

半干旱区露天矿排土场不同植物水分利用策略的季节变化

张亮¹, 李龙^{1,2}, 王婧¹, 王鹤燕¹, 刘彤彤¹

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010010;

2.国家林业局荒漠生态系统保护与修复重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: [目的] 探究旱雨两季不同植被配置模式下苜蓿与沙棘的水分来源, 为矿区植被恢复提供理论依据。[方法] 以内蒙古自治区鄂尔多斯市满来梁煤矿排土场平台为研究区, 采用稳定同位素技术, 采集研究区内3种植被配置模式下植物木质部样品、土壤样品、降水样品, 分析其氢氧稳定同位素组成。[结果] ①随着雨季的来临各样地土壤含水率均呈现增大的趋势, 纯沙棘地由旱季的6.56%增长至9.88%, 纯苜蓿地由7.94%增长至9.15%, 混交地由9.4%增长至15.45%。②旱季不同植被配置模式下苜蓿与沙棘主要利用80—100 cm土壤水作为其水分来源。而雨季随着降水对土壤水的补充, 土壤含水率增大, 各类植被吸水深度发生上移, 主要集中于20—60 cm处。[结论] 植被不同配置模式下苜蓿与沙棘在旱雨两季水分来源大不相同, 旱季二者主要集中于深层土壤, 雨季吸水深度上移且吸水范围增加。雨季混交情况下沙棘为避免资源竞争会选择深层土壤水作为其主要水分来源。

关键词: 矿区; 排土场; 同位素; 植被; 水分利用

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0028-10

中图分类号: X173

文献参数: 张亮, 李龙 王婧, 等. 半干旱区露天矿排土场不同植物水分利用策略的季节变化[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 28-37. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.004; Zhang Liang, Li Long, Wang Jing, et al. Seasonal variation in water use strategies of different plants in an open-pit mine dump site in semi-arid area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 28-37.

Seasonal Variation in Water Use Strategies of Different Plants in an Open-pit Mine Dump Site in Semi-arid Area

Zhang Liang¹, Li Long^{1,2}, Wang Jing¹, Wang Heyan¹, Liu Tongtong¹

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot, Inner Mongolia 010000, China; 2. Key Laboratory of Desert Ecosystem Conservation and Restoration, National Forestry and Grassland Administration, Hohhot, Inner Mongolia 010000, China)

Abstract: [Objective] The water sources of alfalfa and seabuckthorn under different vegetation allocation patterns in drought and rainy seasons were studied to provide a theoretical basis for vegetation restoration in mining areas. [Methods] The platform of the dumping site of Manlailiang coal mine in Ordos City, Inner Mongolia Autonomous Region was taken as the research area. The stable isotope technique was used to collect plant xylem samples, soil samples, and precipitation samples under three vegetation configuration modes in the study area, and the hydrogen and oxygen stable isotope compositions were analyzed. [Results] ① With the advent of the rainy season, the soil moisture content of all plots showed an increasing trend. The pure seabuckthorn land increased from 6.56% in the dry season to 9.88%, the pure alfalfa land increased from 7.94% to 9.15%, and the mixed land increased from 9.4% to 15.45%. ② Alfalfa and seabuckthorn mainly used 80—100 cm soil water as their water source under different vegetation configuration modes in the dry

收稿日期: 2024-04-22

修回日期: 2024-06-14

资助项目: 鄂尔多斯市科技重大专项项目“生态景观经济型植物种筛选与立体配置技术研究”(2022EEDSKJZDZX012-2); 鄂尔多斯市科技计划项目“鄂尔多斯露天矿排土场营养土层重塑与植被构建协同修复技术集成与示范项目”(2022YY005)

第一作者: 张亮(1999—), 男(汉族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: zlltt0704@163.com。

通信作者: 李龙(1989—), 男(汉族), 吉林省桦甸市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀及水土保持相关研究。Email: lilongdhr@126.com。

season. In the rainy season, with the supplement of rainfall to soil water, the soil moisture content increased, and the water absorption depth of various types of vegetation moved up, mainly concentrated at 20—60 cm. [Conclusion] The water sources of alfalfa and seabuckthorn were very different in the dry and rainy seasons under different vegetation configuration modes. In the dry season it was mainly concentrated in deep soil, and the water absorption depth moved up and the water absorption range increased in the rainy season. To avoid resource competition, seabuckthorn will choose deep soil water as its main water source under the mixed condition in the rainy season.

Keywords: mining area; dumping site; isotope; vegetation; water use

中国目前属于全球最大的煤炭资源消费国与生产国,并且煤炭资源在国人日常生活以及国家能源战略体系中长期处于主导地位。但是大规模的矿产资源开发造成了以水土资源为核心的生态环境破坏^[1]。根据调查显示,中国因矿产资源的大规模开发所造成的堆砌物面积越来越大,并且每年以 $2.50 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的速度增长^[2]。露天煤矿开采作为煤炭资源开采的一种重要方式,具有回采率高,产量大的优点^[3]。而中国的露天煤矿多数位于生态环境脆弱区,在煤炭资源的开采过程中极易对土壤与植被造成破坏,随之而生的矿山排土场也存在着土壤肥力退化、水土资源流失等生态问题,同时也会对矿区周边生态环境产生负面影响。

植被恢复措施是解决矿山生态环境问题的重要手段,既可以改变矿山景观格局,提高植物多样性,又可以改善矿山地表的基质结构与肥力,是实现矿山排土成土的必要手段。此外,植物在全球水分循环中扮演着非常重要的角色,它的生存与生长又是一个受水环境制约的过程。稳定同位素是研究植物和水资源相互关系的有效手段^[4],通过对氢氧稳定同位素进行分析,可以探究植物对水源利用的过程和选择,如对降水、土壤水、灌溉水、地下水的利用比例和季节变化规律^[5]。另外,通过对水源和植物水同位素的分析,还可以明晰植物对不同土层土壤水利用的季节变化规律。有研究发现干旱地区一些植物个体对不同水源的利用比例也随时间有较大的变化^[6]。比如,爱德华兹高原的杜松(*Juniperus rigida*)有明显的季节性用水模式,在比较干旱、炎热的夏季主要利用深层土壤水,而在较为寒冷的冬季主要利用浅层土壤水。科罗拉多高原的沙漠生态系统中,长毛落芒草(*Oryzopsis hymenoides*)在干旱条件的胁迫下减少浅层土壤水的吸收,将更深层的土壤水作为自身水来源^[7]。张铁钢等^[8]学者在土石山区对侧柏(*Platycladus orientalis*)和玉米(*Zea mays*)吸水深度进行研究时发现,当土壤发生干旱时,侧柏吸水深度明显上移,而玉米根系吸水范围整体增加。也有部分学者

