



## 接菌影响模拟重构土层水分布及水同位素分馏

毕银丽 田乐煊 柯增鸣

### 引用本文:

毕银丽, 田乐煊, 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1445>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 接种AMF对西部煤矿区紫穗槐根系分布和水分利用效率的影响

Effect of AMF inoculation on root distribution and water use efficiency of *Amorpha fruticosa* L in western coal mining area

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 311–322 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0330>

#### 接菌对根土复合体抗剪拉作用机理及其矿山生态修复潜力

Mechanisms of shear tension resistance of root–soil complexes by inoculated bacteria and potential for ecological restoration in mines

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 493–501 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2167>

#### 生态脆弱矿区地表裂缝动态变化对土壤含水量的影响

Influence of dynamic variation of ground cracks on soil water content in ecological–fragile coal mining areas

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a5b898e5-f10f-4669-9690-af07549dd972>

#### 神东矿区接种AMF对植物土壤生态化学计量及养分回收的影响

Effects of AMF inoculation on plant–soil ecological stoichiometry and nutrient recovery in Shendong mine

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 354–363 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0273>

#### 接种菌根对采煤沉陷区苜蓿生长及土壤改良影响研究

Research on effect of arbuscular mycorrhizal fungi on alfalfa growth and soil improvement in mining subsidence area

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3f9bea58-ed47-402a-821e-6a2b3ad717b0>

#### 煤层气井产出水离子及同位素演化特征研究

Study on evolution characteristics of water ions and isotopes produced by coalbed methane wells

煤炭科学技术. 2019(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/37fc1867-db73-41c2-90ec-9ce52dd05699>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 煤炭加工与环保



移动扫码阅读

毕银丽, 田乐煊, 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.

## 接菌影响模拟重构土层水分布及水同位素分馏

毕银丽<sup>1,2</sup>, 田乐煊<sup>1</sup>, 柯增鸣<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:** 水资源决定着生态恢复过程中的植被结构和种类, 是矿区实现绿色生产、生态修复的主要限制因素。为了研究半干旱煤矿区接种丛枝菌根真菌 (*Arbuscular Mycorrhiza Fungi*, AMF) 对植物根系提水、模拟土壤水分分布及水同位素分馏的影响, 本研究以玉米为供试植物, 布设室内分层土柱模拟试验。设置纯土柱 (CK1)、土柱+玉米 (CK2)、土柱+接菌玉米 (AMF) 三个处理, 每个处理3个重复, 测定土柱毛细水上升高度、土壤含水率以及玉米茎水与土壤水的氢氧同位素。分析了不同处理之间玉米生长发育情况、水分运移规律以及不同深度土壤水同位素分馏的差异, 结果表明: ①接菌有效促进玉米生长发育, 株高、地上生物量、地下生物量、总根长比 CK2 处理分别提高 15.78%、23.39%、43.40%、21.0%。②AMF 促进根系吸收底部黏土层内的蓄水, 提高毛细水上升高度 18.9%, 玉米吸水空间扩大约 50%, 进而影响土柱水分分布。③土柱表层、深层土壤水与初始水相比分馏差异较大。在表层 0~10 cm 处, CK2 与 AMF 处理的 <sup>18</sup>O、<sup>2</sup>H 富集系数显著低于 CK1 处理, 在深层 60~70 cm 处, AMF 处理的 <sup>18</sup>O、<sup>2</sup>H 富集系数显著高于 CK2 处理, 表明 AMF 可以增强深层土壤水同位素分馏的现象。综上, 接菌可以提高玉米对重构土层内深部土壤水的吸收, 促使根系通过提水效应反释至上部干燥土壤, 提高水分重分配能力, 影响不同深度的土壤水同位素分馏, 该结果为解决半干旱煤矿区排土场土地复垦水资源短缺问题提供了科学依据和技术支持。

**关键词:** 矿区生态修复; 土柱试验; 丛枝菌根; 水同位素分馏; 土壤水运移; 提水作用

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)09-0274-10

## Simulated reconstruction of soil water distribution and isotope fractionation under the influence of AMF inoculation

BI Yinli<sup>1,2</sup>, TIAN Lexuan<sup>1</sup>, KE Zengming<sup>1</sup>

(1. Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Areas of West China, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory for Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Water resources determine the vegetation structure and types in the ecological restoration process, and are the main limiting factor for achieving green production and ecological restoration in mining areas. To investigate the effects of inoculation of Arbuscular Mycorrhiza Fungi (AMF) on plant root water extraction, simulated soil water distribution and water isotope fractionation in a semi-arid coal mining area, this study conducted the indoor stratified soil column simulation experiment with maize as the test plant. Three treatments were set up as pure soil column (CK1), soil column + maize (CK2), and soil column + inoculated maize (AMF), with three replicates for each treatment. Meanwhile, the height of capillary water rise in soil columns, soil water content, as well as hydrogen and oxygen isotopes of maize stem water and soil water were measured. The growth and development of maize, water transport patterns, and discrepancies in soil water isotope fractionation at different depths among different treatments were also analyzed in this article. Results showed that: (1) Inoculation could effectively promote the growth and development of maize, with plant height, aboveground biomass, underground biomass and total root length increased by 15.8%, 23.4%, 43.4% and 21.0%, respectively, compared to CK2 treatment. (2) AMF

收稿日期: 2022-09-06

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2022-1445

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFF1303303); 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究资助项目(2022-YRUC-01-0304)

作者简介: 毕银丽(1971—), 女, 陕西西脂人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: ylb88@126.com

have also promoted the root system to absorb the retain water in the bottom clay layer, increased the capillary water elevation by 18.9%, and expanded the water absorption space of maize by approximately 50%, thereby affecting the water distribution in the soil columns. (3) There were significant fractionation differences between the surface and deep soil water of soil column compared to the initial water. At the surface layer of 0 ~ 10 cm, the  $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$  enrichment coefficients of CK2 and AMF treatments were significantly lower than those of CK1 treatment, while at the deep layer of 60 ~ 70 cm, the  $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$  enrichment coefficients of AMF treatment were significantly higher than those of CK2 treatment, indicating that AMF could enhance the phenomenon of isotopic fractionation in deep subsoil water. In summary, inoculation can improve the absorption of deep soil water by maize in the reconstructed soil layer, prompt the root system to counter-release to the upper dry soil through the water lifting effect, improve the water redistribution capacity, and affect the soil water isotope fractionation at different depths. The results could provide scientific basis and technical support for addressing the shortage of water resources for land reclamation in semi-arid coal mining areas.

