

# 接种 AMF 对海绵结构重构土层的玉米根系分布及水分利用特征的影响

毕银丽<sup>1,2</sup>, 李晗<sup>1</sup>, 柯增鸣<sup>1</sup>, 杨伟<sup>1</sup>, 薛超<sup>1</sup>

[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) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083]

**摘要:** [目的] 露天煤矿区生态脆弱, 水资源短缺, 利用微生物复垦已成为矿区生态重建的研究热点。探究露天矿排土场重构土层海绵生态结构条件下接种丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza fungi, AMF)对玉米根系生长及水分利用特征的影响, 为矿区生态农业建设提供科学依据。[方法] 在室内布设土柱模拟试验, 设置裸土柱(CK)、玉米不接菌(NM)和玉米接菌(AM)3个处理, 采用氢氧稳定同位素示踪技术研究玉米根系水分利用特征。[结果] ①接种 AMF 处理促进了玉米根系的生长, 改变了玉米根系分布。AM 处理玉米的总根长、总根表面积、总根体积和根尖数分别比 NM 处理高 19.3%, 14.8%, 9.1% 和 34.0%, AM 处理小于 0.3 mm 的细根及大于 0.7 mm 的粗根比例分别比 NM 处理高 3.2% 和 3.5%。②AMF 改变了玉米的水分利用特征, AM 处理玉米利用的水分来源于 0—20 cm 土层的比例较 NM 处理提升 5.5%。③AM 处理土柱 0—20 cm 土层含水率显著低于 NM 处理, 饱和黏土层含水率: CK 处理 > NM 处理 > AM 处理。AMF 提升了玉米根系吸收水分的能力, 影响黏土层中水分的释出。[结论] 在矿区排土场海绵结构重构土层上接种 AMF 能促进玉米根系发育, 改善水分利用策略, 使其充分利用海绵结构中涵水层储蓄的水分。

**关键词:** 海绵生态结构; 丛枝菌根真菌; 根系分布; 氢氧同位素; 水分利用

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0001-08

中图分类号: S154.3

**文献参数:** 毕银丽, 李晗, 柯增鸣, 等. 接种 AMF 对海绵结构重构土层的玉米根系分布及水分利用特征的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 1-8. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.001; Bi Yinli, Li Han, Ke Zengming, et al. Effects of arbuscular mycorrhiza fungi inoculation on maize root distribution and water use characteristics in spongy reconstructed soil layer [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 1-8.

## Effects of Arbuscular Mycorrhiza Fungi Inoculation on Maize Root Distribution and Water Use Characteristics in Spongy Reconstructed Soil Layer

Bi Yinli<sup>1,2</sup>, Li Han<sup>1</sup>, Ke Zengming<sup>1</sup>, Yang Wei<sup>1</sup>, Xue Chao<sup>1</sup>

[1. Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Areas of West China,

Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. State Key Laboratory for Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China]

**Abstract:** [Objective] The ecology of open-pit coal mine areas is fragile and water resources are scarce. Therefore, the use of microorganisms for mine reclamation has become a research hotspot with regard to ecological reconstruction of mining areas. The effects of soil inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on maize root growth and water use characteristics under the conditions of a reconstructed soil sponge ecological structure in an open-pit mine dump were determined in order to provide a scientific basis for the implementation of ecological agriculture in mining areas. [Methods] A soil column simulation experiment was conducted in a laboratory. Three treatments were evaluated: a bare soil column (CK), maize without bacterial inoculation (NM), and maize with bacterial inoculation (AM). The stable hydrogen and oxygen isotope tracer technique was used to study water use characteristics by maize roots. [Results] ① The AMF treatment increased maize root growth and changed maize root distribution. Total root length, total root

收稿日期: 2023-09-07

修回日期: 2023-10-01

资助项目: 国家重点研发计划项目“西部干旱区煤能源基地区域生态保护与资源综合利用技术”(2022YFF1303303); 国家自然科学基金面上项目“西部煤矿区微生物复垦后枯落物分解及其有机碳累积机制”(51974326)

第一作者: 毕银丽(1971—), 女(汉族), 陕西省米脂县人, 博士, 教授, 主要从事矿区微生物复垦的研究工作。Email: ylb88@126.com。

通信作者: 柯增鸣(1992—), 男(汉族), 陕西省旬阳市人, 博士, 讲师, 主要从事矿区生态环境修复的研究。Email: kezml105@126.com。

surface area, total root volume, and number of root tips for the AM treatment were 19.3%, 14.8%, 9.1%, and 34.0%, respectively, higher than observed for the NM treatment. The proportions of fine roots smaller than 0.3 mm and coarse roots larger than 0.7 mm for the AM treatment were 3.2% and 3.5%, respectively, higher than for the NM group. ② AMF changed water use characteristics by maize roots by depth. The proportion of water used by maize for the AM treatment from the 0—20 cm soil layer was 5.5% higher than for the NM treatment. ③ The moisture content of the 0—20 cm soil layer of the AM treatment was significantly lower than for the NM treatment. The moisture content of saturated clay layer of the CK treatment was higher than for the NM treatment, which was higher than for the AM treatment. AMF improved the ability of maize roots to absorb water, and affected the release of water in the clay layer. [Conclusion] AMF inoculation of a reconstructed soil sponge structure in an open-pit mine dump can promote maize root development, improve maize water utilization strategy, and make full use of the water stored in the water layer in the sponge structure.

