



矿区复垦地土壤改良研究进展

赵鹏, 史兴萍, 尚卿, 谭菁, 王夕刚, 黄占斌

引用本文:

赵鹏,史兴萍,尚卿,谭菁,王夕刚,黄占斌. 矿区复垦地土壤改良研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 1-14.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0805>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同植物种植对矿区复垦土壤微生物多样性的影响

张变华, 靳东升, 张强, 郜春花, 李建华, 籍晟煜

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 355-360 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0304>

赣南某原地浸析稀土尾矿复垦前后土壤质量变化

周彩云, 张崧, 赵小敏, 万广越, 程晓迪, 郭熙

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 89-95 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0042>

露天矿区排土场复垦地土壤容重差异、GPR特征识别与反演

罗古拜, 曹银贵, 白中科, 黄雨晗, 王舒菲

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 441-452 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0286>

水基废弃钻井泥浆对粗质地土壤物理性质和甜菜生长的影响

王茜, 朱志梅, 樊继铭, 张鹏, 付威, 翟文晰, 郝明德, 樊军

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 422-430 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0261>

新疆奴拉赛铜矿周边土壤理化特征和重金属污染生态风险评价

迪娜·吐尔生江, 李典鹏, 胡毅, 杨磊, 徐晓龙, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 17-23 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0159>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵鹏, 史兴萍, 尚卿, 等. 矿区复垦地土壤改良研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 1-14.

ZHAO P, SHI X P, SHANG Q, et al. The research progress on soil amelioration in mine reclamation land[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 1-14.



开放科学 OSID

矿区复垦地土壤改良研究进展

赵鹏¹, 史兴萍², 尚卿², 谭菁¹, 王夕刚³, 黄占斌^{1*}

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 青海威斯特铜业有限责任公司, 青海 玛沁 814000; 3. 北京金元易生态环境产业股份有限公司, 北京 100081)

摘要:矿产资源开发造成土地资源和生态环境破坏,甚至影响区域经济可持续发展。我国矿区土地复垦,特别是土壤改良已成为生态修复重要组成部分。由于矿区废弃物堆场等复垦土地的土壤结构和肥力较差,土壤改良成为矿区土地复垦的核心问题。本文概述矿区复垦地土壤改良的重要性,根据国内外矿区土壤改良现状,结合我国矿区复垦地土壤特征,深入分析矿区土壤改良原理及技术,并根据矿区土壤改良研究和应用中存在的问题,结合矿区生态修复的绿色、稳定和可持续发展导向,提出我国矿区土壤改良的发展方向,旨在为今后矿区复垦地土壤改良与生态修复提供参考和借鉴。

关键词:矿区;复垦地;土壤改良;改良原理;改良技术;环境材料

中图分类号:S156

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)01-0001-14

doi: 10.13254/j.jare.2021.0805

The research progress on soil amelioration in mine reclamation land

ZHAO Peng¹, SHI Xingping², SHANG Qing², TAN Jing¹, WANG Xigang³, HUANG Zhanbin^{1*}

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Qinghai West Copper Industry Co., Ltd., Maqin 814000, China; 3. Beijing Jinyuan Yi Ecological and Environment Industry Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: The exploitation of mineral resources leads to the destruction of land resources, the ecological environment, and even affects the sustainable development of the regional economy. Land reclamation, especially soil amelioration, has become an important part of ecological restoration in mining areas in China. Soil amelioration has become the primary challenge of land reclamation in mining areas because of the poor soil structure and fertility of the reclaimed land, as observed in waste storage yards. This highlights the importance of soil amelioration in mine land reclamation. The amelioration principles and techniques were comprehensively analyzed based on the soil amelioration status of mining areas in China and abroad as well as on the basis of the characteristics of soil in reclaimed mining land in China. According to the existing problems in the research and application of soil amelioration, combined with the green, stable, and sustainable development orientation of mine ecological restoration the development direction of soil amelioration in mining area was put forward. This provides reference for soil improvement and ecological restoration of mining reclaimed land in the future.

Keywords: mining area; land reclamation; soil amelioration; amelioration principle; amelioration technology; environmental materials

收稿日期: 2021-11-20 录用日期: 2022-01-26

作者简介: 赵鹏(1990—), 女, 山东菏泽人, 博士研究生, 主要研究方向为土壤改良与修复。E-mail: 2317939073@qq.com

*通信作者: 黄占斌 E-mail: zbhuan2003@163.com

基金项目: 青海威斯特铜业有限责任公司科研项目

Project supported: Scientific Research Project of Qinghai West Copper Co., Ltd.

我国是世界上人口最多和面积最大的发展中国家,是世界上最大的煤炭、黄金和稀土生产国,拥有1万多个生产矿山。据资料统计,2016—2020年我国煤炭产量由34.1亿t增加到39.0亿t,累计产煤近184亿t^[1]。虽然采矿业对我国经济贡献巨大,但却带来严重的环境影响,包括植被破坏、土地废弃和环境污染。废弃土地复垦成为我国生态修复和实行土地置换政策的重要工作。所以,矿区环境恢复和土地复垦修复逐渐成为矿区综合治理的重要方面,其中土壤结构和肥力的恢复是土地复垦修复的核心^[2]。

随着矿产资源工业的逐步发展,因采矿而被破坏的土地面积不断扩大,矿区生态环境不断恶化^[3]。尽管土壤对采矿活动高度敏感,但它仍可以通过平衡土壤养分、水和能量流来确保生产力和维持生物多样性,在土壤圈的物质循环中发挥着至关重要的作用^[4]。在矿山开采与复垦过程中,开挖、运输、倾倒和堆积会使原始矿区土体的结构和性质发生剧烈变化。最后,受采矿作业干扰的各种固体废弃物(碎石、矿渣、粉煤灰、城市污泥、煤矸石等)重新排列,并经过一系列物理、化学、生物和工程措施,快速熟化为人类可利用土壤(可以定义为矿土)^[5]。因此,矿土的质量和性质会根据地理条件(如地质、气候、土地利用)而异。矿土系统作为矿区开采和复垦系统的重要组成部分,对于调节矿区的植物、水、景观等子系统具有重要作用。事实上,矿土的质量在很大程度上决定了矿区未来的复垦方向。因此,需要进一步了解矿区采矿和复垦过程对土壤性质变化的影响。

矿区在连续开采过程中会破坏植被/土壤系统,降低土壤生产力和肥力,而复垦的目标是通过一系列复垦方法恢复土壤营养特征,使矿土恢复到原始状态^[6]。土地复垦作为一种将被扰动的土地恢复到有用状态的方法,可以实现耕地总量的动态平衡^[7],且通过适当管理和保护,可以在短时间内取得较高的生态和经济效益。然而,由于矿区土壤的异质性和复杂性,利用它们来种植作物和恢复植被,以此提升土壤生产力和生态系统的可持续性,仍面临一定挑战。近十多年来,为改善矿区生态环境,最大限度地利用矿区土地资源,学者开展了大量矿区土壤改良技术研究。在美丽中国、绿色矿山建设战略和“绿水青山就是金山银山”等生态文明理念的引领下,矿区土地复垦进一步形成了矿区生态修复模式。中共中央、国务院《关于加快推进生态文明建设的意见》中提出:以自然恢复为主,与人工修复相结合作为生态建设与修复的基本

原则^[8]。

早在20世纪80年代,我国就已开始有组织地对采煤塌陷地进行综合治理。一些研究还评估了采矿、建立植被和开发再生矿土的影响^[9]。这些研究使人们对矿土的性质和生态系统服务功能有了初步认识。不同种类矿土具有不同的退化机制和性质,需要采取适宜的改良措施。由于矿区废弃物堆场等复垦地的土壤结构和肥力较差,土壤改良成为矿区复垦的核心问题。为了充分理解矿区复垦地土壤改良的重要性,本文根据国内外矿区土壤改良现状,结合我国复垦地土壤特征,深入分析矿区土壤改良原理及其技术,并根据矿区复垦地土壤改良研究和应用中存在的问题,结合矿区生态修复的绿色、稳定和可持续发展导向,提出矿区土壤改良需要加强研究的改良方法、标准制定和管理对策,为今后矿区复垦地土壤改良与生态修复提供参考和借鉴。

1 矿区复垦地土壤改良的重要性

采矿业被认为是世界上最古老和最重要的活动之一。纵观历史,矿业活动为世界文明作出了巨大而重要的贡献。但与此同时它也造成了严重的土地资源破坏和生态环境污染。据统计,我国的采矿业已破坏了近40 000 km²土地,而且仅废弃矿区就以每年330 km²的速度增加^[10]。多年来,采矿业对经济、环境和社会的影响引起了广泛关注。图1概括了采矿业对这三个方面的影响以及每个类别下的净效应^[10]。虽然采矿业促进经济发展,但其对环境产生了负面影响,在某种程度上也对社会产生了负面影响。矿区开采过程中会产生大量尾矿库,给人类健康和环境带来很大风险^[11]。由于尾矿库土质松散,堆积时容易流失和崩塌,经常发生灾难性的溃坝,造成财产损失和人员伤亡^[12]。矿山尾矿中还含有大量难降解重金属或有机污染物,会对生态系统产生有害影响。过量的重金属往往会抑制植物根系的生长,导致叶片黄化和生物量降低。例如,高含量的重金属会增加作物对重金属的吸收,并对植物生长产生负面影响,有时会导致植物死亡^[13]。因此,为了改善矿区生态环境,最大程度地利用矿区土地资源,学者开展了大量的矿区土地复垦与土壤改良技术研究。

