Research on the Integrated Application of Ecological Restoration Technology in Land Reclamation Project

Yanping Liu

Natural Resources Bureau, Lanshan District, Linyi City, Linyi, Shandong, 276000, China

Abstract

The integration of ecological restoration technologies in land reclamation projects represents an organic synthesis of diverse methodologies including engineering remediation, bioremediation, microbial remediation, chemical remediation, and nature-based solutions (NbS). This framework encompasses specific classifications and core principles of various techniques. Systematic development should adhere to collaborative principles, building upon the "soil-microbe-vegetation" synergistic model to establish a scientifically complete construction system. By incorporating intelligent management systems, this approach achieves precise and efficient remediation processes. Looking ahead, priority should be given to developing smart green technologies that combine "remediation + industrialization" attributes. Through technological innovation and industrial integration, these efforts will enhance ecological benefits while unlocking economic value from land resources, ultimately driving sustainable and multifunctional development in land restoration.

Keywords

Land reclamation; Ecological restoration; Technology integration; Synergistic coupling; Intelligent management

土地复垦工程中生态修复技术的集成应用研究

刘艳苹

临沂市兰山区自然资源局, 中国·山东 临沂 276000

摘要

土地复垦工程生态修复技术集成, 是工程性修复、生物修复、微生物修复、化学修复及基于自然的解决方案(NbS)等多元原理与技术的有机融合, 涵盖各类技术的具体分类及核心内涵。其系统构建需遵循协同联动等原则, 以“土壤—微生物—植被”耦合作用模式为基础, 搭建科学完整的建设体系, 并融入智能管控手段, 实现修复过程的精准化与高效化。展望未来, 应重点开发与集成兼具“修复+产业”双重属性的智能绿色技术, 通过技术创新与产业融合, 在提升土地复垦生态效益的同时, 激活土地资源的经济价值, 推动土地修复领域向可持续、多功能化方向发展。

关键词

土地复垦; 生态修复; 技术集成; 协同耦合; 智能化管控

1 引言

随着工业和城镇化的快速发展, 由于采矿、建设等活动引起的土地退化也愈发严重, 矿区塌陷以及土壤污染已成为制约区域发展、影响生态稳定的主要因素。同时由于原来的技术往往只能针对某种类型的土地退化发挥一定效果, 技术间相互隔离不能形成互补关系, 而新型多技术复垦方案就是基于这种现实情况提出的, 实现多技术修复协同增效的目的。

2 生态修复关键技术原理与分类

2.1 工程性修复技术

工程性修复主要是用物理方法改良生境基底的基本手段, 最终目的是恢复和重建生态系统物理上的支撑结构。

地形重塑: 针对因采矿而造成的大片高低差甚至塌陷区等问题, 人为设计优化其水文及物质质量流, 可通过微地形起伏提高储水量来缓解干旱半干旱矿区地下水匮乏, 通过分层回填, 用不同介质交错堆叠而稳定土体结构并为后期植被种植留有土壤种子库^[1]。

土壤结构改良: 围绕土壤理化性状恶化现状, 以物理或者物质方式提高土壤的通透性、保水性和肥力, 对于盐碱地开发“盐改水”, 应用客土压碱、灌水洗盐等方法, 减少土壤含盐量, 为作物生长提供有利条件。在矿区利用煤矸石“海绵结构”阻渗层来治理开采区渗漏和污染, 并运用其多

【作者简介】刘艳苹(1975-), 女, 中国山东临沂人, 本科, 高级经济师, 从事土地整治研究。

孔隙属性来发挥调节水分、隔绝污染物的功能。

2.2 生物修复技术

生物修复运用生物机体实现环境的改善，成本低廉，具有很大的持续性。植物修复：利用植物将污染物转移至根、茎、叶之中或者将其转化为稳定的化合物及其它小分子来降解污染物，并使受污染土地恢复到最初的状态，其关键是在选择生命力强的功能植物。对于一些重金属污染区域来说，一些农田中的杂草能够在一定程度上修复轻度污染的农田；而在盐碱地治理过程中，一些耐旱、耐盐碱的种类能够重新建立自维持的植被群落，土壤结构逐渐恢复，有机质积累增加，“植被-土壤”会产生正反馈^[2]。

土壤生物活化：例如：利用功能性生物或改良生物生存环境的方式提高土壤生物活性和肥力，在实践中可以将有机肥与粉煤灰混合使用，这样既能补充土壤氮、磷、钾等养分，又能利用缓释作用避免养分的流失；一些固氮植物可以通过与根瘤菌共存的形式向土壤提供氮素，达到“养地与植被重建”和“养地与植被重建”的目的。

2.3 微生物与化学修复技术

微生物和化学修复技术依靠生物或化学的作用使污染物得到较快的降解和转化，适用于中重度污染场地的靶向治理。微生物靶向强化：运用微生物代谢功能降解、转化污染物，并通过筛选高效功能菌株提高修复能力。利用相关技术筛选出的菌株应用于富营养化农田和矿区污水修复效果较好。

