

矿山废弃地生态修复过程中基质改良研究进展

王娜^{1,2,3}, 罗玉虎^{1,2,3}

¹陕西地建 - 西安交大土地工程与人居环境技术创新中心, 陕西 西安

²陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

³自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年2月19日; 录用日期: 2025年3月20日; 发布日期: 2025年5月9日

摘要

矿山废弃地生态修复问题是国民经济可持续发展过程中亟待解决的任务。本文重点分析了矿山废弃地生态修复过程中基质改良, 包括表土覆盖、物理/化学改良、生物改良和固体废弃物人工基质改良技术, 并比较了其优缺点和适用范围, 并对今后矿山废弃地生态修复过程中基质改良发展趋势进行了展望, 以期后续工矿废弃地基质改良工作开展提供依据。

关键词

矿山, 生态修复, 基质土, 改良技术

Research Progress on Substrate Improvement in the Ecological Restoration of Abandoned Mining Areas

Na Wang^{1,2,3}, Yuhu Luo^{1,2,3}

¹Technology Innovation Center for Land Engineering and Human Settlements, Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd and Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

³Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

Received: Feb. 19th, 2025; accepted: Mar. 20th, 2025; published: May 9th, 2025

Abstract

The ecological restoration of abandoned mining areas is a critical issue that must be addressed for

文章引用: 王娜, 罗玉虎. 矿山废弃地生态修复过程中基质改良研究进展[J]. 矿山工程, 2025, 13(3): 444-451.
DOI: 10.12677/me.2025.133049

the sustainable development of the national economy. This paper focuses on the substrate improvement techniques used in the ecological restoration of abandoned mining areas, including topsoil covering, physical/chemical improvement, biological improvement, and artificial substrate improvement using solid waste. The advantages, disadvantages, and applicability of these methods are compared. Furthermore, future trends in substrate improvement for ecological restoration in mining wastelands are discussed to provide a reference for future substrate improvement efforts in abandoned industrial and mining lands.

Keywords

Mining, Ecological Restoration, Substrate Soil, Improvement Technology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

矿山废弃地生态修复是恢复生态功能、改善环境质量、减少矿业开发对自然环境负面影响的重要手段。矿山开采过程中,大量的土地遭到破坏,土壤受到了不同程度的污染,造成了植被退化、水土流失和生物多样性的减少。废弃矿山土地由于矿石开采、堆积废石和尾矿的侵占,通常呈现出土壤贫瘠、结构松散、养分缺乏、酸碱失衡等不良环境特征。这些问题使得矿山废弃地成为生态修复中的一大难题[1]。

基质改良是矿山废弃地生态修复中的关键步骤之一,主要通过改善土壤的物理、化学和生物学特性来增强其对植物生长的支持能力。研究表明,基质改良能够有效地改善土壤结构,提升土壤水分和养分保持能力,提高土壤肥力,为植物生长提供更好的环境[2]。通过施加有机肥料、土壤改良剂、以及绿色植物覆盖等手段,可以显著改善矿山废弃地的土壤条件,为植被恢复提供必要的条件,从而推动生态系统的逐步恢复[3]。基质改良研究不仅为矿山废弃地生态修复提供了科学依据,而且为减少矿山开采对环境的负面影响、提升矿山周边地区的生态功能和可持续发展提供了重要的技术支持[4]。因此,深入探讨和优化矿山废弃地基质改良的策略和方法具有重要的科学意义和应用价值。

2. 矿山废弃地基质改良技术

2.1. 表土覆盖技术

表土覆盖技术是矿山废弃地生态修复中常用且重要的一项土壤改良技术,为植物生长提供更适宜的生长条件。其基本原理是通过覆盖一层天然表土、堆肥、秸秆、木屑等有机物或人工合成材料,改善土壤的结构与理化性质,保持土壤的湿度与温度,减少风蚀、水蚀现象,并为植物的生长提供肥沃的土壤环境[5]。覆盖层不仅能减少暴雨引发的土壤侵蚀,还能保持土壤中的水分,防止水分过快蒸发,维持土壤湿润,改善矿山废弃地的水分平衡[6]。同时,覆盖物逐渐分解后,为土壤增加有机质,促进土壤微生物的繁殖,提高土壤的肥力和生态稳定性[7]。在实施表土覆盖时,选择适当的覆盖材料至关重要。常见的覆盖材料包括天然表土、堆肥、秸秆、木屑、草皮等有机物以及草坪网、土工布等人工合成材料[8]。天然表土由于含有较为丰富的矿物质和有机质,是最理想的选择,可以直接恢复土壤的基本功能。堆肥和秸秆等有机覆盖物在改善土壤肥力的同时,还能增加土壤的保水性,适合用在贫瘠或干旱地区[9]。人工合成材料如土工布、草坪网等则通常用于特殊情况下,能够有效防止水土流失并加速地面修复[10]。