使用氢氧稳定同位素示踪的方法对北美乔松干旱年与湿润年的水分利用情况进行研究,发现在地下水位较深处,干旱年的夏季和湿润年的夏季北美乔松对雨水的利用率分别是 20% 和 32%,在地下水位较浅的地区仅利用了 10% 和 16%^[9]。总而言之,氢氧稳定同位素已然成为探究植物水分利用来源与策略的重要手段。目前,大多数学者利用稳定同位素技术在荒漠、河岸、海岸等生态系统中对不同类型的植物水分来源和利用展开了应用,为探究植物水分来源以及利用策略提供了新思路^[10]。然而,基于稳定同位素技术研究干旱区矿山排土场植物水分利用策略的研究迄今为止未见报道。因此,为深入了解干旱区矿山排土场不同植被配置模式下植物在不同季节对不同水源、不同深度水分的响应,本文以内蒙古自治区鄂尔多斯市满来梁煤矿排土场平台不同植被配置模式种植区为研究对象,分别以 5 月与 7 月的植物水分利用策略表征旱雨两季植物水分利用策略。采用稳定同位素示踪技术与多元线性混合模型 Iso-source,确定不同土层深度水分对植物的贡献率,阐明旱季和雨季不同植被配置下沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和苜蓿(*Medicago sativa*)水分利用策略,为半干旱区露天矿排土场植物用水机制和生态需水等关键问题奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

1.1.1 研究区自然概况 满来梁露天煤矿位于黄土高原鄂尔多斯市伊金霍洛旗东部,总面积约为 7.9 km^2 ,地理坐标为 $39^\circ 29' 16''$ — $39^\circ 27' 46'' \text{ N}$, $110^\circ 15' 13''$ — $110^\circ 18' 38'' \text{ E}$ 。该矿区属典型的黄土丘陵区。隶属于中温带,年平均温度为 $7.2 \text{ }^\circ\text{C}$,最高气温 $38.3 \text{ }^\circ\text{C}$,最低温度 $-3.9 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均温度为 $7 \text{ }^\circ\text{C}$,年降雨量 400 mm 左右,主要集中在 7—9 月,多为暴雨天气,研究区年平均蒸发量 $2\,082 \text{ mm}$,无霜期约 125 d。排土场覆土深度 1 m,组成类型主要为黄绵土,微碱性,肥力低下,地表沟壑纵横,植被稀疏,水土流失、风蚀沙化极为严重。

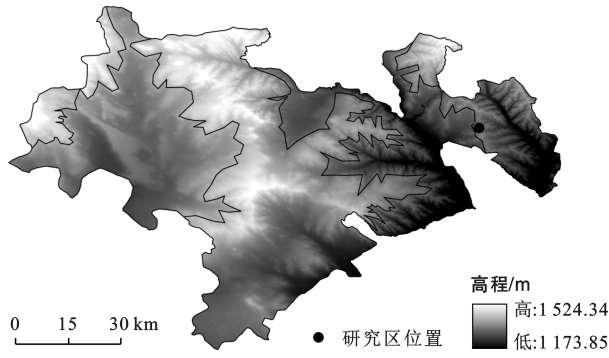


图 1 伊金霍洛旗高程分布图

Fig.1 Elevation distribution map of Yijinhuoluo Banner

1.2 研究方法

1.2.1 采样地确定 本研究于 2023 年 5 月和 7 月在

内蒙古自治区鄂尔多斯满来梁煤矿排土场平台进行,排土场植被种植区覆土深度为 1 m,以苜蓿、沙棘、柠条等植物为植被恢复优势物种。经实地调研分析后,选择相同种植年限下不同植被配置模式的沙棘与苜蓿为研究对象并进行人工标记。采样地调查情况见表 1。

1.2.2 土壤与植物样品采集与分析 2023 年 5 月 31 日和 7 月 31 日进行土壤样品与植物枝条的采集工作。在纯沙棘地、纯苜蓿地、沙棘与苜蓿混交地中各选取 3~5 株长势较好的植株,取样范围为以植物为圆心,1/4 冠幅为半径的圆内。为降低降雨对浅层土壤水的影响,保证每次取样前 3 d 无降雨事件发生。

表 1 样地信息统计

Table 1 Plot information statistics

样地类型	经纬度	复垦年限/a	平均海拔/m	植被覆盖度/郁闭度	种植间隔
纯苜蓿地	39°28'21"N	3	1 273	85%	一行一带
	110°17'30"E				10 cm×10 cm
沙棘纯林	39°28'12"N	3	1 268	70%	一行一带
	110°17'33"E				3 m×3 m
混交地	39°28'26"N	3	1 270	苜蓿:85%	一行一带
	110°17'35"E			沙棘:70%	沙棘:3 m×3 m 苜蓿:10 cm×10 cm

在每一块样地中,利用土壤取样钻机在 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60, 60—70, 70—80, 80—90, 90—100 cm 的深度采集土壤样品,共十层。每株植物钻取 1 钻土,并将所取得的每层土壤样品迅速装入棕色样品瓶中,用 Parafilm 封口膜密封后进行低温保存(0~4 °C),用于土壤水同位素检测,剩余土壤样品放入铝盒中进行土壤含水率的测定。

与此同时,在采样点使用枝剪采集已经栓化、成熟的植被木质部枝条,草本植物采集根茎连接处部分(二级枝条),每株植物取三次重复,去除枝条外皮后立即将样品放入棕色样品瓶中,用 parafilm 封口膜密封后储存于 0~4 °C 保温袋中,随即运送至实验室进行植物水的真空抽提以及同位素检测。

1.2.3 大气降水样品采集与分析 2023 年 5—8 月采集这一时间段内大气降水并收集降雨量、降雨历时等信息。在每次降雨事件中,使用烧瓶和漏斗构成的降雨收集器收集雨水。降雨停止后迅速将收集到的雨水过滤并密封保存于棕色样品瓶内,然后放置于 0~4 °C 低温环境中,以备分析雨水中稳定同位素值。

1.3 数据处理

1.3.1 土壤水、植物水抽提与氢氧同位素测试分析 土壤水抽提与木质部水抽提试验以及同位素含量试验于 2023 年 6 月 18 日至 8 月 7 日在内蒙古农业大学风沙物理实验室进行,抽提试验利用低温真空抽提系统(LI-2000,理加公司,中国),目的为将土壤中的液态水与植物木质部中液态水进行分离,氢氧稳定同位素值由德国 elementar 公司生产的 isoprime precis ION 液态水同位素分析仪(isoprime precis ION, elementar, 德国)进行同位素检测。确定样品的氧同位素组成公式^[10]表示为:

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$\delta^2\text{H} = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_{sample} 与 R_{standard} 分别是样品与标准水(标准平均海水,SMOW)的氧同位素组成($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的摩尔比值)。

1.3.2 土壤含水率与植物利用土壤水比例计算 土壤含水率采用烘干法^[11]计算获得,计算公式为:

$$SW = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中:SW 为土壤含水率(%); M_1 为供试原土质量(g); M_2 为烘干土质量(g)。

利用 Iso-source 多元线性混合模型进行土壤水对植被贡献率进行计算,不同深度土壤水来源的相对贡献可用以下方程^[12-13]表达。

$$\delta M = F_A \delta_A + F_B \delta_B + \dots + F_N \delta_N \quad (4)$$

$$1 = f_A + f_B + \dots + f_N \quad (5)$$

式中: δM 为植物茎抽提水的氢(氧)同位素值; δN 是第 N 种水源的氢(氧)同位素值; f_N 是第 N 种水源在植物茎水分中所占的百分比。

本次试验采集所用数据均采用 Excel 2021 进行

整理,大气降水线方程与土壤水方程的拟合采用 SPSS 25 完成,图片由 Origin 8.5 软件完成。

2 结果与分析

2.1 研究区旱雨两季降雨同位素组成及大气降水线

如图 2 所示,研究期间总降雨量为 35.2 mm,其中 5 月共两次降雨,总雨量 11.6 mm,单次最大降雨量 6.8 mm;7 月共 9 次降雨,总雨量为 33.8 mm,单次最大降雨量 9.8 mm。在整个采样期间,降水的同位素组成变化较为明显,5 月 $\delta^{18}O$ 的变化范围是 $-1.76\text{‰} \sim -3.05\text{‰}$, δD 的变化范围是 $-15.94\text{‰} \sim 15.87\text{‰}$ 。因为降水中的稳定同位素值与降水量不受气温影响,所以不发生温度效应。

