

“双碳”目标下矿山修复与土地利用碳汇增益研究

李儒静

湖南怀德检测技术有限公司, 湖南怀化, 418000;

摘要: 矿产资源的开发支撑了我国工业化与城市化的快速发展,但同时也造成了严重的生态环境破坏,导致矿山生态系统碳汇功能大幅衰减。在碳达峰、碳中和战略目标引领下,矿山生态修复已不再局限于生态环境的单一修复,而是转向生态修复与碳汇增益协同推进的复合型治理模式。本文基于矿山开采对生态环境及碳汇系统的影响分析,探讨了矿山修复过程中碳汇增益的核心路径,重点阐述了地貌重塑、土壤重构、生态重建等修复技术与土地利用优化结合的碳汇提升策略,并结合典型案例总结实践经验,最后提出完善政策保障、强化技术创新、推动多元协同的发展建议,为双碳目标下矿山修复与土地利用碳汇增益协同发展提供理论参考与实践借鉴。

关键词: 双碳目标; 矿山修复; 土地利用; 碳汇增益; 生态系统修复; 生态碳汇

DOI: 10.64216/3080-1508.26.03.081

引言

“双碳”目标是指碳达峰和碳中和两个阶段的目标,即我国正式提出二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和的战略目标,标志着我国经济社会发展进入全面绿色转型的新阶段。矿产资源作为工业生产的核心原材料,其开采过程不可避免地在地表植被、土壤结构、水文系统造成破坏性影响,导致矿山区域生态系统失衡,碳储存能力显著下降,甚至成为温室气体排放源。矿山修复与土地利用碳汇增益的协同推进,既是破解矿山生态环境问题的必然要求,也是挖掘生态碳汇潜力、助力双碳目标实现的重要路径。

生态碳汇是指生态系统通过吸收二氧化碳等温室气体,将其转化成有机物并存储起来的能力。而碳汇增益是指通过森林吸收并存储二氧化碳的能力的增幅,即通过植树造林等措施,借助植物光合作用吸收大气中的二氧化碳,将其固定在植被和土壤中,旨在将大气中温室气体浓度减少的过程或者机制。结合当前实践来看,矿山修复方面暴露出的问题较多,对基础治理的关注度高,包括植被覆盖等,没有对碳汇增益充分考虑。在本次研究中,以此为背景,深入研究双碳目标导向下矿山修复与土地利用碳汇增益的内在关联,构建科学高效的修复与利用模式,具有重要的理论价值与现实意义。

1 矿山开采对生态环境及碳汇系统的影响

矿山开采通过机械扰动、废弃物堆积、化学污染等多种方式,对生态环境造成全方位破坏,进而导致碳汇系统功能退化。并且,矿山开采还会加剧机械设备能耗、矿化有机物分解、酸性废水产生甲烷等,最终引发碳排放。

1.1 土地资源破坏导致土壤碳库流失

矿产开采过程中,地表覆盖层被直接剥离,土壤团聚体结构遭到破坏,土壤有机质加速分解,导致土壤固碳能力大幅降低。同时,开采产生的镉、铅、镉、锌等重金属渗透到土壤中,造成严重的土壤污染,进一步抑制植物生长和微生物活动,破坏土壤碳循环平衡。例如,某锡矿山土壤中砷、镉的平均浓度分别高达315mg/kg、70mg/kg,显著超出世界卫生组织规定的标准值,土壤碳储存能力不足周边正常土壤的1/5。此外,煤矸石等固体废弃物的长期堆积不仅占用大量土地,其自身蕴含的碳元素若处理不当,会通过氧化分解释放大量二氧化碳,加剧温室效应。

1.2 水资源污染破坏水生碳汇功能

矿山开采过程中大量抽取地下水,导致地下水位下降,破坏地下水循环系统,影响周边水生生态环境。同时,黄铁矿、闪锌矿等矿石中的硫元素在雨水、微生物和空气的共同作用下,形成酸性废水,伴随大量悬浮物和重金属离子进入水体,造成水资源污染。这些污染物质不仅危害水生生物生存,还会破坏水生植物的光合作用过程,降低水生生态系统的固碳能力。在平原采煤沉陷区,积水区域因污染导致水生生物大量死亡,水生生态系统碳汇功能基本丧失。