**Key words:** ecological restoration in mining area; soil column test; arbuscular mycorrhiza; water isotope fractionization; soil water transport; water lifting

## 0 引 言

半干旱区露天采矿常引发土壤盐碱化<sup>[1]</sup>、荒漠化<sup>[2]</sup>、生态系统失衡<sup>[3-4]</sup>等系列生态问题。煤炭产业高强度开采形成大面积排土场,其堆积过程中土石大小混杂、大型机械压实不均、表土贫瘠等特点加大了土地复垦与生态重建的难度。对此,学者提出了排土场土层重构类的土体改良措施,即利用不同的表土替代物进行土地充填复垦,从而改良压实土体的物理性质使其土层顺序近似还原未开采前的土壤剖面<sup>[5]</sup>。重构后的土层内各项土壤物理性质在垂向上属于弱变异,土壤容重及孔隙率在层间存在显著差异<sup>[6]</sup>,且重构土壤剖面有利于水分的保持<sup>[7-8]</sup>。同时, HUANG 等<sup>[9-10]</sup>设置 20 个模拟自然土壤剖面分析其渗透与排水过程,研究发现非均质的土层重构模式土壤储水更多,并证实表层覆盖砂土可以更好延缓水分的蒸发。

水分是半干旱区生态重建的主要限制因素,提高土壤水分利用效率是增强西部干旱区植被抗逆性的有效途径之一。随着菌根生物复垦生态工程在矿区排土场中的广泛应用,菌根生物复垦使矿区植被覆盖度显著提高,矿区生态服务功能显著提升。研究表明丛枝菌根真菌 (*Arbuscular Mycorrhiza Fungi*, AMF) 在促进植物养分吸收、土壤结构改良、修复根系功能的同时,在增强植物抗旱性方面也有重要作用<sup>[11]</sup>。人为接种丛枝菌根真菌可以帮助植物吸收土壤水分,避免植物组织脱水,提高其抗旱能力<sup>[12]</sup>。RUTH 等<sup>[13]</sup>利用生根实验量化了 AMF 对植物吸水的贡献率,结果发现菌丝吸收的水分约占植物吸收水分的 20%,也有研究表明,干旱状态下 AMF 菌丝的吸水速率为正常供水时的 2 ~ 7 倍<sup>[14]</sup>,其本质原因是菌丝穿入植物根系表皮细胞形成丛枝结构,菌根可以依据宿主植物地上部分对水分的需求灵活调整

宿主水分的运输与分配,提高水分利用率<sup>[15]</sup>。另外, AMF 分泌出的球囊霉素可提高土壤团聚体的稳定性,进而提高土壤保水能力<sup>[16]</sup>。稳定氢氧同位素 ( $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ ) 作为水分子的一部分,其可揭示大量土壤水的相关信息,尤其近几年水同位素检测技术日益成熟,被国内外众多学者选择作为揭示土壤水运移规律<sup>[17]</sup>、植物用水规律<sup>[18-19]</sup>、水体蒸发规律<sup>[20-21]</sup>的一项有效手段。

然而,目前基于半干旱煤矿区排土场土层重构模式下,针对 AMF 对植被根区土壤水分分布及水分分馏的研究鲜有报道,本文通过室内土柱实验,研究 AMF 与重构土层对玉米根系吸水及根区水分重分配的影响,为解决矿区排土场土地复垦方式单一、水资源短缺、复垦难度大、成本高等问题提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试植物为玉米,品种为“品糯 28 号”,于中国种子交易网购入,为半干旱矿区生态修复常用的经济作物。选取表面无损且大小均匀的玉米种子,使用 75% 的乙醇静置灭菌 1 min,振荡 2 min,去离子水冲洗 3 次,10% 的过氧化氢振荡 5 min,随后以无菌水洗净,于 25 ℃ 黑暗培养箱中培养 3 d,备用。

供试菌种为 AMF 中的地表球囊霉 (*Glomus versiforme*),由中国矿业大学(北京)微生物复垦实验室提供。

供试土壤分别为河砂与咸阳市泾阳县采集的黄土,均过 2 mm 筛,经 121 ℃ 高压蒸汽灭菌 90 min,风干后备用。

试验装置为可组装的透明有机玻璃柱,其单个直径 15 cm、高 10 cm、厚 0.3 cm,侧面有 2 个对立直径 1.5 cm 的小孔,试验中将其组装为总高 80 cm 的土柱装置。



## 1.2 试验设计

试验共设置 3 个处理,分别为纯土柱不种玉米(CK1)、种植玉米不接菌(CK2)、种植玉米接菌(AMF),每个处理 3 个重复,共 9 个土柱。培育期为 110 d(图 1)。

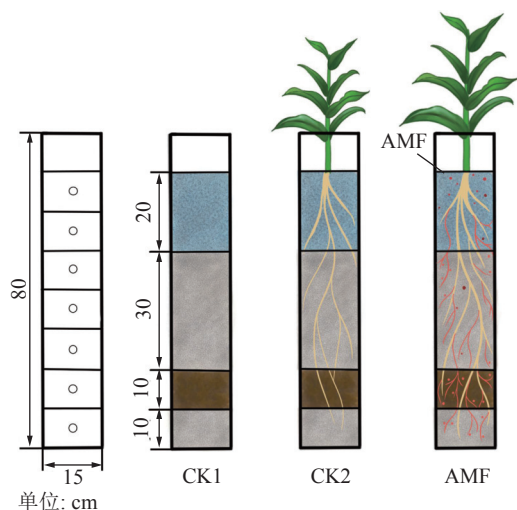


图 1 试验土柱设计及装置

Fig.1 Design and installation drawing of test soil column

试验在西安科技大学西部矿山生态环境修复研究院进行,试验期间环境平均温度 23.4 ℃、平均湿度 67.3%。将单个透明有机玻璃柱采用硅脂对接口进行防水处理后,使用玻璃胶组装为总高度 80 cm 的土柱装置,距底部 10 cm 设一层饱水黏土层,密度为 1.55 g/cm<sup>3</sup>,其余用砂土填充,密度为 1.6 g/cm<sup>3</sup>。黏土层采用毛细饱和法饱和,平均饱和度 87%,平均含水率 26%。每个土柱种 3 粒种子,其中 AMF 处理需挖一个约 5 cm 深的小坑,在种子周围撒入 50 g 的地表球囊霉菌剂,覆盖砂土,浇水 250 mL,发芽后选取生长大小相近的幼苗进行间苗,浇水频率为 3 d/次,每次 50 mL,可供玉米维持生长状态,表土层含水率始终保持在 2.5% 左右。

