

内蒙古戈壁和沙漠沙冬青群落植物水分来源对降雨的响应

王阿晴¹, 朱雅娟^{1*}, 马媛², 李蕴¹, 肖全³, 高培刚³

(1. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所荒漠化研究中心, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古磴口 015200; 3. 敖伦布拉格镇农牧业综合服务保障中心, 内蒙古阿拉善左旗 750300)

摘要: [目的] 研究戈壁和沙漠两个沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)群落不同物种水分来源对降雨的响应, 以期气候变化条件下的荒漠植被管理和易危植物保育提供科学依据。[方法] 在内蒙古磴口市选择戈壁和沙漠的两个沙冬青群落, 分别采集中雨(10.2 mm)和小雨(7.9 mm)的雨水、地下水及雨后第1, 3, 5和10天的植物、土壤样品, 测定样品的稳定氢、氧同位素值, 通过MixSIAR模型计算各种植物的水分来源。[结果] 中雨后戈壁的沙冬青、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)和苦豆子(*Sophora alopecuroides*)竞争中层和深层土壤水, 而刺旋花(*Convolvulus tragacanthoides*)和骆驼蓬(*Peganum harmala*)主要利用降雨补充的浅层土壤水。小雨后沙漠的沙冬青依赖深层土壤水和地下水, 而旱蒿(*Artemisia xerophytica*)、黑沙蒿(*A. ordosica*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelinii*)和拐轴鸭葱(*Lipschitzia divaricate*)均能利用降雨补充的浅层土壤水。[结论] 两个沙冬青群落的植物对降雨的响应表现出明显的种间差异。沙冬青一直依赖深层土壤水或地下水, 但部分伴生植物利用降雨补充的浅层土壤水。伴生植物对降雨的响应差异有利于戈壁和沙漠沙冬青群落的物种共存。戈壁沙冬青群落不同植物对土壤水的竞争更激烈。因此, 建议今后戈壁沙冬青群落保育应注意旱季补充灌溉, 减轻深根系伴生植物水分竞争的影响。

关键词: 沙冬青群落; 水分来源; 稳定同位素; 降雨

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)03-0413-10

Response of plant water source of Gobi and desert *Ammopiptanthus mongolicus* communities to rainfall in Nei Mongol

WANG Aqing¹, ZHU Yajuan^{1*}, MA Yuan², LI Yun¹, XIAO Quan³, GAO Peigang³

(1. Research Center of Desertification Studies, Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, China; 3. Comprehensive Service and Guarantee Center for Agriculture and Pasture, Aulunbrag Town, Alxa East 750300, China)

Abstract: [Objective] Water is a key limiting factor for the survival and growth of desert plants. Rainfall is one of the main water sources in desert ecosystem, and the water sources of desert plants can be temporarily disturbed by rainfall. *Ammopiptanthus mongolicus* is the dominant plant in desert steppe and steppe desert in Nei Mongol. It is extremely resistant to heat and drought, and plays an important role in wind prevention and sand fixation. Understanding the response of *A. mongolicus* to rainfall in different communities will provide a scientific support for desert vegetation management and the conservation of vulnerable species under climate change. This study aimed to address how different plant water source respond to rainfall in Gobi and desert *A. mongolicus*

收稿日期: 2024-10-31 录用日期: 2025-03-26

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费项目(CAFYBB2021MA012); 科技基础资源调查专项(2023 FY100701-6)

* 通信作者: zhuyj@caf.ac.cn

引文格式: 王阿晴, 朱雅娟, 马媛, 等. 内蒙古戈壁和沙漠沙冬青群落植物水分来源对降雨的响应[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 413-422.

Citation: WANG A Q, ZHU Y J, MA Y, et al. Response of plant water source of Gobi and desert *Ammopiptanthus mongolicus* communities to rainfall in Nei Mongol[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 413-422. (in Chinese)



communities. [Methods] Two *A. mongolicus* communities were selected, one in Gobi and the other in desert of Dengkou County. In the Gobi *A. mongolicus* community, the companion species included the shrub *Caragana korshinskii*, *Convolvulus tragacanthoides*, and the herb *Peganum harmala* and *Sophora alopecuroides*. In the desert *A. mongolicus* community, companion species included the shrub *Artemisia xerophytica* and *A. ordosica*, and the herb *Echinops gmelinii* and *Lipschitzia divaricate*. The main soil types were brown desert soil and aeolian soil in two communities, respectively. Rainwater was collected using a rain gauge immediately after rainfall. Groundwater, plants, and soil samples were collected from both communities on the 1st, 3rd, 5th and 10th days following 10.2 mm (moderate rain) and 7.9 mm (light rain) of rainfall in July 2023, respectively. Four healthy plants of similar size were selected from each shrub, and two-year-old twigs were sampled using scissors. Twigs with a length of 5 cm and diameter of 3–5 mm were clipped, the bark was removed, and the xylem was placed into 8 mL glass vials. The junction of root and stem was collected for each herb. Soil samples in the Gobi community were collected by digging a profile with a shovel at depths of 10, 25, 50, 100, and 150 cm. Soil samples in desert were collected at depths of 10, 25, 50, 100, 150 and 200 cm using an AMS soil auger. Groundwater samples were collected from a well located about 500 m from the desert site. Water in soil and plant samples was vacuum extracted using a LI-2000 Water Vacuum Extract System. The stable hydrogen and oxygen isotope values of all water samples were measured using a LWIA-912 Liquid Water Isotope Analyzer. Water sources of each plant at different periods after rainfall were analyzed using the MixSIAR model. [Results] In the Gobi *A. mongolicus* community, *A. mongolicus*, *C. korshinskii* and *S. alopecuroides* mainly utilized middle and deep soil water after moderate rainfall, indicating water competition among the three plants. In contrast, *C. tragacanthoides* and *P. harmala* relied on shallow soil water recharged by rainfall. In the desert *A. mongolicus* community, *A. mongolicus* mainly utilized deep soil water and groundwater after light rain, whereas *A. xerophytica*, *A. ordosica*, *E. gmelinii* and *L. divaricate* used shallow soil water recharged by rainfall at various times after light rain. [Conclusion] In the two *A. mongolicus* communities, there were significantly inter-specific differences in plant water source responses to rainfall. *A. mongolicus* consistently relied on deep soil water or groundwater, while some companion plants used shallow soil water recharged by rainfall. These difference in water use strategies promoted species coexistence of *A. mongolicus* communities in both Gobi and desert. However, the competition for soil water was more intensive among species in the Gobi *A. mongolicus* community. Thus, it suggests that irrigation should be considered during drought periods to reduce water competition from deep-rooted companion plants, thereby supporting the conservation of Gobi *A. mongolicus* community in the future.