**Keywords:** ecological structure of sponge; arbuscular mycorrhizal fungi; root distribution; hydrogen and oxygen isotopes; water use

水资源短缺是限制生态脆弱区煤炭大规模开发的瓶颈<sup>[1]</sup>,露天煤矿开采对原生地表土壤和植被的高强度剥离加剧了矿区水资源的匮乏,水资源的保护与利用成为露天煤矿区生态恢复的关键<sup>[2]</sup>。露天煤矿区排土场重构土层的剖面结构对土壤持水能力有重要影响,毕银丽等<sup>[3]</sup>发明的三层型海绵生态结构(隔水层、涵水层和表土生态层)在黑岱沟露天煤矿复垦区的成功应用表明该结构能够充分保存并有效利用水分。其中隔水层主要由黏土组成,在质地较粗的砂土中下设黏土隔水层可以降低土壤入渗并提高土壤田间持水量<sup>[4]</sup>,提升露天煤矿区的生态重建效果。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza fungi, AMF)是自然界中普遍存在的一类土壤微生物,其与陆地 80% 以上的有花植物都能够形成菌根共生<sup>[5]</sup>。在矿区新复垦土地接种 AMF 有利于促进植物生长和改良根际土壤<sup>[6]</sup>,根系分布显著影响植物对土壤水、肥的利用效率,AMF 的根外菌丝可在土壤中形成广泛的菌丝网络,增加根系长度,改变根系形态,调节根系水力导度,影响根系水分吸收<sup>[7]</sup>。氢氧稳定同位素示踪技术是研究水分运动机制的重要手段之一,通过比较植物茎的水氢同位素( $\delta D$ )、氧同位素( $\delta^{18}O$ )值与各潜在水源的  $\delta D$ ( $\delta^{18}O$ )值,同时借助 MixSIAR 贝叶斯混合模型,可以分析植物与各潜在水源同位素组成关系,确定植物吸收水分来源和比例<sup>[8]</sup>。付昕宇等<sup>[9]</sup>利用该技术研究湖滨带湿地主要草本植物吸收水分来源及利用策略,发现草本植物主要利用 0—30 cm 表层土壤水分,多年生草本植物在竞争激烈的情况下会吸收更深层的土壤水分。Wang Jian 等<sup>[10]</sup>研究表明黄土高原代表性植物黄荆随着水分胁迫程度的增加可以从更深的土壤中寻找水源,而这种能力主要与其根系分布特征有关。

发展生态农业是矿区生态重建和实现可持续发展的重要途径之一<sup>[11]</sup>,适宜经济作物的选择是矿区生态农业建设的关键,玉米因其具有耐旱性、耐寒性和耐贫瘠性等优势被种植于露天矿排土场复垦地<sup>[12]</sup>。目前对海绵重构土体的保水作用和 AMF 的促生作用均已有大量研究<sup>[3,6-7]</sup>,西部矿区在自然土层使用微生物修复技术也已经出现明显生态效益,但重构土体中微生物修复技术对土壤水分布的影响及其与根系的关系还鲜有研究。综合考虑野外试验条件恶劣,试验不可控因素众多等原因,本研究拟采用室内土柱模拟试验,通过测定和比较接菌与未接菌处理不同土层深度植物根系特征值,分析植物根系吸水来源,揭示接种 AMF 对植物根系分布及水分利用策略的影响机理,为露天煤矿区排土场应用微生物技术进行生态农业建设工作提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试作物为玉米,品种为玉糯一号,在播种前完成催芽处理。菌剂为 AMF 中的摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*),由中国矿业大学(北京)微生物复垦实验室提供。砂土和黏土均为露天矿排土场土层重构常见充填材料,本试验选取采于陕西省咸阳市泾阳县的黏土模拟海绵结构的隔水层,选取性质与风沙土相似的河道砂模拟表土生态层及涵水层,供试土壤均经高温灭菌锅灭菌(温度为 121 °C,压强为 100 kPa)处理 2 h。黏土样采用毛细饱和法处理使其饱和度达到 0.8 以上。定名标准参考《土工试验方法标准》<sup>[13]</sup>(GB/T 50123—2019),经上述处理后土样的物理参数见表 1。

表 1 供试土样物理参数  
Table 1 Physical parameters of test soil samples

项目	土类名称	饱和度/%	液限/%	塑限/%	砂粒含量/% (0.075~2 mm)	粉粒含量/% (0.005~0.075 mm)	黏粒含量/% (<0.005 mm)
黏土	低液限黏土	84.7±1.0	29.3	15.8	29.1	67.4	8.7
砂土	黏土质砂	3.2±0.5	—	—	77.9	10.5	11.5

## 1.2 试验设计

露天矿区海绵结构排土场覆土层厚度相对较薄,且回填土在大型机械压实作用下容重较大,孔隙率低<sup>[14]</sup>。本试验隔水层放置层位和土壤容重均参考内蒙古黑岱沟露天矿复垦区土层结构和性质,其隔水层距离地表一般在 40—100 cm 左右,砂土和黏土的容重分别为 1.60 g/cm<sup>3</sup> 和 1.55 g/cm<sup>3</sup>。

试验装置为有机玻璃制作的圆柱体土柱,土柱内部直径为 15 cm,高 80 cm(图 1),底部密封,顶部开口以供玉米生长。自上而下 0—20, 20—40 和 40—50 cm 土层分别对应 3 层海绵结构中排土场中的表土生态层、涵水层和隔水层。为模拟排土场重构土壤的压实状态,将土柱沿平行于底面方向切割为 8 节,每节 10 cm,并严格控制砂土和黏土的容重分别为 1.60 g/cm<sup>3</sup> 和 1.55 g/cm<sup>3</sup>,填装时使用击实锤将固定质量的土样装入单节土柱,两节有机玻璃柱间采用凡士林及玻璃胶作密封防水处理。

室内土柱模拟试验于 2021 年 3—7 月在西安科技大学西部矿山生态修复研究院水模拟实验室进行,设计裸土柱(CK)、玉米不接菌(NM)和玉米接菌(AM)3 个处理,每个处理 3 个重复。在 2021 年 3 月 15 日播种玉米,每根土柱播种 5 粒,出苗后间苗至 1 株。播种时,接菌处理在穴播处添加 50 g 含有混合 AMF 根段和根际土的菌剂。为模拟露天矿区重构土体养分贫瘠、干燥缺水的土壤环境,使土柱中土壤的养分和水分含量与矿区接近,在装柱前将适量 N, P 和 K 固体营养剂与砂土搅拌均匀,元素含量分别为 100, 30, 150 mg/kg; 土柱布设完成后向表层 0—20 cm 砂土中浇水 200 ml,之后每 7 d 浇水一次,每次浇水量为 100 ml,使表层土壤饱和度保持维持在较低水平(约 40%)。