## 1.3 测定指标与方法

### 1.3.1 毛细水上升高度

试验自 2021 年 4 月 17 日开始,每日使用卷尺测量毛细水上升高度,测量黏土层含水率频率 3 d/次。

### 1.3.2 丛枝菌根真菌侵染

试验结束收获玉米时,从玉米根系的须根中随机选取新鲜根样(50 个根段制片),用 10%KOH 溶液浸泡 24 h,去离子水洗净,使用酸性品红乳酸甘油染色液染色法染色,备用,随后在显微镜(Motic Panthera Client)下观察玉米根系的菌根侵染率。

### 1.3.3 玉米生长指标

使用钢尺测量玉米的株高冠幅,使用 SPAD-502

Plus 测量玉米叶绿素(SPAD)值,玉米根系清洗干净后使用 Microtek Scan Maker i800 plus 进行扫描,并用根系表型分析系统 V2.3.2 软件分析根系结构。采用干重法测定玉米地上、地下生物量。

### 1.3.4 土壤水及玉米茎水稳定氢氧同位素

试验期间,收集每次的灌溉用水置于 10 mL 样品瓶中,冷冻保存备用,作为土壤水同位素分馏前的基底值。试验结束后,土柱每 10 cm 一层采集土壤样品,玉米采集其根茎结合部,装入 10 mL 小玻璃瓶中,并且使用 Parafilm 封口膜密封冷冻保存,采用国际上通用的低温真空抽提法抽提土壤水与玉米茎水(真空抽取系统 LI-2000, LICA United Technology Limited, China),备用,使用液态水同位素分析仪(LGR912-0008, ABB Ltd, Canada)分别测量稳定氢氧同位素,仪器的测量精度为±0.1‰(δ<sup>2</sup>H)和±0.3‰(δ<sup>18</sup>O)。分析得出的 δ<sup>2</sup>H 和 δ<sup>18</sup>O 以相对于维也纳标准平均海洋水(VSMOW)的千分差值表示:

$$\delta = \left( \frac{R_A}{R_r} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中:δ 为对应样品的稳定氢氧同位素值;R<sub>A</sub> 为样品中重同位素与轻同位素的比值;R<sub>r</sub> 为国际通用标准物的重同位素与轻同位素的比值<sup>[22]</sup>。

δ 值可由下式转换为 R 值:

$$R_A = R_r(1 + \delta_{A/r}) \quad (2)$$

某种元素的不同同位素原子以不同比例分配于不同物质或物相中的现象,称为同位素分馏。在本研究中,各深度土壤水相对于初始用水均会产生分馏,同位素分馏系数是用来描述某一体系中发生同位素分馏程度大小的参数<sup>[22]</sup>,用 α 表示:

$$\alpha_{C/E} = \frac{R_C}{R_E} \quad (3)$$

式中:R<sub>C</sub> 和 R<sub>E</sub> 分别为特定同位素在物质 C 和 E 中的同位素比值;α<sub>C/E</sub> 为某反应系统内生成物 C 中某元素的两种特定同位素组成的比值与反应物 E 中同一元素中的同样两种同位素组成比值的商<sup>[22]</sup>。

联立式(2)、式(3),可得 α 和 δ 值之间的换算关系:

$$\alpha_{A/B} = \frac{1000 + \delta_A}{1000 + \delta_B} \quad (4)$$

通常,α≈1。因此,α 对于 1 的偏离量称之为“富集系数”,富集系数 ε<sub>E</sub>(C) 表示某反应系统中生成物 C 的同位素组成相对于反应物 E 中同位素组成的富集程度(ε>0)或是贫化程度(ε<0)<sup>[22]</sup>,其计算公式为:

$$\varepsilon_E(C) \equiv \varepsilon_{C/E} = \alpha_{C/E} - 1 \quad (5)$$

## 1.4 数据统计

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理及统计,

应用 IBM SPSS Statistics 25 统计软件进行单因素方差分析 (ANOVA), 显著性水平  $\alpha=0.05$ 。用 Origin 2021 软件作图。

菌根贡献率的计算采用以下公式<sup>[23]</sup>:

$$R_{MC} = \frac{D_{AM} - D_{CK}}{D_{CK}} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $R_{MC}$  为菌根贡献率;  $D_{AM}$  为接菌植物指标数据;  $D_{CK}$  为对照植物指标数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 接菌对玉米生长指标的影响

接种 AMF 后玉米的各项生物指标均高于对照

(表 1), 表明接菌对玉米植株的生长具有正向促进效果, 其中 AMF 在株高、地上生物量、地下生物量显著高于 CK2 处理, 分别增加 15.78%、23.39%、43.40%。表 2 为不同处理玉米根系的根长、体积、平均面积、投影面积在不同深度的结果。由表 2 可知, 接菌后玉米根系结构优于未接菌处理, 并且在 0 ~ 40 cm 内差异显著。AMF 处理中根系可伸长至 70 cm 处, CK2 处理在同深度内未发现根系。接菌后总根长、根体积、投影面积增长幅度分别为 21.0%、14.5%、21.4%。表明菌根在该分层土体结构中可以促进根系生长, 加强根对水分与养分的吸收利用, 增大玉米干物质。

表 1 接种菌根对植株生长的影响  
Table 1 Effect of mycorrhizal inoculation on plant growth

参数	地径/cm	株高/cm	冠幅/cm	SPAD	地下生物量/g	地上生物量/g	玉米含水率/%
CK2	3.15±0.21a	33.21±1.23b	23.25±0.17a	37.97±0.21a	1.06±0.04b	4.96±0.25b	75.15±0.14a
AMF	3.32±0.31a	38.45±0.18a	23.4±0.13a	39.43±0.69a	1.52±0.44a	6.12±0.32a	76.50±0.17a
菌根贡献率	5.40%	15.78%	0.65%	3.84%	43.40%	23.39%	1.80%