Keywords: *Ammopiptanthus mongolicus* community; water source; stable isotope; rainfall

水是荒漠植物生存和生长的一个关键限制因子。降雨是荒漠生态系统主要的水分来源之一。每次降雨能够带来短期的水资源富集,但雨水在土壤中的入渗过程受降水量、土壤质地和地形等多种因素的影响^[1-2]。荒漠的雨水入渗过程能够直接或间接改变一些植物的水分来源^[3]。近年来随着全球气候变化,干旱区出现早期延长、湿润年和干旱年频繁交替的现象^[4]。目前对干旱区植物水分利用过程的研究大部分局限于单一尺度和有限的物种^[5]。从群落尺度研究荒漠植物水分来源对降雨的响应,能够为未来气候变化条件下维持干旱区植被的稳定性提供科学依据。

在大部分荒漠植物中,根系吸收水分以及水分在木质部的输送过程基本不发生氢氧同位素的分馏。通过比较植物木质部水与各潜在水源的稳定氢氧同位素值,就能够确定其水分来源^[6]。随着测量技术的成熟和成本的下降,该技术广泛应用于研究荒漠植物的水分来源^[7]。首先,部分荒漠植物的水分来源具有明显的季节动态,例如:巴丹吉林沙漠大型沙丘上的短穗怪柳(*Tamarix laxa*)春季主要利用中层和深层土

壤水,降雨较多的夏季主要吸收浅层土壤水,秋季则主要吸收深层土壤水^[8]。古尔班通古特沙漠的小果白刺(*Nitraria sibirica*)春季主要通过上层侧根利用雪水补充的浅层土壤水,夏季主要通过深层根系利用降雨下渗的深层土壤水或地下水^[9]。其次,一些荒漠植物的水分来源可能受生境异质性的影响,例如:河西走廊沙漠的泡泡刺(*N. sphaerocarpa*)在干旱的春秋两季主要利用深层土壤水和地下水,降雨较多的夏季则增加对浅层和中层土壤水的利用;砾漠的泡泡刺春秋两季利用深层土壤水,夏季则增加对浅层土壤水的利用^[10]。塔克拉玛干沙漠的沙生怪柳(*T. taklamakanensis*)在沙丘主要利用中层、深层土壤水和地下水,在盐碱地主要利用深层土壤水和地下水,在荒漠绿洲交错区主要利用深层土壤水^[11]。此外,荒漠植物对降雨的响应可能与降水量相关,例如:小雨后库布其沙漠的柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)和北沙柳(*Salix psammophila*)无响应,而黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)和沙地柏(*Juni perus sabina*)增加了对浅层土壤水的利用;大雨后它们均增加了对中层和深层土壤水的利用^[12]。西鄂尔

多斯的绵刺(*Potaninia mongolica*)对小雨、中雨和大雨均具有显著响应,而四合木(*Tetraena mongolica*)和霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)只利用中雨及以上的水[13]。

沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)是我国荒漠中唯一的常绿阔叶灌木,也是国家二级重点保护野生植物,作为草原化荒漠和荒漠草原的优势种之一,具有极强的耐高温和抗旱性,对防风固沙具有重要作用[14]。已有研究表明,西鄂尔多斯的沙冬青主要利用深层土壤水,中雨和大雨后3 d内对雨水的利用达最大值[13]。然而,目前人们还不了解不同类型沙冬青群落对降雨的响应是否存在差异。本研究的科学问题是戈壁和沙漠的沙冬青群落中不同植物的水分来源如何响应降雨。为此,分析两个沙冬青群落降雨后不同时期各种植物水分来源的变化,明确不同生境沙冬青和伴生植物对降雨的响应过程,以期为今后气候变化条件下荒漠植被可持续管理和沙冬青的保育提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县。该县西北部与狼山接壤,中部和西南部为乌兰布和沙漠,属温带大陆性气候,多年平均温度为7.6℃,多年平均降水量为145 mm,多年平均潜在蒸发量为2 381 mm,无霜期为136 d[15]。地带性土壤主要是灰漠土、棕漠土和风沙土;植被类型为草原化荒漠,优势种主要有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙冬青和黑沙蒿等[16]。戈壁沙冬青群落位于狼山南麓(40°29′51″ N, 106°16′28″ E),地貌是洪积扇,该群落地表覆盖砾石,土壤以棕漠土为主,地下水埋深度达28 m;沙冬青的伴生灌木为柠条锦鸡儿和刺旋花(*Convolvulus tragacanthoides*),草本植物有骆驼蓬(*Peganum harmala*)和苦豆子(*Sophora alopecuroides*)。沙漠沙冬青群落位于中国林业科学研究院沙漠林业实验中心(简称中国林科院沙林中心)第一实验林场(40°29′17″ N, 106°15′28″ E),该群落地貌为固定沙丘,土壤以风沙土为主,地下水埋深度为2.5 m;沙冬青的伴生灌木为旱蒿(*A. xerophytica*)和黑沙蒿,草本植物有砂蓝刺头(*Echinops gmelinii*)和拐轴鸦葱(*Lipschitzia divaricate*)。

1.2 试验设计与取样

根据磴口荒漠生态系统定位观测研究站(以下简称磴口荒漠生态站)的气象记录,2023年5—8月,研

究区的总降水量仅37.5 mm,其中>5 mm的降雨仅发生4次。以雨后第1天挖掘土壤剖面观察雨水入渗深度超过20 cm为准进行采样。7月3日发生10.2 mm(中雨)降雨后采集戈壁沙冬青群落的样品,第8天又发生1 mm的降雨;7月12日发生7.9 mm(小雨)降雨后对沙漠沙冬青群落进行采样,第4天又发生1.8 mm的降雨(图1)。

