

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.018

毕银丽, 柯增鸣, 高学江. 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]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 190-196.

BI Yinli, KE Zengming, GAO Xuejiang. Effects of different ecological measures on water use characteristics of *Amorpha fruticosa* in open pit coal mine areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 190-196.

露天煤矿区不同生态措施对紫穗槐水分利用特征的影响

毕银丽^{1,2,3}, 柯增鸣^{1,2}, 高学江^{1,2}

(1. 西安科技大学西部矿山生态环境修复研究院, 西安 710054; 2. 西安科技大学地质与环境学院, 西安 710054;
3. 中国矿业大学(北京)煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的] 为探究排土场不同生态措施下典型植物的水分利用特征, 提高植物水分利用效率, 加速矿区生态恢复进程。[方法] 以黑岱沟煤矿排土场 6 种生态措施(对照、接菌、绿肥、接菌+绿肥、绿肥+风化煤、接菌+绿肥+风化煤)下紫穗槐为对象, 结合水的氢氧稳定同位素等方法分析。[结果] (1) 排土场土壤含水率为 3%~9%, 在 0—30, 70—100 cm 土层较低, 在 30—70 cm 土层较高。(2) 紫穗槐的水分供给来源于降水和土壤水, 土壤水分在 0—30 cm 土层发生显著的分馏现象, 且在不同生态措施表现出显著差异, 绿肥处理最大, 接菌+绿肥处理最小。(3) 不同生态措施下紫穗槐的水分利用特征存在显著差异, 接菌处理对 50—100 cm 土层的水分利用比例较高, 为 53.4%; 绿肥处理紫穗槐主要利用表层(0—20 cm 土层)土壤水分, 为 42.6%; 接菌+绿肥处理紫穗槐对各层土壤水分利用比例较为均匀。[结论] 接菌+绿肥处理优化了紫穗槐水分利用特征, 增加对表层和深层水分的利用比例, 可作为排土场的生态复垦措施, 促进西部干旱矿区生态恢复速率和效应。

关键词: 排土场; 生态措施; 水分来源; 水分利用特征

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0190-07

Effects of Different Ecological Measures on Water Use Characteristics of *Amorpha fruticosa* in Open Pit Coal Mine Areas

BI Yinli^{1,2,3}, KE Zengming^{1,2}, GAO Xuejiang^{1,2}

(1. Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Areas of West China, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an University of Science and Technology School of Geology and Environment, Xi'an 710054, China; 3. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent of Coal Resources, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To explore the water use characteristics of typical plants under different ecological measures at the waste dump, improve plant water use efficiency, and accelerate the ecological restoration process in mining areas. [Methods] Six ecological measures (control, inoculation, green fertilizer, inoculation+green fertilizer, inoculation+weathered coal, inoculation+green fertilizer+weathered coal) were implemented at the waste dump of the Heidaigou Coal Mine to treat *Amorpha fruticosa*. Stable isotopes of hydrogen and oxygen in water were combined with other techniques. [Results] (1) The soil moisture content of the waste dump was 3% to 9%, which was lower in the 0—30 cm and 70—100 cm soil layers, and higher in 30—70 cm soil layer. (2) *Amorpha fruticosa* obtained water from precipitation and soil. The soil water undergoes significant fractionation processed in the 0—30 cm soil layer, and exhibited significant differences among different ecological measures, with the green fertilizer treatment showing the highest and inoculation+green fertilizer treatment being the lowest. (3) Significant differences existed in the water use characteristics of *Amorpha fruticosa* under various ecological measures. The inoculation treatment exhibited a

收稿日期: 2023-08-06

修回日期: 2023-10-02

录用日期: 2023-11-05

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-01-16

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1303300); 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究项目(2022-YRUC-01-0304)

第一作者: 毕银丽(1971—), 女, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事矿区微生物复垦研究。E-mail: ylb88@126.com

通信作者: 毕银丽(1971—), 女, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事矿区微生物复垦研究。E-mail: ylb88@126.com

higher water use ratio of 53.4% in the 50–100 cm soil layer; The green fertilizer treatment mainly utilized the soil water in the surface layer (0–20 cm), which was 42.6%; The treatment of inoculation and green fertilizer had a relatively uniform proportion of soil water use in each layer. [Conclusion] The inoculation + green fertilizer treatment optimized the water use characteristics of *Amorpha fruticosa* plants, increased the utilization ratio of surface and deep soil water, and can be used as an ecological reclamation measure for waste disposal sites, which promoted the ecological recovery rate and effect of arid mining areas in the western region.