2.2. 物理基质改良技术

矿山废弃地由于长期的开采活动, 土壤通常受到压实、贫瘠、结构松散等问题的困扰, 导致土壤的透水性差、通气性差、水分保持能力低, 从而不利于植物的生长。因此, 物理基质改良技术在矿山废弃地生态修复中起到了至关重要的作用。该技术通过改善土壤的物理结构、提高土壤的水分保持能力、改善空气流通性, 创造更有利的环境条件, 促进植被的恢复。

2.2.1. 土壤松动与深翻技术

矿山废弃地常由于矿石开采或重型机械的作业造成土壤的压实, 土壤表面和深层往往形成硬盘或紧实层, 这种情况使得水分和空气难以渗透, 植物根系难以扎根。深翻技术通过使用耕作机械对土壤进行垂直翻动, 打破土壤中的压实层和硬盘, 从而改善土壤的通气性和透水性[11]。此外, 深翻还能够增加土壤的有效根系生长空间, 为植物提供更好的生长环境。松土的过程中, 土壤的结构得以疏松, 减少了土壤板结现象, 同时也为土壤中矿物质的风化提供了条件, 有助于植物更好地吸收养分。

2.2.2. 添加改良材料

矿山废弃地的土壤往往因矿物质的缺失、养分的不足而不适合植物生长。通过添加改良材料, 可以有效地改善土壤的物理性质, 提高其生物活性[12]。常见的改良材料包括沙土、珍珠岩、蛭石等, 能够改善土壤的透气性、排水性和结构稳定性。特别是在黏性土壤中, 添加沙土可以增加土壤的颗粒间隙, 减少水分滞留, 改善水分的渗透性和流动性。而珍珠岩和蛭石则通过其较强的吸水性和通气性, 提高了土壤的水分保持能力和空气交换能力[13]。通过这种方式, 可以有效改善矿山废弃地土壤的物理环境, 使其更适合植物的生长。

2.2.3. 生物炭应用

生物炭是一种由植物或其他有机物质通过热解处理制成的多孔结构碳材料。它的加入能够显著改善土壤的物理性质, 尤其是在改善土壤的孔隙度、提高土壤的水分保持能力和通气性方面具有显著效果。生物炭具有非常高的比表面积, 能够有效地提高土壤的透气性, 减少水分蒸发, 并增强土壤的保水能力。特别是在干旱或半干旱地区, 生物炭通过吸附和保持水分, 有助于减少矿山废弃地的水分流失[13]。此外, 生物炭还能促进土壤微生物的繁殖, 提升土壤生物活性, 进一步改善土壤质量。

1) 生物炭对土壤微生物群落的影响

促进土壤微生物的多样性: 生物炭的应用可通过提供微生物生长所需的有机质、改变土壤的物理化学性质(如 pH、孔隙度、氮、磷等养分的可用性)以及改善土壤的湿润性, 间接或直接促进土壤微生物的多样性和数量。研究表明, 适量添加生物炭后, 土壤中的细菌、真菌、放线菌等微生物群落的多样性会显著增加, 尤其是在贫瘠土壤和施用有机肥的土壤中。

(1) 微生物群落结构的改变: 生物炭能够通过改变土壤环境条件, 如 pH、孔隙度、氧气浓度等, 影响微生物群落的结构。例如, 生物炭的施用可能促进嗜酸性或嗜碱性微生物的生长, 或对某些特定功能菌群(如固氮菌、解磷菌)的富集有积极作用。此外, 生物炭表面的微孔结构为微生物提供了栖息的空间, 有助于形成微生物共生群落。

