

接菌对煤矸石重构土层结构的水盐分布及苜蓿生长的影响

刘庚辰, 柯增鸣, 毕银丽

Effect of inoculation on water and salt distribution and alfalfa growth of coal gangue reconstructed layer

LIU Gengchen, KE Zengming, and BI Yinli

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202412002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江经济带江苏段废弃露天矿山分布与生态修复遥感调查研究

Distribution and ecological restoration of abandoned open-pit mines in Jiangsu section of the Yangtze River Economic Belt

李丽, 杨金中, 陈栋, 于航, 邢宇, 汪洁 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 183-190

基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土生态修复试验研究

An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite-based materials

喻永祥, 郝社锋, 蒋波, 刘瑾, 李明, 李伟, 宋泽卓 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 174-181

平朔露天煤矿复垦区不同地质层组岩土质量综合评价

Comprehensive evaluation of rock and soil quality of different geological stratum groups in Pingshuo opencast coal mine reclamation area

崔潇, 周妍如, 刘孝阳, 白中科 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 164-173

双聚材料改良黄土持水性及生态效应研究

A study of water retention and ecological effects of loess improved by double polymers

朱利君, 裴向军, 张晓超, 任童, 杨晴雯 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 158-166

基于四参数随机生长法重构土体的格子玻尔兹曼微观渗流研究

Lattice Boltzmann meso-seepage research of reconstructed soil based on the quartet structure generation set

蔡沛辰, 阙云, 蒋振梁, 杨鹏飞 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 33-42

改性糯米灰浆的室内研究及在九寨沟钙华地质裂缝修复中的应用

A laboratory study of modified glutinous rice mortar and its application to repair travertine geological cracks in Jiuzhaigou

范明明, 裴向军, 杜杰, 肖维阳, 周立宏, 杨华阳 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 183-190



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202412002

刘庚辰, 柯增鸣, 毕银丽. 接菌对煤矸石重构土层结构的水盐分布及苜蓿生长的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 50-61.

LIU Gengchen, KE Zengming, BI Yinli. Effect of inoculation on water and salt distribution and alfalfa growth of coal gangue reconstructed layer[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 50-61.

接菌对煤矸石重构土层结构的水盐分布及 苜蓿生长的影响

刘庚辰¹, 柯增鸣¹, 毕银丽^{1,2}

(1. 西安科技大学西部矿山生态环境修复研究院, 陕西 西安 710054;
2. 中国矿业大学(北京)矿山生态修复研究院, 北京 100083)

摘要: 西部露天煤矿区排土场生态修复面临水资源严重匮乏的制约, 三层(生态层-涵水层-隔水层)海绵结构能够起到涵养水分促进植物生长的作用, 同时也存在持续浇灌咸水导致土壤盐碱化的风险。煤矸石作为煤炭开采产生的主要伴生固废, 可资源化利用作为充填材料来改变复合材料的结构与性能, 但将煤矸石作为三层海绵结构材料并联合微生物复垦盐碱化土壤的潜力尚不清楚。研究旨在探究三层海绵结构中不同涵水层材料(沙土、煤矸石)与接种丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)对土壤水盐分布及苜蓿生长的影响, 采用室内模拟土柱试验方法, 试验设置 4 组处理, 分别为沙土涵水层未接菌(S-CK)、煤矸石涵水层未接菌(C-CK)、沙土涵水层接种 AMF(S-AM)与煤矸石涵水层接种 AMF(C-AM)。研究结果表明: (1)相较于 S-CK 处理, C-CK 处理使表层土盐度降低了 31.5%, 使苜蓿地上部生物量增加了 49.6%、地下部生物量增加了 38.3%; (2)相较于 C-CK 处理, C-AM 处理使苜蓿地上部生物量增加了 3.8 倍、地下部生物量增加 2.5 倍, 使表层土盐度提高了 24.7%, AMF 促进了 20~40 cm 土层粗根系的发育; (3)煤矸石涵水层与接种 AMF 的协同作用, 使生态层土壤含水率增加了 16.5%, 表层土盐度降低了 14.5%, 地上部生物量增加了 4.1 倍, 地下部生物量增加了 4.7 倍。综合研究表明, 煤矸石涵水层与接种 AMF 相结合可以营造适生的土壤水盐环境, 有效降低土壤盐碱化风险。研究结果可为西部地区露天矿排土场生态修复与重建提供科学依据与技术支持。

关键词: 重构土层; 丛枝菌根真菌; 生态修复; 水盐运移; 苜蓿

中图分类号: TD167

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0050-12

Effect of inoculation on water and salt distribution and alfalfa growth of coal gangue reconstructed layer

LIU Gengchen¹, KE Zengming¹, BI Yinli^{1,2}

(1. Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Area of West China, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Institute of Mine Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In the arid and semi-arid regions of western China, water scarcity and soil salinization pose significant

收稿日期: 2024-12-01; 修订日期: 2025-03-24

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(52394195); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52404187); 国家重点研发计划项目(2022YFF1303304); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0588)

第一作者: 刘庚辰(2000—), 男, 硕士, 主要从事矿区微生物复垦研究工作。E-mail: liugengc@163.com

通讯作者: 毕银丽(1971—), 女, 博士, 教授, 主要从事矿区微生物复垦研究工作。E-mail: ylbi88@126.com

constraints. These areas are also the primary sites for coal mining, where large amounts of coal gangue are generated during extraction occupying vast land resources, further exacerbating ecological degradation. Soil layer reconstruction and microbial remediation technologies are critical approaches for ecological restoration in mining dumps. However, the potential of coal gangue as a reconstructed soil layer material and its combined effects with microbial remediation remain unclear. This study investigated the impacts of different culvert layer materials (sandy soil and coal gangue) and Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on soil water-salt distribution and alfalfa growth within a three-layer sponge structure (ecological layer-culvert layer - waterproof layer). Indoor soil column experiments were conducted with four treatments: sandy culvert layer without inoculation (S-CK), coal gangue culvert layer without inoculation (C-CK), sandy culvert layer with AMF inoculation (S-AM), and coal gangue culvert layer with AMF inoculation (C-AM), each with three replicates. Compared to the S-CK treatment, the C-CK treatment reduces surface soil salinity by 31.5%, while increasing alfalfa aboveground and belowground biomass by 49.6% and 38.3%, respectively. (2) Compared to the C-CK treatment, the C-AM treatment enhances aboveground and belowground biomass by 3.8-fold and 2.5-fold, respectively, but increased surface soil salt accumulation by 24.7%. AMF inoculation also promotes the development of coarse roots in the 20–40 cm soil layer. (3) The synergistic combination of coal gangue culvert layer and AMF inoculation increased soil moisture content in the ecological layer by 16.5%, reduces surface soil salinity by 14.5%, and elevates aboveground and belowground biomass by 4.1-fold and 4.7-fold, respectively. These findings demonstrate that the integration of coal gangue as a culvert layer with AMF inoculation creates a favorable soil water-salt environment, offering an effective strategy for mitigating salinization and promoting ecological restoration of open-pit mining dumps in western China.

