排措施的可行性、先进性，是否达到最佳可行技术标准，量化的分析承诺减排效果，防止企业虚报减排效益来取得项目审批。

3. 对环评报告的内容进行政策符合性审查，将环评报告的内容与国家、地方的产业政策、能源政策、碳达峰行动方案等比对，看项目是否符合绿色低碳发展的要求，有无违规上马“两高”项目的风险，给监管部门提供快速准确的预警信息。

二、强化环评单位与从业人员信用管理

环评质量最根本的保证是从事机构人员的专业水平和职业道德。技术手段的革新要同强有力的制度约束相配合。因此，健全以信用为核心的新型管理机制，用制度设计压实主体责任，是保证环评工作科学性、公正性的根本之策，也是净化环评技术服务市场的重要途径。

（一）环评文件质量终身负责制

环评文件质量终身负责制是强化环评从业主体责任的制度。本制度规定，环评文件的编制主持人、主要编制人员、环评单位法定代表人对其编制的环评文件质量负有终身法律责任。该责任不会因为时间的流逝、工作的变动或者单位的变更而消失。项目建成多年后，如果环评文件出现重大质量问题（弄虚作假、漏项严重、结论失实等），有关责任人会依法依规受到处理。

该制度建立之后，从根本上改变了以往环评责任追究时效性不强、处罚力度不够的状况。它就如同一把高悬在头顶上的利剑，给所有的环评工作者带来了巨大的压力，迫使他们在工作中必须坚持科学严谨、公正无私的原则来对待环评工作，不敢有丝毫的懈怠和侥幸心理。双碳目标之下，环评工程师对于碳排放核算的每一个数据、每一项减排措施的可行性都得做谨慎的论证，任何不负责任的结论都可能成为以后追责的依据。

终身负责制的实行使环评行业迅速走向专业化、规范化。环评单位为了规避长期的风险，会对内部的质量控制体系给予更多的重视，对于从业人员的专业培训以及职业道德教育也会给予更多的重视。同时也有利于环评工程师个人专业品牌的形成，技术过硬、信誉良好的从业人员会得到更多的认可，在市场竞争中获

得更多的机会；而能力不足、信誉不佳的从业人员则会被逐步淘汰，从而实现行业优胜劣汰，提高整个环评技术服务水平，为双碳目标的实现提供高质量的技术支持。

（二）建立环评“黑名单”与信用修复机制

强化责任追究的同时，建立一套动态的、公正的信用体系也十分重要。建立环评黑名单和信用修复机制，就是这一理念的具体体现，它用奖惩分明的信用杠杆，引导环评市场主体自觉规范从业行为。

黑名单制度属于严厉的失信惩戒措施。对环评工作中有严重违法违规行为的单位和个人，如出具虚假或者严重失实的环评文件、在环评工作中谋取不正当利益、被追究刑事责任等，生态环境主管部门将该单位和个人列入全国统一的环评“黑名单”。一旦被列入黑名单，相关单位和个人在一定时期内或者永久不能从事环评技术服务工作。由于把失信与市场准入直接挂钩的惩罚制度，失信成本大大提高，产生了很大的震慑作用，有效地遏制了环评领域劣币驱逐良币的现象。

但是信用管理体系的设计不只有惩罚。为了体现制度的人性化、激励功能而设置的信用修复机制。被列入黑名单或者受到其它行政处罚的失信主体，在一定条件下可以申请信用修复。条件一般包括：已经完全纠正违法行为，消除了不良社会影响；在规定期限内没有再发生新的失信行为；经过相关专业能力再培训、考核等。

惩戒与修复相结合的动态管理模式，就形成了一个更加完备、健康的信用生态。它既可以严惩恶意违法、扰乱市场的主体净化市场环境，也可以给那些真心悔过、积极改正的主体一个重新树立信用的机会，而不会采取一棍子打死的方式。此种张弛有度的监管方式，有利于促成整个行业的知信、守信、用信良好风气的形成，促使环评从业者把诚信作为立身之本，从源头上保证环评文件的质量，使它在服务国家双碳目标决策时更加可靠可信。

三、引入第三方技术评估与监督

政府的行政监管力量是有限的，特别是在技术日新月异、专业领域不断细分的时候。因此，引入第三方力量来参与环评的技术评估以及过程监督，并构建起政府监管、社会监督、行业自律相融合的多元共治体系，就是提高环评科学性和公信力的主要途径。