Keywords: dump; ecological measures; water source; water use characteristics

Received: 2023-08-06

Revised: 2023-10-02

Accepted: 2023-11-05

Online(www.cnki.net): 2024-01-16

黄河流域是我国重要的生态流域,也是我国重要的能源基地,国家 14 大煤炭基地中的 9 个都位于黄河流域(其中 6 个位于中上游西部地区)^[1-2]。土地复垦与生态修复是矿山实现绿色发展的根本保障,煤矿区的生态修复对实施黄河流域生态保护与高质量发展的国家战略具有重要作用^[3-4]。近年来,随着我国“山水林田湖草沙”及“双碳”战略的实施,矿区的生态修复力度逐渐增大,成为矿区绿色可持续发展的保障。然而黄河中上游绝大部分位于干旱半干旱地区,水资源是制约植物生长的主要因子^[5]。在长期干旱的环境,植物生存必须具备良好的水分利用特征以适应长期的干旱胁迫。因此,亟待厘清矿区典型植物的水分利用特征,为矿区生态复垦提供科学支持。

植物水分利用特征受多种因素影响,诸多学者对干旱半干旱地区植物的水分来源进行了研究^[6]。张细林^[7]通过对库布齐沙漠 4 种固沙植物水分利用的来源、比例、吸水深度及其对降水变化的响应及固沙植物水分利用特征、不同类型固沙植物优化配置技术、固沙植物适应干旱环境的策略研究发现,降雨是影响土壤水分的主要因素^[8],受不同降雨强度和土壤水分蒸发速率的影响,同类型固沙植被恢复区土壤水氢同位素值对降水变化的响应程度具有较大差异,降雨量影响植物对土壤水分利用的深度^[9];毕银丽等^[9]研究发现,接种 AMF 植物(玉米)细根的根长度、根体积和根表面积占比分别增加 4.4%,1.2%和 2.6%,还发现 97.4%的玉米根系主要分布在 0–40 cm 的土层中;同时利用本项目所用到的水的氢($\delta^2\text{H}$)氧($\delta^{18}\text{O}$)稳定同位素方法及 MixSIAR 模型量化植物对不同土层的用水比例,结果表明,接种 AMF 改变植物用水特征,使植物对 10–50 cm 土层的用水比例提高 12.1%。这些研究结果表明不同生态措施对植物水分利用特征具有很大影响,筛选最佳的生态措施对优化植物水分利用特征、提高植物成活率及矿区植被覆盖度具有重要意义。

针对植物水分利用特征的研究,学者们大量使用水的氢氧稳定同位素方法来研究植物水分来源及比例。主要的计算方法与模型有直接对比法、线性混合模型和贝叶斯混合模型^[10]。直接对比法是将植物茎干水的同位素值与各潜在水源的同位素值进行对比,以同位素值与植物茎干水同位素值相交或接近的水源作为植物的主要水分来源。杨晔等^[11]将土壤水和锦鸡儿木质部水的氢氧同位素值进行对比,得到锦鸡儿的主要吸水层位。多元线性混合 IsoSource 模型不仅可以计算出植物对不同水源的利用比例,还可以求出各水源对植物的贡献率范围。利用 IsoSource 模型定量分析了玉米根系对水分的吸收发现,随着生育期的推移,玉米根系对深层土壤水的利用比例越来越大^[12]。但 IsoSource 模型有很多不确定性因素该软件计算过程中并未考虑与分析。因此学者^[13]又提出了贝叶斯混合模型,该模型充分考虑贡献源各参数所导致的不确定性、潜在水源和混合物同位素值的不确定性。其中基于 R 语言的 MixSIAR 模型结合 2 种模型的优点,同时增加随机效应分类变量、贡献源的多元同位素原始数据的源输入形式、残差+过程误差等模块,明显提高定量计算植物水分来源比例的准确性。岳伶俐等^[14]基于该方法研究发现,土壤各层对油茶的水分贡献率存在差异,不同生长时期油茶吸水深度也不同。因此,本研究拟采用水的氢氧稳定同位素方法,结合 MixSIAR 模型分析典型植物水分利用特征,探究不同生态措施对植物水分利用特征的影响,为矿区土地复垦提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区为黑岱沟露天矿排土场复垦区,位于内蒙古自治区鄂尔多斯市薛家湾镇(111°12′38″E,39°45′56″N),坐落于黄河西岸,距离神华准格尔能源有限公司 9.8 km,北距呼和浩特市 120 km,南距平朔露天煤矿 225 km,西距鄂尔多斯市 135 km,均有二级公

路相通。该区气候类型属典型的大陆性气候,其特点是四季分明,天气干旱,降雨量少,昼夜温差大,冬季气温低干冷,下雨多集中在夏季。年平均气温 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 592 mm ,平均年蒸发量 $2\ 080\text{ mm}$ 。矿区排土场土壤为复填风积沙土,经过大型车辆反复碾压形成土质紧密的重构土体。