(2) 影响土壤微生物的功能: 生物炭的施用不仅能够增加微生物的多样性, 还可能增强土壤微生物的某些功能性特征。例如, 研究发现施用生物炭的土壤中, 微生物的有机质分解、氮循环和磷循环等过程可能会更加活跃, 这些过程有助于提升土壤的营养供应能力。

(3) 与土壤污染的修复作用: 生物炭还能够帮助修复一些污染土壤中的微生物群落。例如, 生物炭通过改善土壤的 pH 和重金属的吸附作用, 可以减少土壤中有害物质对微生物的毒害作用, 从而促进有益

微生物的生长。

2) 不同生物炭类型对微生物群落的差异性

不同原料来源的生物炭具有不同的物理化学性质, 这些差异会对土壤微生物群落产生不同的影响。主要差异体现在以下几个方面:

(1) 原料来源: 生物炭的来源材料对其性质有显著影响。木材、秸秆、动物粪便、城市垃圾等原料制成的生物炭, 在表面结构、孔隙度、养分含量以及吸附能力等方面存在差异。木材生物炭通常具有较多的微孔结构和较低的养分释放速率, 而秸秆和有机废弃物的生物炭则可能含有更多的植物营养元素, 适合提高土壤的肥力。

(2) 热解温度: 生物炭的热解温度对其表面结构、化学性质和生物降解性有显著影响。较低的热解温度(如 300~400℃)制成的生物炭, 具有较高的表面积和活性官能团, 有助于提高微生物活性和多样性。较高的热解温度(如 700~900℃)则使生物炭更为稳定, 但其表面结构较为致密, 可能对微生物的适应性产生负面影响, 甚至降低微生物多样性。

(3) 表面官能团的差异: 生物炭的表面官能团如羧基、羟基等可以影响微生物的附着和生长。不同原料和热解条件下的生物炭会表现出不同的表面官能团分布, 进而影响微生物的聚集方式及其代谢活动。例如, 富含羧基和酚基官能团的生物炭可能有助于某些特定类型微生物的生长, 如解磷菌和固氮菌。

(4) 生物炭添加量的差异: 生物炭的施用量对土壤微生物群落的影响也存在差异。过量施用生物炭可能会导致土壤过于干燥或富含碱性物质, 从而抑制某些微生物群体的生长; 而适量添加则有助于提升微生物活性和多样性, 尤其是在贫瘠的土壤中。

2.2.4. 固体废料与矿渣利用

在矿山废弃地的修复过程中, 固体废料(如煤矸石、矿渣等)和其他工业副产品的利用, 作为一种物理基质改良措施, 近年来受到了广泛关注。通过将矿渣、煤矸石等物料均匀混入土壤中, 可以增加土壤的结构稳定性和水分保持能力。矿渣和煤矸石中的矿物成分, 如硅、铝、钙等元素, 能够补充土壤中的营养成分, 同时提高土壤的通气性和透水性。此外, 这些废料的加入还能够通过物理方式对土壤进行调节, 改善土壤的持水性和排水性, 防止水分积涝[14]。

2.3. 化学基质改良技术

2.3.1. 石灰及其他碱性物质的应用

在许多矿山废弃地, 尤其是金属矿区, 由于矿石的氧化作用和开采过程中的废料堆积, 土壤常常呈现酸化现象。这种酸性土壤不利于植物的生长, 因为大多数植物难以在酸性环境中吸收必需的营养元素。通过施用石灰(如生石灰、熟石灰)或其他碱性材料(如碳酸钙、石膏等), 可以有效提高土壤 pH 值, 调节土壤酸碱度。石灰通过中和土壤中的酸性成分, 能够释放出有利于植物生长的矿物质, 如钙、镁、磷等。研究表明, 施用石灰能显著改善土壤的结构, 提高土壤的养分供应能力, 增强植物对水分和养分的吸收能力, 从而促进植物的生长和恢复[15]。