1.3 生物多样性下降削弱生态系统碳汇潜力

矿山开采造成的土壤污染、水资源短缺和栖息地破坏,对生物多样性构成严重威胁。多数物种因无法适应恶劣的生存环境而数量锐减甚至灭绝,仅少数耐受物种得以留存,导致生态系统结构单一、功能退化。研究表明,铅锌矿选矿废水排放会导致水中生物分布不均,鱼类等水生动物出现病变甚至死亡;而洗煤废水沉积区域

则因土壤养分匮乏,基本无植物生长。生物多样性的下降直接减少了植被固碳和微生物固碳的主体,大幅削弱了矿山生态系统的碳汇潜力。

2 双碳目标下矿山修复与碳汇增益的核心路径

地貌、土壤、生态、土地利用之间的关系密切,可以相互影响和制约。其中,地貌是土地利用的基础,不同地貌条件决定了土地可利用性。土壤是土地利用的物质基础,其性质会对土地利用方式、生态系统产生较大影响。生态系统的稳定多依赖于土地利用方式。因此,需要综合考虑以及协调。矿山修复与碳汇增益的协同实现,可以将地貌重塑-土壤重构-生态重建为核心框架,结合土地利用类型优化,构建修复-固碳-利用一体化的治理模式,重点通过以下路径提升碳汇能力:

2.1 地貌重塑:构建稳定碳汇基底

地貌重塑是矿山修复的基础工程,其核心目标是通过调整地形结构,消除地质灾害隐患,为后续碳汇系统构建提供稳定的基底条件。针对不同类型的矿山地貌问题,可采用差异化的重塑技术:一是边坡削坡减载技术,通过将陡峭不稳定的边坡修整为台阶状结构,配合锚杆格构梁支护,降低滑坡风险,同时增加植被种植面积。某露天煤矿区将55度的边坡修整为25度的台阶状,不仅提升了地形稳定性,还为油松、紫花苜蓿等固碳植物的种植创造了条件。二是充填-造地技术,利用采矿废料与无机胶凝材料混合,对采空区进行充填,形成人工地基,实现土地资源再利用。某金矿采用废石胶结充填工艺,累计造地超过2万亩,这些新增土地可通过种植高固碳植被提升碳汇能力。三是尾矿库覆膜-植被复合技术,通过铺设防渗膜减少重金属渗漏,再覆盖改良土种植植被,实现尾矿库的生态修复与碳汇提升,某铜矿采用该技术后,植被覆盖度三年内达到85%,碳汇能力显著增强。

2.2 土壤重构:强化土壤碳库建设

土壤是矿山生态系统碳储存的核心载体,土壤重构的关键在于改善土壤理化性质、提升土壤肥力,增强土壤固碳能力。针对矿山土壤酸化、贫瘠、污染等问题,可采用多种土壤改良技术:一是土壤改良柱技术,通过高压喷射注浆将脱硫石膏、生物质炭与本地土壤混合,形成改良柱,快速提升土壤pH值和有机质含量。相关研究表明,该技术可使土壤pH值从3.5提升至6.8,有机质含量从0.8%增至3.2%。二是复合土壤构建技术,针对不同区域的土壤缺陷,构建特色复合土壤体系,如草原煤矿区采用风积沙-秸秆复合技术,将玉米秸秆与风积沙混合,添加粘合剂形成人工土层,抗风蚀能力大幅提升,沙蒿成活率从32%提升至76%。三是微藻协同

改良技术,利用微藻超强的固碳能力和养分转化能力,实现土壤改良与碳汇提升的双重目标。相关示范项目显示,微藻活性液浇灌可使土壤总有机碳含量最高增幅达613.2%,同时提升植被覆盖度38%-54%。