1.2 试验设计与处理

试验以人工种植的紫穗槐为供试植物,设置对照、接菌、绿肥、接菌+绿肥、接菌+绿肥+风化煤、绿肥+风化煤共 6 种生态措施,分别设置 6 个试验小区,每个小区 3 个重复,每块小区规格为 $35\text{ m}\times 45\text{ m}$ 。接菌的菌剂为 AM 真菌中的摩西管柄囊霉 (*Funneliformis mosseae*, F.m),由北京市农林科学院植物营养与资源研究所微生物室提供,中国矿业大学(北京)微生物复垦实验室进行培养扩繁。接菌菌剂为沙土基质,直接施加在植物根部,每株植物施加 50 g ;风化煤直接取自黑岱沟露天煤矿,经过粉碎之后施加在植物根部,每株施加 100 g ;绿肥选取紫花苜蓿,前期在植物周围撒播紫花苜蓿种子,撒播量为 6 g/m^2 ,待出苗 45 天后进行翻压。

1.3 样品采集

于 2022 年 6 月进行试验小区采样,在每块小区选择长势良好,且生长水平相似的 5 株紫穗槐进行取样,去除土壤表层枯落物,在距离植株 15 cm 位置采用土钻进行样品采集,每株植物重复 3 钻,每 10 cm 采集 1 个土壤样品,共采集深度 1 m 。将无根土壤快速装入 12 mL 的棕色小玻璃瓶,填满后在瓶口塞入少量脱脂棉,并用 Parafilm 封口膜密封,旋紧瓶盖,迅速放入 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中,用于测定土壤水氢($\delta^2\text{H}$)氧($\delta^{18}\text{O}$)稳定同位素。同时采集紫穗槐木质部 30 g 装入 12 mL 的棕色小玻璃瓶,在瓶口塞入少量脱脂棉,并用 Parafilm 封口膜密封,旋紧瓶盖,迅速放入 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中,用于测定茎水氢氧稳定同位素。雨水通过自制收集器进行采集,并冷冻后带回实验室进行测定。

1.4 测试分析

土壤水与植物水用低温真空蒸馏法提取,提取的水分通过孔径为 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 、直径为 13 mm 的针筒式滤膜过滤器过滤后装入 2 mL 的样品瓶中待测。本次试验中所有的水样采用美国 LosGatosResearch 公司研发的 DLT-100 型液态水同位素分析仪进行同位素测定。其中, $\delta^{18}\text{O}$ 值的测试误差不超过 $\pm 0.2\%$, δD 值的测试误差不超过 $\pm 0.6\%$,具体试验方法参照 WU 等^[15]。

1.5 数据处理

利用 Excel 进行统计分析,并采用 Origin 软件进

行绘图。依据同位素质量守恒定律,利用直观分析法对紫穗槐木质部水与各土层土壤水进行对比分析,判别紫穗槐水分利用来源。同时,采用 MixSIAR 模型(把植物木质部和各水分来源的稳定同位素值、标准偏差及同位素分馏值作为模型的输入值,模型估计值用平均值 \pm 标准差表示)计算各个潜在水源对紫穗槐木质部水分的相对贡献比例。

2 结果与分析

2.1 矿区不同水体氢氧同位素组成特征

研究区大气降水线方程为 $\delta\text{D}_a = 7.68\ \delta^{18}\text{O} - 11.98$ ($R^2 = 0.94$, $p < 0.01$) (图 1),表明排土场土壤水氢氧同位素具有显著的相关性,将排土场降水氢氧同位素关系线与全球大气降水线方程 $\delta\text{D} = 8\ \delta^{18}\text{O} + 10$ ^[16]、中国大气降水线方程 $\delta\text{D} = 7.9\ \delta^{18}\text{O} + 8.2$ ^[17] 相比,排土场大气降水线方程的斜率明显偏小。

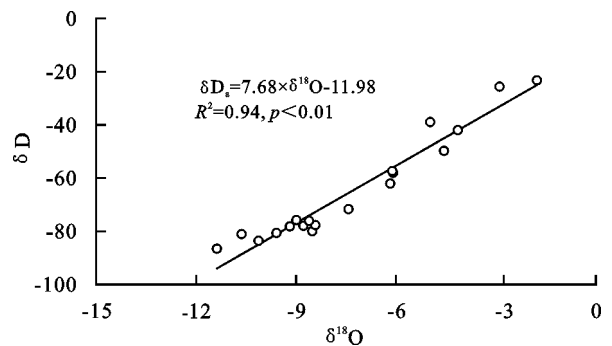


图 1 研究区大气降水氢氧同位素关系线

Fig. 1 Relationship line between hydrogen and oxygen isotope in atmospheric precipitation of waste dumps in the study area