## 1.3 测试指标

测试指标主要包括玉米生物量、根系特征值、根系侵染率、土壤含水率、电导率和氢氧稳定同位素值。玉米培养周期为 120 d,在试验结束后(2021 年 7 月 15 日)拆除土柱并采集样品。沿顶层土壤表面收割玉米地上茎叶部分,玉米根系主要分布在土壤表面以下 0—40 cm 土层内,分 4 层每层 10 cm 收取玉米根系样品,将根系清洗后扫描取样,使用 RhizoPheno 根系分析软件对不同层位的根系做二值化处理后进行数学统计。每株玉米在收取根系时随机取适量新鲜细根样(45 个根段制片),用 10% KOH 溶液浸泡 24 h 并冲洗干净,采用酸性品红乳酸甘油染色液染色法染色,在光学显微镜下观察测定玉米的根系侵染率<sup>[15]</sup>。采用干重法测量玉米各部生物量。菌根侵染率及菌根贡献率的计算公式为<sup>[16]</sup>:

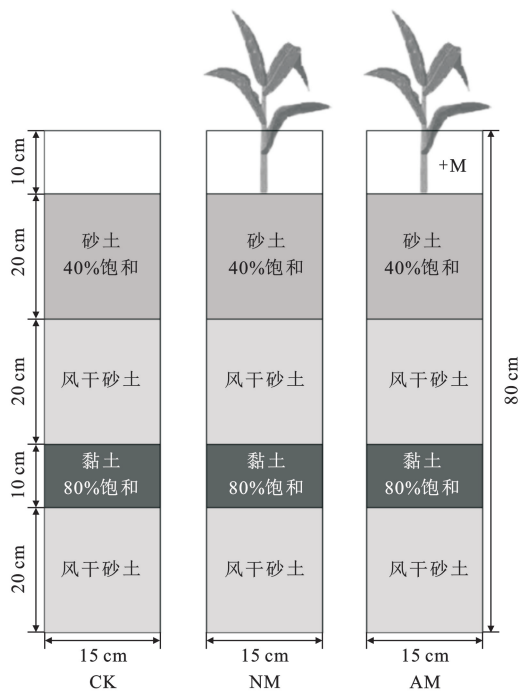
菌根侵染率 =

$$\frac{\text{有真菌侵染特征的根段数目}}{\text{总根段数目}} \times 100\% \quad (1)$$

菌根贡献率 =

$$\frac{(\text{接菌处理生物量} - \text{相应未接菌生物量})}{\text{未接菌处理生物量}} \times 100\% \quad (2)$$

采用烘干法测量土壤含水率,使用电导率仪(SevenExcellence™ 多参数测试仪 pH/EC)测定电导率。土壤水和玉米根茎结合部中的水分采用土壤—植物水真空抽取系统(LI-2000, LICA United Tech-



注:CK 为裸土柱;NM 为玉米不接菌处理;AM 为玉米接菌处理。下同。

图 1 试验装置图

Fig.1 Diagram of test setup

nology Limited, China)提取。使用液态水同位素分析仪(LGR912-0008, ABB Ltd, Canada)测量分析水体的氘氧稳定同位素比率。土壤水测定结果均以维也纳平均海水(V-SMOW)为标准的千分差表示,测定公式为<sup>[17]</sup>:

$$\delta_{\text{sample}} = (R_{\text{sample}}/R_{\text{V-SMOW}} - 1) \times 1000 \quad (3)$$

式中: $\delta_{\text{sample}}$ 为样品的同位素组成( $\delta^2\text{H}$ 或 $\delta^{18}\text{O}$ , ‰);  $R_{\text{sample}}$ 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别为样品和维也纳标准平均海水(V-SMOW)中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 或 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 的比值。

基于贝叶斯理论的 MixSIAR 混合模型是利用 D 和  $^{18}\text{O}$  同位素进行植物水分溯源的主要方法之一<sup>[18]</sup>。植物根系在吸收土壤中水分并输送至根茎结合部的过程中一般不会发生同位素分馏现象,依据同位素质量守恒定律,植株根茎结合部水的双稳同位素比率主要受其吸收水分来源的双稳同位素比率影响<sup>[18-19]</sup>,本次试验中玉米吸收利用的水分主要来自不同深度的土壤水,将各层土壤水的  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  双稳定同位素实测值及标准差作为源项,玉米根茎结合部水同位素数据作为汇项输入 MixSIAR 模型,模型运行步长为“very long”,模型误差选取“process+residual”,由此估算得到的每个水源相应的中值(50%分位数)贡献比例即视为该水源对植物水的贡献率。

#### 1.4 数据处理

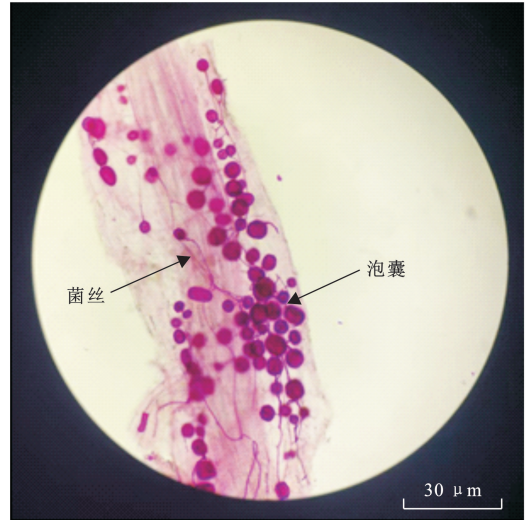
使用 Microsoft Excel 2019 进行数据的整理和统计,采用 Origin 2021 进行绘图。使用 IBM SPSS Statistics 22.0 软件进行统计分析,采用 LSD 多重比较法进行差异显著性检验,显著性水平  $p=0.05$ ;采用基于 R 语言的贝叶斯混合模型 MixSIAR 计算不同层位水分的贡献率。