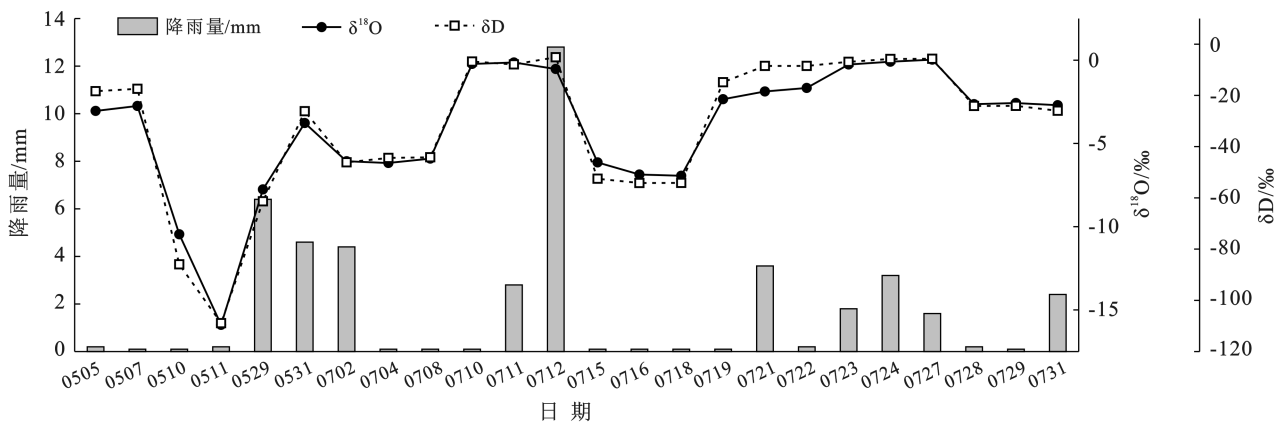


图 2 满来梁煤矿降雨量与雨水 $\delta^{18}O$, δD 值分布情况

Fig.2 Distribution of rainfall and rainwater $\delta^{18}O$ and δD values in Manlailiang coal mine

根据研究区降雨同位素值,得到当地 5 月及 7 月大气降水线方程(LMWL)分别为: $\delta D = 7.355 \delta^{18}O + 0.388$ ($R^2 = 0.96$), $\delta D = 7.177 \delta^{18}O - 3.25$ ($R^2 = 0.96$),

与全球大气降水线方程^[14](GMWL: $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$)相比斜率与截距明显偏小,说明降雨过程受蒸发影响,符合干旱区的特点(图 3)。

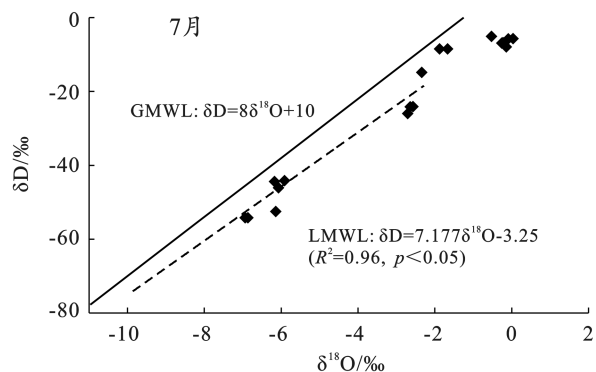
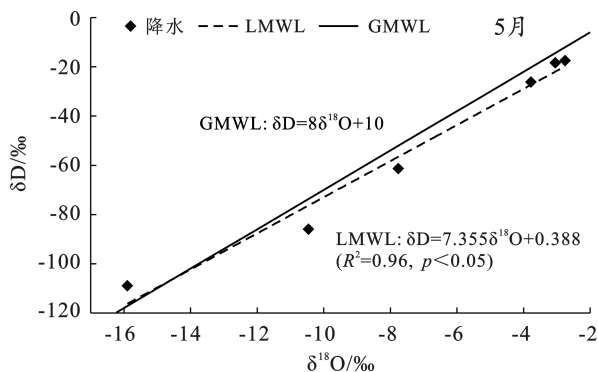


图 3 满来梁煤矿 5 和 7 月大气降水线

Fig.3 Atmospheric precipitation line in May and July in Manlailiang coal mine

在降水过程中,由于氢氧稳定同位素之间分馏速率不同,使得降水中的 δD 与 $\delta^{18}O$ 的关系会出现一个差值 (d), Dansgaard 称之为氘盈余或过量氘

(d -excess),其定义为公式:

$$d\text{-excess} = \delta D - 8\delta^{18}O \quad (6)$$

研究发现旱雨两季的降水 d -excess 存在明显差

异,其中 5 月份降水的 d -excess 变化范围在 -2.27% ~ 18.25% 之间,平均值为 5.23% ,7 月降水的 d -excess 变化范围在 -6.77% ~ 6.54% 之间,平均值为 -8.02% ,从月变化尺度来看,随着雨季的来临 d -excess 值出现减小的趋势,表明研究区水汽来源受到季风的影响(图 4)。

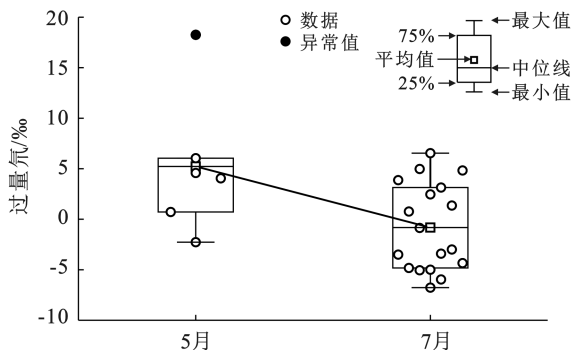


图 4 满来梁煤矿旱雨两季降水 d -excess 差异

Fig.4 Difference of d -excess of precipitation in dry and rainy seasons in Manlailiang coal mine

