

Research on the Demonstration Path of Mine Ecological Restoration in Arid Areas—A Case Study of the Southern Foot of the Eastern Tianshan Mountains (Turpan) Project

Jiancheng Zhou

Changji Geological Brigade, Bureau of Geology and Mineral Resources of the Xinjiang Uygur Autonomous Region, Changji, Xinjiang, 831100, China

Abstract

The ecological restoration of abandoned mines in arid regions is a global challenge in ecological governance. The demonstration project for ecological restoration of historical abandoned mines in the southern foothills of the Eastern Tianshan Mountains in Xinjiang (Turpan City) provides an important model for similar regions due to its systematic innovation in extreme arid environments. This paper systematically expounds the internal pathways for the project's demonstration effects from three dimensions: localization innovation of the technical system, sustainable exploration of market mechanisms, and coordinated development of ecology and industry. The study shows that Turpan's "policy guidance + market-driven" diversified investment and long-term maintenance mechanism has achieved "ecological foundation + industrial empowerment" synergistic benefits through the construction of an adaptive technical solution prioritizing native species and supported by water-saving technologies. The project provides valuable, replicable, and scalable experience for ecological governance in China's arid northwest regions and along the Belt and Road.

Keywords

ecological restoration; abandoned mines; dry areas; sustainable development

干旱区矿山生态修复的示范路径研究——以新疆东天山南麓项目为例

周建成

新疆维吾尔自治区地质局昌吉地质大队, 中国·新疆 昌吉 831100

摘要

干旱区历史遗留废弃矿山生态修复是全球性生态治理难题。新疆东天山南麓(吐鲁番市)历史遗留废弃矿山生态修复示范工程项目, 以其在极端干旱环境下的系统性创新, 为同类地区提供了重要范本。本文从技术体系的本土化创新、市场化机制的可持续探索、生态与产业的协同发展三个维度, 系统阐述了该项目取得示范效果的内在路径。研究表明, 吐鲁番项“政策引导+市场驱动”的多元投入与长效管护机制, 并实现了“生目通过构建“乡土物种优先+节水技术支撑”的适配性技术方案, 形成了态筑基+产业赋能”的综合效益协同。该项目为我国西北干旱区及“一带一路”沿线地区的生态治理提供了可复制、可推广的宝贵经验。

关键词

生态修复 废弃矿山 干旱区 可持续发展

1 引言

干旱与半干旱地区约占全球陆地面积的41%, 其生态系统脆弱, 对气候变化和人类活动干扰极为敏感。在此类区域, 历史遗留的工矿业活动, 尤其是废弃矿山, 造成了严重的生态创伤, 严重威胁区域生态安全与可持续发展。新疆吐

鲁番市, 作为“北方防沙带”的关键节点和绿洲生态屏障的重要组成部分, 其生态地位至关重要。然而, 该地区极端干旱的气候特征使得生态系统的自然恢复能力几乎为零。历史上遗留的134处废弃矿山, 更加剧生态环境恶化, 本文深度解析吐鲁番示范工程为实现“示范效果”所采取的战略路径, 从技术创新、机制构建到效益协同进行系统分析, 总结其成功经验与普适性规律, 以期同类干旱区的矿山生态治理提供理论参考。

【作者简介】周建成(1985-), 男, 中国云南大姚人, 本科, 中级工程师, 从事水文地质、工程地质、环境地质和地质灾害研究。

2 技术体系的本土化创新

吐鲁番示范工程的示范性, 首要体现为其对极端干旱

区特殊性的深刻认知和技术方案的精准适配。项目彻底摒弃了生搬硬套湿润地区或一般干旱区技术的惯性思维，立足于吐鲁番“山地-戈壁-绿洲”复合生态系统的本底特征，构建了一套以“分层修复、精准适配、水分高效利用、生境渐进式再造”为核心原则的本土化、精细化技术体系。

2.1 山地矿山稳定性治理与微生境再造

针对山区普遍存在的边坡高陡失稳、土层缺失或极度贫瘠、立地条件极差等核心问题，项目采取了“低扰动、高效益、近自然”的复合技术策略，力求在保障安全的前提下最小化工程干预，为生态恢复创造初始条件。

2.1.1 低扰动稳定性治理技术集成

在陡峭、破碎的岩质边坡治理中，应用了反向缓倾斜定向钻孔预应力锚固工艺。该工艺通过精确计算岩体结构面，优化钻孔角度和深度，使锚杆(索)能够穿越潜在滑动面，深入稳定岩层，从而极大增强了岩体内部的整体锚固力和稳定性。相较于传统的大开挖、削坡减载方式，此法显著减少了施工对山体的二次扰动和植被破坏，有效保护了山体原生脆弱表皮。同时，为应对高海拔、陡峭山区大型机械设备进场难、修建施工便道对环境影响大的挑战，项目成功引入并优化了重型索道运输系统。该系统实现了修复材料(如锚杆、混凝土、土壤改良剂等)的点对点空中运输，完全避免了长达数公里施工道路建设所需的植被砍伐、土地压占和土壤扰动，是践行“环境友好型施工”的典范，最大限度地保护了项目区及周边脆弱的原生生态环境^[1]。

