西部煤矿区微生物修复促进植物水分高效利用策略

毕银丽[1,2,3]，武　超[1,2]，彭苏萍[3]，田乐煊[1]，张延旭[3]

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安　710054; 2. 西安科技大学 西部矿山生态环境修复研究院, 陕西 西安　710054; 3. 中国矿业大学 (北京) 矿山生态修复研究院, 北京　100083)

摘　要: 西部煤矿区生态环境脆弱，叠加高强度开采致使水土流失、土壤退化、根系受损，植物水分利用效率低，生态恢复困难，提高水分利用效率成为西部矿区生态修复或重建的关键。土壤水是限制干旱半干旱煤矿区生态修复的关键因素，它连接大气水、地表水、地下水与植被生长，是水分循环与养分运输的重要载体。土壤水分的高效与合理利用关系到生态修复的成败，因此探究植物根系水分利用策略对于西部煤矿区生态修复具有重要作用。分析了国内外植物水分利用的主要研究方法，比较了不同方法之间的优缺点及相应研究进展。在干旱半干旱煤矿区受损生态环境中，采用植物-微生物联合的微生物修复技术，能提高植物水分利用效率，改善植物水分利用策略。同时，接种微生物降低了植物从浅层土壤吸收水分的比例，有效地增加植物从深层土壤中吸收和利用水分，提升了植物水分利用效率，使接菌植物在干旱半干旱煤矿区表现出更高的生态适应性。分析了目前西部煤矿区植物水分利用的研究进展和存在的问题，探讨了煤矿区微生物修复对水分利用策略的改善，提出了西部干旱煤矿区生态修复中不同植物组合对水分利用策略的影响及其研究重点，为实现矿区绿色可持续、高质量发展奠定了扎实的基础，具有重要的生态应用价值。

关键词: 西部煤矿区; 丛枝菌根真菌; 植物水分利用策略; 水同位素技术; 植被组合

中图分类号: TD88　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253−9993(2024)02−1003−08

Strategies of high efficiency water usage promoted by microbial remediation in coal mining areas of western China

BI Yinli[1,2,3], WU Chao[1,2], PENG Suping[3], TIAN Lexuan[1], ZHANG Yanxu[3]

(1. *College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an*　710054, *China*; 2. *Institute of Ecological and Environmental Restoration in Mine Areas of West China, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an*　710054, *China*; 3. *Institute of Mine Ecological Restoration, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing*　100083, *China*)

Abstract: The fragile ecological environment in the western coal mining areas of China, compounded by intensive mining activities, has led to water and soil erosion, soil degradation, and damaged root systems. With a low plant water use efficiency, the ecological restoration becomes challenging, making the improvement of water use efficiency a key aspect in the ecological restoration or reconstruction of western mining areas. Soil water is a critical factor limiting the ecological restoration of arid and semi-arid coal mining areas, as it connects atmospheric water, surface water, groundwater, and vegetation growth, serving as an important carrier for water circulation and nutrient transport. Efficient and rational utiliza-

收稿日期: 2024−02−07　**修回日期:** 2024−02−29　**责任编辑:** 钱小静　**DOI:** 10.13225/j.cnki.jccs.YH24.0155

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFF1303303); 国家自然科学基金重大资助项目 (52394194); 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究一期资助项目 (2022-YRUC-01-0304)

作者简介: 毕银丽 (1971—), 女, 陕西米脂人, 教授。E—mail: ylbi88@126.com

引用格式: 毕银丽, 武超, 彭苏萍, 等. 西部煤矿区微生物修复促进植物水分高效利用策略[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1003−1010.

BI Yinli, WU Chao, PENG Suping, et al. Strategies of high efficiency water usage promoted by microbial remediation in coal mining areas of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1003−1010.

移动阅读

tion of soil water is crucial to the success of ecological restoration. Therefore, investigating plant root water utilization strategies plays a significant role in the ecological restoration of western coal mining areas. This paper analyzes the main research methods of plant water use at home and abroad, compares the advantages and disadvantages of different methods, and reviews the corresponding research progress. In the damaged ecological environments of arid and semi-arid coal mining areas, the application of plant-microbe combined microbial remediation technology can improve plant water use efficiency and enhance plant water use strategies. At the same time, the microbial inoculation reduces the proportion of water absorption by plants from shallow soil layers, effectively increasing the absorption and utilization of water from deep soil layers by plants, thereby enhancing plant water use efficiency. This enables the inoculated plants to exhibit a higher ecological adaptability in the arid and semi-arid coal mining areas. This paper analyzes the current research progress and existing problems of plant water use in the western coal mining areas, discusses the improvement of water use strategies through microbial remediation in mining areas, and proposes the impact of different plant combinations on water use strategies and their research focuses in the ecological restoration of western arid coal mining areas. This lays a solid foundation for achieving green, sustainable, and high-quality development in the arid and semi-arid coal mining areas, and has important ecological application value.