2.3.2. 施用有机/无机肥料与堆肥

矿山废弃地的土壤通常缺乏有机质和养分, 因此施用有机肥料或堆肥是化学基质改良技术中的重要环节。堆肥和有机肥料富含植物生长所需的多种元素, 如氮、磷、钾等, 同时还能增加土壤有机质, 提高土壤的肥力。有机肥料的施用不仅能够补充土壤养分, 还能改善土壤的水分保持能力, 增强土壤的结构稳定性。特别是在贫瘠的矿山废弃地, 堆肥的使用可以显著增加土壤的生物活性, 促进土壤微生物的生长与繁殖, 进而改善土壤的生态环境。通过施用有机肥料, 还可以提高土壤的持水性, 减少水分蒸发,

为植物提供更加适宜的生长环境[16]。

2.3.3. 重金属污染的控制与修复

矿山开采过程中, 尤其是金属矿区的开采, 常伴随着重金属污染的发生。废弃矿山土地的土壤积累了大量的重金属元素, 如铅、镉、铜、锌等, 这些重金属不仅对植物有毒害作用, 还可能通过食物链影响生态系统的健康。化学基质改良技术通过使用螯合剂、吸附剂和稳定剂等方法, 有效降低土壤中重金属的生物可利用性, 从而减少其对植物的抑制作用。例如, 螯合剂(如 EDTA)可以与土壤中的重金属离子结合, 形成不易被植物吸收的复合物, 从而降低重金属的毒性[17]。另一方面, 施用有机质、膨润土等吸附剂也可以固定土壤中的重金属, 防止其扩散和生物富集。重金属污染土壤的修复不仅有助于提高植物的生长潜力, 还有助于恢复矿山废弃地的生态功能。

2.3.4. 微量元素的补充与调节

在矿山废弃地的土壤中, 除了一些主要养分元素外, 微量元素(如铁、锰、锌、铜等)的缺乏也会影响植物的生长。矿山开采过程中, 由于土壤的贫瘠性和矿物质的流失, 土壤中的微量元素往往处于缺乏状态。通过施用微量元素肥料, 可以有效弥补这些元素的缺乏, 提高植物的生长性能。微量元素不仅对植物的生长至关重要, 还参与植物体内的酶反应和光合作用[18]。施用适量的微量元素能够促进植物的正常生长, 增强其抗病性和抗逆性, 从而促进矿山废弃地的生态恢复。

2.4. 生物改良技术

在矿山土壤改良的研究中, 蚯蚓被广泛应用于改善土壤结构、修复重金属污染、促进有机物降解以及养分循环等方面。许多研究表明, 蚯蚓通过其生物学活动对矿山废弃地的土壤修复发挥了显著作用。有研究表明, 蚯蚓通过其掘土和排泄活动改善土壤的物理结构, 增加土壤孔隙度和水分渗透性, 从而提高土壤的通气性和通透性。蚯蚓在土壤中形成的通道可以促进空气和水分的流动, 改善植物根系的生长条件[19]。此外, 蚯蚓的排泄物富含有机质和养分, 能够促进土壤肥力的恢复[20]。在重金属污染修复方面, 蚯蚓表现出较强的重金属吸附能力。研究表明, 蚯蚓可以通过其消化系统吸收和积累土壤中的重金属, 尤其是铅、镉、铜和锌等污染物。蚯蚓通过其代谢过程将这些重金属转化为非生物活跃的形式, 减少重金属的生物可利用性, 从而降低其对植物和生态系统的危害[21]。蚯蚓的粪便还具有较强的重金属吸附能力, 可以作为土壤改良剂使用, 进一步减少污染物在土壤中的迁移性[22]。此外, 蚯蚓在有机污染物的降解方面也发挥了重要作用。蚯蚓通过消化土壤中的有机残留物和污染物, 促进有机物的矿化和转化, 提高土壤的养分可利用性。这一过程不仅改善了土壤的肥力, 还为植物提供了必要的生长条件[23]。研究表明, 蚯蚓通过分解植物残体和有机废弃物, 有助于提高土壤的有机碳含量, 改善土壤的营养结构[24]。尽管蚯蚓在矿山土壤改良中具有显著优势, 但其修复效果仍受到环境条件(如土壤酸碱度、污染物浓度等)的限制。为确保蚯蚓在矿山废弃地的有效修复, 未来的研究应关注蚯蚓种类的选择、环境适应性及其与其他修复技术的协同作用[25]。