表 2 AMF 对玉米根系结构的影响  
Table 2 Effect of AMF on maize root structure

处理方式	深度/cm	根长/m	平均直径/mm	体积/cm <sup>3</sup>	投影面积/cm <sup>2</sup>
CK2	0 ~ 10	56.19±2.14b	0.57±0.03a	22.17±1.56a	830.50±11.56b
	10 ~ 20	51.77±1.98b	0.50±0.04a	14.54±1.27b	770.95±17.34b
	20 ~ 30	21.26±0.78a	0.48±0.01a	4.97±0.23a	222.47±9.75b
	30 ~ 40	10.01±3.24a	0.51±0.07a	2.24±0.39a	61.49±7.89b
	40 ~ 50	0.61±0.14a	0.56±0.03a	0.16±0.01a	7.69±1.23a
	50 ~ 60	0.83±0.17a	0.42±0.01a	0.18±0.01a	25.29±4.23a
	60 ~ 70	0	0	0	0
AMF	0 ~ 10	64.85±0.23a	0.58±0.04a	22.64±1.34a	1 014.36±9.17a
	10 ~ 20	65.77±1.36a	0.53±0.03a	19.40±0.76a	829.89±9.21a
	20 ~ 30	16.66±2.13b	0.51±0.02a	4.83±0.03a	324.86±7.56a
	30 ~ 40	5.87±2.15a	0.50±0.03a	1.31±0.13a	151.93±6.50a
	40 ~ 50	1.27±0.16a	0.59±0.04a	0.36±0.03a	22.20±2.01a
	50 ~ 60	2.35±0.10a	0.49±0.01a	0.36±0.02a	28.93±4.02a
	60 ~ 70	0.02±0a	0.42±0.02a	0	0.79±0.04a

### 2.2 接菌对土柱毛细水运移的影响

图 2 为不同处理对黏土层毛细水上升高度及速率的影响。土体内水分上升速率大致呈现下降趋势(图 2b), 且各处理前 15 d 的水分上升速率具有相同的规律。AMF 处理的水分上升高度在 20 d 后显著高于 CK1, 最终湿润锋高度相比 CK1 提高 18.9%, 表

明试验初期菌根尚未发挥作用, 但种植玉米后根系发育从而紧实土壤, 降低孔隙大小, 增大土壤密度, 提高了毛细水上升高度。在试验后期与 CK1 相比, CK2 与 AMF 处理中水分上移速率均有从下降到上升的转折点, 但 AMF 处理较 CK2 提前了 9 d, 表明 AMF 促进玉米根系生长, 并且增强了根系提水能力,

提高玉米对深部土壤水的利用率。

图 3 为饱水黏土层含水率变化规律, CK1 与 AMF 处理黏土层初始含水率近似相等, 在玉米处于发芽期时, CK1 黏土层内含水率下降更快。18 d 后 AMF 处理黏土层含水率下降显著, 分析原因为根系发育且菌丝伸长直接吸收利用黏土层内水分。34 d 后 3 种处理均在黏土层内补充液体养分, 所以出现含水率增加现象, 除此之外, 在 CK1 处理中含水率变化整体呈现下降趋势, 但 AMF 处理在 25 d 出现含水率增长的现象, 分析是因为 AMF 增强了根系对水的重分配作用, 所以黏土层含水率出现反复增减的现象。

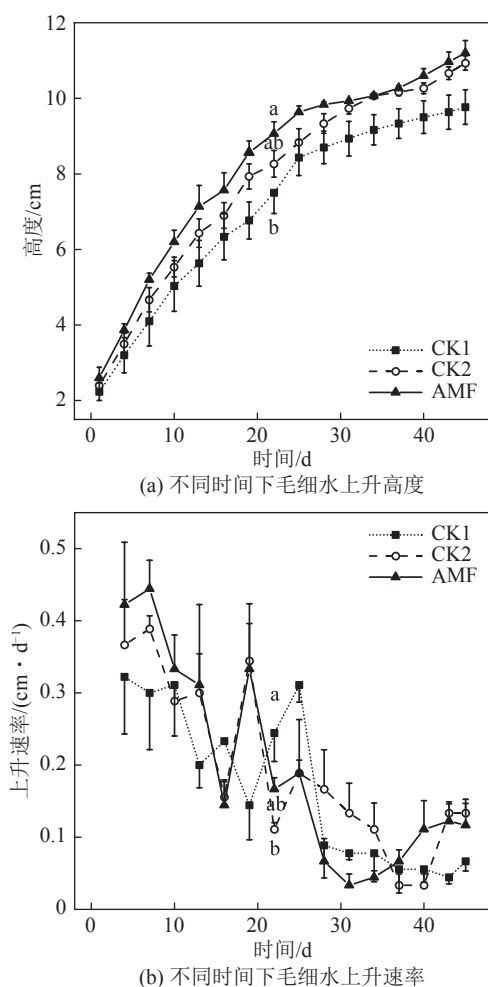


图 2 不同处理下土柱毛细水上升高度及速率

Fig.2 Rising height and rate of capillary water in soil column under different treatments

### 2.3 玉米茎水与土壤水同位素特征

图 4 为不同处理玉米茎水及土壤水氢氧同位素特征。3 种处理  $\delta^{18}\text{O}$  均呈现表层大深层小的变化规律 (图 4a)。CK2 处理中玉米茎水的  $\delta^{18}\text{O}$  与 10~40 cm 处的土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  更为接近, 说明该处理中玉米的生长用水主要来源于 10~40 cm 处土壤水。而

AMF 处理中植物茎的  $\delta^{18}\text{O}$  与 10~70 cm 处的土壤水  $\delta^{18}\text{O}$  均表现为相近关系, 同时又在一定范围内波动, 该规律表明接菌后玉米根系可利用的水分深度更广泛, 比 CK2 处理用水空间提高了 50%。