2.2 不同季节土壤含水率、土壤水 lc -excess 分布特征

土壤中的水分是植物生存生长过程中最重要的

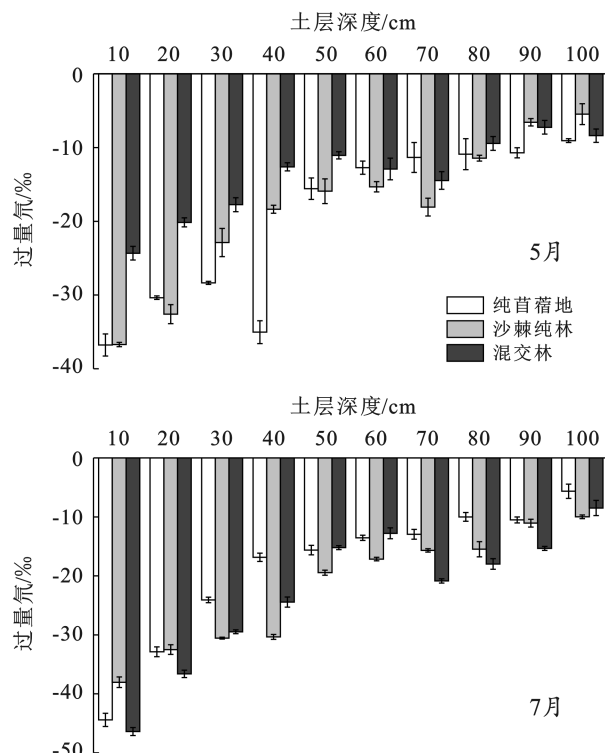
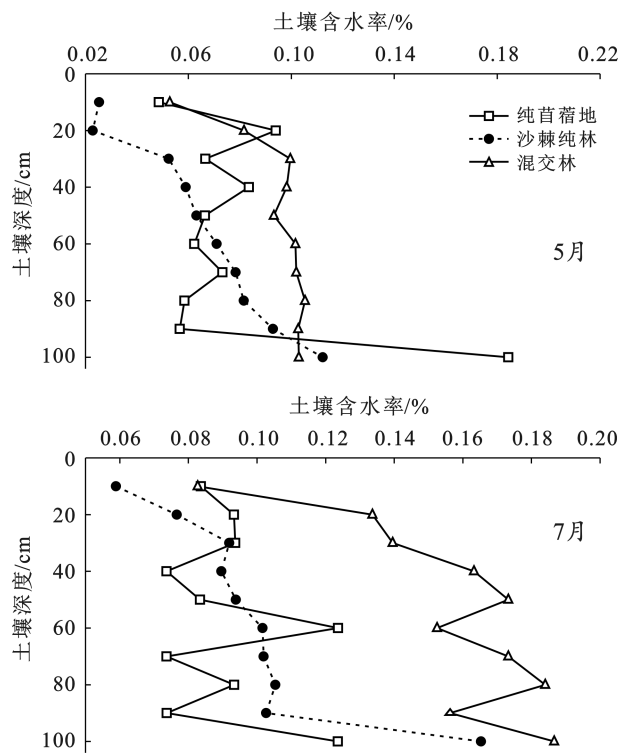


图 5 不同植被配置模式下土壤含水率与土壤水 lc -excess

Fig.5 Soil water content and soil water lc -excess under different vegetation configuration modes

通过对研究区土壤水的 lc -excess 进行分析后发现各样地土壤水 lc -excess 整体表现出随土层深度的增加而增大的趋势,因而得出表层土壤水蒸发强于深层土壤水(图 5),旱季时纯苜蓿地土壤水的 lc -excess 值随

水分来源,由于土壤本身的理化性质使得各深度土壤含水率与土壤水的同位素组成存在一定的差异^[15]。由图 5 可知,5 月混交地土壤含水率大于其余两种植被种植区,为 9.40% ,最小的为纯沙棘地,其土壤含水率为 6.59% 。5 月土壤含水率均呈现随土层深度的增加而增大的趋势,其中纯苜蓿地土壤含水率在 $90-100$ cm 处达到最高,其值为 18.43% 。随着雨季的来临,土壤含水率也逐渐增大。其中混交地土壤含水率最大,为 15.45% 。与含水率最低的苜蓿群落相差 6.30% 。

不同水体中的 lc -excess 则用来表示不同水体对于当地降水蒸发程度。其表达式为:

$$lc\text{-excess} = \delta D - a \times \delta^{18}O - b \quad (7)$$

式中: a 和 b 分别表示 LMWL 的斜率和截距; δD 和 $\delta^{18}O$ 则代表水样中的稳定同位素值。一般来说, lc -excess 的均值为 0,但是由于其他水体中的氢氧同位素因蒸发作用而不断富集,使得 lc -excess 的平均值小于 0,而当水体中的 lc -excess 值大于 0 时,则表明该水体可能受到除降水外其他补给水源的影响。

土层深度的变化范围在 -36.77% ~ -9.06% 之间,均值为 -20.08% ;纯沙棘地土壤水的 lc -excess 变化范围在 -36.72% ~ -5.47% 之间,均值为 -18.34% ,混交地的 lc -excess 变化范围在 -24.33% ~ -8.39% ,均

值为-13.83‰,雨季纯苜蓿地中土壤水 lc-excess 随深度的变化范围在-44.22‰~-5.65‰之间,均值为-18.64‰;纯沙棘地的土壤水 lc-excess 变化范围在-38.03‰~-9.99‰,平均值为-22.02‰;混交地的 lc-excess 变化范围在-46.38‰~-8.49‰之间,平均值为-22.76‰。研究发现旱季时纯沙棘地与混交地的土壤水 lc-excess 均小于雨季,表明当雨季来临时随着温度的增加土壤蒸发作用也增加。整体对比旱雨两季的各植被配置模式土壤水 lc-excess,发现旱季时纯苜蓿地中 lc-excess 最小,其次为纯沙棘地,最大的为混交地,雨季时混交地的土壤水 lc-excess 最小,而纯苜蓿地的土壤水 lc-excess 最大,造成这一现象的原因可能是由于 5 月份降水较少,研究区温度逐渐升高,而混交地内植被盖度较大,可以使得林内温度

相对较低,可以有效避免外界气象因素所造成的土壤蒸发现象。7 月时研究区降雨量增加,温度升高,进而使得土壤蒸发更强烈。

2.3 不同植被配置模式下各潜在水源之间关系分析

依据土壤水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 的分布情况可以拟合出土壤水线(SWL,见图 6)。沙棘纯林,纯苜蓿地与混交地的土壤水线因受到矿区排土场土壤空间分布的空间异质性的存在有一定的差异,旱雨季时部分样地土壤水线的斜率与截距出现高于大气水线的情况,表明土壤水的来源具有人为干扰(局部区域灌溉),也有可能因蒸发作用较强而出现同位素偏移现象。

同时研究发现,不同植被配置模式下的沙棘与苜蓿的 $\delta^{18}O$ 与 δD 分布在土壤水线以及大气水线的下方,表明植物水的来源均来自于大气降雨和土壤。