（一）独立第三方环评技术评估机构

重大、复杂或者对生态环境影响较大的建设项目环评，可以委托独立第三方技术评估机构对技术成果进行审查，可以弥补行政审批部门自身技术上的不足，提高环评决策的科学性、公正性。第三方机构一般由行业内顶尖的专家学者、资深工程师等组成，他们具有深厚的理论基础和实践经验，在中立而专业角度对环评文件进行审查。

第三方技术评价机构对于双碳目标的达成起着非常重要的作用。大量的新型低碳技术、复杂的碳核算模型、长期气候变化影响预测等等都远远超出了传统环评的知识范围。第三方机构就环评报告项目碳排放强度、能源利用效率、减排技术方案等内容做专项评价，看其是否达到行业最佳实践水平和最新的科技发展水平。用先进的分析工具和模型来对环评报告的结论进行独立验证，为审批部门提供一份高水平的无偏颇的技术意见。独立的判断力不仅可以降低环评的技术风险，还可以提高环评结果的社会公信力，使以环评结果作为决策依据更加稳健可靠。

（二）发挥行业协会自律与监督作用

行业协会是政府与市场主体之间的桥梁，在环评监管体系里担当着不可缺少的部分。与政府的强制性监管相比，行业协会的自律管理更加灵活、专业，可以深入到行业内部，促使形成崇尚专业、恪守诚信的行业文化，是构筑环评质量防线的重要力量。

行业协会可以牵头制订和推进行业标准、服务规范、职业道德准则。双碳背景之下，协会编制的特定行业的碳排放评价技术指南，给环评单位提供具体可行的技术指导，使评价尺度一致，防止由于标准不同造成的评价结果出现偏差。协会还可以建立行业内的专家库，组织进行环评文件同行评议，即行业内专家互相审阅、发现问题、交流经验，从而提高行业的技术水平。

行业协会对从业人员的继续教育、培训具有天然的优势。为双碳目标给环评工作提出的新要求，行业协会可以举办高质量的专题培训、技术研讨会帮助环评工程师及时更新自身的知识结构，掌握最新的政策动态和技术方法。行业协会可以建立行业内部的投诉举报、纠纷调解机制，对会员单位的违规行为实行告诫、通报批评等自律性惩戒措施，弥补了政府监管覆盖不全的问题，形成全方位的监管体系，共同促进环评事业更好地服务于国家双碳战略。

环评监管体系优化措施摘要表

优化措施类别	具体内容	核心目的	双碳目标下的新要求 / 价值
构建“互联网 + 监管”新模式	全国环评审批与监管信息平台	提高审批透明度，实现全过程动态监管	实时掌握碳排放增量，闭环监管减排承诺，提供宏观决策数据
	利用大数据进行环评质量智能复核	提高审查效率与精度，弥补人工审查短板	碳排放核算校核，减排措施合理性评价，政策符合性审查预警
强化环评单位与从业人员信用管理	环评文件质量终身负责制	压实主体责任，提升环评质量与公信力	促使对碳排放核算和减排措施进行审慎论证
	建立环评“黑名单”与信用修复机制	规范市场行为，营造诚信从业环境	惩戒失信，激励守信，确保服务双碳战略的可靠性
引入第三方技术评估与监督	独立第三方环评技术评估机构	弥补行政部门技术不足，提高决策科学性	评估低碳技术、碳核算模型，提供无偏技术意见
	发挥行业协会自律与监督作用	促进行业规范发展，提升专业水平	制定碳排放评价指南，组织专题培训，实现多层次监管

由环评监管体系优化措施摘要可知，各项措施互相联系，共同构成支撑“双碳”目标下环评工作高质量发展的重要保障。

第五节 双碳背景下环评发展展望

一、环评向“环境与气候综合影响评价”演进

传统的环境影响评价体系主要是对局部、微观的环境污染问题进行解决，对于全球气候变化这样的系统性问题，它的理论基础和方法论都需要进行更新。因此，环境影响与气候影响一起被纳入考虑的范围中，这已经成为一种必然的发展趋势。

