

王紫薇, 黄来明, 王林志, 裴艳武, 邵明安. 毛乌素沙地人工恢复植物根系吸水来源及水文生态位特征[J]. 土壤学报, 2026,

WANG Ziwei, HUANG Laiming, WANG Linzhi, PEI Yanwu, SHAO Ming'an. Root Water Source and Hydrological Niche Segregation of Artificially Restored Plants in the Mu Us Sandy Land[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

## 毛乌素沙地人工恢复植物根系吸水来源及水文生态位特征\*

王紫薇<sup>1</sup>, 黄来明<sup>2,3†</sup>, 王林志<sup>4</sup>, 裴艳武<sup>5</sup>, 邵明安<sup>1,2,3†</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所黄河三角洲现代农业工程实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 5. 榆林学院生命科学学院, 陕西榆林 719000)

**摘要:** 了解固沙植物水分利用模式及其动态变化特征, 有助于科学指导干旱半干旱区荒漠生态系统人工植被可持续建设和水资源高效利用。然而, 在水分受限的荒漠生态系统中, 关于不同固沙植物水分来源的季节性变化仍缺乏深入认识。本研究选取毛乌素沙地 3 种典型固沙植物(樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、沙柳(*Salix psammophila*)和长柄扁桃(*Amygdalus pcdunculata* Pall))为研究对象, 于 2019—2021 年生长季(5—10 月)每月采集和测定植物木质部水及其潜在水源的氢氧同位素组成, 结合 MixSIAR 模型定量分析了植物水分来源的季节变化, 并使用相似性比例指数(PSI)量化了水文生态位分离与重叠度。结果表明: 樟子松、沙柳和长柄扁桃的水分利用模式均表现出明显的季节变化特征。在旱季, 樟子松和沙柳主要吸收 120~300 cm 土壤水(分别为 63.43±8.42%和 56.12±1.23%), 长柄扁桃主要吸收 40~200 cm 土壤水(54.00±4.16%); 而在雨季 3 种植物均主要吸收 0~120 cm 土壤水(分别为 57.18±5.84%、60.78±15.00%和 60.43±6.80%)。与旱季相比, 樟子松、沙柳和长柄扁桃在雨季均显著增加了对 0~40 cm 土壤水的吸收( $P<0.05$ )。不同固沙植物水分利用模式的变化与其根系垂直分布及土壤水分有效性的季节性波动密切相关。樟子松和长柄扁桃的水文生态位重叠度相对较低(PSI<0.75), 表明二者对同一水源的竞争较弱, 因此适宜搭配种植。然而, 樟子松和沙柳在整个生长季的水分利用策略非常相似, 表现出明显的水分竞争。研究结果可为干旱半干旱区荒漠生态系统人工恢复植被科学配置和水资源管理提供科学依据。

**关键词:** 固沙植物; 根系吸水; 稳定同位素; 水分利用策略; 水文生态位分离

中图分类号: S128.2 文献标志码: A

## Root Water Source and Hydrological Niche Segregation of Artificially Restored Plants in the Mu Us Sandy Land

WANG Ziwei<sup>1</sup>, HUANG Laiming<sup>2,3†</sup>, WANG Linzhi<sup>4</sup>, PEI Yanwu<sup>5</sup>, SHAO Ming'an<sup>1,2,3†</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Yellow River Delta Modern Agricultural Engineering Laboratory, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. School of Life Sciences, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China)

\*国家自然科学基金项目(42377302, 42407429)和中国科学院地球环境研究所黄土科学全国重点实验室开放基金项目(SKLLQG2334) Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.42377302, 42407429) and Open Foundation of State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences (No.SKLLQG2334)

†通信作者 Corresponding author, E-mail: huanglm@igsnr.ac.cn; mashao@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 王紫薇(1998—), 女, 山西长治人, 博士研究生, 主要从事土壤物理与水文生态研究。 E-mail: zwwang@nwfau.edu.cn

收稿日期: 2025-08-27; 收到修改稿日期: 2026-04-03; 网络首发日期(www.cnki.net):