将排土场 6—9 月测得的土壤水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行拟合,得到排土场土壤水氢氧同位素关系线 $y = 5.881\ 5x - 27.567\ 7$ ($R^2 = 0.876\ 7$, $p < 0.01$) (图 2)。

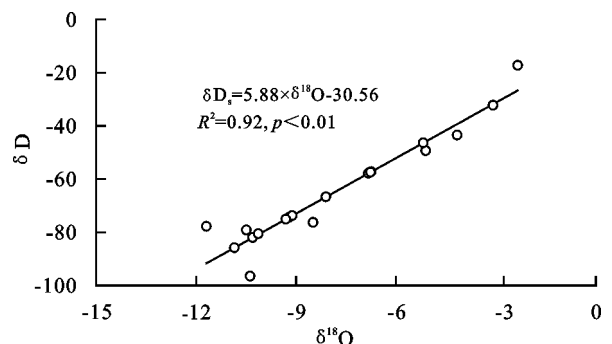


图 2 研究区土壤水氢氧同位素关系线

Fig. 2 Relationship line between hydrogen and oxygen isotope in soil water of waste dumps in the study area

由图 2 可知,排土场土壤水氢氧同位素具有显著的相关性,将排土场土壤氢氧同位素关系线与研究区的大气降水线进行比较可以发现,土壤氢氧同位素分布与大气降水线相近,说明土壤水分的主要补给来源

于大气降水。排土场土壤氢氧同位素关系线的斜率明显小于大气降水线,说明土壤水分除受大气降水的影响外,在大气降水转化为土壤水和土壤中水分重新分布时还发生一定程度的同位素分馏效应。

植物水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 分别在 -11.51% ~ -0.89% 和 -106.83% ~ -47.46% , 植物氢氧同位素关系线斜率大于降水线小于土壤水线(图 3), 这表明植物水分的 δD 和 $\delta^{18}O$ 在土壤水与降水之间波动, 稳定同位素的组成主要是受土壤水和降水影响, 并且植物受环境因素影响较大, 导致其富集作用明显。

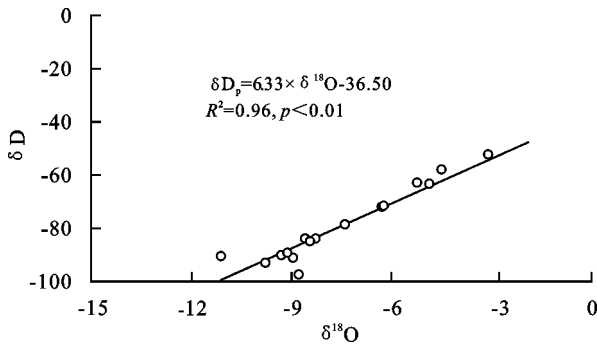


图 3 紫穗槐茎干水氢氧同位素关系线

Fig. 3 Relationship line between hydrogen and oxygen isotope in stem water of *Amorpha fruticosa*

2.2 不同生态措施下土壤水分特征

从图 4 可以看出, 在 0—100 cm 土层, 所有处理的土壤含水率大致呈现先增加后减小的趋势。整个排土场土壤含水率平均值为 3%~9%, 植物生长在较干旱的土壤中。在整个土层深度内, 接菌处理样地土壤在 60 cm 处含水率最高为 7.07%, 对照处理样地土壤在 90 cm 处含水率最高为 7.54%; 接菌+绿肥+风化煤处理样地在 80 cm 处含水率最高为 7.55%; 绿肥+风化煤处理样地在 40 cm 处含水率最高为 8.05%; 接菌+绿肥处理样地在 70 cm 处含水率最高为 7.24; 绿肥处理样地在 70 cm 处含水率最高为 7.10%。所有复垦措施在土壤 0—20 cm 土层含水率均较低, 在 40—70 cm 土层含水率较高。

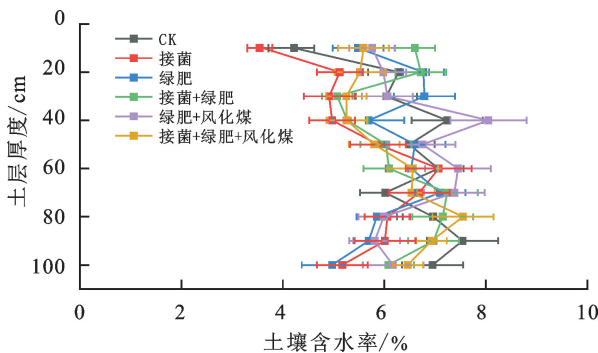


图 4 不同处理土壤含水率

Fig. 4 Soil moisture content under different treatments

从图 5 可以看出, 6 种不同生态措施土壤饱和含

水率存在显著差异, 在 0—40 cm 土层土壤饱和含水率范围为 33.18%~61.00%。对照处理土壤饱和含水率最大, 接菌+绿肥+风化煤处理最小, 除绿肥样地外, 其他 5 种复垦措施 0—20 cm 土层土壤饱和含水率均高于 20—40 cm 土层。