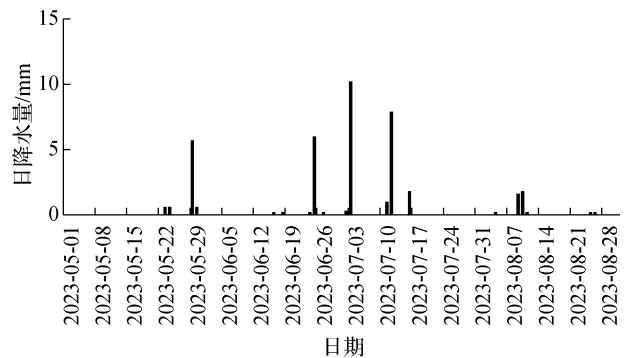


图1 2023年5—8月磴口荒漠生态站的日降水量

Fig. 1 Daily precipitation in Dengkou Desert Ecological Station from May to August in 2023

2023年7月,分别在戈壁和沙漠沙冬青群落中设置3个10 m×10 m的样方。记录每个样方中的物种,每种灌木选择4株植物,用卷尺测量株高、冠幅,计算密度,估计群落总盖度。在每个样方中沿对角线设置3个1 m×1 m的样方调查草本植物。沙漠沙冬青群落的株高、冠幅和灌木层盖度均高于戈壁沙冬青群落(表1)。

分别在降雨后第1,3,5和10天采集两个沙冬青群落的样品,并在磴口荒漠生态站的自动气象站收集雨水,每次3个重复。将雨水装入8 mL玻璃样品瓶(CNW技术公司,德国),用Parafilm封口膜(American National Can公司,美国)密封带回实验室,放入4℃冰箱冷藏保存。戈壁地下水埋较深,无需采集。采集距离沙漠沙冬青群落约500 m的井水代替地下水,3个重复,同样装入8 mL玻璃样品瓶密封后带回实验室冷藏。戈壁土壤中砾石较多,挖掘剖面采集土壤样品,深度分别为10,25,50,100,150 cm。在沙漠使用直径为6.99 cm的沙土钻(AMS公司,美国)采集土壤样品,深度分别为10,25,50,100,150,200 cm。一部分土壤迅速装入8 mL玻璃样品瓶,用Parafilm封口膜密封放入冷藏箱;另一部分土壤装入铝盒,测量土壤含水量。同时,每种灌木选取大小相似、生长状态良好的4株植物,用枝剪采集阳面的两年生枝条,除去韧皮部,木质部保存在8 mL玻璃样品瓶中,密封后冷藏带

回实验室, 每种草本植物则用枝剪采集其根茎连接部位, 使用同样的方法保存样品. 土壤和植物样品每次

均为 4 个重复. 植物和土壤样品在实验室的 -18 °C 冰柜中冷冻保存.

表 1 戈壁和沙漠沙冬青群落的基本特征(平均值±标准误)

Tab. 1 Basic community characteristics of *A. mongolicus* in Gobi and desert (mean±SE)

沙冬青群落	物种	株高/cm	冠幅/cm		密度/(株·m ⁻²)	盖度/%	
			南北	东西			
戈壁	灌木	沙冬青	69.75±9.42	132.42±26.99	147.75±29.98	0.06±0.01	
		柠条锦鸡儿	95.00±17.87	165.00±13.61	159.50±12.97	0.02±0.01	14.75±2.06
		刺旋花	37.00±3.70	78.50±11.53	90.25±8.51	0.54±0.10	
	草本	骆驼蓬	8.17±0.83			0.32±0.15	1.48±0.21
		苦豆子	20.33±1.82			0.12±0.04	
沙漠	灌木	沙冬青	127.44±12.09	163.78±43.34	162.11±45.47	0.06±0.01	
		旱蒿	56.14±3.92	94.00±11.76	101.86±8.46	0.06±0.03	49.67±4.48
		黑沙蒿	76.00±5.48	118.33±10.27	112.89±8.77	0.06±0.07	
	草本	砂蓝刺头	26.56±3.64			0.37±0.10	1.33±0.33
		拐轴鸦葱	31.00±4.58			0.06±0.15	

1.3 样品测定

在中国林科院沙林中心的稳定同位素实验室测量样品的稳定氢、氧同位素值. 雨水和井水先用 0.22 μmL 有机系一次性过滤头(津腾实验设备有限公司, 中国)除去杂质. 土壤和植物样品先用 LI-2100 全自动真空冷凝抽提系统(北京理加联合科技有限公司, 中国)提出水分. 通过 LWIA-912 液态水同位素分析仪(ABB 公司, 加拿大)测定所有水样品的 δD 和 δ¹⁸O 值. 部分土壤样品提取的水样较少, 测试中加入 0.2 mL 玻璃内衬管. 配置不同浓度的甲醇和乙醇溶液, 通过光谱污染诊断软件(Los Gatos 公司, 美国)建立校正曲线, 校正受有机物污染的植物样品的 δD 和 δ¹⁸O 值^[17]. 使用烘干法测土壤含水量(即质量分数), 先用精度 0.01 g 的电子天平(奥豪斯公司, 中国)测定铝盒和土壤湿质量, 然后将铝盒放入电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司, 中国), 在 105 °C 烘干 24 h 至恒量, 冷却后测定土壤干质量.

1.4 数据分析

采用 SPSS27.0 软件的双因素方差分析(two-way ANOVA)研究采样时间和深度对土壤含水量的影响. 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)研究植物水和各层土壤水的 δD 和 δ¹⁸O 值之间的差异($P < 0.05$ 表示差异显著), 若存在显著差异再用 Duncan 多重比较确定不同处理间的差异, 结果用平均值±标准误差

示. 采用 MixSIAR 模型计算植物对各潜在水源的利用比例. 输入数据源为各层土壤水或地下水, 数据汇为植物水, 均为原始数据. 模型参数 TDF 设置为 0, 马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)运行长度为 long, 误差结构设定 Residual Only. 使用 Gelman 和 Geweke 诊断模型的收敛性, 若模型不收敛, 则增加 MCMC 的运算长度^[18]. 输出的结果为平均值±标准差. 使用 Excel2019 软件绘图.