2.5. 固体废弃物人工基质改良技术

固体废弃物人工基质改良技术在矿山土壤改良中的应用研究近年来得到了广泛关注。矿山废弃地通常存在土壤贫瘠、重金属污染、酸化等问题, 采用固体废弃物作为基质改良材料, 不仅能有效改善矿山土壤的理化性质, 还能帮助减少固体废弃物对环境的污染, 具有较高的经济和环境效益。固体废弃物人工基质改良技术主要是通过将工业废渣、城市固体废弃物、农业废弃物等作为改良材料, 优化土壤结构、改善土壤养分含量, 促进植物生长。有研究表明, 工业废渣作为一种有效的改良剂, 能够有效改善矿山废弃地的土壤质量。以钢渣、煤灰、矿渣等为代表的工业废渣, 具有较强的中和酸性土壤的作用, 能够

提高土壤的 pH 值, 改善土壤的酸碱度[26]。此外, 钢渣等废渣富含钙、镁、硅等元素, 可以补充土壤中的重要营养成分, 促进植物的生长。适量的钢渣添加能显著提高矿山废弃地土壤的养分含量, 并促进植物根系的发育[27]。其次, 城市固体废弃物(如垃圾渗滤液污泥、餐厨垃圾、废弃物堆肥等)也被广泛研究作为矿山土壤改良的材料。研究表明, 将城市垃圾渗滤液污泥与矿山废弃地土壤混合, 有助于提高土壤的微生物活性和有机碳含量, 从而促进植物的生长[28]。农业废弃物, 如秸秆、稻壳、畜禽粪便等, 作为土壤改良材料, 在矿山废弃地修复中的应用逐渐得到重视。研究表明, 秸秆等有机废弃物的加入可以增加土壤的有机质含量, 改善土壤的理化性质, 尤其是提高土壤的保水性和通气性[29]。此外, 畜禽粪便富含氮、磷、钾等营养元素, 通过堆肥处理后施入矿山土壤中, 有助于改善土壤肥力, 促进植物的生长。农业废弃物的利用不仅解决了废弃物处理的问题, 还可以减少矿山土壤的污染和退化。近年来, 固体废弃物综合利用技术逐渐成为矿山土壤改良的重要手段。通过将多种废弃物进行联合处理, 如工业废渣与农业废弃物、城市垃圾与矿渣的混合, 能够达到更好的土壤改良效果。例如, 周丽华等[30]研究发现, 将钢渣与秸秆堆肥混合应用于矿山废弃地, 能够有效改善土壤的酸碱性, 提升土壤肥力, 并促进植物的生长。这种固体废弃物的综合利用方式, 不仅能够提高矿山废弃地的土壤质量, 还能够实现废弃物的资源化利用, 达到环境保护和资源节约的双重目标。

3) 各项技术的比较

以下是表土覆盖技术、物理基质改良技术、化学基质改良技术、生物改良技术与固体废弃人工基质改良技术在矿山土壤改良中的优缺点与适用范围的比较表(表 1)。

Table 1. Advantages, disadvantages, and applicability of various techniques in mining soil improvement
表 1. 各项技术在矿山土壤改良中优缺点和适用范围

技术类型	优点	缺点	适用范围
表土覆盖技术	(1)快速改善土壤质量, 恢复土壤结构; (2)能有效防止水土流失; (3)改善土壤温湿度条件, 促进植物生长。	(1)需要较大的表土资源; (2)适用范围有限, 无法应用于所有矿山废弃地; (3)对原土壤要求较高。	主要适用于土壤已具一定肥力、结构尚可的矿山废弃地; 适用于坡度较小、环境条件较为适宜的地区。
物理基质改良技术	(1)改善土壤物理性质, 增加土壤通气性与水分保持能力; (2)增强土壤结构, 有助于植物根系生长。	(1)对土壤肥力的改善有限; (2)长期效果可能不显著; (3)技术应用成本较高。	适用于土壤结构差、缺乏透水性和通气性的矿山废弃地; 适用于大面积、贫瘠的矿山废弃地。
化学基质改良技术	(1)快速调整土壤酸碱度, 修复土壤化学性质; (2)通过添加矿物质改良剂补充养分, 提高土壤肥力。	(1)可能导致土壤重金属积累; (2)改良效果可能随时间衰退; (3)一些化学改良剂对环境有潜在风险。	适用于酸性土壤、缺乏矿物质的矿山废弃地; 适用于需要快速调整土壤化学性质的矿山废弃地。
生物改良技术	(1)通过生物活动改善土壤结构和肥力; (2)可促进土壤生态系统恢复, 减少化学污染; (3)长期效果较为稳定。	(1)需要较长的时间才能见效; (2)对生物种群的选择要求较高; (3)可能受环境变化影响。	适用于长期修复, 特别是需要恢复生态系统和生物多样性的矿山废弃地; 适用于生物资源丰富的地区。
固体废弃物人工基质改良技术	(1)资源化利用固体废弃物, 减少环境污染; (2)改善土壤物理、化学及生物性质; (3)成本较低, 易于获取。	(1)固体废弃物种类多样, 需根据土壤特性选择合适材料; (2)可能带来新的污染源; (3)需要较大的处理和管理工作。	适用于各种矿山废弃地, 尤其是那些需要快速恢复土壤肥力或解决污染问题的区域; 适用于废弃物处理设施较为完善的地区。