原位化学修复：将污染介质（土壤/水）中污染物质通过加入化学药剂，达到固定化、降解、淋洗的作用。研发的相关药剂注入技术，在一定的诱导和辅助氧化下，能极大地促进土壤多环芳烃、石油烃等有机污染物降解率的提升，并且可以避免传统的化学修复存在的二次污染问题。

2.4 基于自然的解决方案（NbS）

NbS技术主张基于自然修复理论，注重整体性的生态功能恢复。对城市棕土区域保持部分原生植被斑块，或者打造人工湿地和昆虫庇护所等类型的游憩场所，在片状或带状分布下组成互不独立却又“点-线-面”相互交织的空间构成，这样能够使得部分城市空间内物种丰富度得到提高。从矿区“近自然生态”修复出发，低密度选取本地物种，依靠自然植被生长扩散及种间竞争作用使植被群落能自我更新并免于人为维护，因此不需要过多地投入长期管护费用。

3 技术集成系统的构建路径

3.1 系统设计原则

技术集成系统设计要协调、有序和循环运行，才能满足修复退化生态环境的要求。

协同性：不同的技术能发挥功能上的互补作用，互相克服单独技术的功能不足问题。如针对土壤重金属污染可以采用“工程阻隔+植物吸收”的组合技术，土壤重金属属

移率大大降低。

时序性：针对生态系统恢复的不同阶段有步骤地采用对应的适配技术，例如，某家集团创新的“三步养地法”，就是在遵循上述时序性的基础上进行：一是利用秸秆覆压实现了固土保墒；二是运用微灌实现了土壤达到一定含水量的标准；三是采用豆科、禾本科作物混播方式，逐步地给土壤补充养分，使得土壤有机质含量较高。

循环性：以物质循环利用的方式实现资源的有效转换，在减少修复费用的同时又能对原“废弃物-资源-土壤”转化为“废弃物-资源-土壤”。如对煤矸石的资源化利用，原来作为工业废物，经过处理变为可用于复垦的土壤营养层的基质，而且含有一定的元素可以为土壤增肥，形成“废弃物-资源-土壤”的链条^[3]。

3.2 关键技术耦合模式

3.2.1 “土壤—微生物—植被”联动模式

通过激活土壤—微生物—植被间的物质循环和能量流动来建立一种能够实现自维持的土壤—植物系统，在这个过程中，利用微生物活化能够使土壤中的氮、磷等营养物质的含量更加充足，使得植物具有更好的定植能力及生长速度。植物生长过程中所产生的根系分泌物可以有效激活土壤中的微生物，使得微生物得到繁殖及代谢活性的增加，二者呈正反馈过程。有关的技术是这一模式的应用典型之一，将污水中富集了特定微生物的污水和土壤改良剂混合在一起，在污水中磷微生物的作用下污水中的磷被转变成在土壤中的缓释磷源。一方面解决了水体富营养化的问题，另一方面增加了土壤肥力，达到“污水净化—土壤改良”的协同增效的目的。

3.2.2 “地形—水文—生物”立体集成模式

从景观尺度出发，在地形重塑优化水文过程的基础上，再配以相应的生物措施实现生态系统的恢复。一有些煤矿恢复实践表明：用特殊方式把地形修成一个蓄水的地方，然后配以滴灌系统，给植物供水。然后选用当地耐旱性的植被来种，用植被根系固土保水，减少水分的蒸发和水土流失；这样就形成了“地形储水—水文供水—生物保水”的良性的循环模式，实现了恢复区无管养。

3.3 智能化管控支撑

通过提高监测精度、提高决策效率等手段来给技术集成系统提供支撑的智能化管控技术。

相关研究团队建立“星-空-地-井”多维感知技术集成体系，将应用卫星遥感、无人机航摄、地面传感器以及钻孔获得的数据开展煤矿塌陷区时空分布预测，并在塌陷事故发生前确定一定的时限得到区域范围以及塌陷程度大小，为进一步的地表形貌重构修复工作开展顺序提供依据。在煤矸石山的修复过程中，采用热红外着地点定位模型找到矸石山表面温度高的区域，准确定位复燃点，采用注浆降温方法，可使煤矸石的复燃率大幅度下降，保障恢复区生态的安全^[4]。

4 土地复垦工程中生态修复技术的集成应用案例

曾经的沂南县西高庄片区属于国家级水土流失重点治理区,以低山丘陵地形为主,坡地与洼地杂处,区域总面积约 515 平方千米,水土流失治理提升面积 201 平方千米,涉及 5 个流域(5 个镇)、其中涵盖五彩山、孟良崮等 4 个流域和 4 个乡镇。当时,表土流失严重,部分区域基岩裸露,耕地变浅变薄。土壤有机质、养分匮乏,植被变差;生态功能退化严重。