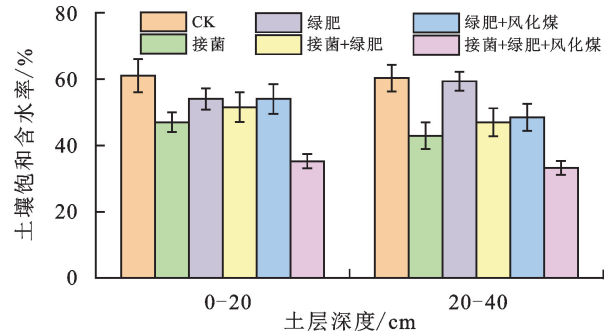


图 5 不同处理土壤饱和含水率

Fig. 5 Soil saturation moisture content under different treatments

2.3 不同生态措施下紫穗槐水分利用特征

通过直观对比法对不同生态措施紫穗槐水源进行分析。从图 6 可以看出, 排土场 6 种不同生态措施样地在 0—30 cm 土层土壤 $\delta^{18}O$ 随土层深度的增加呈降低趋势, 在 30—100 cm 土层, 土壤 $\delta^{18}O$ 随土层深度的增加呈交替变化趋势。对照样地土壤 $\delta^{18}O$ 与植物 $\delta^{18}O$ 相交点在 30 cm 土层左右, 且 60 cm 与 90 cm 土层相靠近, 说明植物可能主要利用 30 cm 土层水分, 对 60 cm 与 90 cm 土层水分利用也较高。接菌样地土壤 $\delta^{18}O$ 与植物 $\delta^{18}O$ 相交点在 30 cm 土层附近, 且与 50—70 cm 土层相靠近, 说明植物可能主要利用 30 cm 土层水分, 对 50—70 cm 土层水分利用也较高。绿肥样地土壤 $\delta^{18}O$ 与植物 $\delta^{18}O$ 相交点在 25 cm 土层附近, 且与 80 cm 土层相接近, 说明植物可能主要利用 25 cm 和 80 cm 土层水分。接菌+绿肥样地土壤 $\delta^{18}O$ 与植物 $\delta^{18}O$ 相交点在 20 cm 土层附近, 与深层水分距离较远, 说明植物主要利用表层水分。绿肥+风化煤样地土壤 $\delta^{18}O$ 与植物 $\delta^{18}O$ 相交点在 35 cm 土层附近, 且与 50 cm 土层相靠近, 说明植物可能主要利用 35 cm 土层水分, 对 50 cm 土层水分利用也较高。接菌+绿肥+风化煤样地土壤 $\delta^{18}O$ 与植物 $\delta^{18}O$ 相交点在 25 cm 土层附近, 且与 70—80 cm 土层相靠近, 说明植物可能主要利用 25 cm 土层水分, 对 70—80 cm 土层的水分利用也较高。

总体来看, 排土场 6 种不同生态措施中, 对照与接菌样地紫穗槐主要利用 10—30 cm 土层水分, 对 40—60 cm 土层水分利用也较高。所有有绿肥措施的样地, 紫穗槐主要利用 10—30 cm 土层水分, 对 70—80 cm 土层水分利用也较高, 对 40—60 cm 土层水分利用