2 结果与分析

2.1 降雨后两个沙冬青群落的土壤含水量

戈壁沙冬青群落的土壤含水量受深度及其与日期交互作用的影响极显著($P < 0.01$)(表 2), 雨后不同深度的土壤含水量差异显著($P < 0.05$)[图 2(a)]. 雨后第 1 天(07-04)、第 3 天(07-06)和第 10 天(07-13), 戈壁的 10 cm 土壤含水量依次为 3.43%, 2.35% 和 2.17%, 均显著高于其他深度($P < 0.05$); 雨后第 5 天(07-08), 150 cm 土壤含水量为 1.55%, 显著高于其他深度($P < 0.05$). 雨后不同日期 10 cm 土壤含水量差异显著($P < 0.05$), 其中雨后第 1 天最高, 第 3 天和第 5 天逐渐下降, 第 10 天则略有上升; 其他深度的土壤含水量在雨后不同日期的差异不显著($P > 0.05$).

沙漠沙冬青群落的土壤含水量受日期、深度及两

者交互作用的影响极显著($P < 0.01$) (表2), 雨后不同深度的土壤含水量差异显著($P < 0.05$) [图2(b)]. 雨后第1天(07-13), 200 cm 土壤含水量为 23.37%, 显著高于其他深度($P < 0.05$). 雨后第3天(07-15)、第5天(07-17)和第10天(07-22), 150和200 cm 土壤含水量分别为 28.80%和 29.38%, 20.02%和 20.40%, 21.46%和 21.66%, 显著高于其他深度($P < 0.05$). 雨

后不同日期沙漠沙冬青群落的土壤含水量差异显著($P < 0.05$). 10~25 cm 土壤含水量均在雨后第5天最高, 显著高于其他日期($P < 0.05$); 100 cm 土壤含水量在雨后第3天和第5天接近, 均显著高于其他日期($P < 0.05$); 150 cm 土壤含水量在雨后第3天最高, 显著高于其他日期($P < 0.05$); 其他深度的土壤含水量在雨后不同日期差异不显著($P > 0.05$).

表2 日期、深度及其相互作用对降雨后戈壁和沙漠沙冬青群落土壤含水量影响的双因素方差分析

Tab. 2 Two-way ANOVA of the effects of date, depth and their interaction on soil water content of *A. mongolicus* communities in Gobi and desert after rainfall

沙冬青群落	因素	Ⅲ类平方和	均方	F	P
戈壁	日期	1.175	0.392	2.241	0.093
	深度	31.648	7.912	45.293	<0.001
	相互作用	11.488	0.957	5.480	<0.001
沙漠	日期	1344.449	448.150	374.642	<0.001
	深度	5459.843	1091.969	912.859	<0.001
	相互作用	1918.526	127.902	106.923	<0.001

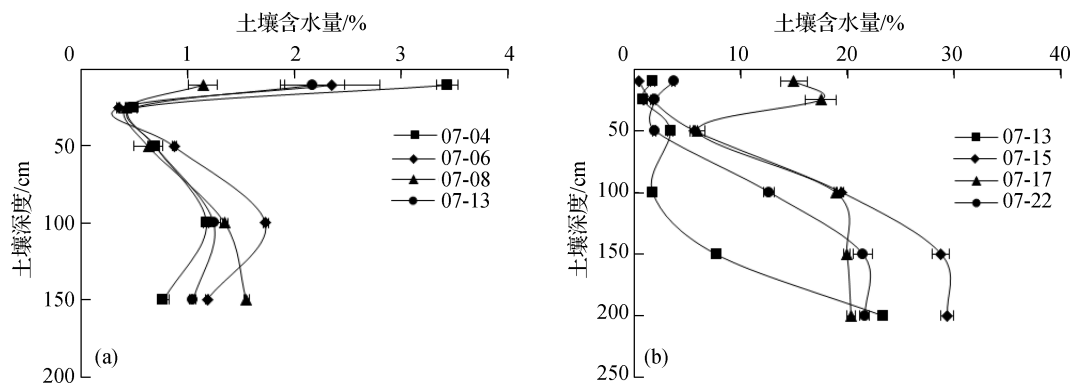


图2 2023年7月降雨后戈壁(a)和沙漠(b)沙冬青群落不同深度的土壤含水量

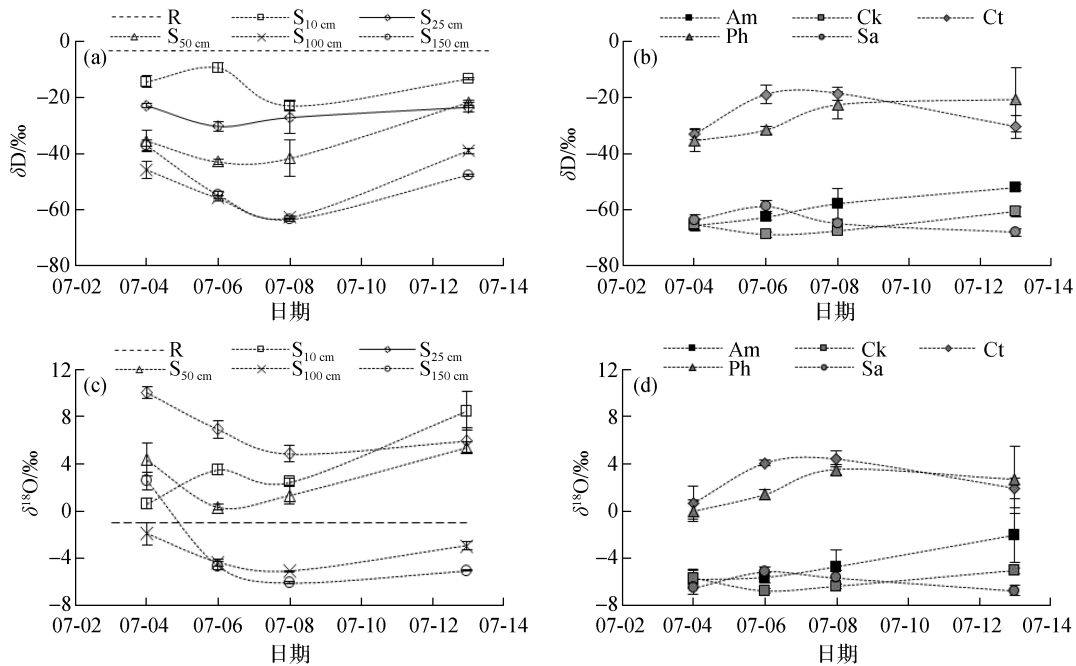
Fig. 2 Soil water content at different depths of *A. mongolicus* communities in Gobi (a) and desert (b) after rainfall in July, 2023

2.2 中雨后戈壁沙冬青群落土壤水和植物水的稳定氢、氧同位素值

中雨后戈壁沙冬青群落不同深度土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值存在显著差异($P < 0.05$), 整体随深度的增加而贫化. 雨后第1天10 cm 土壤水的 $\delta^{18}O$ 值接近雨水, 雨后第3天的 δD 值接近雨水($P > 0.05$). 雨后不同日期各植物水的稳定氢氧同位素动态变化不同: 其中沙冬青、柠条锦鸡儿和苦豆子植物水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值差异不显著($P > 0.05$), 主要接近中层和深层土壤水; 雨后第1天和第10天, 刺旋花和骆驼蓬植物水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值主要接近浅层和中层土壤水, 其余日期主要接近浅层土壤水($P > 0.05$) (图3).