当地开展了系列生态修复工程:土地复垦中采用干砌石技术垒砌“防护墙”,依靠石块自重和摩擦力保持稳定,既能挡雨防沙又具透水性,填入客土后形成梯田,新增千亩高质量农田。植被恢复方面,荒山绿化 33.8 公顷,栽植板栗 24.4 公顷、侧柏 9.4 公顷,栽种侧柏时垒“鱼鳞坑”存水挡土,改善植物生长环境。水系治理上,建设 4.8 千米生态导流渠,绿化 25.86 公顷河道岸坡,设置 57 处生态湿地并栽植 1.1 公顷水生植物,构建起立体良性生态循环系统。

修复之后该区生态极大改善,山绿水青美,原来低质耕种变成了良田,并种植了有机小米、蔬菜等农作物,增加了农户一年约 4000 元的收入;引进龙头企业、合作社等多元化主体通过合作共营等方式共同发展农业规模化特色产业,达到生态修复和乡村振兴相结合的效果,是为土地复垦和生态修复的优秀范例。

5 挑战与对策

5.1 技术瓶颈

生态修复时间较长,现有的大部分项目侧重于短时效应的监测,缺少长时序的过程追踪。有些项目的生物多样性评价仅仅是部分实地记录,并没有形成规范化的数据,也未构建完善的指标体系(如物种丰富度、群落稳定性等),所以其难以反映生态修复的长期效果。在有些矿区,比如地下水埋深浅的地层,土壤经常保持饱和状态,按传统的复垦方法,会使得土地复垦率低。在特殊矿区岩石裸露率高、土壤浅薄等情况下,导致植被重建中成活率低的问题,这就需要技术集成系统有很好的适用性。

5.2 管理机制缺陷

土地复垦高投入性的特征造成其资金来源单一路线,存在一些项目中主体为政府资金投入比例高达 80% 以上的情况,无市场等其他主体参与的多元保障机制难以满足修复规模扩大的需要。采矿规划与复垦设计属于不同的管理部门分管,呈现出“先破坏后修复”的情况,比如因为采矿进度慢于或者快于复垦进度,造成有些复垦修复区域再次被开采导致塌陷,又产生二次修复工作。

5.3 解决路径

针对有关技术开展标准化推广应用,开发制造低成本、易使用生物多样性监测设备(智能昆虫诱捕器、植物物候相

机)、建设全国统一修复效果数据库等工作。“光伏+牧场”模式可供参考,即修复区架设光伏板发电,在板下方种牧草进行畜牧业经营,“光伏发电收益反哺修复管护”。并建立复垦信用与采矿许可挂钩制度,将矿山企业的复垦情况纳入企业信用评价体系,对于未履行完复垦任务的企业不予采矿权延续许可,倒逼企业履行好“边采边复”的义务^[5]。

6 未来研究方向

6.1 智能化和绿色化技术

人工智能优化修复参数:采用机器学习算法分析多源监测数据,建立修复参数(药剂用量、植物种植密度等)和生态成效之间的关联模型,使有关的技术能实现智能调控,提高修复效率 15%~20%。低碳修复材料开发:研发生物炭、秸秆基复合材料等低碳修复材料,并借助于生物炭固碳效果好特点,改善土壤品质,同时达到碳封存目的,促进“双碳”目标的完成。

6.2 跨尺度生态网络构建

区域联动修复:依靠黄河流域的生态廊道建设,把局部的矿区生态恢复项目融入到周边的自然保护区和农田生态系统内,建设“矿区-流域-区域”大尺度生态保护网络,提高整个生态系统的抗干扰性。城市群生境踏脚石体系:一些城市群内的生境踏脚石是在城市棕地改造的基础上建立起来,来联系一些割裂的自然生境,改善城市生物多样性的“孤岛效应”。

6.3 国际标准输出

推广中国特色修复技术的国际化应用,一些技术已获国际相关协会奖项,可进一步在“一带一路”沿线采矿国家推广,提升我国在生态修复领域的国际话语权。推动 NbS 技术在《生物多样性公约》昆蒙框架下的标准化应用,制定适合发展中国家的低成本修复技术指南,为全球生态治理提供中国方案。

7 结语

土地复垦要将工程、生物措施等多种手段融于一体,利用智能化管理的串联耦合方式提升工作效率。在实际施工过程中仍存在很多困难,在后期发展中还需要加强技术创新以及政策完善。未来的方向可以朝向智能化和绿色化发展,跨尺度联网发展、输出国际标准、提供一套完整的生态修复方案。

参考文献

- [1] 郭马磊.露天煤矿土地复垦与生态修复技术的思考研究[J].内蒙古煤炭经济,2025,(03):165-167.
- [2] 缪剑峰,张浩然.水利工程中生态修复技术的集成与效益评估研究[J].农业灾害研究,2025,15(02):264-266.
- [3] 王利群,袁浩,吴尚哲,等.基于生态修复理念的矿山土地复垦技术与应用[J].西部资源,2024,(05):128-130.