较低,可能是由于绿肥(紫花苜蓿)与紫穗槐产生水分

利用的竞争关系,导致紫穗槐对此处水分利用较小。

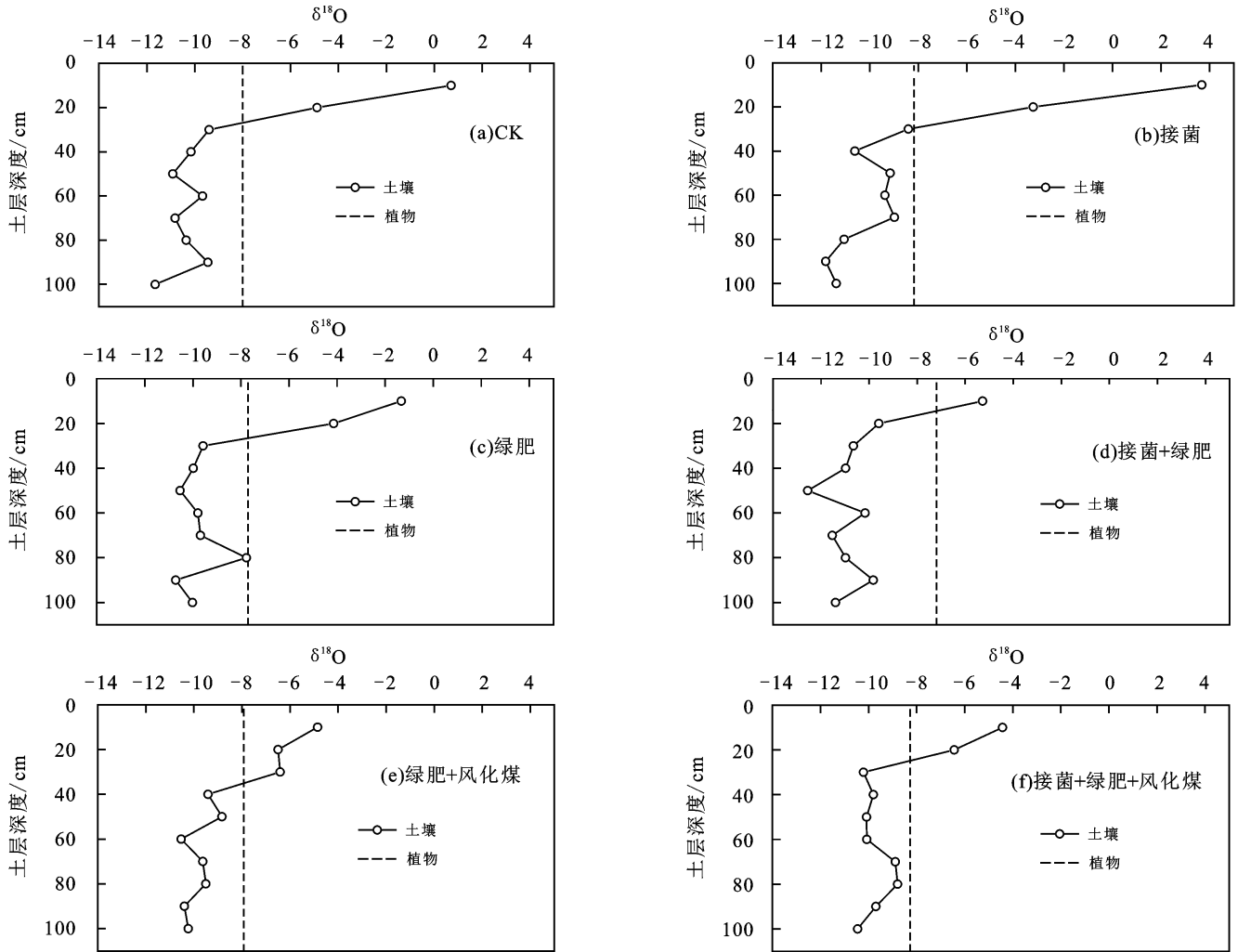


图 6 不同处理土壤 $\delta^{18}O$ 与植物 $\delta^{18}O$ 值

Fig. 6 $\delta^{18}O$ values of soil and plant under different treatments

2.4 不同生态措施下各土层水源贡献率

从图 7 可以看出,排土场 6 种不同生态措施样地对各土层水分利用比例均有显著差异。对照样地紫穗槐对 0—40 cm(表层)土层水分利用率为 35.9%,对 40—70 cm(中间层)土层水分利用率为 33.0%,对 70—100 cm(深层)土层水分利用率为 31.0%。接菌样地紫穗槐对土壤表层水分利用率为 37.8%,对中间层水分利用率为 33.1%,对深层水分利用率为 29.5%。接菌+绿肥样地紫穗槐对土壤表层水分利用率为 49.6%,对中间层水分利用率为 26.7%,对深层水分利用率为 23.6%。绿肥样地紫穗槐对土壤表层水分利用率为 63.4%,对中间层水分利用率为 19.0%,对深层水分利用率为 17.6%。接菌+绿肥+风化煤样地紫穗槐对土壤表层水分利用率为 49.6%,对中间层水分利用率为 26.8%,对深层水分利用率为 26.0%。绿肥+风化煤样地紫穗槐对土壤表层水分利用率为 52.6%,对中间层水分利用率为 23.2%,对深层水分