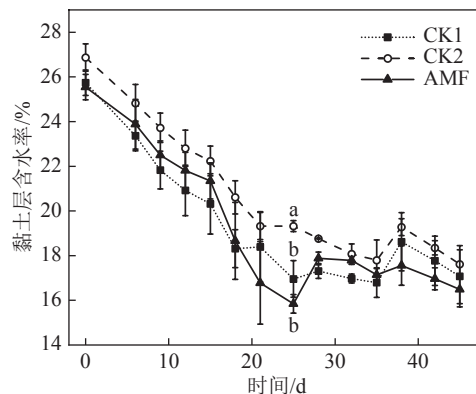


图 3 不同处理黏土层含水率变化规律

Fig.3 Variation law of moisture content of clay layer under different treatments

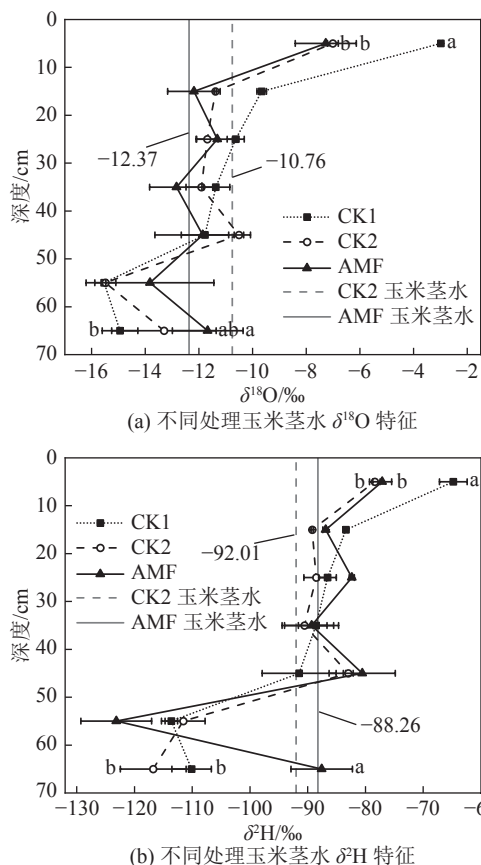


图 4 不同处理玉米茎水及土壤水氢氧同位素特征

Fig.4 Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in maize stem water and soil water under different treatments

3 种处理  $\delta^2\text{H}$  随深度的变化规律整体与  $\delta^{18}\text{O}$  相似 (图 4b), 说明表土层因为土壤蒸发作用使 H 原子以水的形式蒸散发到空气中, 而 D 由于分子质量大

则留在了土壤水中。CK2中玉米茎水的 $\delta^2\text{H}$ 与10~40 cm处的土壤水 $\delta^2\text{H}$ 更为接近,说明该处理的玉米主要吸收利用10~40 cm处土壤水。而AMF处理中植物茎的 $\delta^2\text{H}$ 与10~50 cm、60~70 cm处的土壤水 $\delta^2\text{H}$ 更为接近。与CK2相比,吸收范围增加了66.6%,说明接菌处理玉米根系发育优于未接菌处理,所以根系可以吸收利用保水黏土层向下渗透的土壤水。

从总体来看,种植有玉米的处理中 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^2\text{H}$ 值在深层与浅层之间出现增减反复的现象,说明浅层和深层的部分水分来源相同,表明玉米利用根系的提水作用从深层土壤中吸收水分,通过主根向上运输,再由浅层须根释放到表层较为干燥的土壤中,进而改善表层土壤的干旱缺水的现象,也可以保证

植物自身的表层根系的水分供给。

图5为不同处理土壤水 $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ 富集系数。由图5a,图5b可知,与灌溉用水的水同位素相比, $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ 富集系数在各处理间均呈现由富集转向贫化的趋势。表层0~10 cm处,AMF与CK2处理的 $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ 富集系数显著低于CK1,表明种植玉米后,表土层中土壤水同位素分馏的现象减弱。10~50 cm内的土壤水同位素分馏现象较弱,在50 cm以下的深层土壤中,土壤水同位素分馏的现象逐渐增强,主要表现为随深度的增加 $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ 逐渐贫化。60~70 cm处,AMF处理的 $^{18}\text{O}$ 与 $^2\text{H}$ 的富集系数显著高于CK1处理,但CK2与CK1处理间没有显著差异,且AMF处理的 $^{18}\text{O}$ 与 $^2\text{H}$ 的富集系数的绝对值显著低于CK1处理。

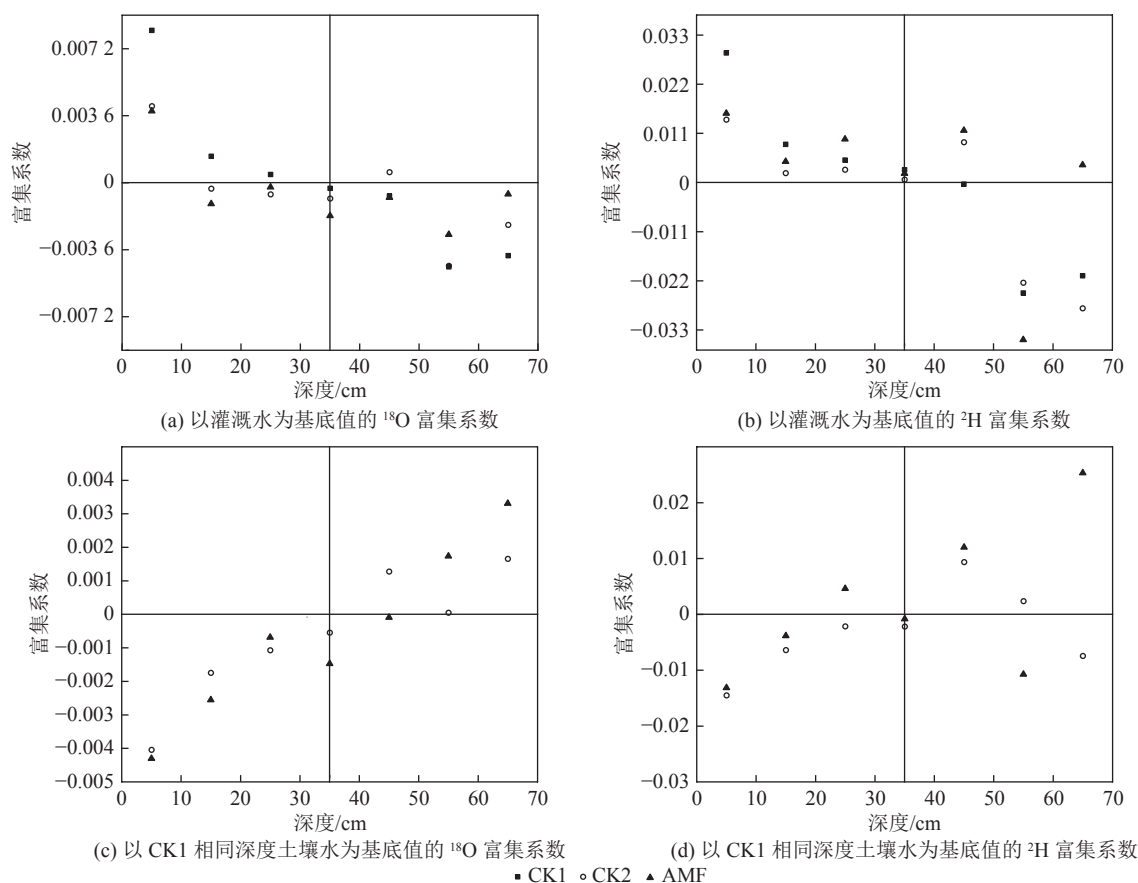


图5 不同处理土壤水 $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ 富集系数

Fig.5  $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$  enrichment coefficients of soil water under different treatments