（一）构建减污降碳协同增效的评价体系

在双碳目标的指引下，环境影响评价的理念也由原来的单一的污染控制，转变为减污降碳的系统性协同。温室气体和大气污染物在能源、工业、交通等领域的来源具有很强的同根同源特性。过去把两者分开管理的模式，造成行政资源的浪费，也失去了许多协同治理的良机。未来的环评体系要打破壁垒，创建起一个能一体化评价项目污染物排放和碳排放影响的综合体系。

新型的评价体系要把碳排放同污染物一样列为约束性指标，在项目准入阶段就加以严格限制。环评技术导则及标准中应该对碳排放核算方法、评价标准和减排路径做出规定，形成一套全生命周期的减污降碳协同评价方法学。在对燃煤电厂升级改造项目进行评价的时候，不能仅仅看脱硫脱硝效率的提升，而应该准确核算出由于能效改善带来的碳减排量，并全面地判断它对区域碳达峰目标的贡献度。

其最终目的就是使环境效益、气候效益达到最大。协同评价可以促使项目在方案设计阶段就选用能效高、能源结构优、资源循环利用充分的绿色低碳技术、工艺，从源头上杜绝高污染、高碳排项目的落地。这是环评制度自身深化的必经之路，也是环评制度服务于经济社会全面绿色转型的重要环节，从而将环境治理的成本效益和社会综合价值提升到新的高度。

（二）适应气候变化与提升气候韧性并重

未来的环境影响评价不应该只关注建设项目对气候变化的减缓贡献，即减少温室气体排放，还应该重视适应气候变化的需求。这就意味着环评视角要发生根本性的转变，即从单纯的评价项目对环境的“输出”影响，转变为评价未来气候变化可能给项目带来的“输入”风险，并把提高项目气候韧性纳入评价的核心内容。因此环评要加入气候风险评价模块，针对气温上升，海平面上升，极端天气频发等气候变化走向下，拟建项目（特别是基础设施，水利工程，沿海项目等）的选址安全，结构稳固性以及长期运营可能遭遇的危险展开全面剖析。

在此基础上，环评报告要提出提高项目气候韧性的适应性措施。调整项目布局避开高风险区域，采用耐候性更好的建筑材料、设计标准，建立更可靠的防洪排涝系统，给农业项目配备抗旱抗涝能力更强的灌溉设施等。将适应性评价纳入环评之中，可以保证重大投资在数十年的生命周期内保持可持续性，防止由于气候变化而造成资产搁置或者功能失效，从而保证经济社会发展的安全与稳定。因此环评就不再是一个静态的环境影响快照，而变成一个前瞻性的、面向未来的可持续发展远景规划工具。

二、环评技术方法的智能化与精准化

评价体系的深刻变革不能缺少技术的有力支持。由于环境、气候问题日益复杂，传统的依靠经验、简化模型的评价方法已经不能满足目前的需求，采用人工

智能、大数据等前沿技术，使评价过程智能化，结果更加精确，这是提高环评科学性的有效途径。

（一）AI 与大数据驱动的环境影响评价新模式

伴随着信息技术的迅猛发展，人工智能同大数据的深度融合，正在给环境影响评价带来一场模式的变革。大数据技术给环评带上了前所未有的海量、多源、高时空分辨率数据基础，涉及到卫星遥感、地面监测站网络、企业在线监控以及社会经济统计等多方面的数据，有利于全方位、动态的描绘区域环境背景和项目影响。

人工智能给这些繁杂的资料赋予了强大的分析引擎。传统的环境影响评价工作在背景调查、影响识别等环节上要花费大量的时间、精力，并且很容易出错。运用机器学习算法对大量的环境数据进行模式识别和关联分析，可以自动识别出环境敏感区、污染物输送的关键路径、累积性环境影响等，大大提高评价的效率和广度。

影响预测方面，以深度学习为基础的预测模型，可以学习环境要素之间复杂的非线性关系，从而创建出比传统的物理模型或者经验公式更加准确的预测工具。利用神经网络模型可以对某种气象条件下污染物扩散的范围、浓度做出更准确的预测，也可以评价不同的土地利用变化情景下的区域碳汇能力。

人工智能技术明显提高了环评监管和决策的质量。用自然语言处理技术对大量的环评报告进行智能审查和对比，及时发现报告中不一致或者缺项的问题，从而大幅度提高审批效率和质量。创建集成大数据、人工智能模型的智慧环评平台，可以给管理者提供可视化的场景模拟、多方案比选、智能决策支持，促使环评由静态的报告编制向动态、交互、科学的决策支持系统转变。