2.3 小雨后沙漠沙冬青群落土壤水和植物水的稳定氢、氧同位素值

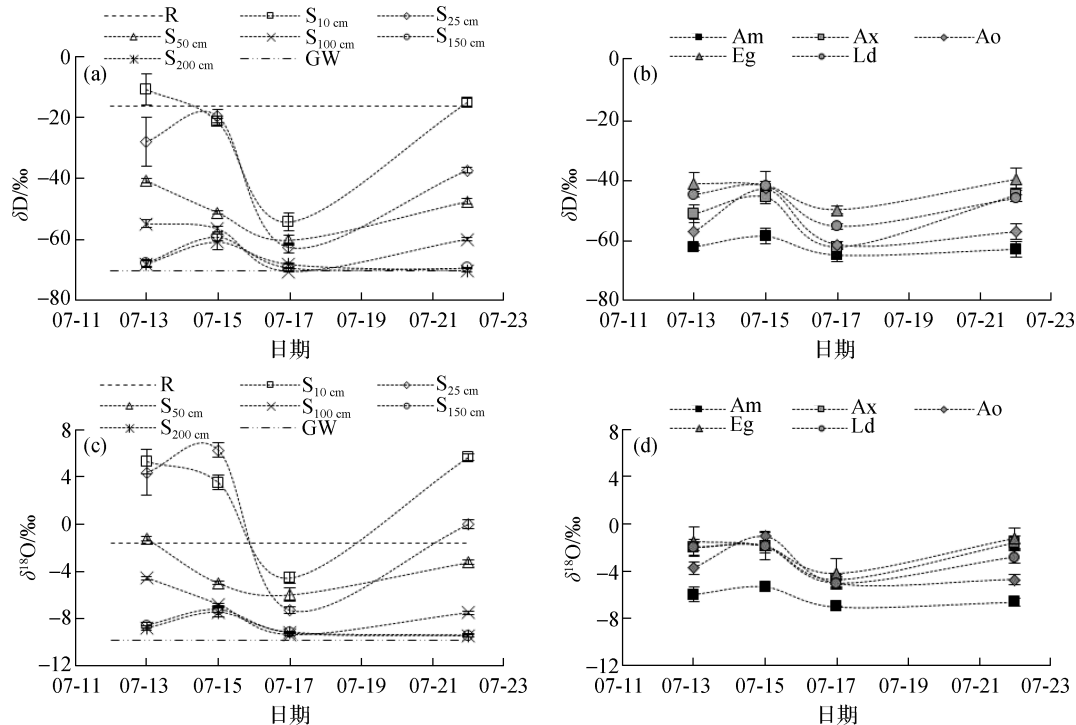
小雨后沙漠沙冬青群落不同深度土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值存在显著差异($P < 0.05$), 基本随深度的增加而贫化. 雨后第1天10 cm 土壤水的 δD 值接近雨水, 雨后第3天10~25 cm 土壤水 δD 值接近雨水($P > 0.05$), 150~200 cm 土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值接近地下水($P > 0.05$). 雨后不同日期各植物水的稳定同位素动态变化不同: 其中, 沙冬青植物水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值主要接近中层、深层土壤水或地下水($P > 0.05$); 旱蒿和黑沙蒿植物水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值前期均接近中层、深层土壤水, 后期均接近浅层土壤水($P > 0.05$); 砂蓝刺头和拐轴鸭葱植物水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值均主要接近浅层土壤水($P > 0.05$) (图4).



(a) 雨后各层土壤水的稳定氢同位素值(R 表示雨水, $S_{10\text{ cm}}$ 、 $S_{25\text{ cm}}$ 、 $S_{50\text{ cm}}$ 、 $S_{100\text{ cm}}$ 、 $S_{150\text{ cm}}$ 分别表示 10, 25, 50, 100, 150 cm 土壤水, 下同);
 (b) 雨后各种植物水的稳定氢同位素值(Am 表示沙冬青, Ck 表示柠条锦鸡儿, Ct 表示刺旋花, Ph 表示骆驼蓬, Sa 表示苦豆子, 下同); (c) 雨后各层土壤水的稳定氧同位素值; (d) 雨后各种植物水的稳定氧同位素值。

图 3 2023 年 7 月降雨后戈壁沙冬青群落土壤水和植物水的稳定氢、氧同位素值

Fig. 3 Stable hydrogen and oxygen isotope values of soil water and plant water of *A. mongolicus* community in Gobi after rainfall in July, 2023



$S_{200\text{ cm}}$ 表示 200 cm 土壤水, GW 表示地下水; Ax 表示旱蒿, Aa 表示黑沙蒿, Eg 表示砂蓝刺头, Ld 表示拐轴鸦葱。

图 4 2023 年 7 月降雨后沙漠沙冬青群落土壤水、地下水和植物水的稳定氢(a~b)、氧(c~d)同位素值

Fig. 4 Stable hydrogen (a - b) and oxygen (c - d) isotope values of soil water, groundwater and plant water of *A. mongolicus* community in desert after rainfall in July, 2023

2.4 中雨后戈壁沙冬青群落植物的水分来源

中雨后不同日期戈壁沙冬青群落的植物主要利用不同深度土壤水. 如表3所示:沙冬青、柠条锦鸡儿和苦豆子雨后第1天主要利用50~100 cm土壤水,总百分比分别为76.3%,76.8%和76.2%;雨后第3天、第5天和第10天,三者主要利用100~150 cm土壤水,总百分比范围分别为49.0%~91.4%,77.4%~

94.5%和75.2%~92.3%. 刺旋花和骆驼蓬雨后第1天主要利用50~150 cm土壤水,总百分比分别为80.2%和78.1%;雨后第3天和第5天,两者主要利用10~25 cm土壤水,总百分比范围分别为80.2%~83.1%和52.2%~77.1%;雨后第10天,刺旋花较均匀地利用0~150 cm土壤水,骆驼蓬则主要利用100~150 cm土壤水,总百分比为64.6%.