矿区土地复垦一般被认为是一项持续进行的计划,因为随着采矿业的发展,其对环境的影响会逐渐增强。采矿是土地的临时用途,从可持续发展的角度

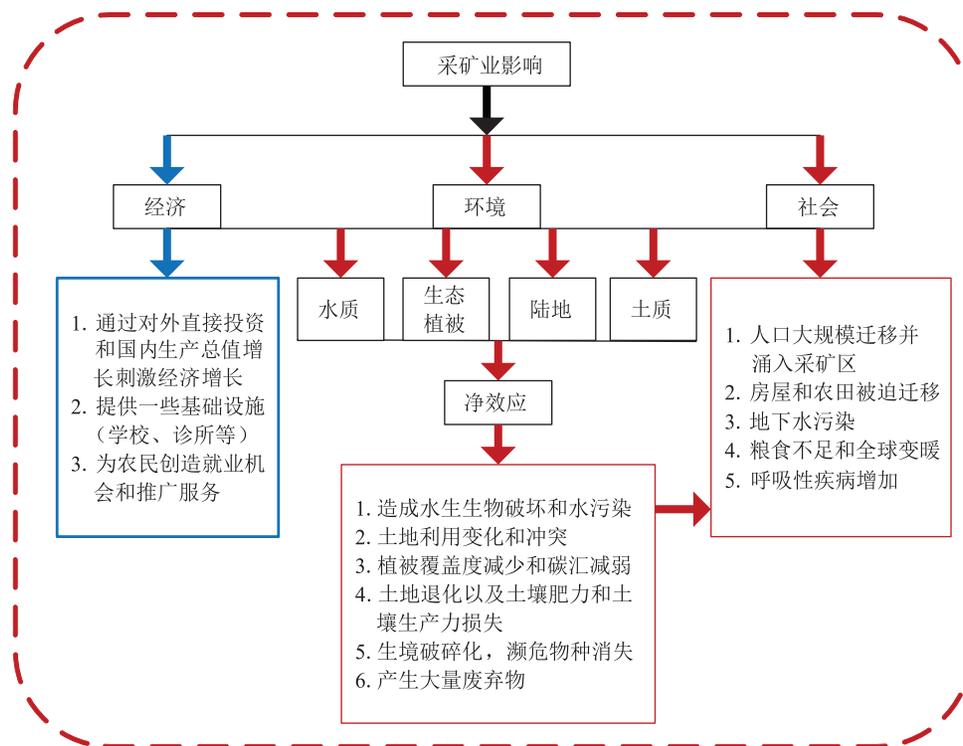


图1 采矿业一般影响的概念化框架

Figure 1 The conceptualized framework depicting the general impact of mining

来看,矿区土地复垦显然是合理的^[14]。矿区土地复垦已成为许多国家可持续发展战略的重要组成部分,其可以提高土地的弹性、生产力和生物多样性^[15]。不同矿区对场地复垦有不同的原理和方法,因此想要对所有场地进行复垦是不可行的,但所有被采矿活动干扰的土地都具有经济、娱乐和美学潜力。因此,复垦的核心是识别矿区的独特潜力,并选择适当的改良技术和措施,将这种潜力转化为可持续的能力^[14]。在土地长期可持续性的范围内,复垦可提供生态调整或土地再利用率。

经开采扰动的矿区土壤通过适当的复垦技术和复垦管理措施可以得到恢复。然而,如果没有适当的复垦规程,矿区复垦地很难恢复到原来的状态。一个满意的矿区通常需要50年或100年才能完全开发,但完全恢复的情况并不多见^[16]。土地复垦的终极目标是恢复矿区土壤的生产力、生态环境和经济价值以及矿区的绿色生态。植物是绿色生态的主题。土壤既是植物生长所需水分、养分和生存环境的基础,还是地球大循环生态系统中重要的组成部分。因此,土壤改良是土地复垦的关键和基础,进行矿区复垦地土壤改良对实现矿区生态修复和可持续绿色发展具有核心意义。

2 国内外矿区复垦地土壤改良进展

2.1 国外

矿区开采造成的土地浪费和生态环境破坏已是全球面临的重要问题,由此引发的矿区复垦改良研究受到国内外学术界和政府的广泛关注。美国、德国、英国、加拿大、澳大利亚等一些矿业发达国家,十分重视矿产资源开采后的土地复垦工作^[16],为矿区复垦地土壤改良的科学研究和治理工作投入了大量资金和技术。早在20世纪20年代初,美国和德国就开始在开采后的矿区进行植树绿化试验以恢复矿区植被^[17]。20世纪50年代末,一些国家已系统地进行矿区土壤改良绿化活动。20世纪60年代,一些发达国家开始制定有关矿区复垦地土壤改良等方面的法律法规,依法开展土壤改良工作,研究复垦地的利用方向、复垦地土壤改良技术和改良效益等,制定复垦地土壤改良规划和实践路径,并获得突出的经济、环境和社会效益,自此进入复垦地土壤科学改良时代^[18]。20世纪70年代,复垦地土壤改良工作已逐步发展成一门多学科、多行业、多部门联合协作的系统工程,很多企业都自觉将土壤改良归入设计、施工和生产实践中。在国家法令和高科技的支持下,美国的矿区环保和恢复

工作卓有成效,尤其是在粉煤灰改良土壤、矸石山植树造林等实践上积累了丰富经验。德国采用农业复垦方法对莱茵露天煤矿和鲁尔井工煤矿进行土地恢复,通过施肥和种植作物改良土壤,恢复矿土生产力,改善矿区生态环境。2000年德国因采煤而破坏的土地已被复垦62%。以采矿业为主题产业的澳大利亚,更是把土地复垦视为矿区开发活动的必要组成部分,在地表侵蚀防治和扰动土处置方面居世界前列。澳大利亚在矿区治理过程中,不但注重土地的恢复,还注重动物栖息地的恢复,目前已形成高科技指导、多专业联合、综合治理开发的土地复垦改良模式^[19]。此外,法国、日本、加拿大等也在矿区复垦地土壤改良方面开展了大量研究。国外还对遥感和计算机信息技术指导矿区复垦地土壤改良进行了深入研究,如Bakr等^[20]将GIS(地理信息系统)用于埃及矿区复垦地土壤改良的研究中,通过遥感监测反映土地覆盖变化,准确高效地评价人类活动对矿区环境的影响。20世纪90年代后,国外将土地复垦目标提升到一个新阶段,转向生态复垦和混合土地复垦^[21]。例如:德国的北莱茵矿区开始转向物种保护、休闲用地设施和循环体系建设等方面,形成了人与自然更加协调的混合土地复垦模式^[22];美国矿区土地复垦研究者通过一系列试验表明,橡树因具有较好的土壤密实性和积水耐受性,可作为湿地复垦的主要树种,用以恢复矿区生态环境^[22]。

2.2 国内

我国人多地少,且耕地后备资源不足^[23],对农业用地的需求高于大部分国家。因此,我国的土地复垦工作不仅要恢复矿区生态环境,更要提升复垦耕地的质量,即更强调对土地的珍惜和利用。我国对矿区土地复垦的研究滞后于发达国家。20世纪50年代末,我国最早开始研究矿区生态修复和土地复垦工作,当时土地复垦率还不足1%。我国的矿区土地复垦与生态恢复工作真正得到重视是在20世纪80年代^[24],国家先后颁布了《土地复垦规定》和《中华人民共和国环境保护法》,到80年代末土地复垦率提高至12%,标志着我国矿区土地复垦研究得到了飞速发展。1999年,《中华人民共和国土地管理法》生效,进一步加强土地管理,切实保护耕地。2011年,我国颁布实施《土地复垦条例》,土地复垦工作更加有序、科学地进行。2019年6月5日,国务院常务会议通过《中华人民共和国固体废物污染环境防治法(修订草案)》,明确指出我国对固体废物污染环境的防治,实行减少固