Keywords: reconstruction of soil layer; Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); ecological restoration; water and salt transport; alfalfa

露天煤矿开采需剥离覆盖煤炭层的表土, 导致地表生态环境受到严重破坏^[1], 堆积形成的排土场土壤结构差、地表裸露、风蚀严重, 地表蒸发强度高, 导致土壤水分含量低^[2], 土壤肥力质量差^[3]。土层重构是排土场植被复垦的一种重要手段^[4-5], 研究发现人为构建具有层序的土壤会加速生态演替^[6]。毕银丽等^[7]提出了一种适合西部矿区排土场的海绵三层(生态层-涵水层-隔水层)结构, 生态层作为植物根区生长的主要层位, 通过涵水层涵蓄灌溉水与大气降水供给土壤微生物及植物修复, 隔水层用来隔绝水分向下渗透流失。干旱区排土场生态修复由于缺水通常需要浇灌矿井咸水来满足复垦植物正常的生命活动, 随着灌溉量与频次增加, 大量盐分累积在土壤层中, 涵水层中的含盐水通过毛管孔隙运移至植物根区^[8], 造成植物水分吸收困难, 影响其渗透调节能力。排土场重构土层次生盐碱化的问题亟需解决。

煤矸石作为矿区的一种固体废弃物, 其堆放占用了大量的土地资源^[9-10], 如何将煤矸石进行资源化利用是矿区生态治理的重要问题^[11]。煤矸石作为充填材料

可以改变复合材料的结构与性能^[12-13], 粒状煤矸石与砾石形态相似, 并且含有多种植物生长需要的矿物元素^[14], 将煤矸石作为涵水层的基质材料, 对煤矸石进行粒径分级来进行资源化利用, 在固废资源化利用的同时也可能有效改善排土场土壤水盐环境^[15]。前人对于不同层状土壤做了较多的研究^[16-17], 发现不同质地的层状土壤会显著影响土壤水盐运移^[18], 进而对植物的生长产生影响。研究表明细质地土覆盖粗质地土会导致上层土壤储水量在渗透过程中增加^[19], Chen 等^[20]通过水文模型模拟的研究结果发现粗质土层的土壤含水率小于临界值时有利于根区储水, 而含水率大于临界值有利于盐淋失。然而, 目前关于煤矸石作为重构土层涵水层对水盐运移规律及植物生长的影响机制尚不明确。为此, 假设采用粗颗粒结构的煤矸石构建涵水层, 可通过增强土壤孔隙连通性提升生态层持水能力, 同时凭借其物理阻隔效应抑制深层盐分向上表聚。

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)在促进植物吸收土壤水分方面发挥着重要作用^[21-22],

通常归因于间接机制,即通过改善土壤保水性能和调节根系水力传导率来帮助根系吸收更多的水分^[23],产生的菌丝网络能够填补土壤颗粒间的孔隙,将根部无法获得的水分带给植物^[24],并且可以将水通过菌丝的胞外途径直接输送到植物中^[25]。此外,研究表明丛枝菌根真菌可以提高植物对重构土层内深部土壤水的吸收利用^[26-27],从而造成不同土层产生水势梯度差异,驱动土壤水盐运移和再分布。基于此,本研究将粗颗粒煤矸石构建的涵水层结构与 AMF 生物调控技术相结合,煤矸石涵水层通过优化孔隙结构实现水分空间再分配,而 AMF 菌丝网络则通过增强植物水分获取能力与调控土壤水势梯度,二者协同调控排土场重构土层土壤水盐分布特征。

由于煤矸石作为三层海绵结构材料并联合微生物复垦的潜力尚不清楚,本文通过室内模拟土柱试验,探究接种 AMF 下煤矸石作为涵水层对生态层土壤水盐运移及植物生长的影响,并阐明二者协同对土壤水盐的联合驱运机制。

1 研究区概况

研究区为 2018 年建成的新疆红沙泉露天煤矿排土场微生物复垦试验示范基地(图 1),属于干旱半干旱区,大陆干旱荒漠气候,年均降水量 173 mm,年均蒸发量 2 145 mm。目前排土场排土面积已达 6 600 m² 以上,排土场土壤 pH 范围在 8~10。矿井水平均可溶性盐质量浓度为 2 673.2 mg/L,排土场土壤可溶性盐质量分数为 0.2%~0.4%,属于轻度盐碱土壤,以 Na⁺、Ca²⁺、

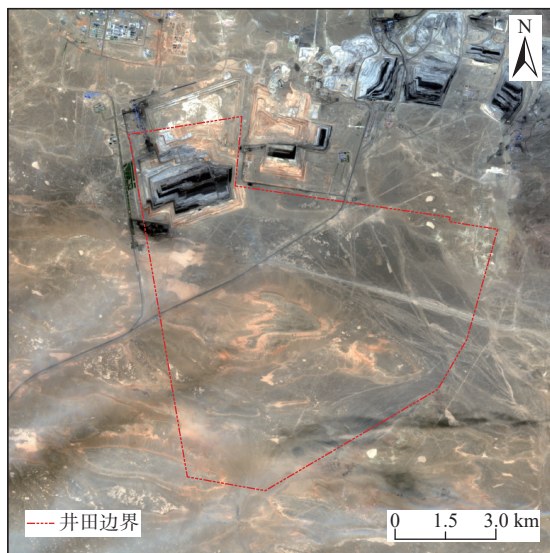


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

SO₄²⁻、Cl⁻为主,分别占可溶性盐质量含量的 24.8%、8.8%、34.3% 和 13.3%。排土场构建的传统三层结构分别为 50 cm 富有机质土壤的生态层、20 cm 沙土涵水层与 30 cm 红黏土隔水层(图 2)。

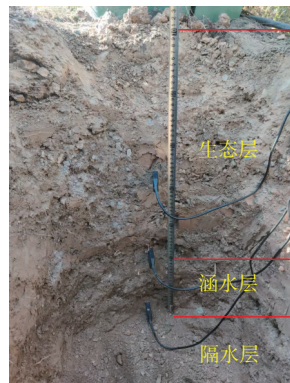


图 2 三层结构剖面图

Fig. 2 Three-layer structure profile

2 材料与方法

2.1 供试材料

供试植物为紫花苜蓿,供试菌剂为 AMF 中的摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*),菌剂为含有菌根菌丝、孢子和侵染根段的沙土混合物,由西安科技大学西部矿山生态环境修复研究院自主扩繁培养获得。重构土层材料为沙土、黄土与煤矸石,煤矸石来源于新疆红沙泉露天矿,煤矸石浸出液检测各化学成分质量百分比均符合国家标准(表 1)。

表 1 煤矸石主要化学成分及质量百分比

Table 1 Main chemical composition and mass percentage of coal gangue

化学成分	质量占比/%	化学成分	质量占比/%
Na ₂ O	1.021 6	Fe ₂ O ₃	6.563 5
MgO	1.633 4	NiO	0.006 7
Al ₂ O ₃	21.289 1	CuO	0.006 6
SiO ₂	62.079 3	ZnO	0.012 3
P ₂ O ₅	0.112 1	Ga ₂ O ₃	0.003 8
SO ₃	0.771 2	As ₂ O ₃	0.003 1
Cl	0.018 7	Rb ₂ O	0.019 4
K ₂ O	3.609 5	SrO	0.033 8
CaO	1.699 8	Y ₂ O ₃	0.003 2
TiO ₂	0.907 6	ZrO ₂	0.020 6
Cr ₂ O ₃	0.017 7	Nb ₂ O ₅	0.002 0
MnO	0.094 7	BaO	0.070 1

