

“土十条”下工业污染场地修复环境效益与经济成本协同机制研究

陈志健

广州珠江实业环境保护有限公司, 中国·广东 广州 510045

摘要: 本文基于《土壤污染防治行动计划》(“土十条”)的实施背景,以工业遗留场地土壤修复工程为研究对象,深入探讨其环境效益与经济成本的平衡策略。通过分析“土十条”对土壤修复的政策导向、工业遗留场地土壤污染特征及修复技术类型,结合成本效益分析方法,从修复技术选择、资金筹措模式、政策激励机制等方面提出平衡策略,旨在为工业遗留场地土壤修复工程的可持续发展提供理论支持和实践指导。

关键词: 土十条; 工业遗留场地; 土壤修复; 环境效益; 经济成本; 平衡策略

Research on the Synergistic Mechanism of Environmental Benefits and Economic Costs of Industrial Contaminated Site Remediation under the "Soil Ten Articles"

Chen Zhijian

Guangzhou Zhujiang Industrial Environmental Protection Co., Ltd., China Guangdong Guangzhou 510045

Abstract: Based on the implementation background of the "Soil Pollution Prevention and Control Action Plan" ("Ten Soil Actions"), this paper takes soil remediation projects of industrial legacy sites as the research object and deeply explores the balance strategy between environmental benefits and economic costs. By analyzing the policy orientation of "Ten Soil Actions" on soil remediation, the pollution characteristics of soil in industrial legacy sites and the types of remediation technologies, and combining the cost-benefit analysis method, this paper proposes balance strategies from aspects such as the selection of remediation technologies, the financing model, and the policy incentive mechanism, aiming to provide theoretical support and practical guidance for the sustainable development of soil remediation projects of industrial legacy sites.

Keywords: Soil Ten-point Plan; industrial legacy sites; Soil remediation; Environmental benefits; Economic costs; Balanced strategies

0 引言

随着我国工业化进程的加速,大量工业企业在城市扩张和产业升级过程中遗留了众多污染场地。这些工业遗留场地土壤中残留的重金属、有机污染物等对周边生态环境和人体健康构成严重威胁。2016年国务院发布的《土壤污染防治行动计划》(“土十条”)为我国土壤污染防治提供了系统性指导,明确提出到2020年受污染耕地安全利用率达到90%左右、污染地块安全利用率达到90%以上的目标,并将工业遗留场地修复纳入重点治理范畴。然而,土壤修复工程具有技术复杂、周期长、资金需求量大等特点,如何在实现环境效益最大化的同时控制经济成本,成为制约行业发展的核心问题。本文基于“土十条”政策框架,结合典型案例与成本效益分析方法,探讨工业遗留场地土壤修复工程中环境效益与经济成本的平衡策略。

1 “土十条”对工业遗留场地土壤修复的政策导向

1.1 明确治理目标与责任主体

“土十条”提出“谁污染,谁治理”原则,要求造成土壤污染的单位和个人承担修复主体责任,地方政府需制定土壤污染治理与修复规划并公开实施情况。例如,湖南省湘江流域重金属污染治理方案明确规定,原责任主体为中央下放地方企业的项目可获得最高45%的中央预算内投资补助,地方企业项目补助比例不超过30%。这一政策设计既强化了污染者的法律责任,又通过财政补贴降低了地方政府的资金压力。

1.2 强化分类管理与风险管控

政策将工业遗留场地划分为优先保护类、安全利用类和严格管控类,针对不同类别实施差异化治理策略。例如,

对拟变更用途为居住、商业等公共设施的污染地块，要求开展土壤环境状况调查评估；对重度污染地块则采取隔离、换土等工程措施。这种分类管理方式有效避免了“一刀切”的治理模式，提高了资金使用效率。

1.3 推动技术创新与产业协同

“土十条”提出整合科研资源、加强基础性和关键技术研究，并鼓励采用环境绩效合同服务模式引入第三方治理。例如，某钢铁厂污染场地修复中，通过“原位修复 + 隔离”“异位修复 + 换土”等技术组合，实现了修复周期与成本的优化。政策还支持土壤修复与循环经济结合，如利用工业石膏、粉煤灰等废弃物作为土壤改良剂，既降低了修复成本，又促进了资源再生利用。

2 工业遗留场地土壤污染特征与修复技术分析

2.1 污染特征与修复难点

工业遗留场地土壤污染具有复合性、隐蔽性和长期性特点。例如，某焦化厂场地中多环芳烃超标严重，部分区域有机污染物浓度高达环境标准的 100 倍以上；某钢铁厂土壤中重金属铬、铅等与有机物形成复合污染，增加了修复技术选择的难度。此外，污染场地常位于城市中心区，土地级差效应显著，修复后需满足商业开发或公共设施建设标准，进一步抬高了治理成本。