---

**Abstract: 【Objective】** Understanding the water use patterns and dynamic changes of sand-fixing plants is crucial for scientifically guiding the sustainable development of artificial vegetation and the efficient use of water resources in desert ecosystems in arid and semi-arid regions. However, in water-limited desert ecosystems, there is still a lack of in-depth understanding of the seasonal variation in water sources of different sand-fixing plants. This study was designed to examine the root water source and hydrological niche segregation of artificially restored plants in the Mu Us Sandy Land, aiming to provide scientific bases for the rational configuration of artificial vegetation and sustainable use of water resources in desert ecosystems. **【Method】** This study focused on three typical sand-fixing plants in the Gechougou catchment in the northeastern margin of the Mu Us Sandy Land, northwest China, including *Pinus sylvestris* var. *mongolica* (*P. sylvestris*), *Salix psammophila* (*S. psammophila*), and *Amygdalus pedunculata* Pall (*A. pedunculata*). The plant xylem water and their potential water sources (rainwater and soil water at different depths) were collected monthly during three consecutive growing seasons (May–October) of 2019–2021.  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of xylem water were measured by Isotope Ratio Mass Spectrometry (IRMS; MAT253, Thermo Fisher Scientific, Germany) to mitigate interference from trace organic compounds.  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of rainwater and extracted soil water were measured by Laser-Based Liquid Water Isotope Analyzer (LWIA; Picarro L2130i, USA). The vertical distribution of fine root (<2 mm) biomass and soil water content in each species stand were also determined. The MixSIAR model was used to quantitatively analyze the seasonal changes in plant water sources, and the proportional similarity index (PSI) was employed to quantify the degree of hydrological niche separation and overlap.

**【Result】** Results indicated that the water use patterns of *P. sylvestris*, *S. psammophila*, and *A. pedunculata* exhibited significant seasonal variations. During the dry season, *P. sylvestris* and *S. psammophila* primarily absorbed water from the 120~300 cm soil layer ( $63.43\pm 8.42\%$  and  $56.12\pm 1.23\%$ , respectively), while *A. pedunculata* mainly obtained water from 40~200 cm soil layer ( $54.00\pm 4.16\%$ ). In the rainy season, all three species mainly absorbed water from the 0~120 cm soil layer ( $57.18\pm 5.84\%$ ,  $60.78\pm 15.00\%$ , and  $60.43\pm 6.80\%$ , respectively). Compared with the dry season, *P. sylvestris*, *S. psammophila*, and *A. pedunculata* significantly increased their absorption of water from the 0–40 cm soil layer during the rainy season ( $P<0.05$ ). The changes in water use patterns of different sand-fixing plants were closely related to their root vertical distribution and the seasonal variation of soil water availability. *P. sylvestris* and *A. pedunculata* exhibited relatively low hydrological niche overlap ( $\text{PSI}<0.75$ ), suggesting minimal competition for the same water sources, making them suitable for interplanting. In contrast, *P. sylvestris* and *S. psammophila* showed very similar water use strategies throughout the growing season, displaying significant water competition. **【Conclusion】** The findings of this study highlight the importance of considering species-specific water use patterns when planning vegetation restoration efforts. Specifically, our results support the idea of strategically interplanting species with complementary hydrological niches to enhance vegetation resilience, improve water use efficiency, and promote sustainable ecosystem restoration in arid and semi-arid desert regions.