Key words: coal mining area of western China; arbuscular mycorrhizal fungi; plant water use strategies; water isotope technology; vegetation combinations

中国是当前世界上最大的煤炭生产国和消费国，在未来一段时间内中国仍将保持以煤炭为主的能源结构。黄河流域煤炭产量占全国 70% 以上，然而黄河流域中上游处于干旱半干旱地区，年降雨量少且蒸发量大，年蒸发量是降雨量的 6 倍以上[1-3]。由于采矿活动剧烈，矿区及周边土壤逐渐退化，土壤水分流失，导致植被干枯甚至死亡[4]。井工开采导致采空区地面塌陷、地裂缝地质灾害以及地下水位下降等问题。露天排土场堆排过程，由于重型机械的反复碾压，导致土壤压实度增加，改变了土壤水分运移和补给，影响植被生长[5]。由此可见，矿区活动在一定程度上破坏当地原始地形地貌，打破了区域生态系统平衡，加剧了土壤与植被退化，矿区生态环境问题亟待解决。

大规模的现代煤炭开采对地区的生态环境造成严重的影响，开展有效的矿山修复与生态重建工作非常重要。土壤水是限制干旱半干旱煤矿区生态修复的关键因素[6]，它连接大气水、地表水、地下水与植被生长[7]，是水分循环与养分运输的重要载体。土壤水分的高效与合理利用关系到生态修复的成败，植物对土壤水分的利用策略对矿区生态修复具有重要现实意义。

植物水分利用策略在一定程度上代表了植物对土壤水分吸收利用的时空特征[8]，反映了植物在不同气候条件下调节自身水分利用的能力。不同环境下其水资源利用模式不同，取决于植被类型、根系性状与分布、水文变化等因素[9]。因此，研究植物的水分利用策略对于理解植物对干旱的响应机制及植被演变趋势至关重要。确定植物水分利用策略的方法有许多种，如根系分布法[10]、液流测量法[11]以及氢氧稳定同位素方法[12]等，这些方法均可确定植物吸收水分的来源。氢氧稳定同位素技术 (δ^2H 和 δ^{18}O) 可为生态脆弱的干旱半干旱矿区植物水分利用策略提供一种无损的测定方法[13]。研究表明，大多数陆地植物在根系吸收水分过程中通常不发生同位素分馏[14]。可通过对比潜在水源和植物木质部中氢氧同位素之间的差异，揭示植物水分吸收来源及其水分利用策略。利用氢氧同位素技术能够探究植物吸水来源，并结合多源混合模型可以量化不同潜在水源对植物的贡献比例，现成为研究植物水分利用策略的主流方法[15]。因此，笔者对植物水分利用策略研究方法与进展、微生物修复对水分利用策略响应等进行论述，有助于提高干旱半干旱煤矿区生态修复系统的生态水文管理效率。

1 植物水分利用的主要研究方法

1.1 根系分布法

根系作为植物水分传输的重要载体，其分布结构在很大程度上影响着植物的水分利用策略[16]。由于根系生长在土壤中，直接观测较为困难，因而根系研究一直落后于植物地上部分[17]。随着对植物根系空间分布在生态系统平衡与水分循环中的逐步认知，根系的分布特征逐渐成为研究热点。早期的研究主要通过挖掘法获取植物完整根系，观测根系形态和空间展布规律等指标判断植物获得水分的来源。但是根系挖掘难度较大，特别是对于一些深根系的乔木和灌木而言，并且在挖掘过程中容易损伤根系，影响植物

后期生存。目前, 部分学者通过根钻法收集植物根系判断植物水分利用策略[18]。通过计算钻取土壤中的根质量密度和根长密度反映植物吸水根系的径向分布与吸收水分来源。与挖掘植物根系相比, 根钻法对植物根系损伤相对较小, 但也因根系空间分布的不均质性, 不能准确反映根系实际分布情况。此外, 根系分布法是一种短期测量方法, 无法反映植物在不同季节的水分利用策略, 并且无法精确定量分析。

1.2　液流测量法

由叶片蒸腾作用引起的植物水分流失, 根部通过木质部向叶片输送水分的过程称之为树干液流。通过比较土壤有效水变化量和植物蒸腾总量的差异, 揭示植物耗水变化, 间接确定植物水分利用。由于采样对植物生存环境破坏小、不改变植物正常生理状态, 长期连续监测能反映季节差异, 经济方便, 也常常被用来表征植物水分利用策略。树干液流法多采用热技术法来实现对植物树干液流的长期监测。热技术法根据不同的原理可分为热脉冲速率法 (HPV)、热平衡法 (SHB)、热扩散法 (TDP)、激光热脉冲法 (LHPG)、热变形法 (HFD)。由于树干液流测定方法机理不同, 不同的方法测定树木液流特征存在差异, 更增大了树干液流法间接推断植物潜在水源的误差。同时树干液流相对敏感, 对环境变化易明显响应, 适合对植物水分来源进行初步、粗略的判断并大体预估植物潜在水源的种类。

1.3　氢氧稳定同位素技术

氢氧稳定同位素技术作为一种精确度高、破坏性小的研究方法, 因其具有示踪和指示等多项功能, 被广泛应用于大气科学、地球化学、地质学、生态学等领域[19], 为确定植物水分来源提供了一种新的途径。早前研究已发现, 大多数陆地植物在根系吸水时通常不发生同位素分馏[14], 即 δ^2H 和 δ^{18}O 不会发生变化, 因此植物木质部水源被认为是植物潜在水源按不同比例组成的混合物, 这为利用同位素技术测定植物潜在水源提供了可能。因此, 可以通过对比植物木质部和潜在水源中氢氧同位素之间的差异, 研究植物水分利用策略。植物体内水分同位素组成是各潜在水源同位素组成的结果, 因此分析植物木质部水分与不同潜在水源的同位素组成, 可以明确植物水分来源以及不同水源对植物水分贡献率大小。国内外学者提出不同方法来研究不同水源对植物水分贡献率, 其中常用方法有二源或三源混合模型、多源线性混合模型、吸水深度模型、贝叶斯混合模型, 如 MixSIR、SIRA、MixSIAR 以及动态模型等。