表3 戈壁沙冬青群落各种植物对不同深度土壤水的利用百分比

Tab.3 Utilization percentages of different plants to soil water in different depths in *A. mongolicus* community in Gobi

日期	土壤深度/ cm	利用百分比/%				
		沙冬青	柠条锦鸡儿	刺旋花	骆驼蓬	苦豆子
07-04	10	7.0±7.0	6.6±6.5	12.8±10.7	15.4±9.4	7.1±7.0
	25	6.0±6.3	5.9±6.0	7.0±6.2	6.5±5.7	5.8±6.2
	50	15.9±18.8	17.2±19.7	26.6±24.9	15.6±15.1	15.4±17.9
	100	60.4±23.5	59.6±24.9	36.4±25.7	45.5±17.4	60.8±23.7
	150	10.7±10.5	10.7±10.4	17.2±21.0	17.0±16.6	10.9±10.6
07-06	10	2.0±2.1	2.8±3.2	56.4±12.0	34.3±8.0	2.0±1.9
	25	2.3±2.4	4.1±6.3	26.7±12.4	17.9±9.2	2.2±2.2
	50	4.3±4.2	5.9±6.5	7.8±6.4	22.6±14.5	4.6±4.3
	100	38.0±29.4	25.7±25.4	4.6±3.8	12.7±9.0	45.0±26.6
	150	53.4±28.9	61.5±26.7	4.5±3.9	12.5±8.9	46.2±26.0
07-08	10	5.9±5.9	1.4±1.6	25.3±18.7	30.3±20.2	2.0±1.9
	25	8.3±10.9	1.4±1.8	54.9±18.1	46.8±18.1	2.0±2.0
	50	36.8±20.3	2.7±4.3	11.9±11.7	13.6±12.3	3.7±4.4
	100	18.1±15.6	13.2±12.6	4.0±3.9	4.8±4.4	18.5±17.3
	150	30.9±22.6	81.3±14.1	3.9±3.7	4.5±4.0	73.8±17.2
07-13	10	7.5±6.8	7.1±6.6	15.9±12.0	9.8±8.7	8.0±7.8
	25	8.9±8.3	7.8±7.4	18.8±14.3	12.2±13.6	8.4±7.8
	50	8.9±8.1	7.7±7.2	19.5±14.3	13.4±14.9	8.4±8.3
	100	36.7±26.4	28.0±19.7	23.0±15.5	45.3±25.2	29.6±20.6
	150	38.0±27.2	49.4±21.8	22.8±13.8	19.3±21.9	45.6±23.2

2.5 小雨后沙漠沙冬青群落植物的水分来源

小雨后不同日期沙漠沙冬青群落不同植物的水分来源不同. 如表4所示:雨后第1天、第3天和第10天,沙冬青主要利用100~200 cm土壤水和地下水,总百分比范围为74.6%~81.3%;雨后第5天主要利用0~200 cm土壤水,总百分比为90.4%. 雨后第1天,旱蒿主要利用25~200 cm土壤水,总百分比为78.8%;黑沙蒿主要利用25 cm、100~200 cm土壤水和地下水,

总百分比为85.4%. 雨后第3天和第5天,旱蒿和黑沙蒿均主要利用10~50 cm土壤水,总百分比范围分别为52.8%~61.7%和57.6%~68.2%. 小雨后第10天,旱蒿主要利用10~50 cm土壤水,总百分比为66.3%;黑沙蒿主要利用25~200 cm土壤水和地下水,总百分比为92.5%. 砂蓝刺头和拐轴鸭葱雨后第1天和第3天主要利用10~100 cm土壤水,总百分比范围分别为66.8%~73.8%和71.8%~73.7%;雨后第

表 4 沙漠沙冬青群落各种植物对不同深度土壤水和地下水的利用百分比

Tab. 4 Utilization percentages of different plants to soil water in different depths and groundwater in *A. mongolicus* community in desert

日期	土壤深度/cm	利用百分比/%				
		沙冬青	旱蒿	黑沙蒿	砂蓝刺头	拐轴鸦葱
07-13	10	4.0±3.3	10.6±8.6	6.5±6.6	20.6±11.5	14.3±7.8
	25	6.1±4.5	22.5±10.3	21.2±10.4	17.8±12.1	10.8±7.5
	50	8.6±6.6	14.0±11.9	8.1±8.0	18.1±15.0	30.3±16.8
	100	15.3±11.3	17.2±13.9	18.3±17.7	17.3±13.5	18.3±12.8
	150	21.2±14.6	12.7±10.3	17.4±14.4	13.2±10.0	13.3±9.3
	200	22.1±15.1	12.4±10.0	15.4±13.2	13.0±10.0	13.0±9.3
	地下水	22.7±14.7	10.6±8.8	13.1±11.0		
07-15	10	6.8±5.4	14.2±10.7	17.1±12.4	22.3±16.7	20.0±12.5
	25	6.4±4.7	24.4±9.7	27.4±11.4	21.4±15.0	19.9±11.1
	50	11.7±10.8	14.2±11.5	13.1±10.4	10.7±10.3	17.5±13.6
	100	14.0±13.4	12.2±10.5	10.8±8.9	12.4±11.5	14.4±11.3
	150	17.8±16.3	12.4±10.1	11.4±9.1	12.7±11.6	14.8±11.0
	200	28.2±17.8	11.6±9.6	10.3±8.5	20.5±15.0	13.4±10.1
	地下水	15.1±12.5	11.0±8.4	9.9±7.8		
07-17	10	25.4±12.1	27.0±13.2	31.7±15.9	50.4±18.6	50.5±17.5
	25	17.8±15.3	14.6±12.2	13.2±11.4	10.9±10.6	10.6±9.8
	50	15.3±13.1	20.1±15.4	23.3±18.1	14.0±14.0	19.6±16.4
	100	10.5±8.8	9.2±8.0	7.6±6.9	7.8±7.8	6.1±5.9
	150	11.0±9.1	9.4±8.1	8.1±7.4	8.1±7.6	6.5±6.1
	200	10.4±9.0	10.9±9.2	8.6±7.8	8.8±8.8	6.7±6.6
	地下水	9.6±8.0	8.8±7.9	7.5±7.0		
07-22	10	5.0±3.8	24.8±12.2	7.5±6.4	27.8±15.5	20.8±9.5
	25	7.2±5.9	25.5±19.0	14.0±11.5	29.7±25.5	21.5±14.8
	50	13.2±10.4	16.0±14.1	25.8±18.3	17.0±16.7	17.5±13.7
	100	13.0±14.1	8.5±7.7	11.4±11.9	9.0±8.6	14.3±10.8
	150	18.6±16.9	8.4±7.2	12.8±11.4	8.1±7.4	13.2±9.8
	200	26.8±19.1	8.9±7.7	16.6±13.7	8.4±7.7	12.7±9.6
	地下水	16.2±15.1	7.9±6.8	11.9±10.4		