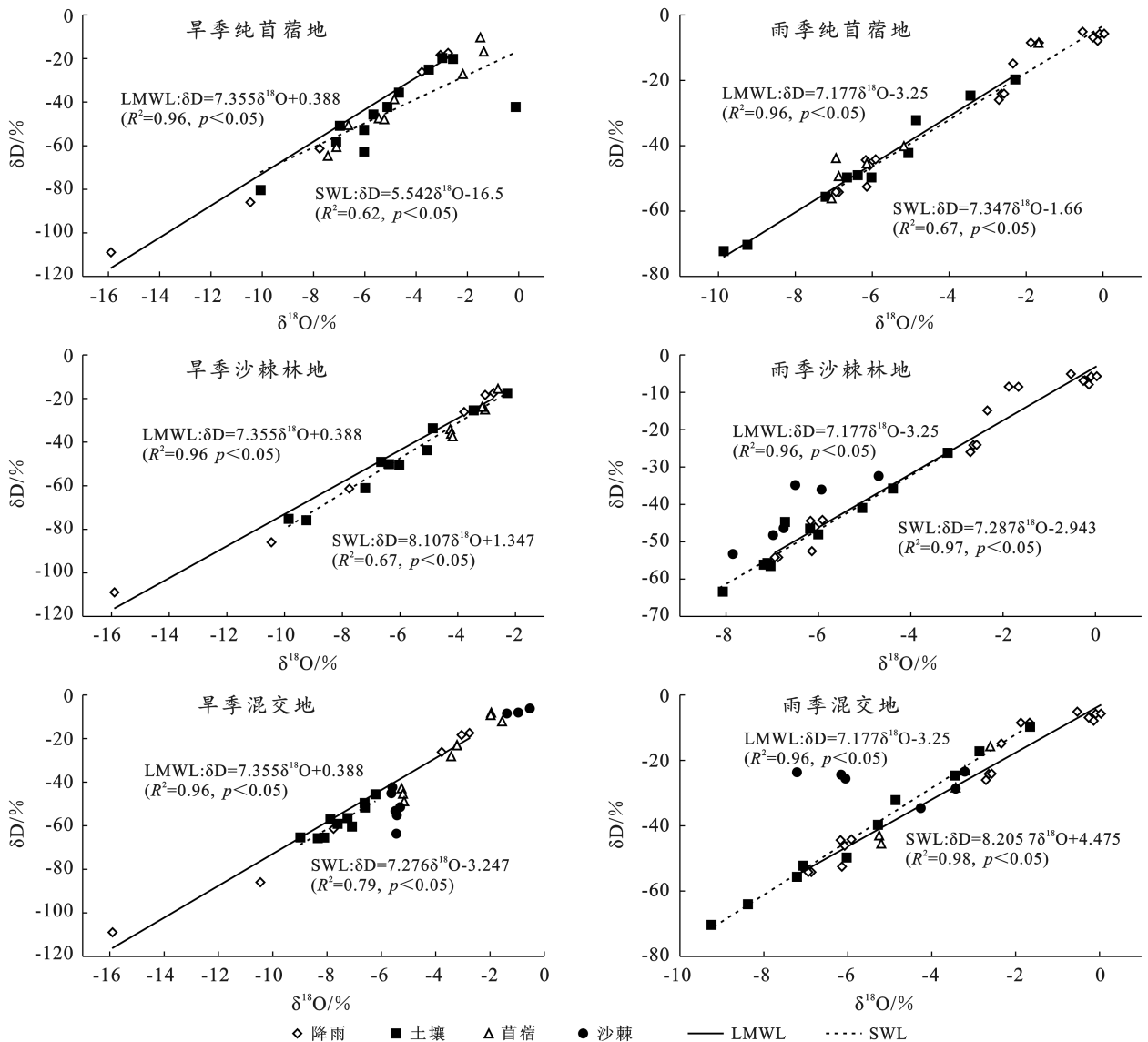


图 6 满来梁煤矿各潜在水源 $\delta D, \delta^{18}O$ 关系变化

Fig.6 Changes of δD and $\delta^{18}O$ relationship of potential water sources in Manlailiang coal mine

2.4 直接观测法判断植物水来源

植物在对土壤水吸收的过程中一般不会发生氢氧同位素分馏^[16-17],因此植物内部氢氧同位素组成情况可以反映出植物对于某一土层土壤水的利用情况,所以认为植物内部的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与某一深度土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较为相近,便可以判断出植物主要吸水层^[18]。

根据直接观察法对比旱季、雨季不同植被配置模式下的植物吸水深度发现,旱季植物吸水深度较深,主要集中于大于70 cm的土层中。雨季大多集中于40 cm以上的土层中(图7)。由图7a可知,旱季纯苜蓿地中苜蓿的植物水与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 相交于70—100 cm处,说明其吸水深度约为70—100 cm的土层中。雨季在30~50 cm处和大于70 m处吸收水分,

由此说明纯苜蓿地中苜蓿主要吸水深度存在上移的现象。纯沙棘地中沙棘的吸水情况情况相较于苜蓿较浅,旱季主要集中于土层深度为60 cm或更深的位置,雨季则集中于30 cm处及80—100 cm,其吸水深度也存在上移的情况。旱雨两季苜蓿与沙棘混交情况下两者木质部植物水 $\delta^{18}\text{O}$ 组成情况类似,分别为-5.251‰(苜蓿)、-5.483‰(沙棘)、-5.203‰(苜蓿)、-5.869‰(沙棘)。其中旱季混交下沙棘与苜蓿的吸水深度大约为80 cm。雨季两种植被的吸水深度均上移且吸水范围扩大,两者均于土壤10—70 cm处吸收水分。根据实地调查发现混交地中两种植被长势相较于纯苜蓿与纯沙棘的情况整体较差,两者对于水分这一必需要素存在竞争的情况。

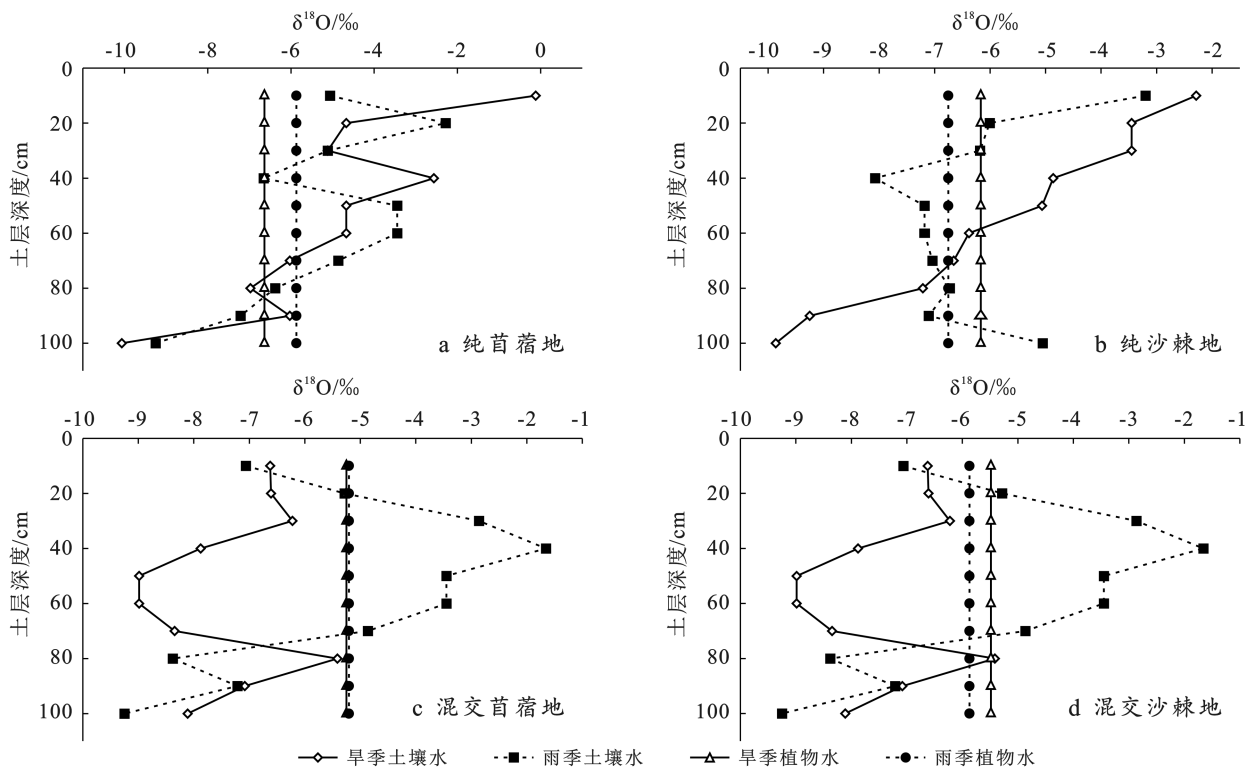


图7 各植被配置下植物水、土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化

Fig.7 Seasonal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in plant water and soil water under different vegetation configurations