2　西部干旱半干旱煤矿区不同修复类型的水分利用策略研究进展

2.1　露天煤矿排土场复垦区植物水分利用策略

近年来, 随着我国西部露天煤矿的快速发展, 露天煤矿产能大幅增加, 而该地区水资源严重缺乏, 水资源总量仅占全国的 3.9%, 极大地限制了该区土地复垦与生态重建的进程。露天煤矿的开采造成上覆岩土体大量剥离, 破坏了原有土层结构, 使矿区原始地形地貌支离破碎, 生态环境愈发恶劣。此外, 大量剥离的岩土体材料堆倒并经过反复碾压形成排土场, 土壤压实度高, 孔隙度较低 (26%～45%), 水力传导速率慢, 土地生产力低, 植被生长困难[20-21]。露天排土场经过土层重构后, 土壤水分分布不均, 同时也影响植物根系的空间布局, 导致排土场植物的水分利用策略发生改变。关于露天煤矿排土场这种特殊重构地层, 植物水分利用策略研究目前较少。笔者通过在对黑岱沟露天煤矿排土场中紫穗槐的根系优先流发育 (亮蓝染色法) 对水分利用特征研究中发现 (图 1), 紫穗槐对 0～50 cm 土层水分利用率高达 50% 以上, 表明紫穗槐水分来源主要依赖浅层土壤。通过根钻研究发现, 10～30 cm 紫穗槐根系最发达, 这表明植物水分利用策略可能在一定程度上受根系发育所控制。

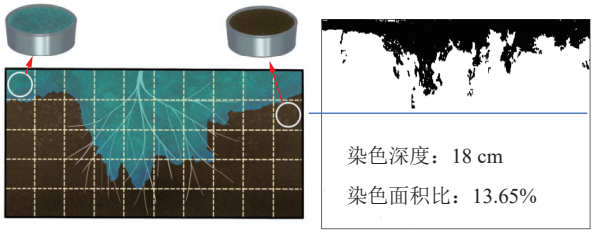

图 1　露天煤矿排土场植物根系发育对土壤优先流发育及水分利用策略的影响

Fig.1　Effects of different plant root development on preferential flow and their water use strategies in open-pit coal mine waste disposal sites

2.2　井工煤矿沉陷区植物水分利用策略

我国 80% 煤炭是井工开采, 大规模井工开采导致地表大面积沉陷, 裂缝发育拉伤根系造成土壤水分含量蒸发增加[22]。采煤沉陷导致煤矿区产生大量裂缝, 土体原有结构被破坏, 土壤水分和养分流失。裂缝两侧的不均匀沉降造成植物根系拉伤, 影响植物生长发育甚至导致死亡 (图 2)。开展有效的生态修复与土壤改良对采煤沉陷地利用具有重要意义。

根是植物中影响产量的重要器官, 根形态决定了植物获得的土地资源量。植物根系的水分利用策略对煤矿区植被恢复具有积极的正向影响, 随着季节变

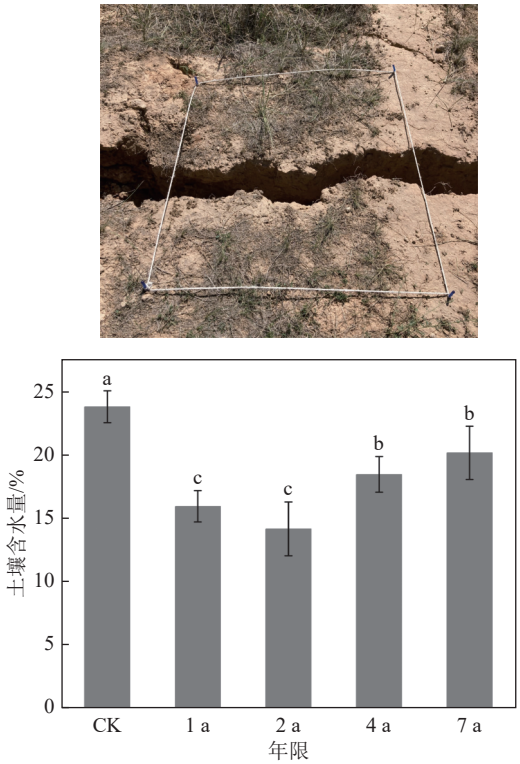

图 2 采煤沉陷裂缝造成植物根系拉伤及含水降低

Fig.2 Coal mining subsidence cracks caused plant roots damaged and soil moisture decreased

化植物根系可以在浅层和深层土壤间调整其吸水量。一些研究也表明，具有双形根的植物可通过调整水分利用策略应对不同气候条件，以更好地适应不良环境[23]。采煤沉陷裂缝破坏了原有植物根系网络，特别是对浅层根系的机械损伤[24]，但裂缝也增加了土壤水分入渗速度。因此，探究采煤沉陷区植物水分利用策略，对沉陷区生态修复与可持续发展具有重要现实意义。CHEN 等[25]利用土壤含水量和同位素标记水 (D)，研究了煤矿开采对非采煤区、采煤无沉陷区和采煤沉陷区土壤水分入渗和荒漠蒿水分利用策略的影响。结果表明，非采煤区中荒漠蒿吸收的水分有 59.7% 来自于 10～20 cm 土壤层。无沉陷区中，荒漠蒿主要从 0～10 cm (39.4%) 和 40～60 cm (46.6%) 的土壤中吸收水分。而在采煤沉陷区中，荒漠蒿吸收利用的水分 85.9% 主要来自 40～60 cm。不同区域荒漠蒿的水分利用深度不同。这表明煤矿井工开采，促使裂缝发育，犹如松土一般，降低了土壤容重 (图 3)，促使沉陷地水分入渗容易，植被吸收水分深度不断增加，吸收比例有所增大。原因可能是开采造成的裂缝一方面增加了表土水分蒸发而减少了表层土壤含水量，另一方面增加了土壤水分向中深层土壤入渗。因此促使矿区植物改变原有的水分利用策略，以适应新的采煤沉陷地环境条件。