2.2 试验设计

采用土柱来模拟排土场重构土层,土柱由上至下分别设置生态层、涵水层与隔水层,试验设计 4 种处

理, 分别为沙土涵水层未接菌(S-CK)、煤矸石涵水层未接菌(C-CK)、沙土涵水层接种 AMF(S-AM)与煤矸石涵水层接种 AMF(C-AM), 每组处理做 3 次重复。试验时间为 2023 年 9—12 月, 试验全程在有日光灯条件下的温室进行, 期间每 10 d 平均温度变化与采样时间点如图 3 所示。

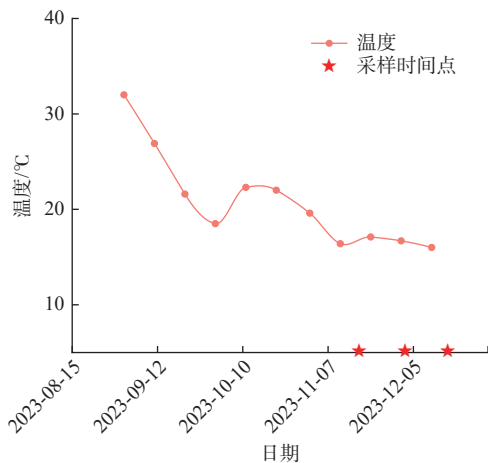


图 3 试验期间每 10 d 平均温度变化与采样时间点
Fig. 3 Mean temperature change every 10 days during the experiment

土柱总高 80 cm(内径 15 cm), 自上而下分为苜蓿生长区(10 cm)、生态层(50 cm)和涵水层(20 cm), 试验区隔水层使用红黏土进行构建, 且经过机械压实处理, 容重通常达到 1.7 g/cm³, 经过室内环刀试验测定其透水率为 0, 所以室内模拟试验底部直接采用 PVC 板封闭来模拟隔水层, 侧壁两侧每 10 cm 开有直径为 1.5 cm 小孔以进行不同层的土样采集(图 4)。底部通

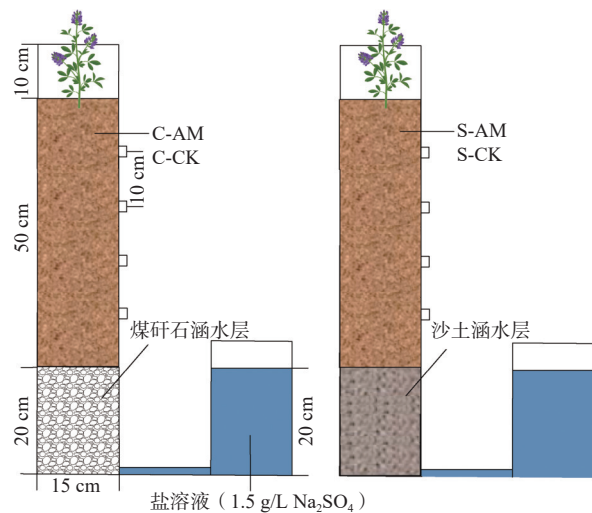


图 4 试验装置图
Fig. 4 Test device diagram

过连接口连接马氏瓶, 模拟红沙泉露天矿矿井盐水处理 1.5 g/L 的 Na₂SO₄ 盐溶液作为涵水层的水源, 马氏瓶液面高度为 20 cm。

选取颗粒饱满的种子经过 10% 双氧水浸泡处理 30 min, 播种时, 用无菌铁匙在表层沙土挖出 15 个孔穴, 随后将 50 g AMF 菌剂均匀撒入接菌处理土柱穴内, 再将每个穴内埋入 3 粒苜蓿种子, 随后将孔穴用沙土填满, 待种子出苗完全后每根土柱间苗至 10 株苜蓿。为了试验初期苜蓿能够良好的发芽与生长, 生态层土壤初始含水率按照田间持水量的 60% 进行灌水, 每根土柱浇水 1.8 L。土柱不同土层所用土壤基础物理性质见表 2, 生态层为黄土和沙土按质量比 1 : 5 混合, 测定其粒径组成与红沙泉矿区表层原状土粒径相符, 沙土与黄土均粉碎过 2 mm 筛, 考虑到排土场土壤经过机械压实, 土壤容重较高, 生态层土壤在自然填充的状态下再进行轻微压实处理, 最终容重为 1.47 g/cm³; 涵水层使用的是沙土作为基质材料, 本试验分别设计煤矸石与沙土涵水层处理, 煤矸石选择粒径为 0.5 ~ 3.0 cm, 沙土粒径为 0 ~ 2.000 mm, 用于分析不同质地涵水层的水盐运移特征。土柱每节长度为 10 cm, 土柱之间采用凡士林及玻璃胶作密封防水处理, 填装时用击实锤将固定质量的土样装入单节土柱。

表 2 土柱填充基质物理性质					
Table 2 Physical Properties of Filling Substrate of Soil Column					
土层结构	土壤质地	容重/(g·cm ⁻³)	粒径范围及比例	孔隙度/%	田间持水量/%
生态层	黄土:沙土 (质量比)= 1:5	1.47	<0.002 mm, 2.08%		
			0.002 ~ 0.050 mm, 30.74%		
			0.050 ~ 2.000 mm, 67.18%		
涵水层	煤矸石	1.27	0.5 ~ 3.0 cm	42.3	
	沙土	1.42	0 ~ 2.000 mm	20.0	

2.3 测定指标

2.3.1 土壤理化性质

试验中在观察到根系生长至 40 ~ 50 cm 处时开始采样测量土壤含水率与电导率变化, 随后每 15 d 采样 1 次, 共采样 3 次, 用于分析土壤水盐的变化。土壤样品每 10 cm 为 1 层分层进行收取, 不同取样时期分别在两侧不同取样孔中完成, 从而避免取样较多破坏土层结构的完整性。土壤质量含水率用烘干法测定^[28]; 电导率是广泛应用于土壤盐分研究的指标, 与盐分含量呈显著正相关^[29], 本研究利用电导率来表征苜蓿生育期土壤盐分的变化, 浸出液(土水质量比 1 : 5)测定土壤电导率, 电导率由多参数测试仪(Seven Excellence)测定; 土壤孔隙度参考《森林土壤水分-物理性质测

定》(LY-T 1215—1999)^[30]用体积 100 cm³ 环刀测定;土壤机械组成采用激光粒度仪(Mastersizer 3000, Malvern Company, UK)测定^[31]。

2.3.2 苜蓿生理指标

采用干重法测定苜蓿地上、地下生物量。根系每 10 cm 为 1 层,分层进行收取(用镊子将全部根挑出),根系清洗干净后使用根系扫描仪(Microtek Scan Maker i800 plus)进行扫描,并用 RhizoPheno 根系表型分析系统 V2.3.2 软件分析根系结构特征。

2.3.3 AMF 的侵染情况

每根土柱随机取 45 个 1.0~1.5 cm 的根段,用 10% KOH 溶液浸泡 24 h,冲洗干净,采用酸性品红乳酸甘油染色液染色法染色,在显微镜(Motic Panthera Client)下观察测定苜蓿的 AMF 侵染情况,并记录不同处理下的侵染率(表 3)。从结果可以看出,C-AM 与 S-AM 组的侵染率分别为 61.5%、65.2%,均显著高于 C-CK 组(3.7%)与 S-CK 组(5.2%),说明 AMF 在苜蓿根系定植良好。