5 天和第 10 天,两者主要利用 10~50 cm 土壤水,总百分比范围分别为 74.5%~75.3%和 59.8%~80.7%。

3 讨论

3.1 戈壁沙冬青群落植物水分来源对降雨的响应

戈壁沙冬青群落各种植物的水分来源对降雨的

响应存在种间差异.沙冬青、柠条锦鸡儿和苦豆子均对中雨的响应不明显:前者在雨后第 1 天和第 5 天能利用中层土壤水,后两者仅在雨后第 1 天利用中层土壤水;其余日期三者均主要利用深层土壤水,这表明它们之间存在水分竞争.然而,刺旋花和骆驼蓬对中雨有明显响应:雨后第 1 天,两者主要利用中层和深层土壤水;雨后第 3 天和第 5 天,两者转向利用降雨补充的浅层土壤水;雨后第 10 天,两者重新依赖深层土

壤水. 植物的水分生理生态过程受根系特征影响^[19], 这3种灌木对降雨的响应与其根系分布特征相符. 沙冬青和柠条锦鸡儿根系最深分别达1.5和1.1 m, 两者的细根主要分布在0.9 m内; 而刺旋花的根系深度仅为0.5 m, 细根主要分布在0.4 m内^[20]. 由于该群落中沙冬青和柠条锦鸡儿的根系分布存在重叠, 两者对降雨的响应相似. 已有研究表明其他戈壁植物对降雨的响应也存在种间差异, 例如: 内蒙古达尔罕茂明安联合旗的短花针茅(*Stipa breviflora*)能利用小雨补充的浅层土壤水^[21]; 西鄂尔多斯的半日花(*Helianthemum songaricum*)能有效利用小雨、中雨和大雨, 而霸王仅对大雨有响应^[22]; 敦煌戈壁的多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)、骆驼刺(*Alhagi camelorum*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和泡泡刺在干旱年份主要利用深层土壤水, 在降雨较多的年份则增加利用浅层土壤水^[23]. 由此可见, 戈壁植物水分来源对降雨的响应差异与其生活型有关.

3.2 沙漠沙冬青群落植物水分来源对降雨的响应

沙漠沙冬青群落各种植物对小雨的响应也存在种间差异. 沙冬青对小雨的响应不明显, 仅在雨后第5天增加利用中层土壤水, 其余日期主要利用深层土壤水和地下水. 早蒿和黑沙蒿则对小雨表现出明显的响应: 雨后第1天、第3天和第5天, 两者主要利用浅层土壤水; 雨后第10天前者主要利用浅层土壤水, 后者则利用深层土壤水. 这种差异可能与植物的根系分布有关: 沙漠的沙冬青根系深度可达1.6 m, 细根主要分布在1.0 m内; 而早蒿和黑沙蒿的根系分布深达1.3和1.0 m, 细根分别主要分布在0.4和0.3 m内^[24]. 已有研究表明这些灌木在其他地区的水分来源也受降雨的影响, 例如: 西鄂尔多斯的沙冬青中雨和大雨后也利用浅层土壤水^[13]; 腾格里沙漠东南缘的黑沙蒿大雨后第1天主要利用浅层土壤水, 且1周内都利用浅层土壤水^[25]. 本研究中群落的草本植物砂蓝刺头和拐轴鸦葱雨后也能利用浅层土壤水. 沙漠沙冬青群落不同植物水分来源的种间差异有利于维持其多样性. 灌木通常依赖深层土壤水, 草本植物主要利用浅层土壤水, 例如: 青藏高原东北部的沙棘(*Hippophae rhamnoides*)干旱时主要利用深层土壤水, 而青藏薹草(*Carex moorcroftii*)和斜茎黄芪(*Astragalus laxmannii*)主要利用浅层土壤水^[26]; 古尔班通古特沙漠南缘的梭梭5月主要利用浅层、深层土壤水和地下水, 8月主要利用深层土壤水和地下水, 而尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrhinchum*)和碱蓬(*Suaeda glauca*)均主要利用浅

层土壤水^[27]. 可见各种植物水分来源对降雨的响应差异有利于沙漠植物群落的物种共存.

3.3 两个沙冬青群落对降雨响应的差异

戈壁的沙冬青对中雨的响应不明显, 雨后主要利用中层和深层土壤水; 沙漠的沙冬青对小雨的响应也不明显, 雨后主要利用深层土壤水和地下水. 这两个群落的部分伴生植物则能利用降雨补充的浅层土壤水, 包括戈壁的刺旋花、骆驼蓬以及沙漠的早蒿、黑沙蒿、砂蓝刺头和拐轴鸦葱. 已有研究显示, 西鄂尔多斯的沙冬青对7.2 mm降雨也无明显的响应, 但在13.7、25.9和54.0 mm的降雨后能有效利用雨水, 且随着降水量的增加对雨水的利用百分比也会增大^[13]. 这说明10 mm以下的降雨对深根系植物沙冬青的水分来源影响较小. 此外, 这两个群落沙冬青水分来源的季节动态存在差异: 戈壁的沙冬青在春季大雨后较均匀地利用各层土壤水, 干旱的夏季主要利用深层土壤水, 秋季中雨后则增加利用浅层土壤水; 沙漠的沙冬青春季大雨后增加利用浅层土壤水, 夏季主要利用深层土壤水和地下水, 秋季则较均匀地利用各层土壤水和地下水^[28]. 未来应进一步研究戈壁和沙漠沙冬青群落水分来源对大雨的响应过程.