体废物的产生量和危害性、充分合理利用固体废物和无害化处置固体废物的原则,促进清洁生产和循环经济发展。随着经济社会发展对土地资源的迫切需要,人们采用“超前式治理模式”,利用“补偿设计”对采矿塌陷区进行回填整治和土地复垦。矿区开采过程会严重破坏区域碳平衡,使矿区碳固存能力下降甚至丧失^[25]。在2020年提出的“碳达峰、碳中和”目标下,研究者对矿区碳源/汇开展了大量研究,如矿区低碳土地利用^[26-27]、露天矿碳源构成^[28]、矿区节能减排对策^[29]等。2012年,国土资源部土地整治中心与德国合作开展了“中德低碳土地利用项目”,借鉴德国低碳土地整治成熟经验,开展我国生态型低碳土地整治工作。矿区开采努力做到“少占地、少损毁、多造地、矿复垦”,实现矿区“低排放、高碳汇、高效益”的土地利用发展状态^[30]。20世纪末,我国矿区复垦主要是恢复耕地,如今随着现代生态农业、生态旅游、景观规划、生态修复以及“碳达峰、碳中和”等理念的引导,综合生态复垦模式已逐渐形成。我国矿区复垦地土壤改良的方法主要有物理法、化学法、生物法以及后来的联合改良法,主要用于研究土壤重构问题。近年来,我国也逐渐开始将RS(遥感)、GIS和GPS(全球定位系统)等技术用于露天煤矿的土壤改良工作中。我国正处于工业化快速发展阶段,虽已在矿区土壤改良研究中取得较多成果,但仍有许多亟待研究的方向,如提高土壤改良认知、加强土壤改良法制标准、加大土壤改良资金投入、创新土壤改良技术、阐述土壤改良原理等。

3 矿区复垦地土壤特征

矿山开采过程中,因挖损、塌陷、压占等造成破坏的土地和未经一定处理而无法使用的土地统称为矿山废弃地。根据废弃物来源,矿山废弃地可分为以下四种类型:一是由剥离的表土、开采的废石以及低品位矿石堆积成的废石堆废弃地(排土场);二是露天开采形成的采空区和地下开采形成的塌陷区;三是分选出精矿物后的剩余物排放形成的尾矿库;四是被采矿作业面、机械设施、矿山辅助建筑物和道路交通等占用后废弃的土地。这四种类型矿山废弃地土壤的共同特征主要表现在表层土被破坏、物理结构不良、持水保肥能力差、贫瘠、极端pH值、抑制植物生长、重金属含量高。矿土作为矿区开采与复垦的重要组成部分,在很大程度上决定着矿区未来复垦的方向。因此,需要进一步了解复垦过程对矿区土壤性质变化的影响。

3.1 物理性质

矿区复垦地的物理特征主要体现在土壤结构上。土壤结构、容重、透气性等物理性质,可通过控制土壤水力性和水文稳定性对土壤改良产生很大影响。矿土结构因地而异,有些会与周围未被破坏的土壤结构相似,但有些会由于原状土的材料被不同质地的覆盖层取代而有所不同。在相同条件下,采场的平均土壤粒径小于未采场的平均土壤粒径。此外,复垦过程中大型机械压实会引起土壤聚集性的变化,使根系生长受到限制,从而导致水分和养分有效性、透气性和植物产量下降^[31],造成实质性的、长期的甚至不可逆转的破坏,从而对土壤生产力和生态系统功能产生负面影响^[32]。土壤压实是土壤退化的物理表现形式,可改变土壤的结构和生产力^[33],对采矿和复垦的可持续发展构成潜在威胁。在矿区,容重是表征矿土压实度最常用的参数。复垦土通常有较高的容重(1.55~1.86 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)^[34],但随着复垦的进行,更多的根会渗入土壤,使孔隙度增加、土壤容重降低。

3.2 化学性质

有关采矿和复垦对特定土壤化学性质的影响已有很多报道^[35-36]。风化对土壤功能的影响是矿区的主要环境问题之一。矿渣内的重金属元素和酸液通过风化和溶解作用进入水体和土壤,可改变矿区土壤的化学性质。风化过程会除去碱性矿物中的可溶性矿物,导致电导率和pH值降低。在大多数情况下,风化的腐坏物和回收的土壤有利于矿区恢复^[37]。在矿区恢复过程中,土壤pH可调节植物养分的有效性。含有碳酸盐的未风化超载材料污染会引起pH值的变化^[35]。复垦活动也会显著改变土壤pH值,从而影响特定树种的生长。研究表明,电导率受土壤质地、深度、复垦时间、基质和风化条件等因素的影响,但在较长一段时间后(20年以上),电导率和其他特性可以维持一个有利于本地物种生长的水平^[35,38-39]。在矿区,不可持续的管理会导致土壤碳氮流失,这些地区很可能成为温室气体排放的净源^[40]。研究矿区土壤碳氮动态对理解土壤碳氮循环和生态系统功能具有重要意义。扰动土中碳库的流失主要是由矿化、侵蚀和淋溶作用造成的。采矿和复垦活动后,矿土中土壤有机碳(SOC)含量呈下降趋势。研究证实,开采复垦后氮的损失在0~15 cm土层最大(>60%)^[41]。此外,人类活动在采矿过程中也添加了重金属(As、Cd、Co、Cr、Hg、Ni、Pb、Se等)。因此,矿区废弃物中金属释放产生的环境影响一直是复垦实践中的一个重大问题。

3.3 生物学性质

土壤生物活动可以为监测矿区土壤质量提供有用的信息,而且微生物特性已越来越多地用于评价土壤恢复力^[42]。微生物群落对土壤环境非常敏感,其敏感性与多种土壤过程有关,包括有机残体的分解、养分循环、有毒化合物和污染物的降解等,因而微生物群落已被许多研究人员作为严重扰动矿区的生态指标^[43-45]。微生物群落是土壤养分循环和有机质积累的重要驱动力,为复垦植物的生长提供基础。对矿区微生物特性的野外调查研究表明,在复垦场址测量的大多数土壤微生物参数与未受干扰场址的土壤微生物参数相当^[46],证明复垦活动对土壤微生物没有显著影响。土壤酶调控着生态系统功能,在土壤系统有机质转化和养分循环等生化过程中发挥关键作用。矿质土壤的扰动容易影响酶的活性。随着复垦演替年限的增加,大部分酶活性提高,且复垦地的酶含量高于对照组,但不同植被处理复垦地的酶活性差异不显著^[47]。土壤动物在土壤有机质的分解与融合中具有重要作用。未开垦地中动物群落发育较差,而开垦地中动物群落丰富。土壤动物多样性能够反映生态系统的新陈代谢,可作为矿区土壤质量的评价指标来评价矿区的恢复状况。

4 矿区复垦地土壤改良原理及技术

4.1 改良原理

矿区复垦地的土壤改良可依靠恢复生态学原理及理论,其相关原理的研究还会涉及到群落演替理论、限制性因子理论、生物多样性理论、景观生态学理论等^[48],其中群落演替理论是指导矿区土壤改良和生态恢复的基础理论,即矿区植被恢复过程中引入的先鋒植物经过一系列演替,最终达到顶级群落,并以整体性原理、结构稳定与功能协调原理、自生原理和循环再生原理为核心原理^[49]。矿区生态恢复的目标是使一个结构复杂的多层次系统实现多样的功能。矿区复垦地的土壤改良应持有生态学视角,以植被恢复和生物多样性保护为目标,选用适宜的技术改良土壤。矿区生态恢复可采纳白中科等^[50]提出的矿区恢复重建的“五阶段”法,即地貌重塑、土壤重构、植被重建、景观重现、生物多样性重组与保护。地貌重塑主要是通过有序排弃和土地整形等措施,重新塑造一个与周边景观协调的新地貌,提高土地利用效率。土壤重构的主要目的是应用工程措施及物理、化学、生物等改良措施,恢复或重构矿区损毁土地的土壤,其是矿

区生态恢复的核心。植被重建是在地貌重塑和土壤重构的基础上,针对矿区不同土地损毁类型和程度,综合外界环境条件,进行不同损毁土地类型物种筛选(先锋和适生植物)、植被配置、栽植及管护,使重建的植物群落持续稳定。景观重现则是遵循“山、水、林、田、湖、草”生命共同体理念,重建一个与周边景观相协调的生态系统。生物多样性重组与保护主要是借助人工支持和诱导,调控生物种群的组成和结构,逐步修复生态系统功能,诱导生态系统最终演替为一个符合代际(间)需求和价值取向的可持续生态系统。胡振琪等^[51]总结出矿区生态修复目标遵从的6条原则:尊重自然,以人为本;因地制宜,宜林则林、宜耕则耕、宜水则水、宜建则建、宜荒则荒;安全高效、可持续利用;注重生态环境效益,经济合理;恢复耕地、草地、林地优先;控制源头和过程,末端治理。

4.2 改良技术

稳定的土壤结构对维持农业生产力和减少水土流失具有重要意义。然而,矿区具有极端pH值、高盐度、低保水能力、高含量重金属、土壤有机质和肥力不足等物理化学特性,不利于植物的自然生长。因此,应采取适当的改良措施,改善矿区的物理、化学和生物特性,以促进植物定植。目前,矿区土壤改良技术主要包括物理、化学、生物和联合改良技术。