表 3 不同处理的苜蓿侵染率

Table 3 Infection rate of alfalfa under different treatments

分组	C-CK	S-CK	C-AM	S-AM
侵染率/%	3.7±2.2	5.2±3.0	61.5±6.7	65.2±5.9

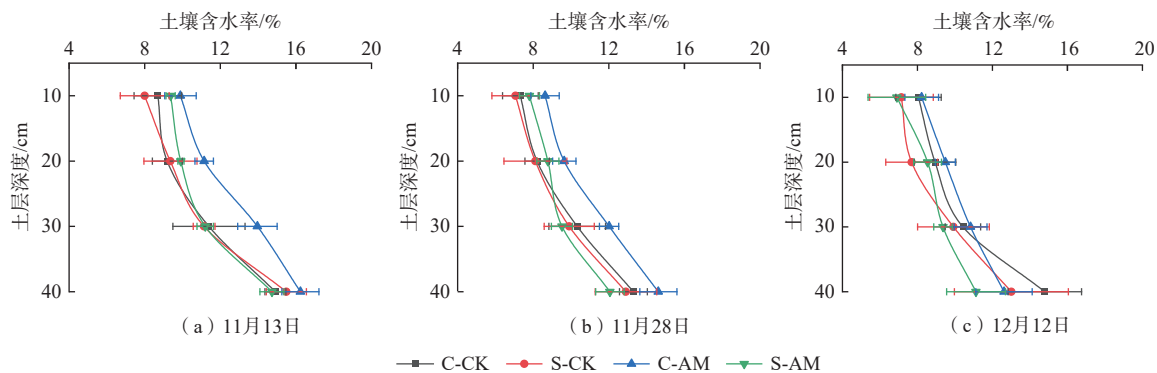


图 5 不同处理下土壤水分分布特征(2023 年)

Fig. 5 Distribution characteristics of soil moisture under different treatments (in 2023)

不同采样时间土柱盐分分布特征如图 6,煤矸石涵水层的盐分平均值高于沙土涵水层,接种 AMF 后进一步增加了各土层电导率,整体分布中 C-AM 电导率最高(平均值为 194.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$),相较于 S-CK(平均值为 149.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$)增加了 29.7%,C-CK 与 S-AM 之间则并无显著差异,平均值分别为 174.3, 173.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。在 11 月 28 日至 12 月 12 日这一时期,40 cm 土层中 S-AM 的电导率增加了 27.8%。

地表是空气与土壤的界面,土壤中的水分经过蒸发

2.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 软件和 IBM SPSS 22.0 软件(SPSS Inc, Chicago, IL, USA)对数据进行整理分析。采用单因素方差分析(Duncan 检验)($P < 0.05$)比较不同处理之间的差异,采用事后 T 检验比较数据的显著性,各个指标之间的相关性采用 Person 相关系数。本文所有图片均采用 Origin2021 绘制。

3 结果

3.1 土壤水盐分布特征

图 5 为不同采样时间土柱水分分布特征,土壤含水率随土层加深呈增加趋势,在 40 cm 土层达到最高(平均值为 13.8%),相较于 10 cm 土层(平均值为 8.1%)增加了 70.0%。如图 5 (a)(b)所示,在 2023 年 11 月 13 日、11 月 28 日时期,C-AM 处理土壤含水率较高,平均值为 12.0%,相较于 S-CK(平均值为 10.3%),增加了 16.5%,C-CK、S-CK、S-AM 处理之间并无显著差异;如图 5 (c)所示,在 12 月 12 日时期,40 cm 土层深度中不同涵水层的 AM 处理含水率(平均值为 11.9%)相较于 CK 处理(平均值 13.9%)降低了 14.0%,表明接种 AMF 促进了苜蓿在 11 月 28 日至 12 月 12 日这一时期对深层土壤水分的利用。

损失后,盐分逐渐积累在表层土壤。由图 7 可知,C-CK 表层土盐度最低(5.6 dS/m),S-AM 最高(8.4 dS/m);相较于 S-CK,C-CK 与 C-AM 表层土积累的盐分分别降低了 31.5%、14.5%;值得注意的是,C-AM 表层土盐度显著($P < 0.05$)高于 C-CK,在煤矸石涵水层中接种 AMF 使土壤表层土的盐分增加了 24.7%。

3.2 土壤孔隙度

不同土层之间的孔隙度存在显著差异(图 8),各处理 0~10 cm 土层孔隙度均高于 30~40 cm 土层。

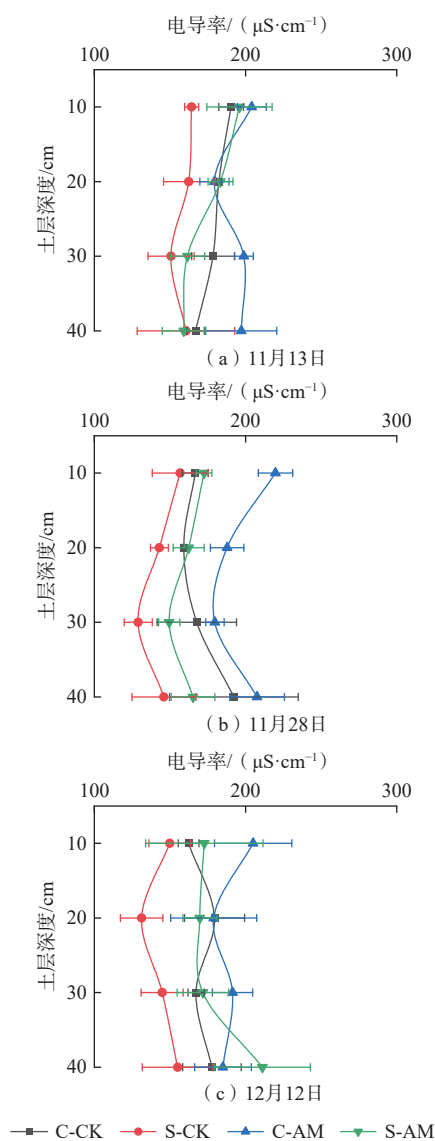


图6 不同处理下土壤盐分分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of soil salinity under different treatments

在 0~10 cm 土层中, 孔隙度由大到小依次为 S-AM、C-AM、C-CK、S-CK, 不同处理对土壤孔隙度无显著影响, 相较于初始值(22%)孔隙度平均增加了 10.5%; 在 30~40 cm 土层中, 孔隙度由大到小依次为 S-CK、S-AM、C-CK、C-AM, S-CK 处理的土壤孔隙度显著高于其他 3 种处理, 相较于初始值孔隙度平均减少了 7.7%。煤矸石涵水层与接种 AMF 均降低了 30~40 cm 土层的土壤孔隙度, 而沙土涵水层的土壤孔隙度则略微增加。

3.3 苜蓿生长发育特征

3.3.1 生物量

由图 9 可知, 接种 AMF 显著增加了苜蓿地上部和地下部生物量, 煤矸石涵水层进一步增加促进了苜蓿地下部的生长。与 S-CK 处理苜蓿地上部生物量

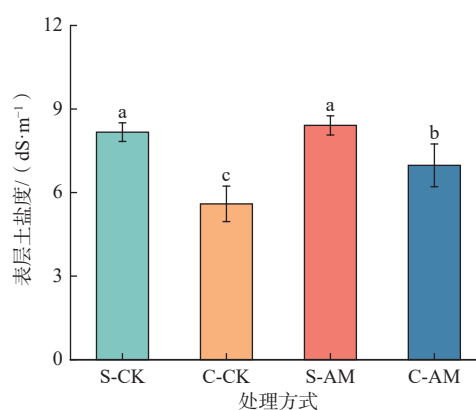


图7 不同处理下表层土壤盐分积累量

Fig. 7 Salt accumulations in surface soil under different treatments

注: 图中小写字母代表不同处理之间的差异显著(Duncan 检验, $P < 0.05$)。

(1.2 g)和地下部生物量(0.5 g)相比, C-CK 处理苜蓿地上部和地下部生物量分别增加了 49.6%、38.3%, C-CK 处理苜蓿地下部生物量显著($P < 0.05$)高于 S-CK 处理, S-AM 处理苜蓿地上部与地下部生物量分别增加了 3.8 倍和 2.5 倍, C-AM 处理的地上部与地下部生物量分别增加了 4.1 倍和 4.7 倍。