## 2 结果与分析

### 2.1 接种 AMF 对玉米根系侵染率和生物量的影响

图 2 为玉米根系的 AMF 侵染情况,可观察到 AMF 的菌丝和孢囊结构。表 2 为不同处理下玉米的生物量和根系侵染率,接菌处理明显提高了玉米植株

的物质积累量,接菌处理下玉米的地上生物量和地下生物量的菌根贡献率分别达到了 38.8% 和 4.2%,总生物量的菌根贡献率为 31.8%,表明 AMF 有效促进了玉米的生长。根系侵染率是表征菌根真菌与宿主植物是否建立共生关系的重要指标,接菌处理显著提高了玉米的根系侵染率( $p<0.05$ ),表明接菌处理对玉米根系有显著的侵染效果。但是不接菌处理也存在少量 AMF 的侵染,表明不接菌处理高温灭菌不彻底。



注:图片为 Motic BA210 显微镜拍摄,放大倍数为 400 倍。

图 2 玉米根系的 AMF 侵染情况

Fig.2 AMF infection characteristics of maize roots

### 2.2 接种 AMF 对玉米根系分布的影响

借助 RhizoPheno 根系分析软件对玉米根系分布状况进行了定量化表征。图 3 为接种 AMF 对玉米不同层位根系特征值的影响,0—10,10—20,20—30,30—40 cm 分别指从该土层中收取根系的特征值,AM 处理玉米总根长、总根表面、总根体积和根尖数较 NM 处理提高 19.3%,14.8%,9.1% 和 34.0%。AM 处理和 NM 处理的根系主要分布在 0—20 cm 处的土壤中,但 AM 处理 20—30 cm 层的根系较 NM 处理更多,表明接种 AMF 后玉米根系下扎深度更深,AMF 促进了玉米根系的生长。

表 2 不同处理玉米的生物量和根系侵染率

Table 2 Biomass and root infection rate of maize under different treatments

处理	地上生物量/g	地下生物量/g	总生物量/g	根系侵染率/%
NM	2.9±1.4 <sup>a</sup>	0.7±0.4 <sup>a</sup>	3.6±1.8 <sup>a</sup>	8.9±3.8 <sup>b</sup>
AM	4.0±1.1 <sup>a</sup>	0.8±0.2 <sup>a</sup>	4.7±1.2 <sup>a</sup>	66.7±6.6 <sup>a</sup>

注:数据表示为平均值±标准误差,同一列不同字母表示在  $p<0.05$  水平上有差异显著。

根系按照直径的划分受植株培养时间和品种等多种因素影响,本研究依据 RhizoPheno 软件中获得的根系直径数据的分布状况,将根系为 3 种类型:细根( $d\leq 0.3$  mm)、中细根( $0.3<d\leq 0.7$  mm)和粗根

( $d>0.7$  mm),图 4 表明接种 AMF 可增加细根及粗根所占的比例,其中 AM 处理玉米根系中根系直径大于 0.7 mm 和小于 0.3 mm 的根所占比例分别为 24.9% 和 28.0%,而 NM 处理所占比例分别为 21.4% 和 24.8%。

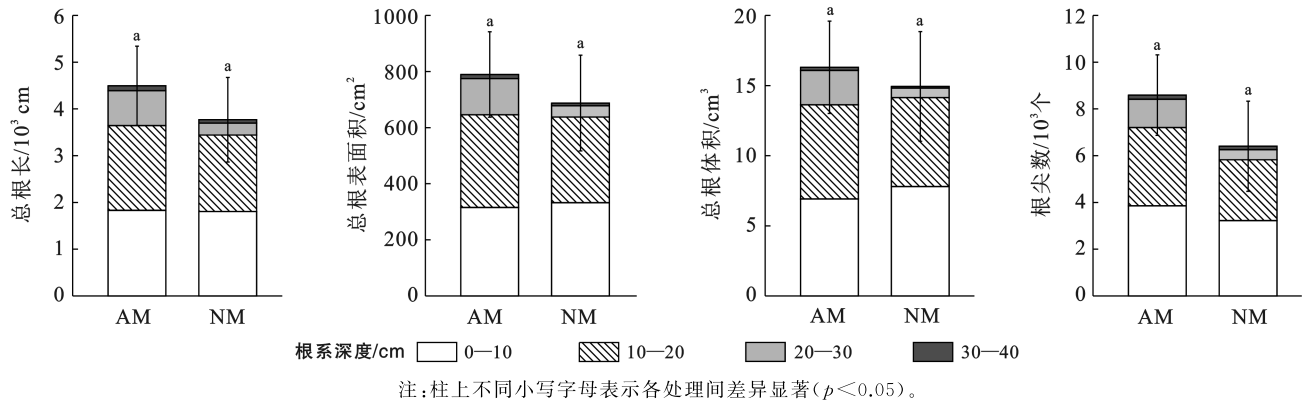


图 3 不同处理玉米的总根长、总根表面积、总根体积和根尖数

Fig.3 Total root length, total root surface area, total root volume and number of root tips of maize under different treatments