2.3 生态重建:提升植被与微生物碳汇功能

生态重建是矿山碳汇增益的核心环节,通过构建多样化的植被群落和优化微生物环境,提升生态系统的固碳总量。一是优选高固碳植被品种,根据矿山土壤和气候条件,选择固碳能力强、适应性好的乡土植物,构建乔灌草复合型植被体系。黄土高原区域煤矿区选用沙棘、油松、苜蓿组成复合植被系统,配合接种摩西球囊霉形成菌根共生体,植被固碳量达到 $32\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$,较自然恢复快5-8年。二是超积累植物-微生物联合修复技术,针对重金属污染严重的矿山区域,利用超积累植物吸收重金属,同时接种功能微生物改善土壤环境,提升植被生长质量。某锡矿采用蜈蚣草、东南景天和狗牙根组成的修复群落,配合接种产酸克雷伯氏菌,使土壤砷、镉含量三年分别下降62%和58%,植被固碳能力同步提升。三是节水型生态重建技术,在干旱半干旱矿区,采用鱼鳞坑+生物滞留槽集水系统,配合滴灌-覆膜保墒技术,提高降水利用率,保障植被生长,某矿区通过该技术使乡土植物成活率超过70%,形成稳定的碳汇植被群落。

2.4 土地利用优化:实现碳汇与效益协同

在矿山修复的基础上,优化土地利用类型,可进一步提升碳汇增益效果,同时实现生态效益与经济效益的双赢。一是生态农业利用模式,将修复后的土地用于种植牧草、经济林等,形成修复-种植-加工产业链。草原区域煤矿区采用紫花苜蓿与沙打旺混播,年干草产量达 $8000\text{kg}/\text{hm}^2$,既提升了碳汇能力,又带动了养殖业发展。二是文旅融合利用模式,将修复后的矿山打造为生态公园、地质科普基地等,在保护碳汇系统的同时实现经济增收。某区域废弃矿山通过该模式,年接待游客50万人次,带动周边民宿收入增长300%。三是碳汇林业模式,将修复区域纳入碳汇林管理,通过碳汇交易实现生态价值市场化,进一步激发矿山修复的积极性。

3 典型案例分析

某能源企业生物固碳协同土壤架构重塑技术示范项目是矿山修复与碳汇增益协同推进的典型案例。该项目位于沙化排土场,针对北方缺水少土的生态环境特点,创新构建微藻固碳—矿坑水净化—土壤再生三位一体技术体系。项目搭建了1500平方米微藻固碳实验连栋温室,利用矿坑水和农牧固废产生的二氧化碳作为培养基质培育微藻,再将微藻活性液用于浇灌矿山植被。在碳汇测算上,面积为1500平方米,边界涵盖微藻生物

固碳、土壤有机碳提升及植被碳汇的总和,基准线设定为未修复前沙化排土场的原有碳汇水平,采取监测微藻固碳量、土壤总有机碳含量变化等方法进行核算。

实践结果显示,该技术无需覆土即可完成生态恢复,使项目区域植被覆盖度提升38%—54%、土壤含水率提升14%—85%、土壤总有机碳含量最高增幅达613.2%,年增碳汇突破1000吨。同时,项目实现了矿坑水的资源化利用,微藻生长过程中同步吸收水中氮、磷污染物并固定重金属,净化后的水质达到灌溉标准。该案例充分证明,通过技术创新,矿山修复可实现生态修复-碳汇增益-资源循环的多重目标,为北方干旱半干旱地区矿山修复提供了可复制、可推广的方案。在成本效益方面,虽然前期投入成本较大,但可以通过碳汇交易、矿坑水净化节约等方式进行平衡,可以促进经济效益的提升。从长远的角度分析,如果想要大规模应用,可能被北方地区水资源限制等因素影响,无法实现技术的合理应用。在后续发展中,可以尝试优先在水源比较稳定的区域进行,加强相应工艺的优化。