由图5c,图5d可知,与CK1处理同一深度的土壤水同位素相比,CK2、AMF处理中均表现出随深度增加由贫化 $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ 转变为富集状态。在深度0~50 cm内,CK2、AMF的 $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ 富集系数无显著差异,在60~70 cm处,AMF的 $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ 的分馏程度均大于CK2处理。表明接菌在深层土壤中比对照的

分馏强度大,且在深度60~70 cm处AMF与CK2相比由贫化 $^2\text{H}$ 状态转变为富集 $^2\text{H}$ 状态。

### 3 讨论

3.1 土体分层与根系联合作用对土壤水分布的影响  
土地复垦技术在半干旱煤矿区区内广泛应用,



利用土层重构的方式起到稳定土壤的作用<sup>[24]</sup>,并且重构后的土层结构在对水分的保蓄能力上与原始地貌更为相似<sup>[25]</sup>。而植物修复是矿区土地复垦改善景观、恢复原始地貌的一项关键绿色技术<sup>[26]</sup>。本试验为模拟半干旱沙地煤矿区排土场降雨量小、蒸发量大的试验环境,只设一个底部饱和黏土层作为蓄水土层,以期利用底部黏土层达到减少蒸发提高水分利用效率的作用<sup>[27]</sup>,试验结果表明,重构后的土层增强了对水分的保蓄能力,其中含水层毛细水未达到表土层,减弱了含水层的蒸发作用<sup>[28]</sup>,在后续的生态重建中可以为植物生长提供长期且稳定的水源补给。植物在处于干旱状态时会刺激根系的提水作用,提高表层土壤的毛细水带,该结论与张杨<sup>[29]</sup>、李唯等<sup>[30]</sup>一致。并且本研究发现重构后的土层内种植玉米可以进一步减弱表土的土壤蒸发,增强土壤保水能力<sup>[31]</sup>。土壤水与植物茎水的同位素示踪结果同样表明,不同层位的土壤水显示同源关系,也证实了是根系在其中的吸水与释水作用导致的<sup>[32]</sup>。并且接菌后玉米的同位素特征与各层位土壤水同位素特征更为相近,也说明根系在其中起到了水分重分配作用<sup>[33]</sup>。综上,模拟重构土层与根系联合作用可以提高半干旱沙地矿区土层的水分保蓄能力,扩大供给植物生长的水分来源。

### 3.2 接菌对土壤水同位素分馏的影响

土壤水的分馏有多方面的原因,主要受到蒸发温度、相对湿度、盐度及风速等因素的影响<sup>[34]</sup>。而半干旱沙地矿区中土壤蒸发强度大、相对湿度低,所以土壤的分馏强度也大<sup>[35]</sup>,但本次模拟研究发现种植玉米与玉米接菌处理均可以显著降低表土水同位素分馏。有相关研究表明植物在发生蒸腾作用之前,根系吸水过程及运输过程均不会产生分馏作用<sup>[36]</sup>。但本研究发现 AMF 在不同深度内对土壤水同位素分馏有不同的影响,在深层土壤中增强其分馏作用。分析原因有以下两点:其一,AMF 可以伸长菌丝网络,吸收根系可及之外的水分,一方面对玉米根系发育产生正向促进效果,加强根系对水分的吸收利用<sup>[37]</sup>,另一方面,菌丝也吸收利用一部分水<sup>[38]</sup>。所以本研究中 AMF 处理的 $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$  富集系数绝对值显著低于 CK1 处理,表明 AMF 可以增大土壤盐分,减少表土层内的自由水,减弱表土层内土壤水同位素分馏的现象。其二,有相关学者研究也发现,AMF 在根内的定殖结构占据植物根的质外体区室<sup>[39]</sup>,所以 POCA 等<sup>[40]</sup>认为 AMF 不是通过大量吸收和向植物供应较干旱部位的水来直接影响同位素的分馏,而

是通过阻碍水通过质外体的运动来间接改变土壤水同位素分馏,这也解释了本研究中深层土壤水中 AMF 处理的 $^{18}\text{O}$ 与 $^2\text{H}$ 富集系数显著大于 CK1 的现象。总的来说,AMF 是通过改变根系结构、土壤含水及理化性质间接影响土壤水同位素分馏。

### 3.3 接菌对玉米吸水的影响

土壤微生物在矿区的有机修复功能是近年来土地复垦的关注热点<sup>[41]</sup>。陆地上大部分植物均能与 AMF 形成互利共生的关系,有研究表明供给植物生长的水分主要来自于根系吸收传输的水分<sup>[42]</sup>,而被丛枝菌根侵染后的植物根系可以利用根外菌丝吸收水分输送至宿主根系,促进植物的水分吸收率、维持植物生长<sup>[43]</sup>。张亚敏等<sup>[44]</sup>研究证实缺水状态下接菌不仅提高了植株的地下干物质累计,而且提高了根系的投影面积。本研究结果也表明,在少量灌溉水的条件下,接种丛枝菌根真菌后的地上、地下干物质及根系投影面积与 CK2 处理相比均有显著增加,说明丛枝菌根真菌对模拟半干旱沙地矿区缺水环境中的植物生长展现其抗逆性,维持植物生存状态,吸收养分与水分反哺于植物根系<sup>[45]</sup>。同时,有研究表明 AMF 可以利用其自身形成的菌丝网络协助根系获取根系无法到达处的水分<sup>[46]</sup>,这也解释了为何本次研究中 AMF 处理的玉米  $\delta^{18}\text{O}$  值与各深度土壤水的接近程度要高于 CK2 处理。其原因为菌丝网络的延长长度要大于根系可达到的范围,而菌丝吸收的水分可通过根系传输给宿主植物<sup>[47]</sup>,再经提水作用由侧根释放至上部干燥土壤中,在菌丝-根系-土壤之间形成良性循环,所以在半干旱矿区排土场下设保水黏土层,并联合接种 AMF 可以扩大植株的吸水利用范围,为解决半干旱沙地矿区水资源短缺的问题提供科学依据。