4.2.1 物理改良技术

物理改良是矿区复垦的基础,是几乎所有类型矿区恢复最简单的修复方法,同时也是土壤重建的核心,对矿区景观和地形的影响有巨大的影响。改良矿区土壤的物理方法有回填、倾倒、覆盖和固化等,物理改良可以快速有效地改善土壤条件和防止污染物迁移,并为植物生长提供适宜的基质。但该技术处理效率低、成本高,不适合处理大规模污染土壤。此外,物理处理也无法利用矿区土壤中有价值的成分。回填表土是目前最常用且有效的物理改良方法,在矿区开采前先剥离保存好0~30 cm和30~60 cm的土层,以备回填时使用,有利于为植被恢复提供富含高质量生物群落的土壤^[24]。很多研究都证实回填表土可以有效减少风蚀和水蚀,产生很好的改土和修复效果。Holmes等^[52]研究发现,回填10 cm和30 cm表土都可以高效提高植物盖度。Redente等^[53]的研究也表明,回填15 cm表土即可达到很好的恢复效果。也有研究表明,越厚的回填土层越可以有效避免根系长入有毒的矿土,但超过一定厚度范围后,对矿区的修复效果提升不显著^[54]。因此,矿区回填表土厚度建议为

10~15 cm,具体厚度可根据矿区不同的物理、化学、生物特性实际调整。但回填表土涉及到表土的剥离、存放、二次倒土等很多工作,费用高、难管理,且大部分矿区位于山区,土源少,有些矿山企业甚至花巨资进行异地熟土覆盖。因此,这种技术的应用会受到材料适用性低和运输费用高的局限性。物理改良技术的总体目标是:①减少侵蚀;②在改善土壤质量的同时减少土壤压实;③创造恢复矿山废弃地的适宜条件。

4.2.2 化学改良技术

化学改良的目的是改变矿土的不平衡状态,以及采取一定措施调节土壤pH、缓解其重金属毒性、提高土壤肥力等。基于植物的最佳生长条件,利用有机和/或无机材料在矿区进行土壤改良已被广泛尝试。研究表明,石灰、粉煤灰、磷酸盐材料和有机材料(如生物固体、凋落物、堆肥和粪肥等)都可用于矿区的土壤改良。石灰处理是氧化矿区中最广泛采用的中和酸性和降低金属毒性的方法之一^[55],但由于浸灰剂的溶解和浸出,特别是在酸性环境下,其作用逐渐受到限制^[56]。Mcgowen等^[57]报道,添加磷酸盐基材料可以有效固定土壤中Cd、Pb、Zn。Moreno等^[58]进一步提出浮石是改善细粒矿区排水的优良无机材料。总的来说,无机改良剂主要改善矿区土壤的物理性能(如排水性能)或有限的化学性能(如pH值和过量的可溶性金属含量)^[59]。Alcantara等^[60]对矿区重金属进行提取,研究表明使用75%的生物固体和25%的矿土组合可以最大化促进印度芥菜和胡萝卜的生长,并可最大化进行汞(Hg)和金(Au)的植物提取。Asensio等^[61]在污泥改良剂对铜矿土壤质量的影响研究中证实,污泥可以中和土壤pH值、降低金属含量和提高土壤肥力,对植物生长发育也有显著影响。此外,污泥的添加还可以改善铜矿土壤的生物特性和生物群落结构。Fellet等^[62]提出,生物炭作为有价值的有机物质来源,可以通过提高土壤营养和改善矿山结构(包括pH值、阳离子交换量、持水能力和Cd、Pb、Ti、Zn的生物有效性)帮助建立植被的覆盖。与无机材料相比,有机材料可以缓冲土壤pH值,从而间接影响金属在矿区土壤中的吸附和络合作用,也可以改善土壤性质、营养状况、水分入渗和持水能力。化学改良技术的总体目标是提高植物对养分的吸收,调节土壤pH值,改善土壤质地和结构,提高重金属的生物有效性和溶解度等,最终改善土壤的整体理化性质,减少土壤污染^[63]。但化学改良方法的应用会由于缺乏持久性和需要定期检查而受到一定限制。

4.2.3 生物改良技术

矿区土壤改良也会采用一些生物改良方法,主要有土壤动物改良、植物改良、微生物改良、植物-微生物联合改良。土壤动物作为生态系统中的消费者和分解者,在改良土壤结构、增加土壤肥力和促进生态恢复等方面具有重要的作用。Boyer等^[64]研究了蚯蚓对露天开采后生态系统服务的恢复潜力,发现蚯蚓不仅可以改良矿土的理化性质,而且能富集重金属,提升表土肥力从而加速土地复垦,促进矿区生态系统功能的恢复。植物改良是一种利用植物移除、解毒和累积土壤中有机和无机污染物的生物修复技术,是一种高效、廉价、环境友好的改良策略^[12]。矿区植被恢复是通过稳定土壤来降低全球环境风险的有效方法。此外,还可以通过提高土壤有机质、养分含量和生物活性来改善土壤质量^[65-66]。植物改良技术在矿山尾矿和污染土壤修复中的应用已得到证实。植物在清除环境污染物方面具有排毒作用。根据不同的植物特性,植物改良技术可以划分为三种:植物提取(通过根部吸收污染物或金属)、植物稳定(冠层减少风扩散,根防止水蚀、固定重金属和防止淋失)和植物挥发(植物与水一起吸收污染物并通过气孔将其释放到大气中)。微生物改良主要是利用微生物的生命代谢活动使矿土中有害有毒物质减少或无害,帮助实现矿区的生态恢复。微生物可以产生某些有机酸,通过改变重金属的土壤环境(pH值和氧化还原电位)提高重金属的溶解度。微生物分泌的部分多糖易与土壤颗粒结合,从而改善土壤团聚体结构,增强土壤结构稳定性。例如,球囊霉素和丛枝菌根真菌释放的其他糖蛋白可通过增加颗粒聚集和稳定团聚体抵抗风蚀和水蚀来改善土壤结构。此外,一些土壤细菌能够降解矿物加工过程中产生的有毒有机化合物,包括溶剂。Zhu等^[67]将滴滴涕降解菌接种到Cd超富集植物——景天属中,培养超过18个月后,土壤Cd和滴滴涕含量分别下降32.1%~40.3%和33.9%~37.6%,而未种植和未接种的对照土壤Cd和滴滴涕含量分别下降3.25%和3.76%。Wu等^[68]研究表明丛枝菌根真菌接种到Pb/Zn尾矿中,可以减少土壤中Pb/Zn的迁移,显著降低香根草根系中重金属含量,有效缓解重金属对植物的毒害作用。楼骏^[69]筛选出两株对菲具有较高降解能力的变形菌门下的马赛菌,通过液体培养降解菲实验得出,菌株在48 h内可以完全降解100 mg·L⁻¹的菲,可以作为修复矿区菲污染土壤的环境友好型生物材料。生物改良技术可以最大程度地减少现有和

潜在污染物的有害影响。尽管该技术在处理重金属和其他污染物污染的矿山废弃地方面具有潜力,但仍有一些局限性,尤其是植物修复,例如:①大多数自然发生的超富集草本和灌木物种生长缓慢,生物量低;②污染土壤修复周期长;③如果不建立适当的处置机制,存在将重金属重新释放到环境中的风险;④金属生物利用度有限;⑤适用性有限,并不是所有的超富集植物都适用于含有中高含量毒性金属的土壤^[70]。

4.2.4 联合改良技术

矿区污染程度不同且理化特性多样,单一的改良技术已经很难达到低成本、高效、稳定和可持续的矿区生态修复效果。因此,结合多项单一改良技术的联合改良技术逐渐成为我国矿区生态修复的发展方向。目前,应用较多的联合改良技术主要包括化学/物化-生物、物理-化学、微生物-植物、物理/化学-植物等联合改良技术。其中化学-植物、微生物-植物联合改良技术最适于矿区的生态修复。化学-植物联合改良技术的原理是对污染土壤先进行原位化学改良,改善土壤环境,以防止污染元素进一步扩散转移,再筛选具有特殊吸收富集能力的植物种植在污染土壤中,彻底吸附土壤中的污染元素,最后收获并处理植物。该方法可将污染元素从土体中移除,达到矿区污染治理和生态修复的目的。苏银萍^[71]通过室内盆栽试验,研究海泡石、沸石对短毛蓼修复锰矿区土壤效果的影响,结果表明海泡石、沸石可显著提高短毛蓼对Mn污染土壤的修复效率。王静雯等^[72]研究表明,施加适量EDTA可增强鱼腥草对Pb、Zn、Cu、Cd的吸收富集能力,即增强鱼腥草对矿区重金属复合污染土壤的修复能力,因而可用于矿区重金属复合污染土壤的植物修复。微生物-植物联合改良技术可通过微生物活动改变土壤pH值,影响重金属的生物有效性并改变其赋存形态,增加植物对重金属的吸附特性,同时还可以通过微生物与植物之间的协同作用,高效降解土壤中的有机污染物。Zhu等^[67]将DDT降解菌与Cd超累积植物东南景天联合改良重金属-有机复合污染土壤,田间试验结果表明该方法可使土壤中的Cd和DDT含量分别降低31.1%和53.6%。很多研究表明,微生物在植物修复技术中发挥着重要作用,微生物与植物的协同作用在植物修复过程中可促进对重金属的去除和解毒。例如,生物降解菌、植物生长促进菌和丝状真菌等微生物可以通过改变土壤环境、增加生物量和提升重金属生物有效性来降低重金属毒性,对植物修复具有一定作用^[73](图2)。因此,可以将微生