2.2 修复技术类型与成本效益

2.2.1 物理修复技术

物理修复通过改变土壤物理性质实现污染物分离，包括土壤挖掘、置换、淋洗等。例如，某重金属污染场地采用土壤置换技术，将受污染土层挖除并替换为清洁土，修复成本约 1500 元 / 立方米，但需占用大量填埋空间，且存在二次污染风险。物理修复适用于污染深度较浅、面积较小的场地，但大规模应用时经济性较差。

2.2.2 化学修复技术

化学修复通过添加化学试剂使污染物转化或固定，包括化学氧化、还原、沉淀等。例如，某有机污染场地采用化学氧化技术，利用过硫酸盐氧化分解多环芳烃，修复周期缩短至 6 个月，但化学试剂成本高达 800 元 / 吨，且可能破坏土壤微生物群落。化学修复适用于急性污染场地，但需严格控制试剂用量以避免生态干扰。

2.2.3 生物修复技术

生物修复利用微生物或植物降解污染物，具有成本低、环境友好等优势。例如，某石油污染场地采用植物修复技术，种植超积累植物蜈蚣草，3 年内土壤中多环芳烃浓度降低 60%，修复成本仅为物理修复的 1/3。然而，生

物修复周期较长（通常需 3—5 年），且受气候、土壤类型等因素限制，适用于轻度污染场地的长期治理。

2.2.4 新型修复技术

电化学修复、纳米材料修复等新型技术通过提高污染物迁移效率实现快速治理。例如，某重金属污染场地采用电动力学修复技术，通过施加直流电场促使重金属离子向电极迁移，修复效率较传统方法提升 40%，但设备投资成本高达 200 万元 / 公顷。新型技术适用于高价值商业地块修复，但需解决技术成熟度与规模化应用问题。

3 工业遗留场地土壤修复工程成本效益分析

3.1 成本构成与影响因素

土壤修复成本包括直接成本（材料、设备、劳务）和间接成本（监测、维护、管理）。以某钢铁厂修复项目为例：直接成本上，原位修复成本 6000 万元（修复周期 2 年），异位修复成本 1.4 亿元（修复周期 8 个月）；间接成本上环境影响评估费用占直接成本的 5%，长期监测费用占 3%；总成本差异上重度污染区域修复成本是轻度区域的 2.3 倍，主要源于污染深度、污染物种类和修复技术选择。

3.2 效益评估指标与方法

环境效益评估需兼顾污染物削减量、生态功能恢复程度和健康风险降低水平。例如，某农用地修复项目通过降低土壤中镉含量，使水稻籽粒镉浓度从 0.8mg/kg 降至 0.2mg/kg 以下，达到国家食品安全标准，间接保障了周边居民健康。经济效益评估则采用净现值（NPV）、内部收益率（IRR）等指标，例如某商业地块修复后土地增值收益覆盖修复成本的 120%，项目 IRR 达 15%。

4 典型案例分析

4.1 案例一：湘江流域重金属污染治理——政府主导的系统性修复

4.1.1 项目背景与实施

湘江流域是我国重要的有色金属冶炼基地，长期工业活动导致流域内土壤重金属污染严重，镉、铅、砷等污染物超标率达 30% 以上。2013 年，湖南省启动“湘江流域重金属污染治理三年行动计划”，总投资超 4000 亿元，覆盖 8 个地级市，目标是通过关闭重污染企业、建设污水处理设施及土壤修复，实现流域土壤环境质量根本改善。项目采用“源头控制 + 过程阻断 + 末端治理”的复合模式：关闭淘汰落后产能企业 1200 家以减少污染物排放；在冶炼厂周边建设截污沟、生态隔离带阻断污染物扩散；对重度污染农田采用“客土置换 + 化学稳定化”技术，轻度污染农田实施“低积累作物种植 + 土壤调理剂添加”。

4.1.2 成本与资金来源

项目直接成本占 60%，包括修复材料（石灰、磷酸盐等）、设备租赁（挖掘机、运输车）及劳务费用；间接成本占 15%，涵盖环境监测与长期维护费用。资金来源以中央财政专项资金（40%）和省级财政配套（30%）为主，企业自筹和社会资本参与分别占 20% 和 10%。尽管财政支持缓解了部分压力，但资金缺口仍达 20%，导致部分项目延期。

4.1.3 效益与平衡策略

修复后，农田镉含量从 0.8mg/kg 降至 0.3mg/kg 以下，达到农用地土壤污染风险管控标准；流域内湿地植被覆盖率提升 15%，鱼类种群数量增加 20%；周边居民血铅超标率从 12% 降至 3%，农产品重金属超标率下降至 5% 以下。经济效益方面，修复后农用地流转价格从 2000 元 / 亩 / 年提升至 3500 元 / 亩 / 年；关闭的冶炼厂旧址改造为文化创意产业园，年吸引游客超 50 万人次，带动就业 2000 人；通过源头控制减少未来 30 年污染治理支出约 800 亿元。项目通过中央与地方财政分担机制缓解资金压力，并将修复与土地再开发结合，以土地增值收益反哺治理成本。然而，客土置换产生大量废弃土方，需额外建设填埋场，增加二次污染风险。