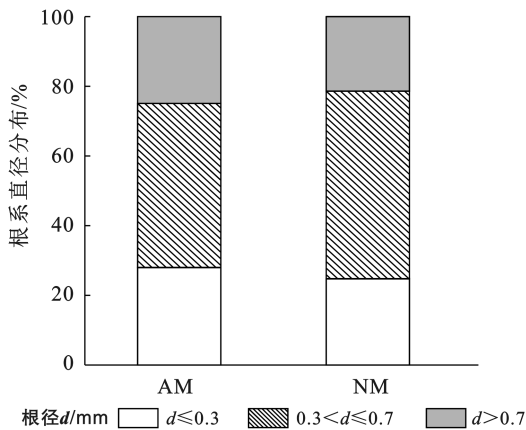


图 4 不同处理玉米根系直径分布

Fig.4 Distribution of maize roots diameter under different treatments

### 2.3 接种 AMF 对土柱水盐分布特征的影响

接种 AMF 后土壤剖面水分和盐分含量的垂直分布规律差异显著(表 3),结果表明自上而下逐渐降低,在表层 0—10 cm 土壤中,AM 处理含水率显著低

于 NM 处理,NM 处理显著低于 CK 处理,在 10—20 cm 砂土层中,AM 处理的含水率仍显著低于其他 2 种处理,在 20—60 cm 的土柱中段,各处理间不存在显著性差异;在 60—70 cm 的土柱下段,CK 处理含水率显著高于种植玉米的 NM 处理和 AM 处理,表明在没有种植玉米时,水分逐渐向下入渗至土壤深层。土壤电导率可以反映出土壤中盐分的含量高低,土柱在初始状态下各层砂土电导率应基本相同,试验进行过程中由于水分的迁移和玉米根系对盐分的吸收等因素导致了部分土层电导率发生变化,顶部 0—20 cm 土层处 AM 和 NM 处理电导率均显著高于 CK 处理,且 AM 处理略低于 NM 处理,40—50 cm 黏土层的电导率 CK 处理更高,这表明 0—30 cm 土层中的盐分可能源于黏土隔水层,该土层正是植物根系主要分布的层位,表明植物根系能影响土柱中的水盐分布。相比于 NM 处理,AM 处理表层 0—30 cm 土层含水率和电导率均更低,其原因可能为接菌处理改善玉米根系分布后提升了根系从土壤中吸收水分和养分的能力。

表 3 不同处理下不同土层含水率和电导率的差异显著性

Table 3 Differences of moisture content and conductivity of different soil layers under different treatments

土层位置/ cm	含水率/%			电导率/( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )		
	CK	NM	AM	CK	NM	AM
0—10	2.6±0.3 <sup>a</sup>	2.0±0.8 <sup>ab</sup>	1.5±0.5 <sup>b</sup>	74.5±6.9 <sup>b</sup>	102.8±8.9 <sup>a</sup>	89.5±8.0 <sup>ab</sup>
10—20	3.4±0.3 <sup>a</sup>	3.5±0.1 <sup>a</sup>	2.4±0.3 <sup>b</sup>	110.1±22.6 <sup>b</sup>	178.8±28.9 <sup>a</sup>	155.2±38.7 <sup>ab</sup>
20—30	3.9±0.9 <sup>a</sup>	4.3±0.9 <sup>a</sup>	3.0±0.1 <sup>a</sup>	138.6±36.9 <sup>b</sup>	220.4±4.2 <sup>a</sup>	186.5±20.7 <sup>ab</sup>
30—40	4.7±0.9 <sup>a</sup>	4.5±0.1 <sup>a</sup>	3.2±2.1 <sup>a</sup>	180.5±30.2 <sup>a</sup>	216.0±19.7 <sup>a</sup>	218.9±6.0 <sup>a</sup>
40—50	25.2±0.6 <sup>a</sup>	23.0±0.2 <sup>a</sup>	22.8±1.9 <sup>a</sup>	640.4±58.2 <sup>a</sup>	508.6±79.4 <sup>b</sup>	537.0±37.2 <sup>b</sup>
50—60	4.6±1.1 <sup>a</sup>	3.8±0.1 <sup>a</sup>	3.8±0.8 <sup>a</sup>	216.1±38.8 <sup>a</sup>	184.9±22.8 <sup>ab</sup>	142.7±11.3 <sup>b</sup>
60—70	12.3±2.0 <sup>a</sup>	5.2±1.9 <sup>b</sup>	5.5±0.7 <sup>b</sup>	336.7±31.5 <sup>a</sup>	365.7±53.9 <sup>a</sup>	235.6±10.5 <sup>b</sup>

注:不同小写字母代表同一土层下不同处理土壤含水率及电导率的差异,显著性水平为 0.05。

### 2.4 接种 AMF 对玉米水分利用策略的影响

各层土壤水及玉米根茎结合部水  $\delta^{18}\text{O}$  值见图 5。表层 0—20 cm 土壤中 AM 处理和 NM 处理有明显差异,AM 处理 0—10 cm 处的土壤水与玉米根茎结合

部水更为接近,而 NM 处理表层 0—10 cm 的  $\delta^{18}\text{O}$  值与 10—20 cm 处差异较小,这表明接种 AMF 后玉米根系更倾向于利用表层 0—10 cm 处水分,这与表层土壤含水率的显著差异表现出的规律一致。40—

50 cm处黏土层土壤水的  $\delta^{18}\text{O}$  值距离相对较远,表明黏土层并不是主要的供水层位。

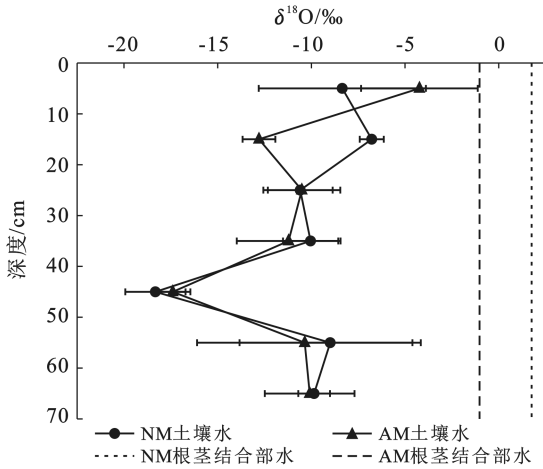


图 5 不同处理下木质部水  $\delta^{18}\text{O}$  值比较

Fig.5 Comparison of  $\delta^{18}\text{O}$  values in xylem water under different treatments

根据  $\delta^{18}\text{O}$  的测定结果将 0—20 cm 划分为浅层土壤, 20—40 cm 划分为中层土壤, 40—70 cm 划分为深层土壤。接菌处理下玉米植株对各层位潜在水源的利用率见图 6。