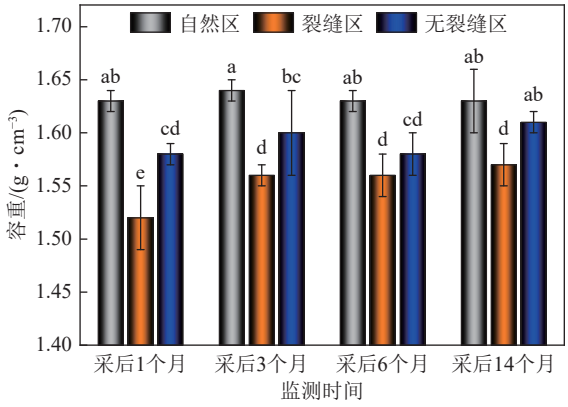

图 3 采动过程对土壤容重的影响

Fig.3 Impact of mining process on soil bulk density

2.3 不同植被类型与组合模式对水分利用的策略

水对干旱半干旱煤矿区生态系统中的植物生长和生物多样性具有重要意义。煤炭开采加剧矿区水土流失，使得地表水文生态条件发生显著改变，土壤含水量较低[26]。合理利用有限的土壤水分资源对于揭示植物水分利用策略至关重要。研究表明，不同植被类型与组合可有效充分地利用土壤水分资源。然而，目前对干旱半干旱煤矿区这种特殊地质环境下不同种植模式中植物水分利用策略的研究较少。煤矿区不同种植模式的植物水分利用策略将有助于矿区生态修复中选择最佳的物种组合模式，指导干旱半干旱煤矿区的生态系统管理[27]。笔者通过在陕煤陕北柠条塔煤矿微生物复垦科研示范基地中采集 0～300 cm 土壤和植物样品，通过氢氧稳定水同位素分析，确定出苜蓿、柠条和苜蓿+柠条混种 3 种模式下不同植物的水分利用策略。发现单一种植苜蓿、柠条对不同深度土壤水分的吸收比例存在显著差异。在混种模式中，2 种植物之间存在显著的水分竞争，并且这种竞争在浅层 (0～40 cm) 土壤中更加明显。这可能是苜蓿和柠条的细根 (66.5%) 均主要集中在浅层土壤 (0～40 cm) 中。此外，笔者对黑岱沟露天煤矿排土场中不同植被类型与组合样地 (草、灌–草、乔–草、乔–灌–草) 植物水分利用进行研究发现，草本主要利用浅层水分，灌木对中间层水分的利用比例高于浅层及深层，灌木和草本形成吸水互补的关系。乔–灌–草样地中乔木和灌木水分利用层位高度重合，形成了较为严重的水分竞争 (图 4)。杨国敏等[28]针对黑岱沟露天煤矿排土场中小叶杨和沙棘混交林中水分利用策略，采用氢氧稳定同位素技术和模型，分析了小叶杨和沙棘的水分来源及其季节变化特征，发现小叶杨和沙棘均以深层土壤水分作为主要水源，其中 60～150 cm 土层对小叶杨的贡献达 49.9%，对沙棘约为 36.8%。为了避免植物种间竞争，小叶杨对表层 (0～10 cm) 土壤