4.2 案例二：某钢铁厂污染场地修复——市场化运作的技术优化

4.2.1 项目背景与目标

某钢铁厂位于长三角城市群，占地 50 公顷，运营期间产生的重金属（铬、铅）及多环芳烃（PAHs）污染深度达 8 米。2018 年，该场地规划为商业综合体，需在 1 年内完成修复并达到居住用地标准。项目采用“分区修复 + 技术组合”策略：轻度污染区（PAHs<50mg/kg）采用原位化学氧化（过硫酸盐注射），修复周期 4 个月；重度污染区（PAHs>200mg/kg）采用异位修复（挖掘 + 热脱附），修复周期 8 个月；地下水污染通过抽出处理（活性炭吸附 + 化学沉淀）治理。

4.2.2 成本与资金模式

原位修复单位成本 2000 元 / 立方米，总成本 8000 万元；异位修复单位成本 3500 元 / 立方米，总成本 1.4 亿元；地下水修复成本占比 15%。项目通过 PPP 模式引入社会资本，政府提供 20 年运营补贴，分担前期投资风险。修复后地块拍卖价格从 5000 元 / 平方米升至 1.2 万元 / 平方米，增值收益覆盖修复成本的 120%；通过技术优化缩短修复时间 6 个月，提前实现商业运营；热脱附过程回收能源

用于厂区供暖，年减少二氧化碳排放 2000 吨。

4.2.3 效益与平衡挑战

项目优先修复污染较轻区域，实现“边修复边开发”，缩短资金回笼周期；与高校合作研发低成本修复材料（如工业废渣基稳定剂），降低药剂成本 30%。然而，异位修复产生大量废弃土方，处置费用占成本 25%；热脱附技术能耗高，运营阶段电费支出达 500 万元 / 年。

4.3 案例对比与核心启示

4.3.1 技术路径与成本效益

湘江流域项目以“安全管控”为目标，采用低成本、长周期的生物 - 化学联合技术，适合大面积农用地修复；钢铁厂项目以“快速开发”为导向，选择高效但高成本的物理 - 化学组合技术，适用于高价值商业地块。两者均通过技术组合实现修复效率与成本的优化，但技术路径选择需与场地开发目标匹配。例如，湘江流域若采用热脱附技术，成本将增加 3 倍，而钢铁厂若采用生物修复，周期将延长至 2 年，均不符合项目需求。

4.3.2 资金模式与风险分担

政府主导项目依赖财政转移支付，需建立跨区域生态补偿机制以解决资金可持续性问题；市场化项目通过土地增值反哺、PPP 模式等实现资金闭环，但需完善风险分担机制。例如，钢铁厂项目通过 PPP 模式引入社会资本，政府补贴与运营收益挂钩，既降低企业投资风险，又保障修复质量；而湘江流域项目若引入社会资本，需解决污染责任界定、长期维护责任等难题。

4.3.3 政策支持与技术突破

技术研发补贴方面加大对纳米材料、生物电化学等新型修复技术的研发支持，降低药剂成本与能耗。例如，湘江流域项目若采用生物修复技术，成本可降低 40%，但需解决技术成熟度问题。绿色金融支持方面推广绿色债券、土壤修复专项基金，拓宽融资渠道。钢铁厂项目若通过绿色债券融资，利率可较传统贷款降低 1—2 个百分点，减少财务费用。资源化利用方面将修复产生的废弃物（如污染土方）转化为建筑材料，降低处置成本。钢铁厂项目若将废弃土方用于路基填筑，可节约处置费用 30%。

4.3.4 平衡策略优化方向

全生命周期管理：建立“修复前评估—修复中监控—修复后维护”的闭环体系。湘江流域项目通过第三方监测机构实时公开数据，避免过度修复与资金浪费。跨区域协同治理：对流域性污染场地，建立上下游联防联控机制，共享监测数据与治理技术。湘江流域项目通过跨市合作，

统一治理标准，降低重复建设成本。公众参与与监督：通过公开修复信息、设立公众举报渠道，提升项目透明度。钢铁厂项目在修复过程中邀请周边居民参与监测，增强公众信任，减少社会阻力。

5 结语

“土十条”背景下，工业遗留场地土壤修复工程需在环境效益与经济成本间寻求平衡。通过优化技术组合、创新资金模式、完善政策激励和强化全生命周期管理，可实现修复效率与成本控制的双赢。未来研究应聚焦于新型修复技术的规模化应用、跨区域污染协同治理机制以及土壤

修复与城市更新的融合路径，为构建可持续的土壤环境治理体系提供支撑。

参考文献：

- [1] 张大伟. 工业遗留场地土壤修复技术选择及其环境经济效益分析[J]. 环境科学与技术, 2018.
- [2] 刘芳. 基于“土十条”的工业场地土壤修复成本效益评估模型研究[J]. 中国环境科学, 2019.
- [3] 陈明辉. 工业污染场地土壤修复的环境效益货币化及成本效益分析[J]. 生态环境学报, 2020.