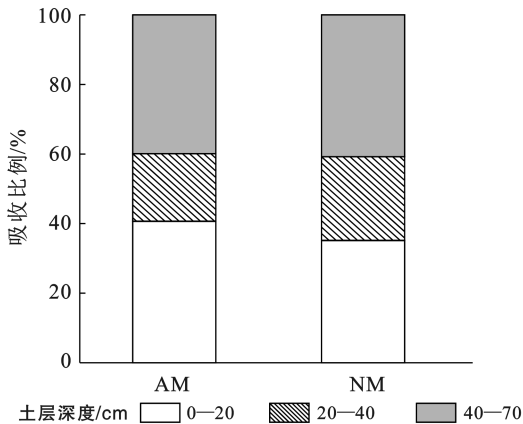


图 6 不同处理下玉米吸水比例

Fig.6 Water absorption ratio of maize under different treatments

图 6 表明, 含有黏土层的深层土壤水分对玉米的生长和浅层土壤水分在玉米利用来源中占比较大, 接菌处理改变了玉米对不同层位的吸收水分比例, 接菌处理的玉米较多地利用了浅层水分, 比不接菌处理高 5.5%, 较少利用了中层土壤水。深层土壤水的吸收比例没有明显差异, 比例约 40.0%。

### 3 讨论

有研究表明, 接菌处理可以显著提高玉米生物量并改善玉米根系结构<sup>[20]</sup>, 屈明华等研究表明任豆幼苗在接种摩西球囊霉后表现出较高的根系侵染率和生

物量<sup>[21]</sup>。本试验得出相似的结果, 接菌处理显著提高了 AMF 在玉米根系的侵染率, 玉米根系与摩西球囊霉形成菌根共生体后表现出明显的促生效应, AM 处理物质积累量较 NM 处理更高, 这可能是由于 AMF 的侵染增加了植物根系蔗糖合成酶相关基因表达, 使菌根共生体从宿主植物获得更多蔗糖等有机物<sup>[22]</sup>。

AMF 能够促进玉米根系生长并改变根系分布。根系是植物获取养分及矿质营养的重要器官, 根系形态能够直接反映出根系的生长状况<sup>[23]</sup>。Kaldorf M. 等<sup>[24]</sup>发现 AMF 增加了玉米体内生长素 IBA 的生物合成, 并引起玉米根系形态变化; 李胜宝等<sup>[25]</sup>研究发现玉米根系接菌处理后玉米根长、根表面积和根尖数均显著增加, 本次试验中 AM 处理总根长、总根体积、总根表面积及根尖数均高于 NM 处理, 这与前人的研究结果保持一致<sup>[24-25]</sup>。Yao Q. 等<sup>[26]</sup>发现接菌后柑橘根系长度增加的同时, 根系的平均直径却降低了。黄京华等<sup>[27]</sup>研究发现接菌后玉米根系中细根比例提升。本次试验根系中细根及粗根的所占比例较 AM 处理分别提高 3.2% 和 3.5%, 这表明根系分布发生明显改变。Tracy S. R. 等<sup>[28]</sup>研究证明细根主要参与水分及养分的吸收过程, 粗根主要负责水分及养分的运输。综合水盐分的分布状况据此推断细根及粗根比例的提升增强了玉米根系从土壤中获取并运输水分和养分的能力。

AMF 改变了玉米的水分利用特征, 使玉米更多地吸收表层土壤水分。植物根系主要通过根尖的根毛区来吸收水分, 植物根系的平均根直径和根尖数是决定植物吸收水源的重要因素, 所以植物根系分布对植物水分利用策略有很大影响<sup>[29]</sup>。本次试验中 AMF 对玉米水分利用策略的影响主要是通过改变根系分布, 使玉米对表层的水分利用得更加充分。有研究表明根外菌丝可以将水分输送到宿主根系, 提高植物根系水分吸收率<sup>[30]</sup>。在各处理的表层浇水量与初始饱和度相同的条件下接菌处理表层的含水率及电导率显著低于 NM 处理, 这说明 AM 处理玉米根系吸收表层 0—20 cm 水分及养分的能力较 NM 处理更强。氢氧稳定同位素及 MixSIAR 模型的分析结果证明 AM 处理吸收水分来源于表层 0—20 cm 的比例较 NM 处理高 5.5%, 以上两项试验结果均表明 AMF 促进了玉米对表层水分和养分的吸收。双稳定同位素的结果同时也表明黏土层并不是玉米的主要供水层位, 但是深层土壤水仍占据较大的比例, 这一原因可能为玉米的根系分布及水分利用策略发生改变后, 各处理间玉米根系对土壤水分和盐分的吸收量产生差异, 表层土壤水含水率降低导致其基质吸力提升<sup>[31]</sup>,

促进了深层土壤水向上迁移,从而使其占据了较大的供水比例。

西部煤矿区普遍降雨稀少且集中,蒸发强烈<sup>[32]</sup>。黏土层作为重构土壤三层海绵生态结构中的隔水层,材料较容易获得,其在雨季来临时能够在一定程度上阻止水分下渗,使水分保留在植物根系可以利用的土壤层位内。已有研究表明,露天矿区排土场土层重构模式能影响玉米的生长,相比于纯砂土的重构方式,海绵结构重构土体上种植的玉米根系细根比例和水分利用效率均有提高<sup>[33]</sup>。本研究结果表明在重构土体海绵结构下接种 AMF 能起到改善玉米根系分布和水分利用策略的作用,使玉米充分利用表土生态层及涵水层中储存的水分和养分。在今后的矿区生态农业建设工作中,可以利用重构土体海绵结构储水,AMF 促进作物用水的建设方法,二者联合有望缓解在西部煤矿区上进行生态农业建设时所面临的水资源短缺问题。

## 4 结论

(1) 接种 AMF 可以显著提升玉米根系侵染率至 60% 以上,并能够促进根系发育,改变根系分布特征。AM 处理玉米的总根长、总根表面积、总根体积和根尖数较 NM 处理分别提高 19.3%, 14.8%, 9.1% 和 34.0%; 接种 AMF 后根系中较细根及较粗根的比例增加。根系分布的改变提升了玉米获取水分及养分的能力,有利于玉米适应排土场新复垦地贫瘠,高度压实的土壤环境。

(2) AMF 改变了玉米的水分利用策略,AM 处理吸收的表层 0—20 cm 处的土壤水占比较 NM 处理提高 5.5%, 表明 AMF 侵染根系后玉米更倾向于利用表层 0—20 cm 处的水分,AMF 能够促进玉米利用重构土层海绵结构储蓄水分的优势,二者联合会在矿区农业建设中展现出巨大潜力。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 张东升,李文平,来兴平,等.我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究进展[J].煤炭学报,2017,42(1):36-43.  
Zhang Dongsheng, Li Wenping, Lai Xingping, et al. Development on basic theory of water protection during coal mining in northwest of China [J]. Journal of China Coal Society, 2017,42(1):36-43.