3.3.2 根系分布特征

对各土层的根长密度(root length density, RLD)、根体积密度(root volume density, RVD)、根表面积密度(root surface area density, RSD)进行分析(表 4)。RVD、RSD 的结果表明, 苜蓿的根系主要集中在 0~20 cm 土层, 且根系含量随着深度的增加而迅速减少, CK 处理 RLD 在 20~30 cm 土层中为最高值($0.14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), RVD、RSD 均在 0~10 cm 土层中为最高值($0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 和 $0.26 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$), 表明粗根含量在浅土层占比较高, 细根含量则在深土层占比较高。将 RLD、RVD、RSD 分为 0~20 cm 和 20~40 cm 2 部分, 研究不同涵水层与接种 AMF 对苜蓿根系生长的影响。C-AM 处理在 0~20 cm 土层的 RLD 与 RSD 显著($P < 0.05$)高于 S-AM 处理; 在 20~40 cm 土层中, S-AM 与 C-AM 的 RLD 与 S-CK 与 C-CK 之间无显著差异, AM 处理的 RVD、RSD 则显著($P < 0.05$)高于 CK 处理, 表明 AMF 促进了 20~40 cm 土层粗根系的发育。

3.4 土壤-植物相关性分析

为了探究土壤水盐与植物之间互相影响的关系, 将 0~10 cm(浅层)与 30~40 cm(深层)土层之间的土壤含水率、电导率、孔隙度与苜蓿的地上部生物量、地下部生物量、RLD、RVD、RSD 进行相关性分析(图 10)。结果表明, 0~10 cm 土层水分、盐分、RVD

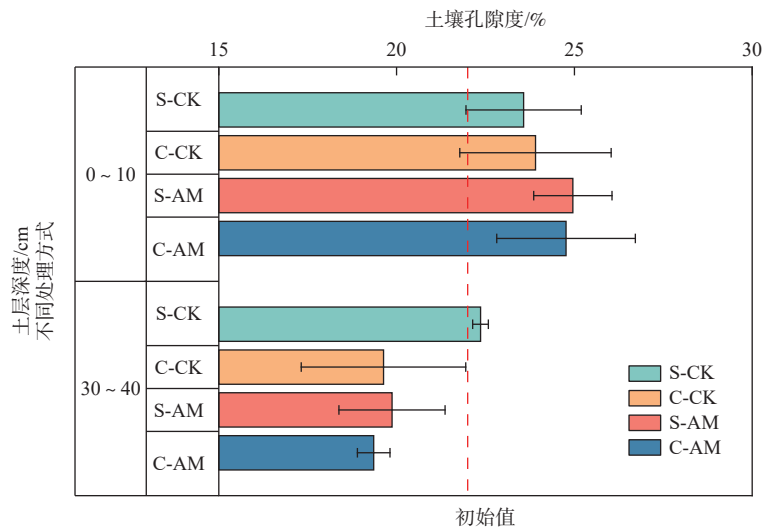


图 8 不同处理下 0 ~ 10 cm 与 30 ~ 40 cm 土壤孔隙度差异

Fig. 8 Difference of porosity between 0~10 cm and 30~40 cm soil layers under different treatments

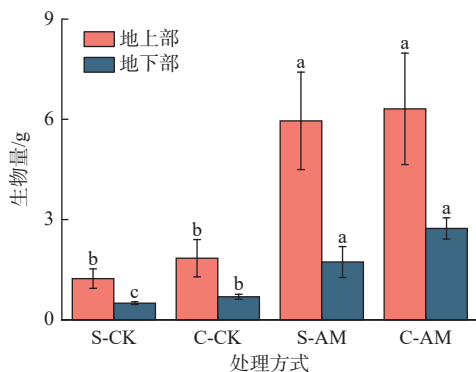


图 9 不同处理下苜蓿地上部与地下部生物量

Fig. 9 Aboveground and underground dry matter quality of alfalfa under different treatments

注: 图中小写字母分别代表地上部与地下部生物量不同处理之间的差异显著 (Duncan 检验, $P < 0.05$)。

与地下部生物量之间呈显著正相关 ($P < 0.05$)。地上部生物量与 RVD、深层 RVD 之间显著正相关, 地下部生物量与浅层 RSD、深层 RSD、浅层 RVD、浅层土壤含水率之间显著正相关。值得注意的是, 浅层土壤孔隙度与苜蓿的根系和地上部生物量之间均表现较强的正相关性, 深层土壤孔隙度则表现较强的负相关性。

4 讨论

4.1 煤矸石涵水层与 AMF 对土壤水盐的影响

先前的研究已经表明, AMF 可以直接将水输送到宿主苜蓿^[32], 并且可以增加重构土层表层土壤的持水量^[27], 而不同层状土壤通过影响水分入渗、持水能力, 进而表现出土壤水盐分布差异^[33]。涵水层土壤水分通过毛细管作用向地表运移, 当细质地的生态层表土覆

盖粗质地的煤矸石涵水层时, 由于下层的毛管孔隙减少限制了涵水层的水盐向上运移。研究结果表明, 煤矸石涵水层接种 AMF 处理通过提高生态层土壤持水量, 补偿了因毛细管作用减弱而减少的水分向上运移, 导致各土层水盐含量增加。然而, 煤矸石涵水层与沙土涵水层未接菌处理之间土壤水分并无显著差异 (图 5), 这一原因很有可能与植物的根系相关, 根是植物从环境中吸收水分的主要器官^[32], 煤矸石涵水层处理显著增加了苜蓿的地下生物量 (图 9), 由此推测其提高了苜蓿对土壤中水分的吸收利用, 进而降低了各土层的含水率。

在干旱和半干旱地区, 地下水除了向土壤供水外, 还具有盐化作用^[34], 当地下水位较浅时, 大量的盐伴随着水通过毛细作用上升至表土层, 水蒸发损失后盐逐渐积累下来, 诱发土壤盐碱化^[35]。研究结果表明, 煤矸石涵水层处理抑制了涵水层中的盐分向上运移, 显著降低了表层土盐度, 接种 AMF 则增加了表层土盐分的积累, 尤其在煤矸石涵水层处理下。Kakouridis 等^[24], 通过同位素标记与荧光染料直接示踪量化了 AMF 与宿主植物之间的水分运输, 证明了 AMF 可以作为根系沿着土壤-植物-空气连续水分运动的延伸。而土壤水是可溶性盐的输送介质, AMF 影响表层土盐度的原因可能是通过影响苜蓿的根系与形成的大量菌丝来作为土壤水盐向上运移的路径, 从而补偿了在煤矸石涵水层中由于毛管孔隙减少的向上运移的水盐含量。