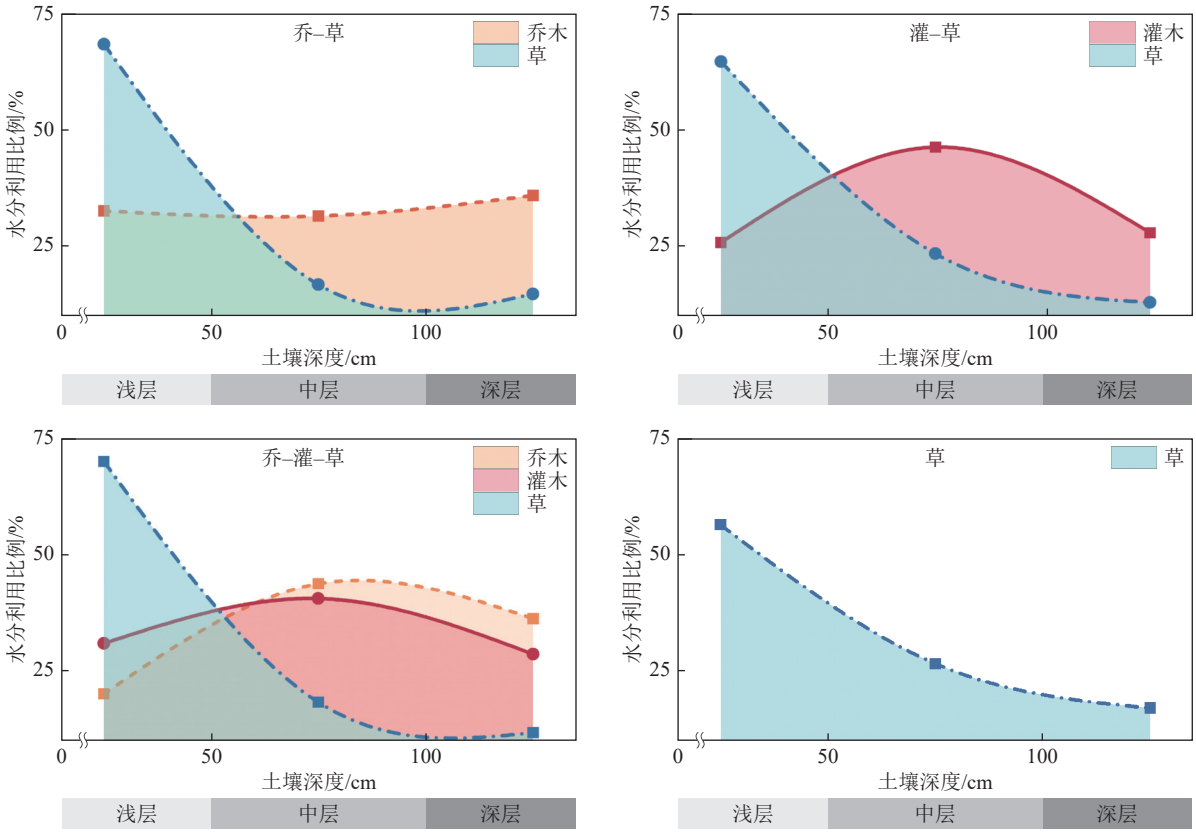

图 4　不同植被类型与组合模式对水分利用策略的影响

Fig.4　Impact of different vegetation types and combination patterns on water use strategies

水分利用较少 (约 8.7%), 而沙棘则利用了约 26.5%。这也是干旱半干旱地区植物为了生长发育而采用的水分利用策略, 即植物会通过自我调节最大限度地利用不同水源, 从而向着最优表现型发展[29]。

3　干旱半干旱煤矿区微生物修复的水分利用策略

干旱半干旱地区多种植物被作为矿山生态修复先锋植被, 如苜蓿、柠条、紫穗槐和沙棘等。丛枝菌根真菌 (AMF) 是一种普遍存在的土壤微生物, 可与大多数陆生植物形成菌根共生体。西部干旱半干旱煤矿区生态恢复困难, 利用植物–微生物联合的生态修复技术可以提高生态修复效率[30-31]。研究表明, AMF 可以帮助宿主植物根系从土壤获取较多水分, 提高寄主植物的耐旱性[32]。菌根真菌能够通过间接作用来改善植物–水之间关系, 如增强宿主植物营养和渗透调节能力[33]。此外, 最新研究表明, AMF 根外菌丝也能够直接将水输送到宿主植物中[34]。因此, AM 真菌可以通过与植物共生从而影响植物的水分利用策略[35] (图 5), 然而目前国内外对微生物参与下植物对水分利用策略的响应研究较少。

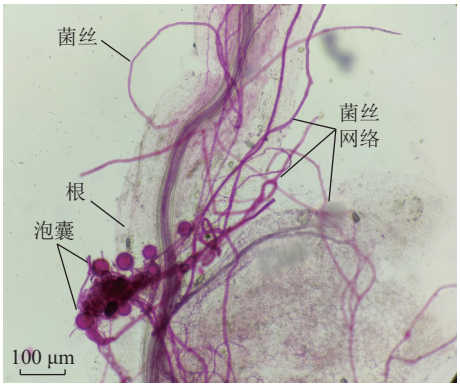

图 5　丛枝菌根真菌扩大根系吸收范围，促进植物水分吸收

Fig.5　Arbuscular mycorrhizal fungi expand the range of root absorption and promote plant water absorption

笔者通过对柠条塔煤矿微生物复垦科研示范基地和大柳塔煤矿生态示范基地复垦植物多年监测, 探索了不同物种 (乔–灌–草) 和不同复垦年限中 AM 真菌与植物共生对水分利用策略的改善作用。通过研究苜蓿、柠条以及苜蓿+柠条混种生态系统, 发现接种菌根真菌使得植物减少对浅层土壤水分的吸收比例, 有效促进植物对中层 (40～100 cm) 和深层 (100～300 cm) 土壤水分的吸收。接菌植物叶片的 δ^{13}C 显著增加, 表明接菌能有效提高植物水分利用效率, 使植

物表现出更高的生态可塑性。此外，接种菌根真菌使得混种系统中苜蓿和柠条 2 种植物在表层之间的水分竞争减少[12]。

在大柳塔煤矿生态示范基地，通过根钻法采集沙棘根系，发现其主要分布在 0～100 cm 土层内，接种 AM 真菌改变了沙棘根系分布。在 5 月和 10 月，接种 AM 真菌对深层土壤水分的利用比例比不接种区分别提高了 12.70% 和 11.00%(图 6)。此外，在对不同复垦年限下 (10、9、8 a) 紫穗槐样地水分利用策略研究中发现，接种 AMF 降低了紫穗槐从浅层土壤吸收水分的比例，有效促进了植物对中深层土壤水分的利用，提高了植物的水分利用效率 (图 7)。