（二）高精度模拟与预测技术的应用

在“双碳”目标之下，环评工作对于量化分析的精度要求越来越高，于是各种高精度的环境模拟和预测技术被广泛应用。通过把复杂的物理、化学、生物过程数学化、模型化，可对人类活动对环境、气候系统的影响进行准确的模拟与预测，给环评提供有力的科学依据。

高精度模拟技术在环评中应用广泛，共同构成现代环评技术体系的基础，具体内容见表：

高精度环境模拟与预测模型概览

模型类型 / 名称	主要功能与应用	典型模型示例
大气化学传输模型	模拟污染物（如 PM2.5、O3）和温室气体（如 CO2、CH4）的产生、转化、输送、沉降过程；评估从项目点源到区域尺度的影响；量化减污降碳协同效应。	CMAQ, WRF-Chem
流域水文水质与生态系统模型	模拟地表径流、地下水补给、污染物迁移转化等过程；评估建设项目对流域水资源量、水质、水生生态系统的长期影响。	SWAT, MIKE
生态系统碳循环与碳汇计量模型	量化大面积土地利用变化（如新城建设、矿产开采）对区域植被、土壤碳储量的影响；判断项目是碳源还是碳汇，为区域碳中和目标提供决策支持。	InVEST, CASA

高精度模型在环评中得到的预测结果，一方面大大提高了预测结果的可信度，另一方面也对环境影响的机理进行了更深层次的揭示，为提出成本低、效果好、生态环保性更好的应对气候变化策略打下了基础。

三、环评在生态文明建设中的核心作用

伴随着评价体系日趋完善和技术手段日新月异，环评的战略地位和功能也随之发生了质的飞跃。生态文明建设的大好篇章里，环评由单纯的技术审查，升华为推动发展方式全面绿色转型的主要制度保障和关键抓手。

（一）成为推动绿色发展的源头把关制度

在双碳目标引领下的生态文明建设新阶段，环境影响评价制度的地位被提高到前所未有的战略高度，成为从源头推进经济社会发展全面绿色转型的第一道屏障。其主要作用就是依靠严格的项目准入管理，将绿色低碳理念贯穿于投资决策、产业布局全过程，从源头上遏制和减少环境污染、碳排放。环评不再只是项目建设之后的合规性审查，而应该成为前瞻性、具有引导和约束作用的战略性制度安排。它同“三线一单”生态环境分区管控体系紧密结合，共同形成一道坚固的生态安全屏障。

将碳排放评价纳入环评强制性内容之后，环评制度就直接对投资导向起到引导作用。对高耗能、高排放的“两高”项目，实行最严格的环评审批制度，倒逼其技术升级、能源替代或者直接不准入，从而有效地遏制了不符合绿色发展要求的产能盲目扩张。符合国家战略性新兴产业方向的绿色低碳项目，环评可以依靠

优化服务、简化程序等方式，给绿色低碳项目优质生产力开辟绿色通道。差异化的、有保有压的管理方式，使环评成为调整产业结构、能源结构、交通运输结构的有力政策工具，促使经济增长与碳排放逐步脱钩，从源头上为碳达峰碳中和目标的实现打下基础。

（二）服务美丽中国与全球生态文明建设目标

环境影响评价的创新发展，最终是为了服务建设人与自然和谐共生的“美丽中国”宏伟蓝图，为全球生态文明建设提供中国的智慧。以减污降碳的协同控制策略为特点的新时代环评，直接回应了人民群众对优美生态环境的期待。每一次科学严谨的环评审批都是对蓝天、碧水、净土的切实保护，保证新的发展不会以牺牲环境质量为代价，进而实现经济效益、社会效益和生态效益的有机统一。

在全球范围内，中国对于环评领域探索与实践，特别是把应对气候变化全面融入环境治理体系的制度创新，给世界各国，尤其是广大发展中国家提供可以借鉴的范例。当中国企业“走出去”参与“一带一路”等国际合作项目的时候，一套成熟的、将气候因素纳入考虑范围的环评标准与方法，可以促使海外投资项目按照更高的绿色标准来执行，从而有效地防止污染和碳排放转移至其他国家。既提高了中国的负责任大国形象，又是践行人类命运共同体理念的实践。