2.5 利用多元质量守恒模型确定植物吸水深度及比例

采用同位素质量守恒法可以定量分析不同土层水分来源以及对植物根系吸水的贡献率,此方法通过计算满足所有条件的节能组合来确定水分来源^[19]。如图8所示,旱季纯苜蓿地中苜蓿根系主要吸水层集中于80~100 cm处,贡献率达到了47.8%。纯沙棘地中沙棘根系吸水主要集中于60~80 cm处,贡献率总和为44.5%。沙棘与苜蓿混交状态下这两种植被吸水深度大致相同,为80~100 cm,贡献率分别为91.4%,86.8%。

与旱季相比,雨季不同植被配置模式下苜蓿与沙棘的吸水深度整体上移。纯苜蓿地中苜蓿主要吸水深度为40~60 cm,贡献率达到了43.1%。纯沙棘地中沙棘根系水分来源主要集中于20~40 cm处,贡献率为31%。混交状态下20—40 cm处土壤水对于苜蓿的贡献率最大,为32.2%,表明混交地中苜蓿的水分来源主要源自这一深度,而混交下沙棘的主要吸水层为20—40 cm处,其贡献率为31%。研究发现,苜蓿与沙棘会随着环境的改变而转变其水分利用策略,这类现象称为“二态”结构特征。植物的二形态特征

会使其在不同环境影响下体现出不同的水分利用策略,研究发现随着降水的逐渐增多,研究区沙棘与苜蓿的主要吸水深度均发生变化,且混交模式下的苜蓿

与沙棘变化情况较为显著,对水源利用的转换表明了研究区不同植被配置模式下的苜蓿与沙棘二形态特征较为显著。

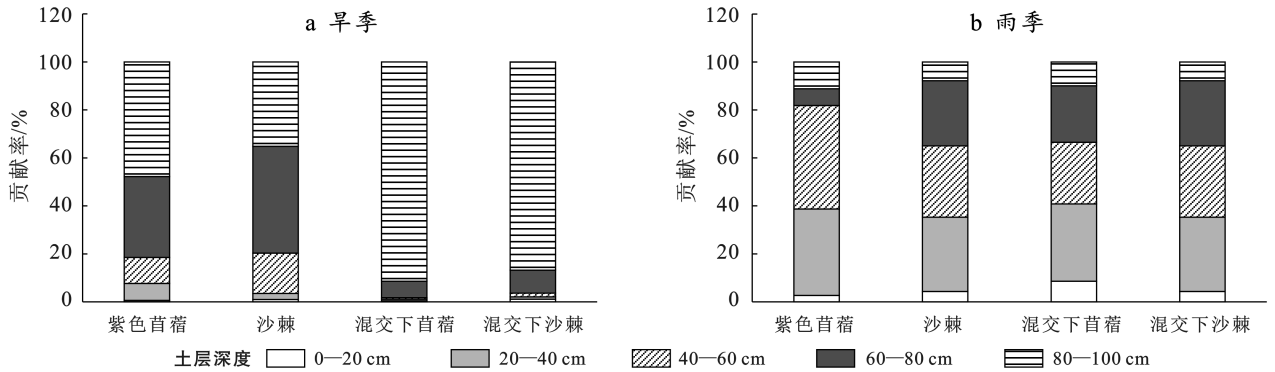


图 8 旱雨两季不同配置模式下苜蓿、沙棘对各层土壤水利用比例

Fig.8 Utilization ratio of alfalfa and sea buckthorn to soil water in different layers under different configuration modes in dry and rainy seasons

3 讨论

3.1 植物水分来源的季节差异

由于露天矿排土场平台无地下水源供给,土层分布浅薄,土壤保水能力较差,同时鄂尔多斯市位于半干旱区,因此季节更替是引起植物水分来源变化的主要因素^[16]。研究发现旱季土壤含水率大体呈现随土层深度增加而增大的趋势,但是整体数值偏小。因此不同配置模式下的各类植物选择利用土壤更深层次的水分,平均深度大于 70 cm,这一现象表明苜蓿与沙棘这两种植物具有强大的根系^[20],在面对干旱胁迫时根系的向水性和向地性促使植物寻求更为稳定的深层土壤水^[21]。

在雨季,充足的降水和表层的土壤水足够供给植物生长,延长其在旱季时的生长发育。不同植被配置下各类植物对于表层土壤水的利用率达到了最大,这说明沙棘与苜蓿具有发达的侧根,对于浅层土壤水的吸收能力较强。这与彭晓红^[22]等学者的研究结果相一致。同时由于雨季降水次数与降水量明显增加,土壤含水率相比于旱季显著提高,同时对土壤水进行补充,因此改变了不同植被配置模式下植物的水分来源。

对比旱季雨季不同植被配置模式下植物水分来源研究发现,旱季混交模式下沙棘与苜蓿的吸水深度均集中于 80—100 cm 处,而雨季土壤 20—30 cm 处土壤水的贡献率最大,而 70—80 cm 处土壤水对沙棘贡献率最大。有学者在国内外 36 组乔灌草植物共生群落研究的基础上发现:在干旱胁迫下,植被共生群落主要是利用植物根系的可塑性从而降低了水分竞

争,从而实现了对干旱胁迫的整体适应^[23-25]。这可能是雨季混交模式下沙棘对表层土壤水利用较少的主要原因。

3.2 植物水分利用策略

矿区内植物对土壤中水分利用非常敏感,植物能从潜在的水源中获得充足的水分以维持自己的生长,其来源的改变调节了植物的用水策略^[26]。受季节和土壤水含量的影响,植物通过调节自身的用水策略来避免干旱胁迫和更好地适应环境。旱季降雨对于土壤水的补充较小,沙棘与苜蓿调整自身用水策略,转向利用深层土壤水维持生命。根据部分学者的研究发现,沙棘的根系长度通常大于 80 cm,苜蓿则在干旱条件的胁迫下根系往往长达 1 m 以上^[27-28]。因此这一策略与其强大的根系和深层土壤水的稳定性有关,而雨季吸水深度上移并且吸水范围增大,对深层土壤水的利用较少,这是因为降雨对土壤水进行补充,不同配置模式下的各类植物可以均衡利用土壤各层水源。

从旱季到雨季,土层深度 0—60 cm 处土壤水贡献率明显增大,因为研究区降雨次数从旱季的 5 次增加至 18 次,降雨量由 11.6 mm 增加至 33.8 mm,使得土壤水分得到补充,土壤含水率随之增大,改变了植物的水分利用策略。