4.2 煤矸石涵水层与 AMF 对苜蓿生长的影响

土壤盐度通常会决定植物对水分的可用性^[36], 水

表 4 不同处理下苜蓿根系分布特征
Table 4 Distribution characteristics of alfalfa roots under different treatments

土层深度/cm	RLD/(cm·cm ⁻³)			RVD/(cm ³ ·cm ⁻³)		RSD/(cm ² ·cm ⁻³)	
	涵水层处理	CK	AM	CK	AM	CK	AM
0 ~ 20	S	0.08Ba	0.12Ab	0.06Ba	0.25Aa	0.19Ba	0.49Ab
	C	0.10Ba	0.31Aa	0.07Ba	0.36Aa	0.24Ba	0.85Aa
20 ~ 40	S	0.12Aa	0.09Aa	0.02Ba	0.09Aa	0.16Ba	0.26Aa
	C	0.11Aa	0.15Aa	0.03Ba	0.08Aa	0.16Ba	0.33Aa
0 ~ 10		0.09ab	0.23a	0.09a	0.36a	0.26a	0.76a
10 ~ 20		0.08b	0.20a	0.04b	0.26a	0.17bc	0.58a
20 ~ 30		0.14a	0.11a	0.04bc	0.09b	0.2ab	0.27a
30 ~ 40		0.09ab	0.14a	0.02c	0.08b	0.11c	0.31a
ANOVA		P-value					
土层深度		0.032	0.617	0.006	0.023	0.018	0.156
涵水层 (0 ~ 20)		Ns	*	Ns	Ns	Ns	*
涵水层 (20 ~ 40)		Ns	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns

注: 不同大写字母代表涵水层中CK与AM处理之间的差异显著, 不同小写字母代表同一土层深度中沙土涵水层(S)与煤矸石涵水层(C)之间的差异显著; 土层深度中不同小写字母代表同一列不同深度下的数据差异显著, (Duncan检验, $P<0.05$); Ns代表不同处理之间无显著性差异, *代表不同处理之间存在显著性差异($P<0.05$)。

是植物生长的最大限制因素^[37]。煤矸石涵水层通过改变土壤水盐分布进而影响苜蓿的生物量, 使苜蓿的地上与地下生物量均高于沙土涵水层处理, 这一结果与 Ityel 等^[38]的研究结果一致, 在盐胁迫条件下, 根区底部的砾石层可补偿盐度引起的植物蒸腾和生物量下降。根系分布特征的结果(表 4)表明, AMF 促进了粗根系在深层土壤的发育, 植物通常会根据盐度变化动态地调整其根系生长, 以最大限度地降低代谢成本和胁迫影响^[39]。研究结果发现沙土涵水层表层积累的较高盐分在一定程度上限制了苜蓿根系在 0 ~ 20 cm 土层的发育, 导致其根长密度与根表面积密度显著低于煤矸石涵水层处理。尽管结果表明接种 AMF 促进了表层土盐分的积累, 但同时也有研究发现, 接种 AMF 可以增强宿主盐碱胁迫抗性^[40], 盐生植物与 AMF 共生在排土场盐碱地改良中仍具有潜在的应用前景。

植物细根和丛枝菌根真菌会影响土壤大孔隙结构^[41], 研究结果表明根系特征指标与浅层土壤孔隙度之间具有较高的相关性, 并且苜蓿的根系主要分布在浅层土壤中, 这可能是浅层土壤孔隙度增大的主要因素。此外, Zhang 等^[42]通过扫描电镜观察土壤表面微观结构发现土壤在蒸发前存在絮状结构, 蒸发后表面微观结构发生明显变化, 可以观察到孔隙和盐晶体。这一原因可能与盐分的类型有关, 而在本试验中使用的是 Na₂SO₄, 在表层土中结晶的过程中可能会产生盐胀效应^[43], 然而, 在本文的研究结果中并未发现表层

土盐度与孔隙度之间具有明显的相关性, 这一问题仍需要后续通过例如 CT 扫描等手段进行更为细致的研究。

4.3 煤矸石作为涵水层基质的应用潜力

在过去的几十年里, 虽然煤矸石的利用率从 1998 年的约 41% 提高到 2013 年的约 64%, 但煤矸石的累积量大, 增加率高, 仍然需要替代利用方法。研究发现煤矸石具有适当的导水性、吸附特性和浸出行为^[44], 这些特性已经表明煤矸石具有作为替代材料功能的潜力。Han 等^[45]通过室内试验研究了不同厚度和粒径的煤矸石覆盖可以提高矿区土壤蓄水能力, 将煤矸石作为充填材料用于回填复垦, 不仅降低了煤矸石堆存的占地率, 实现了煤矸石的就近处置, 而且具有良好的经济与环境效益^[46]。本研究利用煤矸石作为基质材料充填涵水层, 可以实现 20% 的重构土层材料就近利用, 增加矿区对煤矸石的利用效率, 且由于上层覆盖有生态层的土壤, 减少了氧气与煤矸石的直接接触, 同时涵水层的水分含量较高, 避免了煤矸石自燃的风险, 为煤矸石作为排土场重构土层材料提供了理论基础。

研究通过利用筛分后的煤矸石作为构建三层重构土层的涵水层基质材料, 证明了其可以有效抑制涵水层的盐分向上运移, 且可以显著的促进苜蓿的根系发育, 并发现了接种 AMF 处理后会促进土壤的水盐向上运移, 这可能是苜蓿的根系与 AMF 产生的菌丝共同作用的结果。综上, 建议对于盐碱化风险较高的露天矿地区, 利用筛分后的煤矸石作为涵水层可以有