利用率为 24.6%。

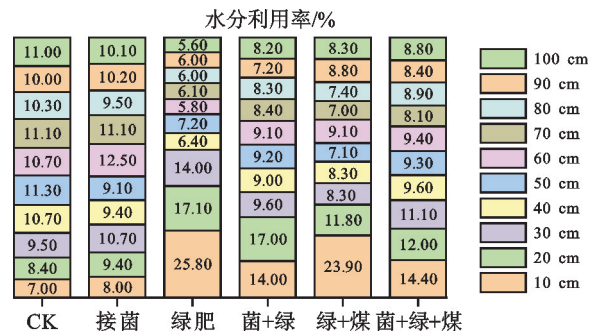


图 7 不同处理紫穗槐对土壤各层水分的利用率

Fig. 7 The utilization ratio of soil moisture in different layers of purple locust under different treatments

3 讨论

黑岱沟排土场所有生态措施均在 0—30, 70—100 cm 土层表现出较低的含水率,在 30—70 cm 表现出较高的含水率。表层土壤含水率较低是因为该地区降水较少,蒸发量大造成。而 30—50 cm 土层土壤含水率较高是因为降水通过表层入渗到此处被涵

蓄,从而提高该层水分含量。而有限的降水未能对较深层进行补给,表现出较低的水分含量。排土场大气降水发生分馏现象,这主要是由于降水在非饱和大气中降落时受到云下二次蒸发的影响,导致重同位素富集,同时大气降雨还受温度、湿度、季节变化等因素影响^[18]。排土场土壤水分的主要来源于大气降水,通过将排土场土壤氢氧同位素关系线与研究区的大气降水线进行比较发现,土壤氢氧同位素分布与大气降水线相近。另外,大气降水转化为土壤水和土壤中水分重新分布时还发生一定程度的同位素分馏效应,表现出排土场土壤氢氧同位素关系线的斜率明显小于大气降水线。所有处理在 0—30 cm 土层富集显著,其中绿肥样地最大,接菌+绿肥样地最小,这可能是由于接菌后植物冠幅增大,降低土壤蒸发强度,进而表现出较弱的土壤水同位素分馏现象;也可能与接菌植物根系分布在较深土层,导致表层土壤水分相对稳定有关,该结果与毕银丽等^[19]对接菌影响模拟重构土层水分分布及水同位素分馏的结果相似。

接菌与对照处理紫穗槐对各土层水分利用比例相似,总体表现出对表层水分利用率较低,对深层水分利用率较高,这可能是由于土壤表层含水率较低,且植物细根系在深层分布较多的原因。而添加绿肥措施紫穗槐对表层水分利用率较高,而对深层水分利用率较低,这可能是由于绿肥样地中,绿肥长势较好,遮挡住阳光对土壤的直接照射处理,紫穗槐对深层水分的利用效率均高于对应的不接菌处理^[20],研究说明接菌有利于植物细根系向下生长发育,菌丝也有利于植物对水分的吸收利用,这与邢丹等^[21]研究丛枝菌根真菌对岩溶区植物水分吸收利用的促进作用结果相似。综上,接菌+绿肥为干旱露天煤矿区最佳的生态复垦措施,为矿区生态修复提供了重要方法。

4 结论

(1) 矿区排土场所有处理在 0—30, 70—100 cm 土层均表现出较低的含水率,在 30—70 cm 表现出较高的含水率。

(2) 受气温、蒸发等因素影响,排土场表层土壤水分表现出显著的分馏现象,其中绿肥处理最大,接菌+绿肥处理最小。

(3) 矿区排土场不同生态措施下紫穗槐水分利用特征存在差异,接菌措施增加根系对深层土壤水分的利用比例,绿肥添加处理进一步提高紫穗槐对表层水分的利用,接菌+绿肥处理对土壤各层的水分利用更加均匀,有利于排土场生态恢复的可持续发展。

参考文献:

- [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.
- PENG S P. High quality development in the Yellow River Basin urgently requires attention to ecological restoration in coal mining areas[N]. China Science Daily, 2020-09-07.
- [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 S P, BI Y L. 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] 胡振琪, 肖武. 关于煤炭工业绿色发展战略的若干思考: 基于生态修复视角[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 35-42.
- HU Z Q, XIAO W. Some thoughts on green development strategy of coal industry: From aspects of ecological restoration[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 35-42.
- [4] BIAN Z F, MIAO X X, LEI S G, et al. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes[J]. Science, 2012, 337(6095): 702-703.
- [5] 林芙蓉, 顾大形, 黄玉清, 等. 植物根系水力再分配的研究进展[J]. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2978-2986.
- LIN F R, GU D X, HUANG Y Q, et al. Research advances in hydraulic redistribution of plant roots[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(9): 2978-2986.
- [6] 陈平, 孟平, 张劲松, 等. 两种药用植物生长和水分利用效率对干旱胁迫的响应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1300-1306.
- CHEN P, MENG P, ZHANG J S, et al. Effects of drought stress on growth and water use efficiency of two medicinal plants[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(5): 1300-1306.
- [7] 张细林. 基于稳定同位素技术的库布齐沙漠 4 种固沙灌木水分利用特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2022.
- ZHANG X L. Study on water utilization characteristics of different types of sand-fixation shrubs in the Hobq Desert based on stable isotope techniques[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2022.
- [8] 杨志成, 柯奇画, 马芊红, 等. 喀斯特地区黄壤坡面土壤水分对降雨的响应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 75-79.
- YANG Z C, KE Q H, MA Q H, et al. Response of soil moisture to rainfall on Karst yellow soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 75-79.
- [9] 张铁钢, 李占斌, 李鹏, 等. 土石山区不同植物土壤水分利用方式对降雨的响应特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1461-1467.
- ZHANG T G, LI Z B, LI P, et al. Response characteristics of soil water use patterns by different plants to precipitation in rocky mountainous areas [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1461-1467.

[1] 彭苏萍. 黄河流域高质量发展亟须重视煤矿区生态修复

- [10] 段德玉, 欧阳华. 稳定氢氧同位素在定量区分植物水分利用来源中的应用[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 655-660.
DUAN D Y, OUYANG H. Application of stable hydrogen and oxygen isotope in analyzing plant water use sources[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 655-660.
- [11] 杨晔, 张明军, 张宇, 等. 基于氢氧稳定同位素的兰州南山绿化植物种选择: 以锦鸡儿为例[J]. 生态学杂志, 2023, 42(1): 83-90.
YANG Y, ZHANG M J, ZHANG Y, et al. Selection of greening plant species in the South Mountains of Lanzhou based on hydrogen and oxygen stable isotopes: A case study of *Caragana*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(1): 83-90.
- [12] WU Y J, DU T S, LI F S, et al. Quantification of maize water uptake from different layers and root zones under alternate furrow irrigation using stable oxygen isotope[J]. Agricultural Water Management, 2016, 168: 35-44.
- [13] 高阳, 韩磊, 柳利利, 等. 宁夏河东沙地不同坡度柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)水分利用策略差异[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1212-1223.
GAO Y, HAN L, LIU L L, et al. Differences in water use strategies of *Caragana korshinskii* at different slopes in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1212-1223.
- [14] 岳伶俐, 夏雄, 胡德勇, 等. 基于氢氧同位素的油茶果实生长高峰期水分来源量化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 154-161.
YUE L L, XIA X, HU D Y, et al. Quantifying the water sources of *Camellia oleifera* during fruit growth peak period using hydrogen and oxygen isotopes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(20): 154-161.
- [15] WU W J, TAO Z, CHEN G J, et al. Phenology deter-
mines water use strategies of three economic tree species in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 312: e108716.
- [16] 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 J S, MA Y, HU X N, 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.
- [17] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [18] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801-806.
ZHENG S H, HOU F G, NI B L. Study on stable isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 28(13): 801-806.
- [19] 毕银丽, 田乐焯, 柯增鸣. 接菌影响模拟重构土层水分分布及水同位素分馏[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 274-283.
BI Y L, TIAN L X, KE Z M. The inoculation affected the water distribution and isotope fractionation in the simulated reconstructed soil[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 274-283.
- [20] YU W S, YAO T D, TIAN L D, et al. Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau[J]. Atmospheric Research, 2008, 87(2): 158-169.
- [21] 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 D, WANG Z H, SHEN G, 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.
- (上接第 28 页)
- [120] 陈雪冬, 李尤亮, 杨旸. 植物根系对浅层边坡的水文学加固研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 33-40.
CHEN X D, LI Y L, YANG Y. Study on hydro-mechanical effect of plant roots on the shallow slope[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2022, 44(1): 33-40.
- [121] KHALILI N, KHABBAZ M H. A unique relationship for λ for the determination of the shear strength of unsaturated soils[J]. Géotechnique, 1998, 48(5): 681-687.
- [122] DUAN X M, ZENG L F, SUN X. Generalized stress framework for unsaturated soil: Demonstration and discussion [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(5): 1459-1481.
- [123] 胡小荣, 路祥, 蔡晓锋. 非饱和黏性土的广义有效应力三剪弹塑性本构模型[J/OL]. 工程力学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//11.2595.o3.20230216.1729.061.html>.
HU X R, LU X, CAI X F. The triple-shear unified constitutive model for unsaturated clays based on the generalized effective stress concept [J/OL]. Engineering Mechancis. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//11.2595.o3.20230216.1729.061.html>.