3.3 同位素偏移现象

在本研究发现,一些植物的木质部水分同位素其位置不在土壤水分范围之内,而在土壤水分之下。这种植物水同位素偏移现象已在灌木阔叶林、热带雨林等多种群落中观察到^[29]。

采用低温真空抽提法由于水分抽提不彻底,使得

测定结果与真实值存在较大偏差,而长时间抽提可以提高使用效率,使土壤和枝条水分提取率达到 100%^[30]。本研究中土壤水和植物水的提取时间均为 4 h,提取率大于 99%,可排除提取不完全导致的同位素偏移。

虽然同位素偏移是一个普遍存在的现象,但部分学者认为由于低温真空提取技术本身具有局限性而产生的同位素偏移现象对植物水分来源的结果并不会产生较大影响^[31]。未来应当在认识到这些误差和不确定性的基础上,在模型中输入先验信息(如根系分布、土壤含水量)来提高模型的准确性。

4 结论

(1) 本次研究所得鄂尔多斯露天矿排土场旱雨两季大气降水线分别为 $\delta D = 7.355\delta^{18}O + 0.388$ ($R^2 = 0.96$)、 $\delta D = 7.177\delta^{18}O - 3.25$ ($R^2 = 0.96$),符合干旱区特征。且降水 d -excess 随着旱季温度的增加而降低。

(2) 研究结果发现旱雨两季不同植被配置模式下的土壤含水率发生了一定的变化,纯沙棘地由旱季的 6.56% 增长至 9.88%,纯苜蓿地由 7.94% 增长至 9.15%,混交地由 9.4% 增长至 15.45%。

(3) 在半干旱区露天矿排土场平台上,不同植被配置模式下植物水分来源均受降水的影响。在旱季苜蓿与沙棘主要利用土壤 80—100 cm 处水源。而雨季两者对土层深度 20—60 cm 处水源吸收更多,且范围更大。混交模式下苜蓿对于土壤水的反应更为迅速,雨季时苜蓿对于土壤 20—40 cm 处土壤水的依赖性极强,而沙棘为避免资源竞争从而选择更深层次(70—80 cm)的水分作为来源。

参考文献 (References)

[1] 郭琳琳,杜雪明.人与自然和谐共生现代化视阈下矿区生态修复制度优化:以《矿产资源法》修订为契机[J].中国矿业,2023,32(S2):13-17.
Guo Linlin, Du Xueming. Optimization of ecological restoration system in mining area from the perspective of harmonious coexistence between man and nature: Taking the revision of the Mineral Resources Law as an opportunity [J]. China Mining Magazine, 2023, 32 (S2): 13-17.

[2] 吕金岭,张希明,吕朝燕,等.准噶尔盆地南缘荒漠区梭梭维持水源初步研究[J].中国沙漠,2013,33(1):110-117.
Lü Jinling, Zhang Ximing, Lü Chaoyan, et al. A preliminary study on the water sources of *Haloxylon ammodendron* at the southern edge desert of Junggar Basin, China [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33

(1):110-117.

[3] 方瑛,马任甜,安韶山,等.黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究[J].环境科学,2016,37(3):1121-1127.
Fang Ying, Ma Rentian, An Shaoshan, et al. Heidaigou opencast coal mine: Soil enzyme activities and soil physical and chemical properties under different vegetation restoration [J]. Environmental Science, 2016, 37 (3): 1121-1127.

[4] 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.

[5] 张雅楠.黑岱沟排土场复垦地植被类型及土壤理化性质的研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
Zhang Yanan. Study on vegetation types and soil physical and chemical properties of reclaimed land in Heidaigou dump [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.

[6] Wang Jian, Fu Bojie, Lu Nan, 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.

[7] 杨凯捷.毛乌素沙地两种典型固沙灌木的水分来源解析[D].北京:北京林业大学,2020.
Yang Kaijie. Analysis of water sources of two typical sand-fixing shrubs in Mu Us Sandy Land [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[8] 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 Tiegang, Li Zhanbin, Li Peng, 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.

[9] Bao Tiejun, Zheng Yunnuan, Zhang Ze, et al. Divergent water sources of three dominant plant species following precipitation events in enclosed and mowing grassland steppes [J]. PeerJ, 2019, 7:e7737.

[10] 汤英,徐利岗,王怀博,等.不同水分条件下宁夏枸杞氢氧稳定同位素变化特征试验研究[J].排灌机械工程学报,2020,38(3):304-309.
Tang Ying, Xu Ligang, Wang Huaibo, et al. Experiment on variation characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes of *Lycium barbarum* in Ningxia un-

- der different irrigation conditions [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2020, 38(3):304-309.
- [11] 贾瑞龙,米俊珍,周永利,等.植被复垦对露天煤矿排土场土壤理化性质和土壤酶活性的影响[J].*环境保护与循环经济*,2019,39(3):53-57.
Jia Ruilong, Mi Junzhen, Zhou Yongli, et al. Effects of vegetation reclamation on soil physical and chemical properties and soil enzyme activities in open-pit coal mine dump [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2019,39(3):53-57.
- [12] Brum M, Vadeboncoeur M A, Ivanov V, et al. Hydrological niche segregation defines forest structure and drought tolerance strategies in a seasonal Amazon forest [J]. *Journal of Ecology*, 2019,107(1):318-333.
- [13] 吴思聪,陈孝杨,邢雅珍,等.煤矸石充填复垦修复区土壤有机碳空间分布研究[J].*煤炭工程*,2018,50(11):141-146.
Wu Sicong, Chen Xiaoyang, Xing Yazhen, et al. Spatial distribution of soil organic carbon in reclaimed soil filled with coal gangue [J]. *Coal Engineering*, 2018,50(11):141-146.
- [14] Newberry S L, Nelson D B, Kahmen A. Cryogenic vacuum artifacts do not affect plant water-uptake studies using stable isotope analysis [J]. *Ecohydrology*, 2017,10(8):e1892.
- [15] 刘君,聂振龙,段宝谦,等.氢氧稳定同位素指示的呼和浩特地区土壤水的补给特征[J].*干旱区资源与环境*,2016,30(10):145-150.
Liu Jun, Nie Zhenlong, Duan Baoqian, et al. Characteristics of stable isotope ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) in soil water in Hohhot Area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016,30(10):145-150.
- [16] Yang Bin, Wen Xuefa, Sun Xiaomin. Seasonal variations in depth of water uptake for a subtropical coniferous plantation subjected to drought in an East Asian monsoon region [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015,201:218-228.
- [17] 邓文平,余新晓,贾国栋,等.雨季北京山区3种典型植物的水分来源[J].*干旱区研究*,2014,31(4):649-657.
Deng Wenping, Yu Xinxiao, Jia Guodong, et al. Water sources of three typical plants in the Beijing Mountain areas in rainy season [J]. *Arid Zone Research*, 2014,31(4):649-657.
- [18] Rossatto D R, Silva L C R, Sternberg L S L, et al. Do woody and herbaceous species compete for soil water across topographic gradients? Evidence for niche partitioning in a Neotropical savanna [J]. *South African Journal of Botany*, 2014,91:14-18.
- [19] Chen Lixin, Zhang Zhiqiang, Zha Tonggang, et al. Soil water affects transpiration response to rainfall and vapor pressure deficit in poplar plantation [J]. *New Forests*, 2014,45(2):235-250.
- [20] 赵国琴,李小雁,吴华武,等.青海湖流域具鳞水柏枝植物水分利用氢同位素示踪研究[J].*植物生态学报*,2013,37(12):1091-1100.
Zhao Guoqin, Li Xiaoyan, Wu Huawu, et al. Study on plant water use in *Myricaria squamosa* with stable hydrogen isotope tracer in Qinghai Lake basin [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013,37(12):1091-1100.
- [21] 邓文平,余新晓,贾国栋,等.利用稳定氢氧同位素定量区分栓皮栎旱季水分来源的方法比较[J].*应用基础与工程科学学报*,2013,21(3):412-422.
Deng Wenping, Yu Xinxiao, Jia Guodong, et al. Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of *Quercus variabilis* in dry season [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013,21(3):412-422.
- [22] 彭晓红,丁文荣.滇中高原岩溶区典型植物旱雨季水分来源的差异特征[J].*应用与环境生物学报*,2023,29(1):204-211.
Peng Xiaohong, Ding Wenrong. Different characteristics of water sources of typical plants in dry and rainy seasons in karst area of Central Yunnan Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023,29(1):204-211.
- [23] 周洁,杨晓东,王雅芸,等.梭梭和骆驼刺对干旱的适应策略差异[J].*植物生态学报*,2022,46(9):1064-1076.
Zhou Jie, Yang Xiaodong, Wang Yayun, et al. Differences in adaptation strategies of *Haloxylon ammodendron* and *Alhagi sparsifolia* to drought [J]. *Plant Ecology*, 2022,46(9):1064-1076.
- [24] Xu Qing, Liu Shirong, Wan Xianchong, et al. Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in Southwestern China [J]. *Hydrological Processes*, 2012,26(25):3800-3809.
- [25] Goldsmith G R, Muñoz-Villers L E, Holwerda F, et al. Stable isotopes reveal linkages among ecohydrological processes in a seasonally dry tropical montane cloud forest [J]. *Ecohydrology*, 2012,5(6):779-790.
- [26] 甘永德,贾仰文,仇亚琴,等.降雨条件下分层土壤入渗特性[J].*水土保持学报*,2012,26(5):217-219.
Gan Yongde, Jia Yangwen, Qiu Yaqin, et al. Stratified soil infiltration characteristics during rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012,26(5):217-219.