3. 展望

在矿山废弃地的生态修复过程中, 基质改良技术作为重要的修复手段, 已取得显著的研究进展。然而, 随着修复需求的多样化和复杂化, 基质改良的研究仍然面临许多挑战, 未来的研究方向应更加注重技术的综合性、绿色环保性以及经济可行性。

(1) 基质改良技术的集成与综合应用将是未来研究的重要方向。目前, 大多数矿山废弃地修复依赖于单一的基质改良技术, 尽管在某些情况下取得了一定的效果, 但单一技术的局限性逐渐显现。未来的研究应探索不同基质改良技术的组合应用, 采用物理、化学、生态和微生物等多种修复手段的协同作用, 以实现更加长效和全面的修复效果。

(2) 新型修复材料与技术的开发是矿山废弃地基质改良领域的研究热点。当前, 许多矿山废弃地面临着高盐、高酸或重金属污染等问题, 传统的修复材料如石灰、钢渣等可能存在一定的环境风险, 且修复效果有限。因此, 未来应着重研发新型环保、低成本的基质改良材料, 如利用农业废弃物、工业副产品以及天然矿物等资源, 探索其在矿山土壤修复中的潜力。此外, 智能化修复技术的引入也值得关注, 随着大数据和传感技术的发展, 未来有望实现土壤改良的实时监测与精确调控, 进一步提高修复效率和精确性。

(3) 绿色环保性和可持续性是基质改良技术未来发展的核心。在矿山废弃地的修复过程中, 如何减少修复过程中的二次污染、提高修复技术的环境友好性, 是研究的关键之一。绿色修复技术不仅能有效改善土壤质量, 还能够保护和恢复土壤生态系统, 避免过度依赖化学药剂或高能耗设备。此外, 资源化利用也是未来矿山废弃地基质改良的重要方向, 如何通过废弃物的循环利用实现矿山生态修复和资源的再利用, 将对生态修复的可持续性产生积极影响。

(4) 随着修复技术的不断进步, 修复效果的长期评估和反馈机制也应逐步完善。未来的研究应更多关注修复后土壤和植被的长期稳定性及其生态系统功能恢复的效果, 避免短期内效果明显但长期效果不持久的问题。通过建立科学的评估体系, 能够对不同修复技术的效果进行准确的评估, 进而优化修复方案。

基金项目

陕西省科学技术协会青年人才托举计划项目(20240517), 陕西地建-西安交大土地工程与人居环境技术创新中心开放基金项目(2024WHZ0244), 陕西省土地工程建设集团有限责任公司内部科研项目(2024DJNY-25)。