环评制度长期会继续作为生态文明建设的基石起到重要的作用。它将会是不断发展的、不断完善、不断革新的体系，在不断吸收最新的科学知识和技术成果的基础上，不断自我改进和完善，以更好地应对新的环境和气候变化的挑战。依靠这个制度的有效运行，可以保证中国现代化进程始终走在绿色、低碳、可持续发展的道路上，实现经济繁荣、社会进步、生态优美三者的和谐统一，为全球可持续发展目标的实现作出中国的贡献。

参考文献

- [1] 王慧钧.”双碳”目标下新能源项目经济性评价的创新思路[J].财富生活, 2025(18):27-29.
- [2] 赵珩,杨佐斌,陆君君,等.伙伴关系视角下清洁能源项目环保管理[J].清华大学学报(自然科学版), 2025(1):165-166.
- [3] 张艺鑫.”双碳”目标下城市交通健康评价方法研究[D].山东交通学院,2023.
- [4] 陈婉尹,熊妮,李腾飞,等.基于”双碳”目标下”碳评+金融”模式的产融协同创新与实践[J].财经界, 2025(13):92-94.
- [5] 孟卫军,刘启豪.”双碳”目标下中国上市建筑企业绿色创新效率评价及影响因素研究[J].科技与经济, 2025(1):39-41.
- [6] 梁大为 杨露希 陆文晓 钟梅 兰忠实.双碳目标下大跨径斜拉桥绿色施工安全评估与低碳运维策略研究[J].2025(4):64-66.
- [7] 唐洋,邓涛,罗园.”双碳”目标下企业绿色治理绩效评价体系构建研究[J].中国乡镇企业会计, 2025(1):43-46.
- [8] 姚丽,薛铃琦,程君婷.”双碳”目标下企业绿色技术创新对ESG绩效的影响研究[J].中国管理信息化, 2025(13):115-116.
- [9] 刘昱.”双碳”目标下可持续发展报告质量评价研究——以华能国际与ENEL为例[J].产业创新研究, 2022(12):78-80.
- [10] 林健.低碳城市能源系统优化与评价方法研究[D].厦门大学,2021.
- [11] 郑超,刘威林,蔡洪烨,等.”双碳”战略目标背景下的创新实验设计与实践[J].化学教育(中英文), 2025(10):47-49.
- [12] 沈梦园.”双碳”目标下土地利用经济效益与生态环境效益的耦合协调及时空差异研究[J].中国资源综合利用, 2025(7):112-114.
- [13] 吕海童.创新动机视角下环境规制对企业绿色创新的影响机理及效果评价研究[D].中国矿业大学;中国矿业大学(江苏), 2025.
- [14] 潘晓滨,杨晗雁.”双碳”目标下碳排放环境影响评价法制化路径探究[J].环境影

- 响评价, 2025, 47(2):23-29.
- [15] 王璟睿,王静,史沁枫,等.”双碳”目标下的碳排放评价管理实施对策[J].环境与可持续发展, 2025(3):38-40.
- [16] 肖镖航,陈玲芳.”双碳”目标下的企业环境信用评价体系建[J].环境保护与循环经济, 2023, 43(5):106-110.
- [17] 步宏婕,景民昌.研究生碳素养现状调查与等级评价[J].科学咨询, 2025(19).
- [18] 吴艺楠,赵芳,唐微.”双碳”目标下温室气体排放环境影响评价的实践与挑战[J].环境保护, 2023, 51(14):29-33.
- [19].”双碳”目标下生物质资源利用方式评价与选择研究--以农作物秸秆为例[J].工业工程与管理, 2023(2):26-27.
- [20] 梁金强,刘丹竹,徐庶亮,等.”双碳”目标下能源安全定量评价方法[J].化工进展, 2022(041-003).
- [21] 郭以琦.”双碳”目标下环境影响评价制度变革研究[D].重庆大学, 2025.
- [22] 尹士,王曼曼,许俊锋.”双碳”目标下区域制造业绿色创新驱动发展评价研究[J].边疆经济与文化, 2022(3):3.
- [23] 文霞.再生道路碳排放评估及路域造林项目降碳研究[D].中国矿业大学, 2025.