本研究通过对不同处理土柱内的水同位素、根系进行分层分析,解释了 AMF 在玉米根系提水过程中的水分分布以及对土壤水同位素分馏的影响,表明接种 AMF 有利于在干旱环境下植物对深层土壤水的利用。但尚未研究不同复垦剖面对土壤水分布及分馏的影响,后期可设置一系列不同位置、厚度、密度的重构土层,并针对土壤水与植物水之间的同位素差异,深入揭示植物在各类复垦剖面中的水分利用规律,对半干旱矿区生态修复具有一定的生态意义。

## 4 结 论

1) AMF 有效促进玉米生长发育,尤其对玉米总



根长、投影面积等方面有显著增强,比CK2处理分别提高21.0%、21.4%。

2) 缺水情况下,AMF有助于根系吸收底部黏土层内的蓄水,加强根系水分重分配能力,提高湿润锋高度18.9%,扩大约50%的吸水空间。

3) 土柱表层、深层土壤水与初始水相比分馏差异较大,在0~10 cm处CK2与AMF处理的 $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ 富集系数显著低于CK1处理;在底部60~70 cm处,AMF处理的 $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ 富集系数显著高于CK2处理,表明AMF在深层土壤中增强了土壤水同位素分馏现象。

# 参考文献(References):

- [1] 史晓霞,王静,任春颖,等. 基于GIS与Geo-CA模型的半干旱区土壤盐碱化动态模拟研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2004, 32(2): 88-94.  
SHI Xiaoxia, WANG Jing, REN Chunying, *et al.* Studys on the modeling of soil salinization in semi-arid area based on GIS and Geo-CA model[J]. *Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition)*, 2004, 32(2): 88-94.
- [2] 毕银丽,刘涛. 露天矿区植被协同演变多源数据时序分析:以准格尔矿区为例[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 293-302.  
BI Yinli, LIU Tao. Time series analysis of muti-source data of coordinated evolution of vegetation in open-pit mining area: taking Jungar Mining Area as an example[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 293-302.
- [3] 梁香寒,张克斌,乔厦. 半干旱黄土区柠条林土壤水分和养分与群落多样性关系[J]. 内蒙古林业, 2019, 28(9): 1748-1756.  
LIANG Xianghan, ZHANG Kebin, QIAO Xia. Relationship between soil moisture and nutrients and plant diversity of Caragana microphylla community in semi-arid loess region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(9): 1748-1756.
- [4] 夏宜宣,张淑勇,张光灿,等. 黄土丘陵区土壤水分对黄刺玫叶片光响应特征参数的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5142-5149.  
XIA Xuanxuan, ZHANG Shuyong, ZHANG Guangcan, *et al.* Effects of soil moisture on the photosynthetic light reaction of Rosa xanthina L. in a loesshilly region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5142-5149.
- [5] 胡振琪. 煤矿山复垦土壤剖面重构的基本原理与方法[J]. 煤炭学报, 1997, 22(6): 59-64.  
HU Zhenqi. Principle and method of soil profile reconstruction for coal mine land reclamation[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(6): 59-64.
- [6] 李玉婷,曹银贵,王舒菲,等. 黄土露天矿区排土场重构土壤典型物理性质空间差异分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(3): 615-623.  
LI Yuting, CAO Yingui, WANG Shufei, *et al.* Changes of typical physical properties of reclaimed mine soil in the dump site of loess open mining area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(3): 615-623.
- [7] ZHANG Z, GUO X, LYU Q, *et al.* Water distribution in reconstructed soil of nonmetal mines and the ecological effect in Xinjiang, China[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 1585963.
- [8] 宋杨睿,王金满,李新风,等. 高潜水位采煤塌陷区重构土壤水分运移规律模拟研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 143-148, 154.  
SONG Yangrui, WANG Jinman, LI Xinfeng, *et al.* Simulation of moisture transfer law with different soil reconstruction models in coal mining subsided area with high ground-water level[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 143-148, 154.
- [9] HUANG M, ELSHORBAGY A, BARBOUR S L, *et al.* System dynamics modeling of infiltration and drainage in layered coarse soil[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(2): 185-197.
- [10] HUANG M, BRUCH P G, BARBOUR S L. Evaporation and water redistribution in layered unsaturated soil profiles[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(1): 1-14.
- [11] 毕银丽,申慧慧. 西部采煤沉陷地微生物复垦植被种群自我演变规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 307-315.  
BI Yinli, SHEN Huihui. Effect of micro-reclamation on different planted forest on the vegetation self-succession in the western mining subsidence area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 307-315.
- [12] 刘娜,赵泽宇,姜喜铃,等. 菌根真菌提高植物抗旱性机制的研究回顾与展望[J]. 菌物学报, 2021, 40(4): 851-872.  
LIU Na, ZHAO Zeyu, JIANG Xiling, *et al.* Review and prospect of researches on the mechanisms of mycorrhizal fungi in improving plant drought resistance[J]. *Mycosystema*, 2021, 40(4): 851-872.
- [13] RUTH B, KHALVATI M, SCHMIDHALTER U. Quantification of mycorrhizal water uptake via high-resolution on-line water content sensors[J]. *Plant and Soil*, 2011, 342(1/2): 459-468.
- [14] ZHANG F, ZOU Y N, WU Q S. Quantitative estimation of water uptake by mycorrhizal extraradical hyphae in citrus under drought stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 229: 132-136.
- [15] BOOMSMA C R, VYN T J. Maize drought tolerance: Potential improvements through arbuscular mycorrhizal symbiosis?[J]. *Field Crops Research*, 2008, 108(1): 14-31.
- [16] SMITH S E, FACELLI E, POPE S, *et al.* Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 3-20.
- [17] CHE C W, ZHANG M J, ARGIRIOU A A, *et al.* The stable isotopic composition of different water bodies at the Soil-Plant-Atmosphere Continuum (SPAC) of the western loess plateau, China[J]. *Water*, 2019, 11: 1742.
- [18] LIU Y, ZHANG X M, ZHAO S, *et al.* The depth of water taken up by walnut trees during different phenological stages in an irrigated arid hilly area in the taihang mountains[J]. *Forests*, 2019, 10: 121.
- [19] LIU Z, MA F Y, HU T X, *et al.* Using stable isotopes to quantify