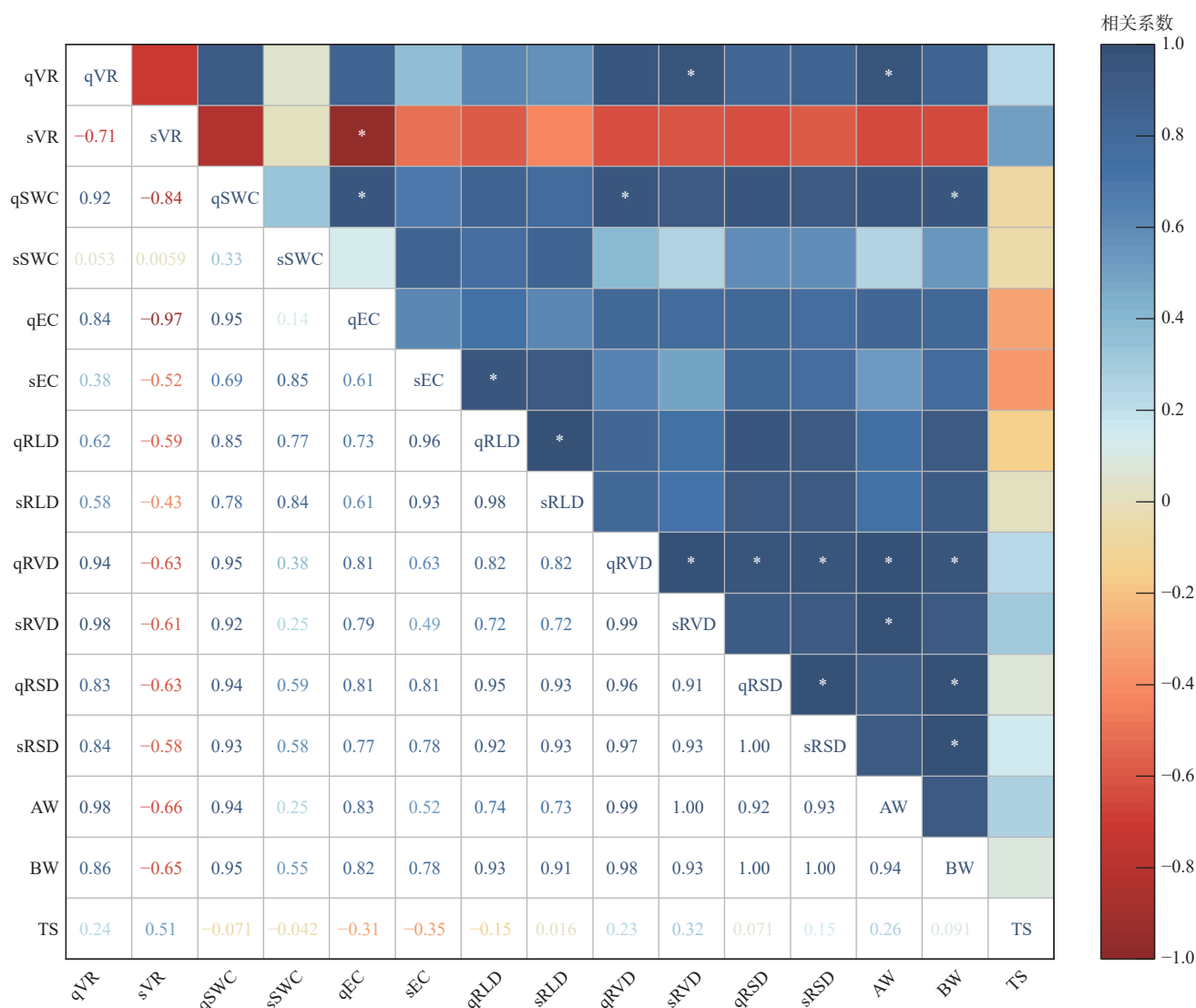


图 10 相关性分析热图 (字母 q、s 分别表示 0~10 cm 与 30~40 cm 土层)

Fig. 10 Correlation analysis (q and s represent 0-10 cm and 30-40 cm soil layers, respectively)

注: 孔隙度(void ratio, VR)、土壤含水率(soil water content, SWC)、电导率(electrical conductivity, EC)、苜蓿的地上部生物量(aboveground weight, AW)、地下部生物量(belowground weight, BW)、表层土盐度(topsoil salinity, TS), *为 $P < 0.05$ 。

效降低排土场重构土层的盐碱化程度,但相对于水分条件较好且土壤盐碱化程度低的地区而言,则需要结合实际的成本问题来综合考虑,而 AMF 在缓解植物对于水分与盐碱胁迫机制方面表现出了显著的优势^[40],使其在干旱半干旱地区具有重要应用价值。AMF 的应用需以盐分-水分梯度和经济-生态效益平衡为核心考量,在半干旱矿区,AMF 增强植物盐胁迫抗性与促进植物生长的效应具有不可替代性^[39],而在低胁迫环境中,建议结合具体成本与收益分析选择性推广。

5 结论

(1)煤矸石作为涵水层材料,凭借其粗质地和高

孔隙度,提升了重构土层的储水能力,与沙土涵水层相比,其通过减少生态层与涵水层之间的毛细管作用降低了 31.5% 的表层盐分积累。

(2)接种 AMF 促进了 20~40 cm 土层粗根系生长的发育,使苜蓿的地上部与地下部生物量分别增加了 3.8 倍、2.5 倍,AMF 通过影响苜蓿的根系生长促进了土壤水盐向上运移,使表层土盐度提高了 24.7%。

(3)煤矸石涵水层与接种 AMF 协同作用,使各土层土壤含水率增加了 16.5%,盐分含量增加了 29.7%,表层土盐度减少了 14.5%,苜蓿地上部生物量增加了 4.1 倍,苜蓿地下部生物量增加了 4.7 倍,显著促进了苜蓿的生长发育。

参考文献 (References):

- [1] WU Zhenhua, LEI Shaogang, LU Qingqing, et al. Impacts of large-scale open-pit coal base on the landscape ecological health of semi-arid grasslands[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(15): 1820.
- [2] WANG Shougang, HUANG Jiu, YU Haochen, et al. Recognition of landscape key areas in a coal mine area of a semi-arid steppe in China: A case study of Yimin open-pit coal mine[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2239.
- [3] 崔潇,周妍如,刘孝阳,等.平朔露天煤矿复垦区不同地质层组岩土质量综合评价[J].水文地质工程地质, 2021, 48(2): 164 – 173. [CUI Xiao, ZHOU Yanru, LIU Xiaoyang, et al. Comprehensive evaluation of rock and soil quality of different geological stratum groups in Pingshuo opencast coal mine reclamation area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 164 – 173. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王靖伟.露天煤矿排土场地层重构试验研究[D].徐州:中国矿业大学, 2019. [WANG Jingwei. Experimental study on stratum reconstruction of dump soil in open-pit coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 毕银丽,高学江,柯增鸣,等.露天煤矿排土场土层重构及接菌对植物根系提水作用试验研究[J].煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 12 – 20. [BI Yinli, GAO Xuejiang, KE Zengming, et al. Experimental study on effect of soil layer reconstruction and inoculation on plant root hydraulic lift in open-pit coal mine dump[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 12 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [6] GILLAND K E, MCCARTHY B C. Microtopography influences early successional plant communities on experimental coal surface mine land reclamation[J]. *Restoration Ecology*, 2014, 22(2): 232 – 239.
- [7] 毕银丽,彭苏萍,杜善周.西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J].煤炭学报, 2021, 46(5): 1355 – 1364. [BI Yinli, PENG Suping, DU Shanzhou. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1355 – 1364. (in Chinese with English abstract)]
- [8] KARIMOV A K, ŠIMŮNEK J, HANJRA M A, et al. Effects of the shallow water table on water use of winter wheat and ecosystem health: Implications for unlocking the potential of groundwater in the Fergana Valley (Central Asia)[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131: 57 – 69.
- [9] FAN Jingsen, SUN Yuzhuang, LI Xinyu, et al. Pollution of organic compounds and heavy metals in a coal gangue dump of the Gequan Coal Mine, China[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2013, 32(3): 241 – 247.
- [10] 李建中,张进德.我国矿山地质环境调查工作探讨[J].水文地质工程地质, 2018, 45(4): 169 – 172. [LI Jianzhong, ZHANG Jinde. Discussion on the work of mine geo-environmental investigation of China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(4): 169 – 172. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李思雯.改性煤矸石在矿区复垦林地土壤改良中的试验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学, 2022. [LI Siwen. Study on soil improvement of reclaimed forest land in mining area by modified coal gangue[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 赵鸣,尹守仁,陈清如.改性煤矸石矿粉填充橡胶(NR)的结构与性能[J].中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 472 – 475. [ZHAO Ming, YIN Shouren, CHEN Qingru. Effect of the structure and characters of modified coal shale filler on vulcanized rubber properties[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34(4): 472 – 475. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 赵鸣,山相朋,魏征.煤矸石粉填充聚丙烯复合材料的性能研究[J].中国矿业大学学报, 2014, 43(1): 126 – 131. [ZHAO Ming, SHAN Xiangpeng, WEI Zheng. Properties of polypropylene composite filled with coal gangue powder[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(1): 126 – 131. (in Chinese with English abstract)]
- [14] WANG Tong, WANG Ying, WANG Jun. Research on potential fertilization of coal gangue in the Weibei Coalfield, China[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2008, 82(3): 717 – 721.
- [15] 王曦.基于煤矸石充填的重构土壤水分运移特征及环境效应——以淮北矿区为例[D].淮南:安徽理工大学, 2014. [WANG Xi. Water contension variational properties and environmental effects of reconstructed soil filled with coal gangue: A case study from Huaibei Mining Area[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [16] REN Lidong, HUANG Mingbin. Fine root distributions and water consumption of alfalfa grown in layered soils