[2] 彭苏萍,毕银丽.黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J].煤炭学报,2020,45(4):1211-1221.  
Peng Suping, Bi Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in

coal mine areas in the Yellow River basin of China [J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(4):1211-1221.

- [3] 毕银丽,彭苏萍.一种露天矿排土场生态再造海绵结构及其应用;CN112970369B [P]. 2022-06-14.  
Bi Yinli, Peng Suping. An ecologically reconstituted sponge structure of an open pit dump and its application; CN112970369B [P]. 2022-06-14.
- [4] 胡振琪,王培俊,邵芳.引黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地技术的试验研究[J].农业工程学报,2015,31(3):288-295.  
Hu Zhenqi, Wang Peijun, Shao Fang. Technique for filling reclamation of mining subsidence land with Yellow River sediment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(3):288-295.
- [5] Bahadur A, Batool A, Nasir F, et al. Mechanistic insights into arbuscular mycorrhizal fungi-mediated drought stress tolerance in plants [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019,20(17):4199.
- [6] 李少朋,毕银丽,孔维平,等.丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果[J].环境科学,2013,34(11):4455-4459.  
Li Shaopeng, Bi Yinli, Kong Weiping, et al. Effects of the arbuscular mycorrhizal fungi on environmental phytoremediation in coal mine areas [J]. Environmental Science, 2013,34(11):4455-4459.
- [7] Boomsma C R, Vyn T J. Maize drought tolerance: Potential improvements through arbuscular mycorrhizal symbiosis? [J]. Field Crops Research, 2008,108(1):14-31.
- [8] 杜俊杉,马英,胡晓农,等.基于双稳定同位素和MixSIAR模型的冬小麦根系吸水来源研究[J].生态学报,2018,38(18):6611-6622.  
Du Junshan, Ma Ying, Hu Xiaonong, et al. Applying dual stable isotopes and a MixSIAR model to determine root water uptake of winter wheat [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(18):6611-6622.
- [9] 付昕宇,刘华民,于晓雯,等.岱海湖滨带湿地植物水分来源及利用策略研究[J].干旱区资源与环境,2020,34(12):42-49.  
Fu Xinyu, Liu Huamin, Yu Xiaowen, et al. Water sources and use strategies of plants in Lake Daihai wetland [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020,34(12):42-49.
- [10] Wang Jian, Lu Nan, Fu Bojie. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning [J]. Science of the Total Environment, 2019,666:685-693.
- [11] 陈乐涵.露天矿复垦区现代生态农业规划设计研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.  
Chen LeHan. Research on the design of modern ecological

- agriculture in the open pit-mine zone [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [12] 籍晟煜, 张强, 靳东升, 等. 种植玉米对矿区复垦土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响 [J]. 山西农业科学, 2020, 48(2): 228-232.
- Ji Shengyu, Zhang Qiang, Jin Dongsheng, et al. Effects of planting maize on the stability of soil aggregates and organic carbon distribution in reclaimed soil [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(2): 228-232.
- [13] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [14] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 基于 CT 分析露天煤矿复垦年限对土壤有效孔隙数量和孔隙度的影响 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 229-236.
- Wang Jinman, Guo Lingli, Bai Zhongke, et al. Effects of land reclamation time on soil pore number and porosity based on computed tomography (CT) images in opencast coal mine dump [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 229-236.
- [15] 裘浪, 毕银丽, 江彬, 等. 覆膜与接种 AM 真菌对半干旱区玉米根际土壤理化性质的影响 [J]. 菌物学报, 2017, 36(7): 904-913.
- Qiu Lang, Bi Yinli, Jiang Bin, et al. Effects of plastic film mulching and inoculation with AM fungi on soil physicochemical properties of maize rhizosphere in semiarid areas [J]. Mycosystema, 2017, 36(7): 904-913.
- [16] 张珊珊, 杨文忠. 橙黄硬皮马勃菌种的分离纯化及其菌根的人工合成 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(7): 1-8.
- Zhang Shanshan, Yang Wenzhong. Isolation and purification of *Scleroderma citrinum* and its artificial synthesis [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(7): 1-8.
- [17] West A G, Patrickson S J, Ehleringer J R. Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis [J]. Rapid Commun Mass Spectrom, 2006, 20(8): 1317-1321.
- [18] Moore J W, Semmens B X. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models [J]. Ecology Letters, 2008, 11(5): 470-480.
- [19] Beyer M, Hamutoko J T, Wanke H, et al. Examination of deep root water uptake using anomalies of soil water stable isotopes, depth-controlled isotopic labeling and mixing models [J]. Journal of Hydrology, 2018, 566: 122-136.
- [20] 沈鹏, 赵桂茹, 杨友琼, 等. 接种 AMF 与根系分隔对玉米马铃薯间作土壤氮素利用的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022(9): 166-173.
- Shen Peng, Zhao Guiru, Yang Youqiong, et al. Effects of AMF inoculation and root separation on soil nitrogen utilization in maize-potato intercropping [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(9): 166-173.
- [21] 屈明华, 俞元春, 王佳, 等. 喀斯特土壤条件下丛枝菌根真菌侵染对任豆幼苗生物量分配和根系结构特征的影响 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 766-776.
- Qu Minghua, Yu Yuanchun, Wang Jia, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on biomass distribution and root architecture characters of *Zenia insignis* seedlings in karst soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3): 766-776.
- [22] 邹英宁, 吴强盛, 李艳, 等. 丛枝菌根真菌对枳根系形态和蔗糖、葡萄糖含量的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1125-1129.
- Zou Yingning, Wu Qiangsheng, Li Yan, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on root system morphology and sucrose and glucose contents of *Poncirus trifoliata* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1125-1129.
- [23] Wang Xinxin, Li Hongbo, Chu Qun, et al. Mycorrhizal impacts on root trait plasticity of six maize varieties along a phosphorus supply gradient [J]. Plant and Soil, 2020, 448(1): 71-86.
- [24] Kaldorf M, Ludwig-Müller J. AM fungi might affect the root morphology of maize by increasing indole-3-butyric acid biosynthesis [J]. Physiologia Plantarum, 2000, 109(1): 58-67.
- [25] 李胜宝, 曹力, 秦丽, 等. 丛枝菌根真菌对砂培玉米幼苗根系特征、光合生理与镉累积的影响 [J]. 微生物学通报, 2020, 47(11): 3822-3832.
- Li Shengbao, Cao Li, Qin Li, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on root traits, photosynthetic physiology and cadmium accumulation of sand-cultured maize seedlings [J]. Microbiology China, 2020, 47(11): 3822-3832.
- [26] Yao Q, Lin F X, Chen J Z, et al. Responses of Citrus seedlings and a leguminous herb, *Stylosanthes gracilis*, to arbuscular mycorrhizal fungal inoculation [J]. Acta Horticulturae, 2008(773): 63-67.
- [27] 黄京华, 刘青, 李晓辉, 等. 丛枝菌根真菌诱导玉米根系形态变化及其机理 [J]. 玉米科学, 2013, 21(3): 131-135.
- Huang Jinghua, Liu Qing, Li Xiaohui, et al. Mechanism of maize root morphology change induced by Arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(3): 131-135.