4 结 论

两个沙冬青群落不同植物的水分来源对降雨的响应存在种间差异. 中雨后戈壁的沙冬青、柠条锦鸡儿和苦豆子主要利用深层土壤水, 三者之间存在水分竞争; 而刺旋花和骆驼蓬能利用降雨补充的浅层土壤水. 小雨后沙漠的沙冬青主要利用深层土壤水, 而早蒿、黑沙蒿、砂蓝刺头和拐轴鸦葱也能利用降雨补充的浅层土壤水. 降雨后沙漠沙冬青群落各种植物和戈壁沙冬青群落部分植物利用不同深度土壤水, 有利于干旱气候下的物种共存. 戈壁沙冬青群落不同植物之间存在较强烈的水分竞争. 因此, 戈壁的沙冬青在今后保育时可以考虑旱季补充灌溉, 减少过度水分竞争可能导致的植被衰退.

参考文献:

- [1] TIAN J, ZHANG B Q, WANG Y B, et al. Vertical partition patterns of infiltration within soil profile and its control factors at large-scale arid mountainous areas[J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: 129190.
- [2] ZHANG Y Y, ZHAO W Z, LI X B, et al. Contribution of soil macropores to water infiltration across different land

- use types in a desert-oasis ecoregion[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(4): 1751-1760.
- [3] 金可, 卢阳, 周火明, 等. 古尔班通古特沙漠水文研究进展[J]. *水文*, 2022, 42(1): 1-10.
- [4] XIAO J, EZIZ A, ZHANG H, et al. Responses of four dominant dryland plant species to climate change in the Junggar Basin, Northwest China[J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(23): 13596-13607.
- [5] 徐庆, 任冉冉, 张蓓蓓, 等. 碳氢氧稳定同位素在陆地生态系统植物水分利用研究中的应用[J]. *陆地生态系统与保护学报*, 2022, 2(1): 73-81.
- [6] ROTHFUSS Y, JAVAUX M. Isotopic approaches to quantify root water uptake: a review and comparison of methods[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(8): 2199-2224.
- [7] BOWEN G J, CAI Z Y, FIORELLA R P, et al. Isotopes in the water cycle: regional- to global-scale patterns and applications[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2019, 47(1): 453-479.
- [8] ZHANG J H, WANG N A, NIU Z M, et al. Stable isotope analysis of water sources for *Tamarix laxa* in the megadunes of the Badain Jaran Desert, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(6): 821-832.
- [9] ZHOU H, ZHAO W Z, ZHENG X J, et al. Root distribution of *Nitraria sibirica* with seasonally varying water sources in a desert habitat[J]. *Journal of Plant Research*, 2015, 128(4): 613-622.
- [10] 周海, 赵文智, 何志斌. 两种荒漠生境条件下泡泡刺水分来源及其对降水的响应[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2083-2092.
- [11] DONG Z W, LI S Y, ZHAO Y, et al. Stable oxygen-hydrogen isotopes reveal water use strategies of *Tamarix taklamakanensis* in the Taklimakan Desert, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(1): 115-129.
- [12] WU Y S, LIAO Z L, YU X Q, et al. Stable isotopic analysis of water utilization characteristics of four xerophytic shrubs in the Hobq Desert, northern China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1103789.
- [13] CHEN J, XU Q, GAO D Q, et al. Differential water use strategies among selected rare and endangered species in West Ordos Desert of China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2017, 10(4): 660-669.
- [14] 董雪, 许德浩, 韩春霞, 等. 天然沙冬青器官生态化学计量特征对异质生境的响应[J]. *生态学报*, 2024, 44(2): 858-869.
- [15] 李新乐, 鲍芳, 吴波, 等. 荒漠植物白刺新固定碳在植物-土壤系统中的分配[J]. *草业学报*, 2019, 28(2): 33-40.
- [16] 宋兆斌, 辛智鸣, 朱雅娟. 内蒙古荒漠-草原过渡带灌木群落特征[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(2): 104-112.
- [17] 孟宪菁, 温学发, 张心昱, 等. 有机物对红外光谱技术测定植物叶片和茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(10): 1359-1365.
- [18] WANG J, LU N, FU B J. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 685-693.
- [19] 陈向珍, 杨小林, 幸福梅. 拉萨河谷 5 种乡土树种晾晒后对根系活力及光合日进程的影响[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2017, 56(2): 205-211.
- [20] ZHU Y J, WANG G J, XIN Z M, et al. The annual dynamics of the water source of an *Ammopiptanthus mongolicus* community in the Gobi Desert of the Mongolian Plateau[J]. *Forests*, 2024, 15(12): 2117.
- [21] SONG Y F, YAN D H, LIU T J, et al. The suitability of isotopic methods in identifying water sources of a shallow-rooted herbaceous plant in a desert steppe[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 902: 166072.
- [22] 陈婕, 徐庆, 高德强, 等. 西鄂尔多斯半日花及霸王的水分利用[J]. *林业科学*, 2016, 52(2): 47-56.
- [23] CUI Y Q, MA J Y, FENG Q, et al. Water sources and water-use efficiency of desert plants in different habitats in Dunhuang, NW China[J]. *Ecological Research*, 2017, 32(2): 243-258.
- [24] 齐凯, 辛智鸣, 张景波, 等. 乌兰布和沙漠沙冬青群落的根系分布特征[J]. *草业科学*, 2019, 36(7): 1706-1715.
- [25] 王艳莉, 刘立超, 高艳红, 等. 基于较大降水事件的人工固沙植被区植物水分来源分析[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1053-1060.
- [26] WU H W, LI X Y, JIANG Z Y, et al. Contrasting water use pattern of introduced and native plants in an alpine desert ecosystem, northeast Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 524: 182-191.
- [27] 傅思华, 胡顺军, 李浩, 等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 群落优势植物水分来源[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(5): 1024-1032.
- [28] 王阿晴, 朱雅娟, 马媛, 等. 乌兰布和沙漠两个沙冬青群落的水分来源差异[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(7): 1762-1770.

(责任编辑:徐婷婷)