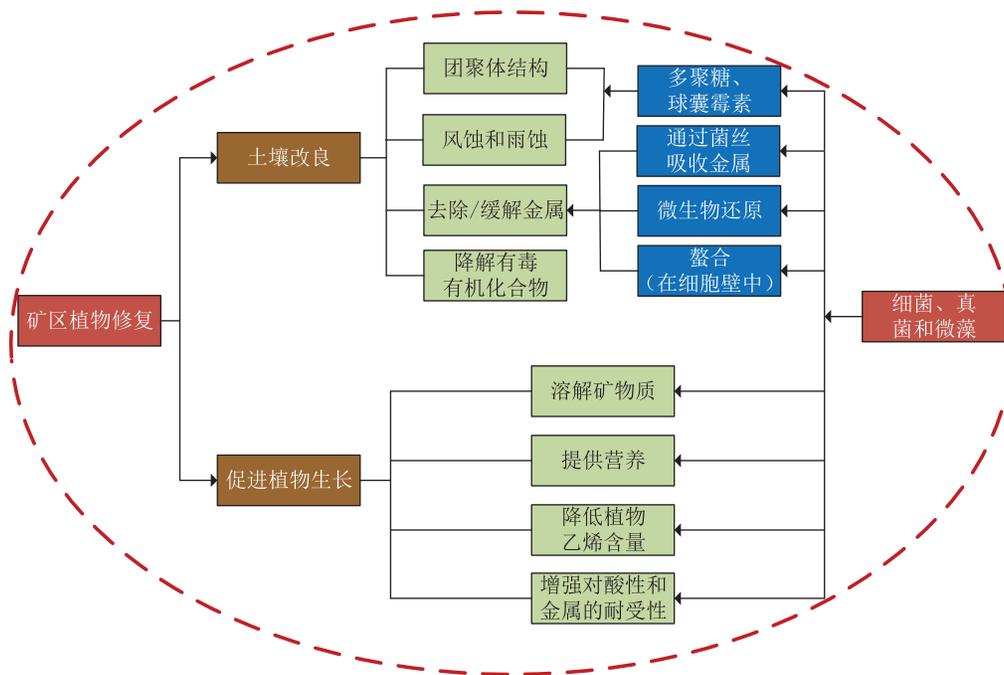


图2 微生物对尾矿植物修复的贡献

Figure 2 Contribution of microorganisms to the phytoremediation of mine tailings

物和植物联合用于矿区的土壤改良。

5 环境材料在矿区复垦地土壤改良中的应用

环境材料(Environmental materials 或 Eco-materials)是20世纪90年代初由日本学者山本良一等最早提出的,定义为特别优异的环境协调性材料或那些本身具有净化环境、修复土壤等功能材料。我国学者认为,环境材料是那些在加工、制造、使用和再生过程中资源消耗少、无二次污染、可循环再生利用、具有良好性能/功能并与环境协调的材料。因此,环境材料是一类要综合考虑资源、能源和环境问题的材料总称,既包括经改造后的现有传统材料,也包括新开发的环境材料。环境材料可分为天然材料、循环再生材料、高分子材料、低环境负荷材料等。由于具有功能性、环境协调性和经济性,环境材料已被广泛应用于环保、工业、农业生产等领域。目前,环境材料在矿区的土壤改良中也得到广泛应用,其对矿区土壤和植物的综合影响如图3所示。我国目前应用较多的环境材料主要有腐植酸、生物炭、保水剂、微生物菌肥等,它们在水肥保持和环境治理方面具有很好的实践效果。

腐植酸被称为土壤的“生命核”,含有20多种活性官能团(羟基、羧基、酚羟基、羰基等),这些官能团使腐植酸具有酸性、亲水性、阳离子交换性,可与土壤中的污染物发生吸附、离子交换、络合和氧化还原作

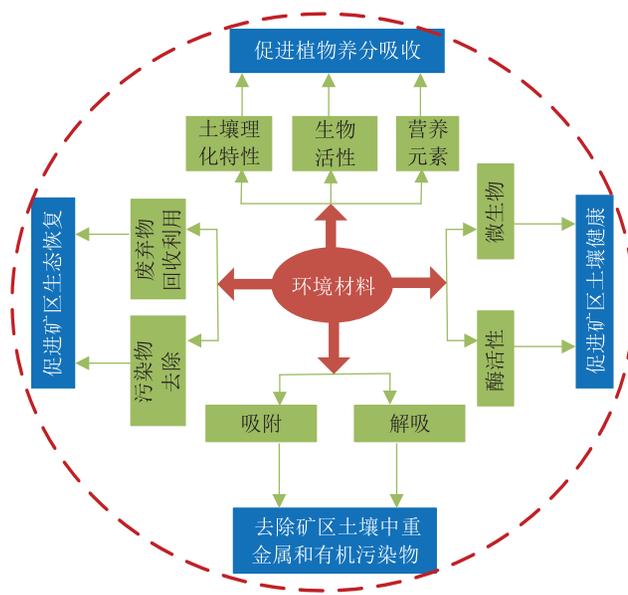


图3 环境材料对矿区土壤和植物的综合影响

Figure 3 Comprehensive effects of environmental materials on soil and plants in mining area

用。目前,腐植酸及其各类产品被广泛应用于农业生产和污染土壤修复中。Liu等^[74]研究表明,向玉米种植地中施加腐植酸可以使土壤大团聚体增加77.59%~125.58%。候月卿等^[75]研究了环境材料对猪粪堆肥中Zn的钝化效果,试验表明嘉博文生物腐植酸对Zn的钝化效果显著高于对照组,高达64.94%。

Perminova等^[76]在研究不同来源腐植酸对多环芳烃的解毒特性时发现,土壤腐植酸、泥炭腐植酸和淡水腐植酸都可以降解蒽、荧蒽和芘,而且富含芳烃的腐植酸解毒潜力最高。于学胜^[77]研究了生物腐植酸对矿区废弃土壤微生态的重建作用,结果表明在生物腐植酸单施情况下,添加量为每亩(1亩=667 m²)30 kg的处理效果最好,与空白对照相比,其可培养微生物数量提高96%,植物量提高34%,真菌多样性指数提高6.5%;在生物腐植酸与肥料混施的情况下,每亩30 kg生物腐植酸加50 kg复合肥处理效果最好,与空白对照相比,其可培养微生物数量提高94%,植物量提高70%,真菌多样性指数提高15%。

生物炭是有机废弃物在完全或部分缺氧条件下热解炭化生成的一种稳定、富碳和高度芳香化的难溶高聚物。生物炭原料来源广泛,植物、动物粪便、市政固体废物等在热解、水热碳化和微波碳化等过程中均能制备成生物炭。生物炭因具有较大比表面积、丰富孔结构以及大量无机灰分和极性官能团,对重金属具有很好的吸附性,已被广泛应用于土壤重金属修复中。生物炭可通过静电相互作用、离子交换、物理吸附、络合和沉淀等反应,钝化土壤中的重金属,降低重金属在土壤中的迁移性和生物有效性^[78]。李光炫等^[79]的研究表明,废菌棒生物质炭可以有效改良矿区土壤酸性,提高土壤速效养分和土壤酶活性,丰富细菌多样性和有益菌群数量,降低 TCLP 提取态 Cd(12.1%~24.8%)、Zn(8.3%~31.4%)、Pb(32.9%~53.7%)含量。杨凯等^[80]利用生物炭修复铅矿区污染土壤,研究表明在30 d恒温恒湿、干湿交替和冻融循环3种老化条件下,玉米秆生物炭的添加可使Pb的有效态含量分别下降47.4%、16.1%和45.0%。

保水剂是一种三维网络结构的高分子聚合物,携带大量的亲水基团,具有很好的吸水和保水性,短时间可吸收自身质量400~600倍甚至更高倍数水。保水剂施加于土壤可改善土壤环境,为植物提供更多的水分,且用量少、见效快,已被广泛应用在农业生产、水土保持和环境治理等方面^[81]。保水剂主要分为淀粉类、纤维素类和合成聚合物类,它们的共性是分子中都携带大量羧基和羟基,可以与重金属发生络合/螯合反应,从而降低其在环境中的生物活性^[82]。秦端端等^[82]的研究表明,在水溶液吸附试验中,镉浓度为200 mg·L⁻¹时,保水剂对镉的吸附量在120 mg·g⁻¹以上;在培养60 d的土盆试验中,单独添加保水剂处理组可使土壤镉下降20%以上,添加保水剂且种

植黑麦草处理组可使土壤镉下降36%以上。Guiwei等^[83]在高粱的盆栽种植试验中发现,添加0.2%保水剂的处理组植株地上部Cd含量、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶活性均降低,且高粱的生长得到促进^[84]。Santos等^[84]对矿区修复的研究表明,保水剂用量为75、150 mg·hm⁻²时,可显著降低植物对重金属的吸收,促进土壤保水保肥,增强与营养循环和微生物活性相关的酶活性。