- infiltration and water storage in loess area of western province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(2):50-59.
- [27] 席本野. 杨树根系形态、分布、动态特征及其吸水特性 [J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(12):37-49.  
Xi Benye. Morphology, distribution, dynamic characteristics of *Poplar* roots and its water uptake habits [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(12):37-49.
- [28] Avice J C, Ourry A, Lemaire G, et al. Root protein and vegetative storage protein are key organic nutrients for alfalfa shoot regrowth [J]. *Crop Science*, 1997, 37(4):1187-1193.
- [29] 董玉峰, 姜岳忠, 王卫东, 等. 大汶河流域杨树根系的生物量组成和空间分布 [J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(5):30-35.  
Dong Yufeng, Jiang Yuezhong, Wang Weidong, et al. Composition and spatial distribution of *Populus* root biomass in the Dawenhe Watershed [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(5):30-35.
- [30] 杨文斌, 王涛, 熊伟, 等. 低覆盖度治沙理论的核心水文原理概述 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(3):75-80.  
Yang Wenbin, Wang Tao, Xiong Wei, et al. Overview of hydrological principle of low vegetation coverage sand control [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(3):75-80.
- [31] 陈嘉嘉, 黄磊, 贾鸿飞, 等. 腾格里沙漠人工植被区不同植被类型土壤水分垂直变异特征及其动态变化模型 [J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(4):126-133.  
Chen Jiajia, Huang Lei, Jia Hongfei, et al. Vertical variability and dynamic simulation of soil moisture in different artificial vegetation arrangements in the Tengger Desert [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(4):126-133.
- [32] 吴丽丽, 刘丹一, 杨文斌, 等. 降雨量、土壤蓄水量对流动沙地土壤水分深层渗漏的影响 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(3):210-218.  
Wu Lili, Liu Danyi, Yang Wenbin, et al. Relationship between precipitation and soil water storage and soil deep percolation in mobile sand land [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(3):210-218.
- [33] 孙于卜. 晋西黄土区果农间作系统种间土壤水分竞争及调控 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.  
Sun Yubu. Interspecific soil water competition and regulation of fruit intercropping system in loess region of Western Shanxi [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [34] 朱羚, 金一兰, 丛日慧, 等. 环境因素及种间竞争在群落多样性格局中的作用 [J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6):1427-1435.  
Zhu Ling, Jin Yilan, Cong Rihui, et al. Effects of environmental factors and interspecific competition in community biodiversity pattern [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(6):1427-1435.
- [35] 罗超, 郭小平, 冯昶栋, 等. 乌海周边土壤种子库特征及其与地上植被和土壤因子的关系 [J]. *草业学报*, 2021, 30(11):13-28.  
Luo Chao, Guo Xiaoping, Feng Changdong, et al. The characteristics of the soil seed bank in Wuhai and surrounding areas and the relationship with vegetation and soil factors [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(11):13-28.

(上接第 8 页)

- [28] Tracy S R, Nagel K A, Postma J A, et al. Crop improvement from phenotyping roots: Highlights reveal expanding opportunities [J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(1):105-118.
- [29] Zhang Xiang, Xiao Yang, Wan Hui, et al. Using stable hydrogen and oxygen isotopes to study water movement in soil-plant-atmosphere continuum at Poyang Lake wetland, China [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2017, 25(2):221-234.
- [30] 邢丹, 王震洪, 申刚, 等. 丛枝菌根真菌对岩溶区植物水分吸收利用的促进作用探讨 [J]. *世界林业研究*, 2019, 32(3):24-29.  
Xing Dan, Wang Zhenhong, Shen Gang, et al. Promoting mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi on plants water absorption and utilization in karst area [J]. *World Forestry Research*, 2019, 32(3):24-29.
- [31] 袁聚云. 土质学与土力学 [M]. 第 4 版. 北京: 人民交通出版社, 2009.  
Yuan Juyun. *Soil properties and Soil Mechanics* [M]. 4th ed. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [32] 徐智敏, 孙亚军, 高尚, 等. 干旱矿区采动顶板导水裂隙的演化规律及保水采煤意义 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(3):767-776.  
Xu Zhimin, Sun Yajun, Gao Shang, et al. Law of mining induced water conduction fissure in arid mining area and its significance in water-preserved coal mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(3):767-776.
- [33] 毕银丽, 李明超, 柯增鸣, 等. 土层重构模式下接种 DSE 对玉米根系形态及水分利用的影响 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(8):3191-3203.  
Bi Yinli, Li Mingchao, Ke Zengming, et al. Effects of DSE inoculation on maize growth and water use under soil reconfiguration mode [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(8):3191-3203.