2.1.2 土壤基质重构与固持技术深化

面对矿渣堆场、废弃场地普遍存在的土壤母质缺失、保水保肥能力差等难题，项目采用了“客土改良+有机质提升+结构强化”的综合土壤重构方案。特别是引入了由合作单位研发的新型绿色低碳固土材料。该材料以天然矿物和植物纤维为主要成分，具备优良的保水透气性、抗冲蚀性和抗冻融特性(能耐受吐鲁番地区-20℃至50℃的极端温度变化)，其网状结构能有效固结土壤颗粒，防止因冬季低温冻融和春季大风导致的坡面表层土体松散、垮塌，为植物幼苗的根系定植和生长发育创造了至关重要的稳定基质环境。通过实验室模拟与现场试验，确定了最佳的材料配比与施用厚度，确保了技术的可行性与经济性^[2]。

2.2 山前戈壁地带的水分保持与风蚀防治系统构建

山前洪积戈壁带是风沙活动的主要策源地和水分极端蒸发的重灾区，也是生态修复的难点所在。

项目创新性地设计并大规模应用了“隔离层+防渗层+保护层”的复合结构。具体而言，首先在平整后的地表铺设具有滤水和加筋作用的无纺土工布，其上覆盖高密度聚乙烯(HDPE)防渗膜以有效阻隔深层土壤水分的向上毛细运动和非饱和蒸发，最上层再覆盖厚度约10-15厘米的天然戈壁砾石，形成仿自然的表面保护层。这一复合结构发挥了多重协同功效：防渗膜是水分保持的关键，能将有限的自然降水

(尤其是微量的露水、雾水)有效蓄积在根层土壤；无纺布防止细颗粒土壤堵塞防渗膜，并增强表层稳定性；砾石层则能有效缓冲大风对地表的直接风蚀作用，降低地表风速，同时其多孔结构易于吸纳夜间凝结水，间接补充土壤水分。监测数据表明，该技术体系可减少90%以上的地表无效水分蒸发，使土壤含水率能较长时间维持在植物可耐受的范围，为植物种子的自然着落、萌发和生长创造了宝贵的“微域生境”。

2.3 基于乡土植物的植被恢复与近自然生态系统重建

在植被恢复环节，项目坚决贯彻“适地适树、乡土物种优先、节水近自然”的原则，实现了从追求短期绿色的“景观化”到构建长期稳定的“生态化”的根本转变。

2.3.1 乡土先锋植物种的优选与配置优化

项目彻底摒弃了耗水量大、适应性差、可能引发生态入侵的外来观赏性或速生树种，转而优先选用经长期自然选择驯化、具有极强抗逆性的本地旱生、超旱生植物物种，如骆驼刺、梭梭、沙拐枣、白刺、琵琶柴等。以核心物种骆驼刺为例，其根系深可达地下数米，能有效利用深层土壤水或微咸地下水，同时具备强大的无性繁殖(克隆生长)能力，在极端干旱条件下能通过根系蔓延迅速形成稳定、连片的植物群落。专项研究表明，当骆驼刺群落的盖度达到30%时，其地表粗糙度显著增加，可使近地表输沙通量降低60%以上，防风固沙效益极为显著。

2.3.2 节水灌溉与近自然培育模式融合

在植被重建初期，为确保种植成活率，采用滴灌、渗灌等精准节水灌溉技术，提供定量的“保育水”。关键创新在于制定了递减式灌溉制度，即随着植株生长和根系发育，逐步减少灌溉频次和水量，诱导植物根系向更深、更广的土层伸展，以寻求自然水源。在2-3年的辅助生长期后，目标是完全停止人工灌溉，促使植被回归自然雨养(包括微量的降水、露水、凝结水)状态，最终形成具有自我维持、自我更新能力的荒漠生态系统^[3]。

3 市场化机制的可持续探索

吐鲁番示范工程成功探索并实践了破解干旱区生态修复“资金投入不足、后期管护乏力”这一共性难题的市场化路径与长效机制，实现了从依赖政府“输血式”治理向具备内生动力的“造血式”可持续发展的根本性转变。

3.1 多元投入与利益共享机制创新

项目精准运用国家和自治区关于鼓励社会资本参与生态修复的政策工具箱，巧妙设计了“中央引导、地方配套、市场反哺”的多元投入格局和利益联结机制。

3.1.1 资金杠杆效应放大

本项目运用PPP(政府与社会资本合作)模式，通过公开竞争性程序引入具有技术和资金实力的专业环保企业，负责具体修复工程的投融资、设计、建设、运营和维护的

一部分或全部,政府方则负责监管和绩效考核,实现了优势互补。

3.1.2 产权与开发权激励政策落地

项目落实了“点状供地”等灵活的土地政策。明确规定,对参与修复的社会资本主体,允许其依法依规使用不超过修复总面积3%的土地,用于发展与生态保护相适宜的产业,如生态旅游、康养休闲、科普教育、新能源设施(如分布式光伏)等。这一政策直接将社会资本的商业利益与生态修复区的长期管护成效和生态环境质量深度绑定,极大地激发了其前期投资和后期精细化运营维护的内在动力,变“要我治”为“我要治”。