- water uptake from different soil layers and water use efficiency of wheat under long-term tillage and straw return practices [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 229: 105933.
- [20] QIU X, ZHANG M J, WANG S J. Preliminary research on hydrogen and oxygen stable isotope characteristics of different water bodies in the Qilian Mountains, northwestern Tibetan Plateau [J]. *Envi Earth Sci*, 2016, 75: 1491.
- [21] ZHU G F, GUO H W, QIN D H, *et al.* Contribution of recycled moisture to precipitation in the monsoon marginal zone: Estimate based on stable isotope data [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 423–435.
- [22] 顾伟祖, 庞忠和, 王全九, 等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [23] 毕银丽, 孙江涛, 王建文, 等. AM真菌对采煤沉陷区黄花菜生长及根际土壤养分的影响 [J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5315–5321.
- BI Yinli, SUN Jiangtao, WANG Jianwen, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on daylily growth and soil fertility in a coal mining subsidence area of northern Shaanxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15): 5315–5321.
- [24] 袁力. 徐州矿区绿色生态修复治理实践与思考 [J]. *矿山测量*, 2020, 48(6): 136–139.
- YUAN Li. Green ecological restoration technology in Xuzhou Mining Area [J]. *Mine Surveying*, 2020, 48(6): 136–139.
- [25] WANG S, CAO Y, GENG B, *et al.* Succession law and model of reconstructed soil quality in an open-pit coal mine dump of the loess area, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 312: 114923.
- [26] 刘莹, 许丽, 丰菲, 等. 乌海矿区矸石山边坡植被重建初期物种多样性及群落稳定性 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 190–196.
- LIU Ying, XU Li, FENG Fei, *et al.* Species diversity and community stability at early stage of vegetation reclamation in gangue hill slope of Wuhai mining area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(1): 190–196.
- [27] 王春颖, 毛晓敏, 赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 61–67.
- WANG Chunying, MAO Xiaomin, ZHAO Bing. Experiment and simulation on infiltration into layered sand column with sand interlayer under ponding condition [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 61–67.
- [28] 王中翰, 柴金义, 张宏. 层状构造土体中毛细水上升的试验研究 [J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(2): 192–197.
- WANG Zhonghan, CHAI Jinyi, ZHANG Hong. Experimental study on the rise of capillary water in layered soil [J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2021, 52(2): 192–197.
- [29] 张扬, 沈玉芳, 李世清. 施肥对干旱胁迫下夏玉米根系提水的调节作用研究 [J]. *西北植物学报*, 2009, 29(3): 535–541.
- ZHANG Yang, SHEN Yufang, LI Shiqing. Regulation of different fertilizer treatments on hydraulic lift of summer maize under drought stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(3): 535–541.
- [30] 李唯, 胡自治, 万长贵, 等. 苜蓿、玉米根系提水作用与土壤水势: 植物根系提水作用机理研究Ⅲ [J]. *草地学报*, 2008, 16(1): 11–16.
- LI Wei, HU Zizhi, WAN Changgui, *et al.* Hydraulic lift in plant root system and soil water potential study on mechanism of hydraulic lift in root system of alfalfa and maize Ⅲ [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(1): 11–16.
- [31] WANG J, FU B, LU N, *et al.* Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 27–37.
- [32] CALDWELL M M, RICHARDS J H. Hydraulic lift: water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots [J]. *Oecologia*, 1989, 79(1): 1–5.
- [33] 杨贵森, 黄磊, 杨利贞, 等. 植物根系水力再分配量及影响因素分析 [J]. *干旱区研究*, 2021, 38(5): 1411–1419.
- YANG Guisen, HUANG Lei, YANG Lizhen, *et al.* Analysis of the magnitude and influencing factors of the hydraulic redistribution of plant roots [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(5): 1411–1419.
- [34] 马斌. 氢氧稳定同位素指示水体分馏与降水入渗补给研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
- MA Bin. Evaluation of water fractionation and infiltrated precipitation using hydrogen and oxygen stable isotopes [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [35] 孙晓旭, 陈建生, 史公勋, 等. 蒸发与降水入渗过程中不同水体氢氧同位素变化规律 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 100–105.
- SUN Xiaoxu, CHEN Jiansheng, SHI Gongxun, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic variations of different water bodies in evaporation and rainfall infiltration processes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(4): 100–105.
- [36] 冯建祥, 黄敏参, 黄茜, 等. 稳定同位素在滨海湿地生态系统研究中的应用现状与前景 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(4): 1065–1074.
- FENG Jianxiang, HUANG Minshen, HUANG Qian, *et al.* Present status and application perspectives of stable isotopes in coastal wetland ecosystem research: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(4): 1065–1074.
- [37] BEGUM N, AHANGER M A, SU Y, *et al.* Improved drought tolerance by AMF inoculation in maize (*Zea mays*) involves physiological and biochemical implications [J]. *Plants*, 2019, 8(12): 579.
- [38] CAMILLE S D, LAUREN M S, SARA E, *et al.* Beyond nutrients: a meta-analysis of the diverse effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plants and soils [J]. *Ecology: A Publication of the Ecological Society of America*, 2017, 98(8): 2111–2119.
- [39] PARNISKE M. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, 6(10): 763–775.
- [40] POCA M, COOMANS O, URCELAY C, *et al.* Isotope fractionation during root water uptake by *Acacia caven* is enhanced by ar-

- buscular mycorrhizas[J]. *Plant and Soil*, 2019, 441(1/2): 485–497.
- [41] 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.
- [42] LEE E, KUMAR P, BARRON-GAFFORD G A, *et al.* Impact of hydraulic redistribution on multispecies vegetation water use in a semiarid savanna ecosystem: an experimental and modeling synthesis[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(6): 4009–4027.
- [43] 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.
- [44] 张亚敏, 马克明, 曲来叶. 干旱条件下接种AM真菌对小马鞍羊蹄甲幼苗根系的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(8): 2611–2619.
- ZHANG Yamin, MA Keming, QU Laiye. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi enhances the root system of *Bauhinia faberi* var. *microphylla* seedlings under drought stress conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(8): 2611–2619.
- [45] 李娇娇, 曾 明. 丛枝菌根对植物根际逆境的生态学意义[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3216–3226.
- LI Jiaojiao, ZENG Ming. Ecological significance of arbuscular mycorrhiza on plant rhizosphere stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(9): 3216–3226.
- [46] SMITH S E, SMITH F A. Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth[J]. *Mycologia*, 2012, 104(1): 1–13.
- [47] LI T, HU Y J, HAO Z P, *et al.* First cloning and characterization of two functional aquaporin genes from an arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*[J]. *The New Phytologist*, 2013, 197(2): 617–630.