微生物菌肥(微生物肥料)是以特定、可繁殖的微生物活动为核心,使植物获得所需营养的一种绿色环保、高产高效、多功能的新型生物肥料或菌剂。微生物菌肥具有改善土壤肥力、促进植物生长和络合重金属等作用,同时,某些特定菌种还可以分解土壤中有有机污染物,活化或钝化土壤重金属离子等^[85]。我国矿区土壤存在重金属污染严重、肥力低下等情况,可以通过施用微生物菌肥修复矿区复垦地土壤。微生物菌肥对重金属的强化机制有两种途径:一是活化重金属,促进植物吸收,减少土壤中重金属含量以符合国家标准;二是钝化重金属,降低土壤重金属污染,防止通过食物链二次传递^[86]。李晓越等^[87]的研究表明,微生物肥在添加比例为1.5%时,可使烟叶中降Cd率(与CK相比)最高达63.9%,添加比例为3.0%时,可使烟叶中降Cd率最高达66.6%。张森等^[88]的研究表明,微生物菌剂可以使水稻根部、茎鞘、谷壳和糙米中降Cd率(与CK相比)分别达46.19%、52.46%、38.39%和55.31%。杨继飞^[89]的研究表明,菌肥添加使玉米地上部对Pb的吸收率(与CK相比)提高17.0%~40.1%,玉米根部对Pb的吸收率提高19.5%~20.6%。周普雄等^[90]的研究表明,重金属污染土经12 d生物淋滤(氧化亚铁硫杆菌接种的淋滤液)后,Cu、Zn、Cd和Pb的去除率分别达到66.5%、55.1%、72.8%和35.6%。

6 矿区复垦地土壤改良存在的问题与发展方向

6.1 存在问题

矿区开采会对土地资源造成一系列影响,对生态环境造成巨大压力。矿区土地复垦与土壤改良已成为几十年来备受科学家关注的世界性课题。但矿区的复杂性和脆弱性使复垦研究和改良实践面临多重困难,在实际研究过程中存在一些亟待解决的问题。

6.1.1 缺乏矿区复垦地土壤改良原理研究

目前对矿区复垦地土壤改良的研究主要针对土壤改良材料对矿区复垦地土壤性质、植物生长、环境

治理等的改良效果评价,而对土壤改良材料与土壤、植物以及微生物之间的相互作用机制研究很少。不同改良材料的改良机理不同,其改良效果会受重金属离子种类、植物种类、土壤类型以及环境因素的影响。因此,今后应针对不同区域、不同类型矿区复垦地选用恰当的改良材料,并进一步深入系统地研究改良材料的改良机理。

6.1.2 缺乏矿区复垦地土壤改良技术研究

土壤改良技术是矿区土地复垦的核心基础,经过近几十年的研究与实践,我国矿区土壤改良技术已经有了重要进展。从物理改良、化学改良、生物改良到多项改良技术联合,每种改良技术都具有一定的实用性或先进性,但同时其又不可避免地具有某些局限性,仍未形成一种能高效、经济、稳定、成熟的矿区复垦地改良技术。矿区土壤污染存在隐蔽性、累积性、不可逆性和难治理性等特点,因此更需要加强对矿区复垦地土壤改良技术的研究。

6.1.3 缺乏矿区复垦地土壤改良的相关标准规范

据统计,2020年北京有20个矿区土地复垦在置换验收中基本不合格,正在完善相关标准。各地土地复垦改良的置换缺乏验收评价标准。我国现行的有关绿色矿区构建的法律条例和规范,也缺少针对矿区开采全过程动态的生态环境保护内容。目前我国土地复垦技术标准建设相对落后,且国家技术标准存在共通性、整体控制的特点,缺乏因地制宜的、详尽具体的规范性标准。因此,我国需要加强矿区复垦地土壤改良相关法律和标准的研究制定。

6.1.4 缺乏矿区土地复垦监管体系

矿区土地复垦监管是一个包括矿区开采、土地复垦与生态环境恢复全过程的监测和管理活动。近年来,我国矿区土地复垦监管体系已初步建成,但仍存在很多问题,如监管体系较为单一、监管机构不明确、缺乏具体有效的监管部门、监管手段落后等。因此,我国需要加强监管体系建设,尽快建立完备、可操作的监管机制。

6.2 我国矿区复垦地土壤改良的发展方向

矿区开采伴随的环境问题是土壤改良研究的难题,也是制约社会和经济可持续发展的障碍。在当今越来越重视环境保护的大环境下,我国矿区复垦地土壤改良研究已取得了一些成效,但与矿业发达国家相比,仍有很多不足之处。因此,我国应抓住当前科技快速发展的机遇,加大对矿区修复的支持和研究,做到技术创新,开创一条矿区开采与环境保护协调发展

的文明道路。

6.2.1 加强矿区复垦地土壤改良原理研究

今后,我国应针对不同矿区复垦地选用不同改良材料,分析其结构组分和理化特性,结合矿区复垦地改良前后土壤的理化和生物特性变化以及植物的生长和品质变化,揭示改良材料对矿区复垦地土壤的改良原理,在此基础上研发针对不同类型矿区复垦地的环保低价的新型土壤改良材料。

6.2.2 加强矿区复垦地土壤改良技术研究和集成

在当今“碳达峰、碳中和”的战略目标下,矿区复垦地土壤改良工作要做到减排增汇:以矿区固体废弃物(粉煤灰、煤矸石等)为原料,因地制宜、就地取材地配制新型表土回填材料,还可以利用生产和生活废物研究固体废物充填技术,达到“废物减排、以废治退”的目标;尽量减少大型机械的使用,绿色施工,减轻土壤压实,以减少碳排放;增施有机肥,增加土壤有机碳,提高植被覆盖面积,以增加碳汇;优化土地利用结构,对积水坑进行湿地改造,建设郊野公园等。矿区复垦可发挥“3S”技术集成优势,即采用遥感技术(RS)获取矿区复垦地影像,确定土壤改良范围、面积和类型;采用全球定位系统(GPS)对矿区复垦地定位、测绘;采用地理信息系统(GIS)对矿区复垦地进行适宜性评价。复垦实践中,应围绕三大核心技术——地貌重塑、土壤重构和植被恢复,恢复矿区复垦地生态功能,实现碳源向碳汇的转变。此外,矿区复垦地土壤改良还可以采用截排水、边坡稳定、农业调控等辅助措施,更好地实现矿区的土壤改良。

6.2.3 加强矿区复垦地土壤改良相关法律和标准的研究制定

矿区开采与修复是一项长期持久的工程,因此,为了降低矿区开采后修复的难度和对周边环境造成的污染和损毁程度,要制定边开采边复垦的采矿计划,并对周边造成损毁的地区进行保护,同时坚持“开采与保护并举、损毁与复垦并重”的采矿原则;应进一步修改完善相关法律体系,构建以生态环境保护可持续发展矿业为核心的标准规范,包括矿区开采、土地复垦与环境保护、闭矿验收等动态全过程;针对地区特点、矿区企业差异,因地制宜地制定符合自身区域特点、企业特点的土壤改良法律体系和标准规范;构建以矿区环境保护、土壤改良和生态恢复为核心的矿区土壤改良标准体系。

6.2.4 加强矿区复垦地的土壤质量管理和评价

矿山开采会产生大范围的土地扰动和生态环境

破坏,所以应在开采前先进行环境影响评价,依法编制土地开采、复垦与环境保护规划,在开采、复垦过程中实时跟踪监测生态环境指标。矿区环境与社会利益密切相关,可建立公众参与机制,鼓励社会公众和土地权益人积极参与矿区生态环境保护工作,共同监督、共同受益;加强矿区恢复目标的管理,建立“3S+N”生态目标评价和监管机制,即努力构建安全、稳定、无污染、可持续的矿区生态环境指标体系;建立一套管理法律政策完备、管理层级分明、部门职责清晰、管理方式多样、管理指标健全的综合管理体系;提出具有地区针对性的、过程控制的土地复垦质量控制标准与管理要求,并根据矿区恢复过程中的实际情况,建立全面、科学、合理、实用、有效的矿区生态恢复质量评价体系。

参考文献:

- [1] 王国法,任世华,庞义辉,等.煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J].煤炭科学技术,2021(9):1-8. WANG G F, REN S H, PANG Y H, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of “dual carbon” target[J]. *Coal Science and Technology*, 2021(9): 1-8.
- [2] MARTINS W B R, LIMA M D R, BARROS JUNIOR U O, et al. Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 145: 105707.
- [3] WANG S D, LIU C H, ZHANG H B. Suitability evaluation for land reclamation in mining area: A case study of Gaoqiao bauxite mine[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21: s506-s515.
- [4] DOMINATI E, PATTERSON M, MACKAY A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(9): 1858-1868.
- [5] JITENDRA A, SUBODH K M. Development of technosol properties and recovery of carbon stock after 16 years of revegetation on coal mine degraded lands, India[J]. *Catena*, 2018, 166: 114-123.
- [6] UPADHYAY N, VERMA S, PRATAP S A, et al. Soil ecophysiological and microbiological indices of soil health: A study of coal mining site in Sonbhadra, Uttar Pradesh[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 16(3): 778-800.
- [7] ADRIANSEN H K. Land reclamation in Egypt: A study of life in the new lands[J]. *Geoforum*, 2009, 40(4): 664-674.
- [8] 雷少刚,卞正富,杨永均.论引导型矿山生态修复[J].煤炭学报,2022, 47(2): 915-921. LEI S G, BIAN Z F, YANG Y J. Discussion on the guiding restoration for mine ecosystem[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 915-921.
- [9] AHIRWAL J, MAITI S K, SATYANARAYANA R M. Development of carbon, nitrogen and phosphate stocks of reclaimed coal mine soil within 8 years after forestation with *Prosopis juliflora* (Sw.) Dc.[J]. *Catena*, 2017, 156: 42-50.
- [10] WORLANYO A S, JIANGFENG L. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 279: 111623.
- [11] SANCHEZ-LOPEZ A S, CARRILLO-GONZALEZ R, GONZALEZ-CHAVEZ M D C A, et al. Phytobarriers: Plants capture particles containing potentially toxic elements originating from mine tailings in semiarid regions[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 205: 33-42.
- [12] DARY M, CHAMBER-PEREZ M A, PALOMARES A J, et al. “In situ” phytostabilisation of heavy metal polluted soils using *Lupinus luteus* inoculated with metal resistant plant-growth promoting rhizobacteria[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177(1/2/3): 323-330.
- [13] SCHMIDT U. Enhancing phytoextraction: The effect of chemical soil manipulation on mobility, plant accumulation, and leaching of heavy metals[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(6): 1939-1954.
- [14] CAO X. Regulating mine land reclamation in developing countries: The case of China[J]. *Land Use Policy*, 2007, 24(2): 472-483.
- [15] KAHN J R, FRANCESCHI D, CURI A, et al. Economic and financial aspects of mine closure[J]. *Natural Resources Forum*, 2001, 25(4): 265-274.
- [16] BIELECKA M, KRÓL-KORCZAK J. Hybrid expert system aiding design of post-mining regions restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(10): 1232-1241.
- [17] 刘国庆.准格尔旗煤田塌陷地生态修复研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2008. LIU G Q. Research on the eco-rehabilitation modes of coal mine subsidence of Zhunger County coal field[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2008.
- [18] DRIUSSI C, JANSZ J. Pollution minimisation practices in the Australian mining and mineral processing industries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14(8): 673-681.
- [19] 郭利刚.我国煤矿、金属矿损毁土地复垦潜力研究[D].北京:中国地质大学(北京),2011. GUO L G. Study on reclamation potential of destruction land of coal and metal mine in China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [20] BAKR N, WEINDORF D C, BAHNASSY M H, et al. Monitoring land cover changes in a newly reclaimed area of Egypt using multi-temporal Landsat data[J]. *Applied Geography*, 2010, 30(4): 592-605.
- [21] POROS M, SOBCZYK W. Reclamation modes of the post-mining terrains in the Checiny-Kielce area in the context of its use in an active geological education[J]. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 2014, 16: 286-403.
- [22] 王莉,张和生.国内外矿区土地复垦研究进展[J].水土保持研究,2013, 20(1): 294-300. WANG L, ZHANG H S. The research progress of land reclamation in mining area in domestic and abroad[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1): 294-300.
- [23] HE J H, LIU Y L, YU Y, et al. A counterfactual scenario simulation approach for assessing the impact of farmland preservation policies on urban sprawl and food security in a major grain-producing area of China[J]. *Applied Geography*, 2013, 37: 127-138.

- [24] 莫爱, 周耀治, 杨建军. 矿山废弃地土壤基质改良研究的现状、问题及对策[J]. 地球环境学报, 2014, 5(4):292-300. MO A, ZHOU Y Z, YANG J J. Existing situation, problems and countermeasures on amelioration of soil matrix in mining wasteland[J]. *Journal of Earth Environment*, 2014, 5(4):292-300.
- [25] AHIRWAL J, MAITI S K. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal(*Shorea robusta*) forest, India[J]. *Catena*, 2016, 140:155-163.
- [26] 杨博宇, 白中科. 露天煤矿区低碳土地利用途径研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(6):89-93. YANG B Y, BAI Z K. Research on the low-carbon land use in opencast coal mine area[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(6):89-93.
- [27] 付梅臣, 郭卫斌, 李建民, 等. 我国煤矿区低碳型土地复垦现状与展望[J]. 中国矿业, 2015, 24(5):49-52. FU M C, GUO W B, LI J M, et al. Low-carbon land reclamation in China's coal mining areas: Current situation and prospects[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(5):49-52.
- [28] 安英莉, 卞正富, 戴文婷, 等. 煤炭开采形成的碳源/碳汇分析——以徐州贾汪矿区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2):415-422. AN Y L, BIAN Z F, DAI W T, et al. Analysis on the gas carbon source and carbon sink in coal mining: A case study of Jiawang, Xuzhou[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(2):415-422.
- [29] 张黎明, 张绍良, 侯湖平, 等. 矿区土地复垦碳减排效果测度模型与实证分析[J]. 中国矿业, 2015, 24(11):65-70. ZHANG L M, ZHANG S L, HOU H P, et al. Evaluation model and empirical study of carbon emission reduction effect from mining land reclamation[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(11):65-70.
- [30] 杨博宇, 白中科. 碳中和背景下煤矿区土地生态系统碳源/汇研究进展及其减排对策[J]. 中国矿业, 2021, 30(5):1-9. YANG B Y, BAI Z K. Research advances and emission reduction measures in carbon source and sink of land ecosystems in coal mining area under the carbon neutrality[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(5):1-9.
- [31] KIM H, ANDERSON S H, MOTAVALLI P P, et al. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field[J]. *Geoderma*, 2010, 160(2):244-251.
- [32] CAMBI M, CERTINI G, NERI F, et al. The impact of heavy traffic on forest soils: A review[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 338:124-138.
- [33] MUELLER L, SCHINDLER U, MIRSCHEL W, et al. Assessing the productivity function of soils: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(3):601-614.
- [34] SHRESTHA R K, LAL R. Land use impacts on physical properties of 28 years old reclaimed mine soils in Ohio[J]. *Plant and Soil*, 2008, 306(1/2):249-260.
- [35] SHRESTHA R K, LAL R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation[J]. *Geoderma*, 2011, 161(3/4):168-176.
- [36] ZHEN Q, MA W M, LI M M, et al. Effects of vegetation and physico-chemical properties on solute transport in reclaimed soil at an open-cast coal mine site on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2015, 133:403-411.
- [37] ZIPPER C E, BURGER J A, SKOUSEN J G, et al. Restoring forests and associated ecosystem services on Appalachian coal surface mines[J]. *Environmental Management*, 2011, 47(5):751-765.
- [38] MILLER J, BARTON C, AGOURIDIS C, et al. Evaluating soil genesis and reforestation success on a surface coal mine in Appalachia[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(3):950-960.
- [39] SHOWALTER J M, BUEGER J A, ZIPPER C E. Hardwood seedling growth on different mine spoil types with and without topsoil amendment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(2):483-491.
- [40] SHRESTHA R K, LAL R. Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil[J]. *Environment International*, 2006, 32(6):781-796.
- [41] GANJEGUNTE G K, WICK A F, STAHL P D, et al. Accumulation and composition of total organic carbon in reclaimed coal mine lands[J]. *Land Degradation and Development*, 2009, 20(2):156-175.
- [42] LI J J, ZHOU X M, YAN J X, et al. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 87:56-62.
- [43] CLAASSENS S, JANSEN V R P, LIEBENBERG D, et al. A comparison of microbial community function and structure in rehabilitated asbestos and coal discard sites[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(3):1091-1100.
- [44] FILCHEVA E, NOUSTOROVA M, GENTCHEVA-KOSTADINOVA S, et al. Organic accumulation and microbial action in surface coal-mine spoils, Pernik, Bulgaria[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(1):1-15.
- [45] HELINGEROVA M, FROUZ J, ŠANTRUCKOVA H. Microbial activity in reclaimed and unreclaimed post-mining sites near Sokolov (Czech Republic)[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(6):768-776.
- [46] FROUZ J, NOVAKOVA A. Development of soil microbial properties in topsoil layer during spontaneous succession in heaps after brown coal mining in relation to humus microstructure development[J]. *Geoderma*, 2005, 129(1/2):54-64.
- [47] BALDRIAN P, TROGL J, FROUZ J, et al. Enzyme activities and microbial biomass in topsoil layer during spontaneous succession in spoil heaps after brown coal mining[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9):2107-2115.
- [48] 关军洪, 郝培尧, 董丽, 等. 矿山废弃地生态修复研究进展[J]. 生态科学, 2017, 36(2):193-200. GUAN J H, HAO P Y, DONG L, et al. Review on ecological restoration of mine wasteland[J]. *Ecological Science*, 2017, 36(2):193-200.
- [49] PRACH K, WALKER L R. Four opportunities for studies of ecological succession[J]. *Trends in Ecology and Evolution (Amsterdam)*, 2011, 26(3):119-123.
- [50] 白中科, 周伟, 王金满, 等. 再论矿区生态系统恢复重建[J]. 中国土地科学, 2018, 32(11):1-9. BAI Z K, ZHOU W, WANG J M, et al. Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas[J]. *China Land Science*, 2018, 32(11):1-9.
- [51] 胡振琪, 赵艳玲. 矿山生态修复面临的主要问题及解决策略[J]. 中国煤炭, 2021, 47(9):2-7. HU Z Q, ZHAO Y L. Main problems in