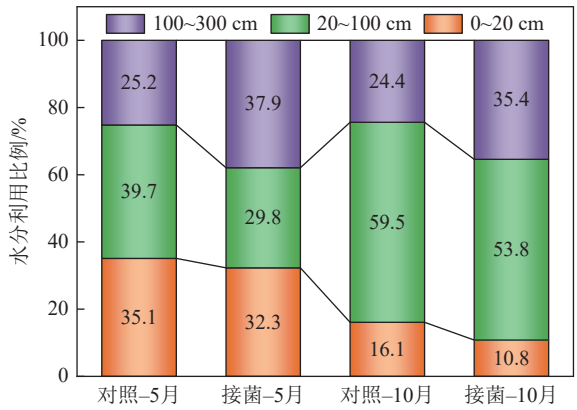

图 6 在不同月份中接种 AM 真菌提高沙棘对深层土壤水分的利用

Fig.6 Inoculation of AM fungi in different months to improve the utilization of deep soil water by *Hippophae rhamnoides*

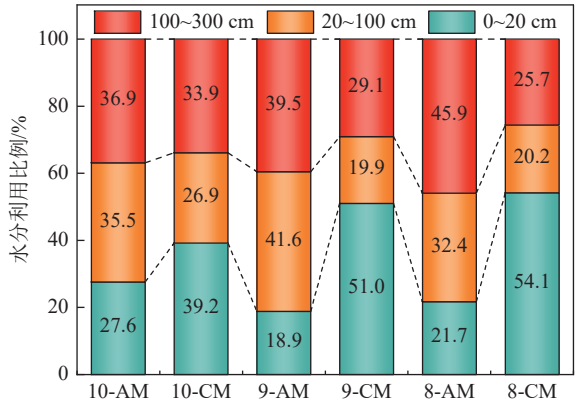

图 7 在不同复垦年限下 (10、9、8 a) 接种 AM 真菌提高紫穗槐对中深层土壤水分的利用

Fig.7 Inoculation of AM fungi under different reclamation years (10, 9, 8 a) to improve the utilization of middle and deep soil water in *Amorpha fruticosa*

在准能露天排土场微生物修复区，微生物修复促进了根系的生长发育空间格局不同，其对水分的利用策略呈现出不同的空间利用分异性 (图 8)。接菌促进了根系发育向下扩展空间，水分利用比例较多地利用了中层和深层土壤水分，对照根系利用浅表层水分较多。灌–草组合对水分的利用比例存在一定的竞争，接菌后灌–草组合在空间存在分异性，灌木更多利用中–深层水分，草本利用浅层水分。即保持了种群的多样性，又协调利用了水分资源，实现了生态协调发展演化。

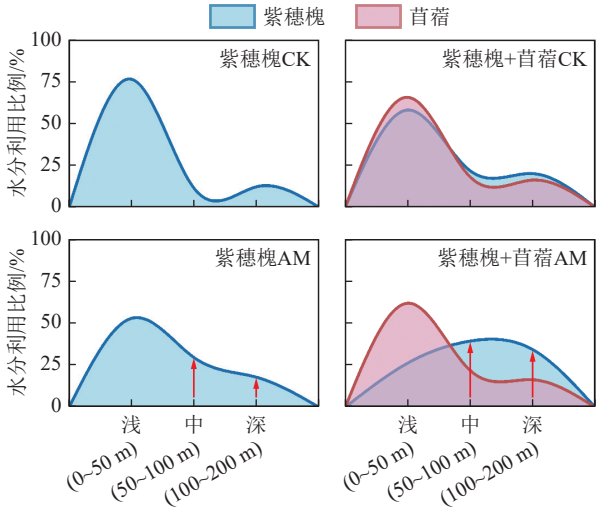

图 8 露天煤矿排土场不同植物组合类型及接菌对植物水分利用策略的影响

Fig.8 Effects of different plant combinations and inoculation on plant water use strategies in open-pit coal mine waste disposal sites

丛枝菌根真菌生活在植物根系和土壤接触的界面上，恰好位于土壤干燥过程中被确定为水通量变化和植物蒸腾限制的位置上。它能够在植物根系周围形成大量菌丝网络，从而将附近大量土壤直接联系到植物根系，扩大根系对水分和养分摄取范围，同时通过连接相邻植物根系的菌根网络重新分配水分资源。此外，当 AMF 生长到土壤基质中时，随着 AMF 进入土壤孔隙空间时，土壤结构会发生变化，而土壤的质地和结构又显著影响着土壤的保水性和导水性。正是由于 AMF 能够通过上述直接和间接对土壤–植物的作用，导致提高植物抵抗干旱胁迫的能力[36]；提高宿主植物的渗透调节能力[37]；调节宿主植物根系导水率帮助根系吸收水分[38]；改善土壤结构，提高团聚体的稳定性和增加土壤保水性能等[39]。因此，接种丛枝菌根真菌有利于宿主植物在干旱土壤基质中更容易地获取水分，进而影响干旱矿区植物水分利用策略的改变。

4 结 论

(1) 露天开采形成的排土场经过土层重构之后，土

壤压实度高, 植物根系向下延伸困难, 植物水分策略往往倾向于浅层土壤水源。

(2) 井工开采造成上覆土壤产生裂隙、塌陷等, 导致浅层植物根系拉伤, 同时地表降水易通过裂隙通道快速补给中深层土壤, 植物则更青睐于利用中深层土壤水分。

(3) 煤矿区不同植被类型与组合可有效充分地利用有限土壤水分资源。不同植被类型与组合中, 草本主要利用浅层水分, 灌木对中间层水分的利用比例高于浅层及深层, 灌木和草本形成根系吸水互补的关系。西部矿区灌–草组合为煤矿区生态修复中最优种植组合。

(4) 不同灌–草与微生物组合修复方式有助于在西部煤矿区生态修复高效利用有限的土壤水分资源, 使生态系统快速调整自身水分利用策略, 从而向着生态稳定最优表现型发展。为实现矿区土–水–生态协调和可持续发展, 提供了一条高效可行的新途径。

参考文献(References):

[1] 彭苏萍. 黄河流域高质量发展亟须重视煤矿区生态修复[N]. 中国科学报, 2020–09–07(1).