- (6):1343-1349.
- Huang Ruiling, Wang Xiwen, Ma Guohu, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil physicochemical properties and enzyme activities in alpine wetland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022,30(6):1343-1349.
- [27] 魏枫,王慧娟,邱秀文,等.模拟氮沉降对樟树人工林土壤酶活性的影响[J].*江苏农业科学*,2019,47(19):129-133.
- Wei Feng, Wang Huijuan, Qiu Xiuwen, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activities in *Cinnamomum camphora* plantation [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019,47(19):129-133.
- [28] 夏允,徐玲琳,杨柳明,等.模拟氮沉降对中亚热带米槠天然林土壤解磷微生物群落和功能潜力的影响[J].*生态学报*,2024,44(4):1727-1736.
- Xia Yun, Xu Linglin, Yang Liuming, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil microbial community and functional potential of phosphate-solubilizing microorganisms in a subtropical *Castanopsis carlesii* forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(4):1727-1736.
- [29] 王小南,熊德成,周嘉聪,等.土壤增温和氮沉降对杉木幼树叶片和土壤化学计量特征的影响[J].*应用与环境生物学报*,2022,28(6):1557-1563.
- Wang Xiaonan, Xiong Decheng, Zhou Jiacong, et al. Effects of soil warming and nitrogen deposition on leaf and soil stoichiometric characteristics of *Cunninghamia lanceolata* saplings [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022,28(6):1557-1563.
- [30] 王丽君,程瑞梅,肖文发,等.氮添加对三峡库区马尾松—栓皮栎混交林土壤微生物生物量和酶活性的影响[J].*应用生态学报*,2022,33(1):42-50.
- Wang Lijun, Cheng Ruimei, Xiao Wenfa, et al. Effects of nitrogen addition on soil microbial biomass and enzyme activities of *Pinus massoniana-Quercus variabilis* mixed plantations in the Three Gorges reservoir area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022,33(1):42-50.
- [31] 徐雷.氮沉降对杉木人工林土壤理化性质和酶活性的影响[D].福建福州:福建农林大学,2007.
- Xu Lei. Impacts of nitrogen deposition on physical-chemical properties and enzyme activities of soil in Chinese-fir plantation forest [D]. Fuzhou, Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007.
- [32] 邓玉峰,田善义,成艳红,等.模拟氮沉降下施石灰对休耕红壤优势植物根际土壤微生物群落的影响[J].*土壤学报*,2019,56(6):1449-1458.
- Deng Yufeng, Tian Shanyi, Cheng Yanhong, et al. Effects of liming on rhizosphere soil microbial communities of dominant plants in fallowed red soil under simulated nitrogen deposition [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019,56(6):1449-1458.
- [33] 吕来新,宋蕾,刘志理,等.红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应[J].*环境科学*,2020,41(4):1960-1967.
- Lü Laixin, Song Lei, Liu Zhili, et al. Response of soil enzyme activity and chemical properties to nitrogen addition in a Korean pine plantation [J]. *Environmental Science*, 2020,41(4):1960-1967.
- 的应用与前景[J].*生态学报*,2002,22(1):111-117.
- Cao Yanli, Lu Qi, Lin Guanghui. Review and perspective on hydrogen stable isotopes technique in tracing plant water sources researches [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002,22(1):111-117.
- [30] 宋献方,夏军,于静洁,等.应用环境同位素技术研究华北典型流域水循环机理的展望[J].*地理科学进展*,2002,21(6):527-537.
- Song Xianfang, Xia Jun, Yu Jingjie, et al. The prospect in the research of water cycle at the typical catchments of North China Plain using environmental isotopes [J]. *Progress In Geography*, 2002,21(6):527-537.
- [31] 林光辉.稳定同位素生态学:先进技术推动的生态学新分支[J].*植物生态学报*,2010,34(2):119-122.
- Lin Guanghui. Stable isotope ecology: A new branch of ecology resulted from technology advances [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010,34(2):119-122.
- (上接第37页)
- [27] 李金波,伍红燕,赵斌,等.模拟边坡条件下常见护坡植物苗期根系构型特征[J].*生态学报*,2023,43(24):10131-10141.
- Li Jinbo, Wu Hongyan, Zhao Bin, et al. Root architecture characteristics of common slope protection plants at seedling stage under simulated slope conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(24):10131-10141.
- [28] 党晓宏,高永,汪季,等.砒砂岩沟坡沙棘根系分布特征及其对林下土壤的改良作用[J].*中国水土保持科学*,2012,10(4):45-50.
- Dang Xiaohong, Gao Yong, Wang Ji, et al. Characteristics of root distribution of *Hippophae rhamnoides* L. and its improving effect on the forest soil on the ditch slope of soft sandstone area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012,10(4):45-50.
- [29] 曹燕丽,卢琦,林光辉.氢稳定性同位素确定植物水源