另一典型案例是某铁矿修复项目,该项目采用地貌重塑-土壤重构-生态重建三阶修复技术,将曾经满目疮痍的矿山群改造为层叠的梯田和绿色植被带。通过边坡修整、土壤改良和高固碳植被种植,项目区域年固碳量高达万吨,同时发展生态农业和乡村旅游,实现了生态效益与经济效益的协同提升。相比之下,另一铁矿在修复期间,采用的模式比较单一,单纯注重生态重建,没有对地貌和土壤两方面因素充分考量,虽然修复工作顺利,但区域年固碳量偏低,周围其他产业也没有被充分带动,经济性不强。

4 双碳目标下矿山修复与土地利用碳汇增益的保障措施

为推动矿山修复与土地利用碳汇增益协同发展,需从政策、技术、机制三个层面构建完善的保障体系:

4.1 完善政策支撑体系

进一步细化矿山修复与碳汇增益相关政策,将碳汇指标纳入矿山修复验收评价体系,明确修复项目的碳汇提升要求。出台鼓励社会资本参与矿山修复碳汇项目的政策措施,完善碳汇交易机制,允许矿山修复产生的碳汇量纳入碳交易市场,提升项目的经济吸引力。同时,加强政策执行监管,确保修复项目按标准推进,保障碳汇增益效果。此外,明确政府、企业、科研机构、社会组织等各方主体的责任,构建多元协同的治理机制。政府负责政策制定、监管引导和公共服务;企业承担矿山修复的主体责任,积极投入资金和技术开展碳汇增益项目;科研机构提供技术支撑,开展关键技术研发和咨询

服务;社会组织加强监督和宣传,提升公众对矿山修复碳汇的认知度和参与度。

4.2 强化技术创新与推广

加大对矿山修复碳汇关键技术的研发投入,重点突破微藻固碳、复合土壤重构、高固碳植被选育等核心技术,提升技术的成熟度和适用性。建立技术示范基地,总结推广不同区域、不同类型矿山的修复与碳汇增益技术模式。加强产学研合作,推动科研成果转化应用,提升矿山修复项目的技术水平。

4.3 落实生态产品价值实现机制

基于双碳目标,在矿山修复期间,加强生态产品价值实现机制的落实。诸如,采取创新生态修复+多元模式(土地整治、新能源等),将废弃矿山转化为生态产品,包括碳汇、耕地等,形成完整的生产-供应以及销售链条。同时,对生态产品价值实现机制不断完善,做好顶层设计,建立试点机制、融资配套支持机制,强化金融产品的开发。

5 结论

以“双碳”目标作为导向,将其嵌入矿山修复与土地利用碳汇增益中深入研究,提出从单一的生态治理转向生态修复与碳汇增益协同推进的复合型发展模式,实现了从“生态外观恢复”到“碳汇功能内生”的理论跃迁。在研究中,通过分析矿山开采对生态环境及碳汇系统的影响发现,其与土地资源破坏导致土壤碳库流失、水资源污染破坏水生碳汇功能、生物多样性下降削弱生态系统碳汇潜力等因素有关。以此为基础,深入探索双碳目标下矿山修复与碳汇增益的核心路径,即构建稳定碳汇基底、强化土壤碳库建设、提升植被与微生物碳汇功能、实现碳汇与效益协同。

未来,需进一步加强矿山修复与碳汇增益的理论研究和实践探索,优化修复技术模式,完善配套政策机制,充分挖掘矿山区域的碳汇潜力,推动矿山生态系统功能全面恢复,为我国双碳目标的实现提供坚实支撑。

参考文献

- [1]张宏."双碳"目标下矿山生态修复与绿色产业融合发展的模式及策略[J].农村科学实验,2025(16):55-57.
- [2]徐东晶,白苑霖,王鹏飞,等."双碳"目标下宝日希勒露天煤矿生态修复技术探讨[J].煤炭技术,2023,42(12):13-16.
- [3]彭昭桓."双碳"目标下矿山修复与土地利用碳汇增益研究[J].经济与社会发展研究,2025(8):0200-0202.