[2] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术及战略思考[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, 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.

[4] 彭苏萍, 毕银丽. 钱鸣高院士指导西部干旱半干旱煤矿区生态修复研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 857–860.
PENG Suping, BI Yinli. Academician Minggao Qian directed ecological restoration research of arid and semi-arid coal mining areas in western China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 857–860.

[5] 李禹凝, 王金满, 张雅馥, 等. 干旱半干旱煤矿区土壤水分研究进展[J]. 土壤, 2023, 55(3): 494–502.
LI Yuning, WANG Jinman, ZHANG Yafu, et al. Soil water in arid and semi-arid mining areas: A Review[J]. Soils, 2023, 55(3): 494–502.

[6] 毕银丽, 高学江, 柯增鸣. 露天煤矿区不同生态措施对紫穗槐水分利用特征的影响[J/OL]. 水土保持学报: 1–7 [2024–03–04]. https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.018.
BI Yinli, GAO Xuejiang, KE Zengming. Effects of different ecological measures on water use characteristics of amorpha Fruticosa in open pit coal mine areas[J/OL]. Journal of Soil and Water Conservation: 1–7 [2024–03–04]. https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.018.

[7] 赵文智, 周宏, 刘鹄. 干旱区包气带土壤水分运移及其对地下水补给研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(9): 908–918.
ZHAO Wenzhi, ZHOU Hong, LIU Hu. Advances in moisture migration in vadose zone of dryland and recharge effects on groundwater dynamics[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(9): 908–918.

[8] VOLTAS J, LUCABAUGH D, CHAMBEL M R, et al. Intraspecific variation in the use of water sources by the circum-Mediterranean conifer Pinus halepensis[J]. New Phytologist, 2015, 208(4): 1031–1041.

[9] ZHAO Y L, WANG Y Q, HE M N, et al. Transference of Robinia pseudoacacia water-use patterns from deep to shallow soil layers during the transition period between the dry and rainy seasons in a water-limited region[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 457: 117727.

[10] 王尚涛, 许洁, 韩拓, 等. 干旱绿洲区葡萄根系分布及水分利用策略[J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2020, 56(4): 537–544, 552
WANG Shangtao, XU Jie, HAN Tuo, et al. Variations in the root water uptake of grapevines based on stable isotopes in an arid oasis region[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2020, 56(4): 537–544, 552.

[11] 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 树干液流研究进展与展望[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 98–105.
ZHAO Chunyan, SI Jianhua, FENG Qi, et al. Stem sap flow research: Progress and prospect[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 98–105.

[12] WU C, BI W L, ZHU W B, et al. Arbuscular mycorrhizal inoculation alleviates water competition between adjacent plants in the mixed planting system[J]. Rhizosphere, 2023, 27: 100751.

[13] WANG J, FU B J, LU N, et al. Water use characteristics of native and exotic shrub species in the semi-arid Loess Plateau using an isotope technique[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, 276: 55–63.

[14] DAWSON T E, MAMBELLI S, PLAMBOECK A H, et al. Stable isotopes in plant ecology[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002,33: 507-559.

[15] 张琦, 苏永红. 植物水分利用策略研究进展[J]. 北方园艺, 2022(7): 119–127.
ZHANG Qi, SU Yonghong. Research progress of plant water utilization strategies[J]. Northern Horticulture, 2022(7): 119–127.

[16] 刘晓丽, 汪有科, 马理辉, 等. 密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布关系[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 90–97.
LIU Xiaoli, WANG Youke, MA Lihui, et al. Relationship between deep soil water vertical variation and root distribution in dense Jujube plantation[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 44(7): 90–97.

[17] 刘凤山, 周智彬, 胡顺军, 等. 根钻不同取样法对估算根系分布特征的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 294–299.
LIU Fengshan, ZHOU Zhibin, HU Shunjun, et al. Influence of different soil coring methods on estimation of root distribution characteristice[J]. Acta Praculturae Sinice, 2012, 21(2): 294–299.

[18] 宋小林, 吴普特, 赵西宁, 等. 黄土高原肥水坑施技术下苹果树根系及土壤水分布[J]. 农业工程学报, 2016, 34(7): 121–128.

SONG Xiaolin, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Distribution characteristic of soil moisture and roots in rain-fed old apple orchards with water-fertilizer pit on the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 34(7): 121−128.

[19] 蒲俊兵. 重庆岩溶地下水氢氧稳定同位素地球化学特征[J]. 地球学报, 2013, 34(6): 713−722.
PU Junbing. Hydrogen and oxygen isotope geochemistry of karst groundwater in Chongqing[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(6): 713−722.

[20] BI Y L, WANG K, DU S Z, et al. Shifts in arbuscular mycorrhizal fungal community composition and edaphic variables during reclamation chronosequence of an open-cast coal mining dump[J]. Catena, 2021, 203: 105301.