- with different layer thicknesses[J]. *Soil Research*, 2016, 54(6): 730 – 738.
- [17] LIU Qian, LIU Yanfeng, JIN Menggui, et al. Impacts of an internal finer-textured layer on soil evaporation and salt distribution[J]. *Transport in Porous Media*, 2021, 140(2): 603 – 620.
- [18] CHEN Shuai, MAO Xiaomin, SHANG Songhao. Response and contribution of shallow groundwater to soil water/salt budget and crop growth in layered soils[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 266: 107574.
- [19] STORMONT J C, ANDERSON C E. Capillary barrier effect from underlying coarser soil layer[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(8): 641 – 648.
- [20] CHEN Shuai, MAO Xiaomin, SHUKLA M K. Influence of coarse-textured soil layers under crop root zone on soil water and salt dynamics and crop yield in shallow groundwater areas[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021, 85(5): 1479 – 1495.
- [21] AUGÉ R M. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. *Mycorrhiza*, 2001, 11(1): 3 – 42.
- [22] QUIROGA G, ERICE G, AROCA R, et al. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to the regulation of radial root water transport in maize plants under water deficit[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 167: 103821.
- [23] ZULFIQAR F, AKRAM N A, ASHRAF M. Osmoprotection in plants under abiotic stresses: New insights into a classical phenomenon[J]. *Planta*, 2019, 251(1): 3.
- [24] KAKOURIDIS A, HAGEN J A, KAN M P, et al. Routes to roots: Direct evidence of water transport by arbuscular mycorrhizal fungi to host plants[J]. *New Phytologist*, 2022, 236(1): 210 – 221.
- [25] WU Chao, BI Yinli, ZHU Wenbo. Is the amount of water transported by arbuscular mycorrhizal fungal hyphae negligible Insights from a compartmentalized experimental study[J]. *Plant and Soil*, 2024, 499(1): 537 – 552.
- [26] 毕银丽, 田乐焯, 柯增鸣. 接菌影响模拟重构土层水分布及水同位素分馏[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(9): 274 – 283. [BI Yinli, TIAN Lexuan, KE Zengming. Simulated reconstruction of soil water distribution and isotope fractionation under the influence of AMF inoculation[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(9): 274 – 283. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 毕银丽, 杨伟, 柯增鸣, 等. AMF-玉米联合对“表土层-含水层-隔水层”排土场重构模式土壤水盐分布的影响[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(4): 68 – 75. [BI Yinli, YANG Wei, KE Zengming, et al. Effect of AMF-maize combination on water and salt distribution in soil under the dump reconstruction mode of "topsoil-aquifer-aquitard"[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(4): 68 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 雷廷武, 马玉莹. 土壤质量含水率的测量方法及装置: CN103115836A[P]. 2013-05-22. [LEI Tingwu, MA Yuying. Measurement method and device of soil mass water content: CN103115836A[P]. 2013-05-22. (in Chinese)]
- [29] WALTER J, LÜCK E, BAURIEGEL A, et al. Seasonal dynamics of soil salinity in peatlands: A geophysical approach[J]. *Geoderma*, 2018, 310: 1 – 11.
- [30] 国家林业局. 森林土壤水分-物理性质的测定: LY-T 1215—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999. [State Forestry Administration. Determination of forest soil water-physical properties: LY/T 1215—1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999. (in Chinese)]
- [31] KE Zengming, MA Lihui, JIAO Feng, et al. Multifractal parameters of soil particle size as key indicators of the soil moisture distribution[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 595: 125988.
- [32] FEDDES R A, RIJTEMA P E. Water withdrawal by plant roots[J]. *Journal of Hydrology*, 1972, 17(1/2): 33 – 59.
- [33] SUN Chengpeng, ZHAO Wenzhi, LIU Hu, et al. Effects of textural layering on water regimes in sandy soils in a desert-oasis ecotone, northwestern China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 627500.
- [34] HE Kangkang, ZHANG Qiying, AI Zhipin, et al. Characteristics and influence factors of soil water and salt movement in the Yellow River irrigation district[J]. *Agronomy*, 2023, 14(1): 92.
- [35] SHOKRI - KUEHNI S M S, RAAIJMAKERS B, KURZ T, et al. Water table depth and Soil salinization: From pore-scale processes to field-scale responses[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(2): e2019WR026707.
- [36] DINNENY J R. Developmental responses to water and salinity in root systems[J]. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 2019, 35: 239 – 257.
- [37] SILTECHO S, HAMMECKER C, SRIBOONLUE V, et al. Use of field and laboratory methods for estimating unsaturated hydraulic properties under different land uses[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015,

- 19(3): 1193 – 1207.
- [38] ITYEL E, LAZAROVITCH N, SILBERBUSH M, et al. An artificial capillary barrier to improve root zone conditions for horticultural crops: Physical effects on water content[J]. *Irrigation Science*, 2011, 29(2): 171 – 180.
- [39] ZOU Yutao, ZHANG Yanxia, TESTERINK C. Root dynamic growth strategies in response to salinity[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2022, 45(3): 695 – 704.
- [40] 阮仕琴, 陶刚, 娄璇, 等. 丛枝菌根真菌生态功能及其与共生植物互作机理 [J]. *中国土壤与肥料*, 2022(5): 237 – 244. [RUAN Shiqin, TAO Gang, LOU Xuan, et al. The ecological functions of arbuscular mycorrhizal fungi and their interaction mechanisms with the symbiotic plants[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(5): 237 – 244. (in Chinese with English abstract)]
- [41] ZHENG Ying, CHEN Ning, YU Kailiang, et al. The effects of fine roots and arbuscular mycorrhizal fungi on soil macropores[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 225: 105528.
- [42] ZHANG Xudong, YE Peng, WU Yajun, et al. Experimental study on simultaneous heat-water-salt migration of bare soil subjected to evaporation[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127710.
- [43] 黄雪峰, 张沛然, 杨校辉, 等. 盐渍土盐胀特性与水热状态变化特征试验研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(6): 184 – 189. [HUANG Xuefeng, ZHANG Peiran, YANG Xiaohui, et al. Experimental research on salt expansion law of saline soil and the change characteristics under different water thermal conditions[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2016, 14(6): 184 – 189. (in Chinese with English abstract)]
- [44] WU Hui, WEN Qingbo, HU Liming, et al. Feasibility study on the application of coal gangue as landfill liner material[J]. *Waste Management*, 2017, 63: 161 – 171.
- [45] HAN Xiuna, DONG Ying, GENG Yuqing, et al. Influence of coal gangue mulching with various thicknesses and particle sizes on soil water characteristics[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 15368.
- [46] 李振, 雪佳, 朱张磊, 等. 煤矸石综合利用研究进展 [J]. *矿产保护与利用*, 2021, 41(6): 165 – 178. [LI Zhen, XUE Jia, ZHU Zhanglei, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gangue[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(6): 165 – 178. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 宗 爽