参考文献

- [1] 陈艳萍. 矿山废弃地生态修复的现状与挑战[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 561-567.
- [2] 赵强. 矿山废弃地土壤改良技术的研究进展[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 134-141.
- [3] 王志坚. 矿山废弃地生态修复中基质改良的应用研究[J]. 矿业工程, 2016, 41(7): 210-215.
- [4] 李华. 矿山废弃地生态修复的技术路径与发展趋势[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(3): 10-15.
- [5] 王建华. 表土覆盖技术在矿山废弃地修复中的应用研究[J]. 矿业环境与技术, 2013, 25(6): 123-128.
- [6] 李浩. 矿山废弃地土壤修复中的表土覆盖技术应用与效果分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 789-795.
- [7] 张鹏程. 表土覆盖对矿山废弃地土壤改良效果的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 33(4): 462-468.
- [8] 刘伟. 矿山废弃地修复中的表土覆盖材料研究进展[J]. 生态修复技术, 2016, 18(2): 92-98.
- [9] 王涛. 堆肥和秸秆在矿山废弃地土壤修复中的应用[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(3): 53-58.
- [10] 赵芳. 人工合成材料在矿山废弃地修复中的应用研究[J]. 土壤与环境, 2018, 34(7): 750-755.
- [11] Li, J. and Zhang, J. (2020) Application of Physical and Chemical Soil Amendments in Ecological Restoration of Mine

- Wasteland. *Journal of Environmental Management*, **270**, Article 110935.
- [12] Zhang, W. and Yu, Y. (2019) Effects of Soil Amendments and Physical Treatments on Soil Fertility and Plant Growth in Mined Lands. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 21725-21734.
 - [13] Khan, S. and Zhang, W. (2018) Application of Biochar in Soil Improvement and Environmental Remediation. *Journal of Soil and Sediments*, **18**, 3412-3421.
 - [14] Pardo, T. and García-González, M.T. (2017) The Role of Soil Physical and Chemical Amendments in the Restoration of Mining Areas. *Ecological Engineering*, **106**, 325-333.
 - [15] Zhang, X. and Li, Z. (2021) Soil Chemical Amendments in Ecological Restoration of Mine Tailings: A Review. *Ecological Engineering*, **160**, Article 106126.
 - [16] Liu, Y. and Li, Z. (2020) Effect of Organic and Inorganic Fertilizers on Soil Fertility and Plant Growth in Mining Wasteland. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 12934-12944.
 - [17] Chen, S. and Yang, X. (2019) Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils in Mining Areas Using Chemical Amendments and Organic Materials. *Science of the Total Environment*, **653**, 717-728.
 - [18] Xie, J. and Liu, D. (2018) Application of Lime and Other Amendments for Soil pH Adjustment and Nutrient Enhancement in Mining Areas. *Environmental Pollution*, **235**, 32-42.
 - [19] Barois, I. (2014) Effects of Earthworms on Soil Structure and Plant Growth. *Soil Biology and Biochemistry*, **74**, 7-16.
 - [20] Edwards, C.A. and Bohlen, P.J. (1996) Biological Control of Soil Pests. *The Biology of Earthworms*. Chapman and Hall.
 - [21] Singh, S. (2013) Earthworm-Mediated Reduction of Heavy Metal Contamination in Polluted Soil. *Environmental Science and Pollution Research*, **20**, 4487-4495.
 - [22] Krishna, K. and Suthar, S. (2008) Role of Earthworms in Bioremediation of Heavy Metal Contaminated Soils. *Waste Management*, **28**, 2136-2141.
 - [23] Bai, L. (2012) Effect of Earthworms on Soil Nutrients and Organic Matter in Contaminated Sites. *Ecotoxicology*, **21**, 22-29.
 - [24] Gunn, A.R. (2000) Earthworm Activities and Their Influence on Soil Physical Properties. *Pedobiologia*, **44**, 376-387.
 - [25] Wang, J. (2014) Effect of Earthworms on Remediation of Contaminated Soils. *Environmental Pollution*, **189**, 161-171.
 - [26] 李忠, 王芳, 孙雪飞. 钢渣和煤灰对矿山废弃地土壤改良效果的研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 251-258.
 - [27] 周志伟, 刘红波, 张丽娟. 矿渣对矿山废弃地土壤的改良效果及应用研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 532-538.
 - [28] 李宇航, 高丽萍, 张培. 城市垃圾渗滤液污泥对矿山废弃地土壤的改良作用[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(7): 625-631.
 - [29] 陈振明, 王瑾, 李建波. 农业废弃物对矿山废弃地土壤结构和植物生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 891-898.
 - [30] 周丽华, 孙朝伟, 胡杨. 钢渣与秸秆堆肥联合施用对矿山废弃地的土壤改良效应[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 711-718.