[21] 毕银丽, 李向磊, 彭苏萍, 等. 煤矿区周边植物多样性的空间变异性及其土壤养分相关性特征[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 205−213.
BI Yinli, LI Xianglei, PENG Suping, et al. Characteristics of spatial variability of plant diversity and soil nutrients in open-pit mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 205−213.

[22] 毕银丽, 刘京, 尚建选, 等. 陕北采煤沉陷区土壤水分入渗和蒸发特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(5): 839−849, 862.
BI Yinli, LIU Jing, SHANG Jianxuan, et al. Study on the characteristics of soil moisture infiltration and evaporation in the coal mining subsidence area of coal mines in northern Shaanxi[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(5): 839−849, 862.

[23] BARGUÉS TOBELLA A, HASSELQUIST N J, BAZIÉ H R, et al. Strategies trees use to overcome seasonal water limitation in an agroforestry system in semiarid West Africa[J]. Ecohydrology, 2017, 10(3): e1808.

[24] 毕银丽, 杨伟, 柯增鸣, 等. 室内模拟接种 AMF 对西部煤矿区紫穗槐根系分布和水分利用效率的影响[J/OL]. 煤炭科学技术: 1−13 [2024−03−04]. https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0330.
BI Yinli, YANG Wei, KE Zengming, et al. Effects of AMF inoculation on root distribution and water use efficiency of *Amorpha fruticose* L in western coal mining area simulated in laboratory[J/OL]. Coal Science and Technology: 1−13 [2024−03−04]. https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0330.

[25] CHEN G, GUO J, SONG Z, et al. Soil water transport and plant water use patterns in subsidence fracture zone due to coal mining using isotopic labeling[J]. Environmental Earth Science, 2022, 81(11): 310.

[26] BI Y L, WU C, WANG S M, et al. Combined arbuscular mycorrhizal inoculation and loess amendment improve rooting and revegetation post-mining[J]. Rhizosphere, 2022, 23: 100560.

[27] JIAN S Q, ZHAO C Y, FANG S M, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 206: 85−96.

[28] 杨国敏, 王力. 黑岱沟露天矿区排土场 2 种典型植物的水分来源及利用策略[J]. 自然资源学报, 2016, 31(3): 477−487.
YANG Guomin, WANG Li. Water use patterns of two typical plants based on hydrogen and oxygen stable isotopes at dumping site in the opencast coal mining area of Heidaigou[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(3): 477−487.

[29] 周海, 郑新军, 唐立松, 等. 准噶尔盆地东南缘多枝柽柳、白刺和红砂水分来源的异同[J]. 植物生态学报, 2013, 37(7): 665−673.
ZHOU Hai, ZHENG Xinjun, TANG Lisong, et al. Differences and similarities between water sources of Tamarix ramosissima, Nitraria sibirica and Reaumuria soongorica in the southeastern Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(7): 665−673.

[30] BI Y L, ZHANG Y X, ZOU H, et al. Plant growth and their root development after inoculation of arbuscular mycorrhizal Fungi in coal mine subsided areas[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2018, 5(1): 47−53.

[31] 毕银丽, 薛超, 柯增鸣, 等. 接种 AMF 对玉米根系及土壤水分分布的影响[J]. 菌物学报, 2023, 42(7): 1539−1550.
BI Y L, XUE C, KE Z M, et al. Effect of AMF inoculation on distribution of maize roots and soil moisture[J]. Mycosystema, 2023, 42(7): 1539−1550

[32] RUIZ-LOZANO J M, AROCA R, ZAMARREÑO Á M, et al. Arbuscular mycorrhizal symbiosis induces strigolactone biosynthesis under drought and improves drought tolerance in lettuce and tomato[J]. Plant, Cell and Environment, 2015, 39(2): 441−452.

[33] 毕银丽, 宋雅宁, 白雪蕊, 等. AMF 和 DSE 对紫花苜蓿生长发育及叶片代谢组分的影响[J/OL]. 菌物学报: 1−13 [2024−03−04]. https://doi.org/10.13346/j.mycosystema.230209.
BI Yinli, SONG Yaning, BAI Xuerui, et al. Effects of AMF and DSE on the growth and development and metabolic fractions of leaves of *Medicago sativa*[J/OL]. Mycosystema: 1−13 [2024−03−04]. https://doi.org/10.13346/j.mycosystema.230209.

[34] WU C, BI Y L, ZHU W B. Is the amount of water transported by arbuscular mycorrhizal fungal hyphae negligible? Insights from a compartmentalized experimental study[J]. Plant and Soil, 2024. https://doi.org/10.1007/s11104-024-06477-1.

[35] 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.

[36] WU Q S, XIA RX. Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions[J]. Journal of Plant Physiology, 2006, 163(4): 417−425.

[37] ZULFIQAR F, AKRAM N A, Ashraf M. Osmoprotection in plants under abiotic stresses: New insights into a classical phenomenon[J]. Planta, 2020, 251(1): 3.

[38] SÁNCHEZ-ROMERA B, RUIZ-LOZANO J M, ZAMARREÑO Á M, et al. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and methyl jasmonate avoid the inhibition of root hydraulic conductivity caused by drought[J]. Mycorrhiza, 2016, 26(2): 111−122.

[39] PAUWELS R, GRAEFE J, BITTERLICH M. An arbuscular mycorrhizal fungus alters soil water retention and hydraulic conductivity in a soil texture specific way[J]. Mycorrhiza, 2023, 33(3): 165−179.