3.2 资源循环利用与生态价值转化机制拓展

项目将生态修复过程本身视为一种资源再生产和价值创造的过程,积极探索“变废为宝、增值变现”的多重路径,拓宽资金回流渠道。

3.2.1 土石料资源化高效利用

项目建立了内部平衡优先、外部交易补充的资源化利用模式。工程产生的土石料首先优先用于本项目区的筑基、回填、地形塑造等,大幅降低了外购建材的成本和运输过程中的碳排放。对于剩余的大量土石料,则按照相关规定进行质量评估后,进入公共资源交易平台进行公开、有偿处置,供应给区域内其他符合条件的建设项目(如公路路基填筑等)。这一做法不仅显著降低了工程自身的成本,还创造了直接的经济收益,实现了“以废治废、循环利用”。

3.2.2 生态指标交易与碳汇价值前瞻性探索

项目引入了“生态指标流转与交易”机制。将修复后形成的高质量的复垦农用地,纳入自治区级的耕地占补平衡指标储备库,其产生的节余建设用地指标可在全区范围内有偿流转,为指标紧张的地区提供发展空间,指标收益则反哺于生态修复和管护。同时,项目营造的大面积荒漠灌木林,未来具备形成碳汇的潜力。这些机制为生态修复项目开辟了持续性的价值实现和资金回报渠道,初步形成了“治理产生生态资产-资产转化为可交易指标-指标交易变现支撑再治理与长效管护”的闭环商业模式,为项目的长期可持续性提供了坚实保障。

3.3 数字化全周期智慧监管与管护机制构建

针对吐鲁番地域广阔、修复点位分散、人工监管成本高昂的现实挑战,项目构建了基于现代信息技术的“智慧化、精细化、高效化”监管与管护体系。

3.3.1 “空-天-地”一体化立体监测网络

项目全面接入并提升了新疆矿山生态修复监管系统的功能。综合利用高分辨率遥感卫星、无人机航拍、以及布设在地面的土壤湿度、风速、图像视频等物联网传感器,对矿山修复图斑实行“修复前本底评估-施工过程动态监控-竣工验收科学评价-后期管护持续跟踪”的全周期、无死角动

态监控。

3.3.2 长效管护责任与社区参与机制融合

项目公司承担不少于5-8年的后期管护责任,并将管护成效与后续产业开发权益的授予、延续以及支付费用直接挂钩,形成强有力的约束和激励。同时建立社区共管机制,通过设置公益性岗位,优先招募当地牧民、农民参与修复区的植被抚育、防火防盗等简易管护工作。这既降低了专业管护的人力成本,又为当地居民创造了稳定的就业岗位和收入来源,增强了其作为生态建设者和受益者的主人翁意识。

4 生态与产业的协同发展

吐鲁番示范工程的终极示范效果,将修复行动深度融合入区域发展战略,实现了生态保护、产业发展与民生改善的有机统一和协同增效。

通过对北部天山区矿山的系统性修复,减少了山体水土流失,增强了表层岩土体的蓄水保水能力,对涵养区域水源、调节小气候具有积极作用,间接保障了下游柯柯亚水库等绿洲“生命线”的水源水质安全。山前戈壁地带大规模、连片的高效防风固沙体系建成后,有效遏制了沙化土地向著名的葡萄沟、哈密瓜主产区等优质农业区蔓延的趋势。

将生态修复区视为培育新业态、发展绿色经济的潜在平台,积极探索“生态+产业”的融合发展模式,实现了生态效益向经济收入的直接转化。

修复后形成的独特地貌景观为新兴业态提供了绝佳的场地和资源。这些新业态可与传统旅游资源形成联动效应,借鉴高昌区“青蛙巷”将生态改善转化为旅游吸引物的成功经验,有效拉长旅游产业链条,提升区域旅游品牌的综合竞争力,实现生态价值的多元化、高效化经济转化。

5 结论

新疆东天山南麓(吐鲁番)历史遗留废弃矿山生态修复示范工程,其价值在于技术的“高精尖”与当地水、土、气、生等自然条件的“适配度”。生态修复的最终目标应融入区域发展总体战略,与产业培育、民生改善紧密结合,让优良生态环境成为地区高质量发展的支撑点和人民幸福生活的增长点。该项目所积累的技术模式、管理经验和制度成果,对于我国西北乃至全球其他干旱半干旱区的生态修复、绿色发展及应对气候变化行动,均具有重要的借鉴意义和推广价值。

参考文献

- [1] 卢震,高琪,员俊杰,等.干旱区废弃矿山环境地质问题现状及生态修复方案:以包头市为例[J].中国矿业,2024,33(S1):111-115.
- [2] 艾婷,李志伟.多专业融合视角下矿山生态修复重建实践探索[J].中国煤炭,2023,49(S1):29-35.
- [3] 雷沙.历史遗留矿山生态环境调查评价与生态修复模式研究[D].仲恺农业工程学院,2023.D