- ecological restoration of mines and their solutions[J]. *China Coal*, 2021, 47(9):2-7.
- [52] HOLMES P M, RICHARDSON D M. Protocols for restoration based on recruitment dynamics, community structure, and ecosystem function: Perspectives from South African Fynbos[J]. *Restoration Ecology*, 1999, 7(3), 215-230.
- [53] REDENTE E F, MCLENDON T, AGNEW W. Influence of topsoil depth on plant community dynamics of a seeded site in northwest Colorado[J]. *Arid Soil Research & Rehabilitation*, 1997, 11(2):139-149.
- [54] 张鸿龄, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 矿山废弃地生态修复过程中基质改良与植被重建研究进展[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(2):460-467. ZHANG H L, SUN L N, SUN T H, et al. Substrate amelioration and vegetation reconstruction in ecological remediation of abandoned mines: Research advances[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2):460-467.
- [55] CATALAN L J J, BUSET K C, YIN G H. Reactivity of oxidized sulfidic mine tailings during lime treatment[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(12):2766-2771.
- [56] RUTTENS A, ADRIAENSEN K, MEERS E, et al. Long-term sustainability of metal immobilization by soil amendments: Cyclonic ashes versus lime addition[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5):1428-1434.
- [57] MCGOWEN S L, BASTA N T, BROWN G O. Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2):493-500.
- [58] MORENO F N, ANDERSON C W, STEWART R B, et al. Phytoremediation of mercury-contaminated mine tailings by induced plant-mercury accumulation[J]. *Environmental Practice*, 2004, 6:165e175.
- [59] POURRUT B, LOPAREVA-POHU A, PRUVOT C, et al. Assessment of fly ash-aided phytostabilisation of highly contaminated soils after an 8-year field trial Part 2: Influence on plants.[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(21):4504.
- [60] ALCANTARA H J P, DORONILA A I, NICOLAS M, et al. Growth of selected plant species in biosolids-amended mine tailings[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 80:25-32.
- [61] ASENSIO V, VEGA F A, SINGH B R, et al. Effects of tree vegetation and waste amendments on the fractionation of Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in polluted mine soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 443:446-453.
- [62] FELLET G, MARCHIOL L, DELLE V G, et al. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(9):1262-1267.
- [63] FORJAN R, RODRIGUEZ-VILA A, COVELO E F. Increasing the nutrient content in a mine soil through the application of technosol and biochar and grown with *Brassica juncea* L.[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, 10(1):103-119.
- [64] BOYER S, WRATTEN S D. The potential of earthworms to restore ecosystem services after opencast mining: A review[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2010, 11(3):196-203.
- [65] JANOS P, VAVROVA J, HERZOGOVA L, et al. Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: A sequential extraction study[J]. *Geoderma*, 2010, 159(3/4):335-341.
- [66] LOPAREVA-P A, POURRUT B, WATERLOT C, et al. Assessment of fly ash-aided phytostabilisation of highly contaminated soils after an 8-year field trial[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(3):647-654.
- [67] ZHU Z, YANG X, WANG K, et al. Bioremediation of Cd-DDT co-contaminated soil using the Cd-hyperaccumulator *Sedum alfredii* and DDT-degrading microbes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235/236:144-151.
- [68] WU S C, WONG C C, SHU W S, et al. Mycorrhizo-remediation of lead/zinc mine tailings using vetiver: A field study[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, 13(1):61-74.
- [69] 楼骏. *Massilia* spp. 对菲的降解特性及其生物组学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. LOU J. Biodegradation of phenanthrene by *Massilia* spp. and its omics analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [70] SARWAR N, IMRAN M, SHAHEEN M R, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives[J]. *Chemosphere*, 2017, 171:710-721.
- [71] 苏银萍. 改良剂及肥料对短毛蓼修复 Mn 污染土壤的影响[D]. 桂林: 广西师范大学, 2014. SU Y P. Effects of the amendments and fertilizer on the repair efficiency of *Polygonum pubescens* Blume in Mn contaminated soils[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2014.
- [72] 王静雯, 伍钧, 郑钦月, 等. EDTA 对鱼腥草修复铅锌矿区重金属复合污染土壤的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6):62-66. WANG J W, WU J, ZHENG Q Y, et al. Effect of EDTA on remediation of heavy-metal combined pollution soil in lead-zinc mining area by *Houttuynia cordata* thunb[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6):62-66.
- [73] CAO X F, LIU L P. Using microorganisms to facilitate phytoremediation in mine tailings with multi heavy metals[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1094:437-440.
- [74] LIU M L, WANG C, WANG F Y, et al. Maize (*Zea mays*) growth and nutrient uptake following integrated improvement of vermicompost and humic acid fertilizer on coastal saline soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 142:147-154.
- [75] 候月卿, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭和腐植酸类对猪粪堆肥重金属的钝化效果[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11):205-215. HOU Y Q, ZHAO L X, MENG H B, et al. Passivating effect of biochar and humic acid materials on heavy metals during composting of pig manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(11):205-215.
- [76] PERMINOVA I V, GRECHISHCHEVA N Y, KOVALEVSKI I D V, et al. Quantification and prediction of the detoxifying properties of humic substances related to their chemical binding to polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(19):3841-3848.
- [77] 于学胜. 生物腐植酸对矿区废弃土壤微生物生态重建作用的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013. YU X S. Effects of bioactive humic

- acid on rebuilding of soil microbial ecology in mining wastelands[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [78] 周春海, 张振强, 黄志红, 等. 不同钝化剂对酸性土壤中重金属的钝化修复研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(33): 71-79. ZHOU C H, ZHANG Z Q, HUANG Z H, et al. Passivation and remediation of heavy metals in acid soil with different passivators: A research progress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(33): 71-79.
- [79] 李光炫, 石岸, 张黎明, 等. 不同粒径生物质炭对土壤重金属钝化及细菌群落的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(3): 583-592. LI G X, SHI A, ZHANG L M, et al. Effects of biochar with different particle sizes on soil heavy metal immobilization and bacterial community [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(3): 583-592.
- [80] 杨凯, 王营营, 丁爱中. 生物炭对铅矿区污染土壤修复效果的稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2715-2722. YANG K, WANG Y Y, DING A Z. Stability of biochar-remediated contaminated soil from a lead mine site[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12): 2715-2722.
- [81] 黄占斌, 孙朋成, 钟建, 等. 高分子保水剂在土壤水肥保持和污染治理中的应用进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 125-131. HUANG Z B, SUN P C, ZHONG J, et al. Application of super absorbent polymer in water and fertilizer conversation of soil and pollution management[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(1): 125-131.
- [82] 秦端端, 姚粉霞, 陈亚军, 等. 保水剂对土壤重金属镉形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2327-2333. QIN D D, YAO F X, CHEN Y J, et al. Effect of water-retaining agent on themorphology of Cd in soil and its' bioavailability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2327-2333.
- [83] GUIWEI Q, DE VARINNES A, MARTINS L L, et al. Improvement in soil and sorghum health following the application of polyacrylate polymers to a Cd-contaminated soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1/2/3): 570-575.
- [84] SANTOS E S, ABREU M M, MACIAS F, et al. Improvement of chemical and biological properties of gossan mine wastes following application of amendments and growth of *Cistus ladanifer* L.[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 147: 173-181.
- [85] 黄勇, 罗伟聪, 吴丹妮, 等. 利用微生物肥料进行土壤生态修复治理的研究与分析[J]. 环境科技, 2016, 29(4): 74-78. HUANG Y, LUO W C, WU D N, et al. The study and analysis of microbial fertilizer application in ecological restoration of soil management[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 29(4): 74-78.
- [86] 张建锋. 环境材料与植物对矿区土壤重金属迁移的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019. ZHANG J F. Effects of environmental materials and plants on heavy metal migration in soil of mining areas [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [87] 李晓越, 段淑辉, 周志成, 等. 不同微生物肥对植烟区镉污染土壤的修复效果[J]. 地学前缘, 2018, 25(5): 314-322. LI X Y, DUAN S H, ZHOU Z C, et al. Effect of biofertilizers on the remediation of Cd-polluted soils in tobacco cultivating area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(5): 314-322.
- [88] 张森, 叶长城, 喻理, 等. 矿物硅肥与微生物菌剂对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 627-633. ZHANG M, YE C C, YU L, et al. Effects of mineral silicon fertilizer and microbial agent on uptake and accumulation of cadmium by rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 627-633.
- [89] 杨继飞. 菌肥对铅污染土壤中玉米生物效应的研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2015. YANG J F. Study on biological effect of bacterial manure application of maize varieties in Pb contaminated soil[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2015.
- [90] 周普雄, 严懿, 余震, 等. 生物淋滤联合类Fenton反应去除污染土壤中重金属的效果[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3575-3581. ZHOU P X, YAN X, YU Z, et al. Performance of bioleaching combined with Fenton-like reaction in heavy metals removal from contaminated soil [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9): 3575-3581.