**Key words:** Sand-fixing plants; Root water uptake; Stable isotope; Water-use strategy; Hydrological niche segregation

全球约 60%的生态系统正处于退化和不可持续状态<sup>[1]</sup>, 直接威胁区域可持续发展目标的实现。为了恢复和提升退化生态系统服务与功能, 我国实施了一系列生态修复工程, 显著提高了植被建设区的生态、经济和社会效益<sup>[2-3]</sup>。单一树种造林方式因实施难度低、管理成本效益高且符合不断增长的市场需求, 成为过去几十年植被建设的主要选择<sup>[4]</sup>。然而,

近年来,越来越多的研究表明,混交林在改善林分条件<sup>[5]</sup>,提高资源(水分、养分和光照)利用效率<sup>[6]</sup>,促进生物多样性<sup>[7]</sup>和加强生态系统稳定性<sup>[8]</sup>等方面优于纯林。在干旱半干旱地区,水分不仅是限制植物生长发育的关键因子<sup>[9-10]</sup>,也是决定植被恢复与生态重建能否充分发挥其生态和经济效益的核心因素。然而,长期的气候观测和预测数据表明,全球干旱区气温持续升高,降水显著减少,干旱程度不断加剧<sup>[11-13]</sup>。这些变化将严重影响区域生态修复工程的可持续性。因此,探索干旱半干旱区人工恢复植物的水分利用策略与协同或竞争关系,可为区域人工植被合理配置和提升脆弱生态系统的稳定性提供科学依据。

造林方式对土壤水资源动态的影响一直是生态水文学领域的关注热点。然而,学者们对于混交林和纯林对土壤水库的影响存在不同看法。一些研究表明,与纯林相比,混交林中的共生植物通过水文生态位的时空分离,并通过改变自身性状以抵抗水分胁迫,能够最大限度地获取有限的水资源,从而提高水分利用效率,有助于缓解深层土壤干燥化<sup>[14-16]</sup>。例如:Wang等<sup>[12]</sup>研究发现,在混交林中,杏树对浅层土壤水分的吸收比例高于纯林,从而降低了深层土壤水分的消耗。Zhang等<sup>[16]</sup>进一步指出,混交林对降雨的截留与储存能力强于纯林,有助于减缓土壤水分的耗竭。此外,混交林中不同物种间的相互促进作用能够有效缓解种间水分竞争。例如,在极端干旱期间,枣树与黄花菜或油菜的农林复合种植可以通过种间水分互补利用增强枣树的适应能力<sup>[17]</sup>。然而,关于混交林是否能够有效缓解水分竞争,仍存在一定争议。一些研究发现,混交林相比纯林导致可用水资源减少,加剧了水分竞争<sup>[18]</sup>。例如,在水资源有限的荒漠地区,乔灌木混合种植并未出现不同植物水文生态位分离现象,反而加剧了浅层土壤水分竞争,导致土壤干燥化和地下水位下降<sup>[18]</sup>。Tang等<sup>[19]</sup>研究表明,尽管混交林中油松和沙棘的水分利用模式存在差异,但二者的水文生态位高度重叠,导致其发生强烈竞争,吸收相似深度的土壤水分,从而加剧了土壤水分的消耗。进一步的研究还表明,不同树种组合下水源利用关系具有明显差异。例如,在生态林中,樟树与杉木之间水源利用存在较高程度的重叠,在干旱时期可能引发水资源竞争,从而限制其生态功能的发挥。相反,在经济林中,栗树与红山茶之间存在明显的水源分化,有利于水资源的合理分配<sup>[20]</sup>。这些结果表明,混交林中不同物种之间水文生态位的分化或重叠具有明显的物种特异性,并可能在不同环境条件下表现出不同的水分利用关系。因此,深入了解混交林内共生植物水分利用策略及水文生态位特征,对于制定科学的造林配置与水分管理策略至关重要。

毛乌素沙地是中国西北旱区典型的生态脆弱区。经过几十年的植被恢复,该地区植被盖度显著提高(0.9%提高至40%以上),极大地改善了当地的生态环境<sup>[3]</sup>。然而,一些不合理的恢复措施(例如:大量引入高耗水的速生植物或高密度种植)导致土壤干燥化和植物生长受限,部分地区人工植被已出现退化或枯死现象<sup>[21]</sup>。尽管西北干旱半干旱地区人工植物水分利用策略已有广泛报道,但对于毛乌素沙地典型人工恢复植物水分利用策略和共生植物水文生态位特征仍知之甚少。基于此,本研究选取毛乌素沙地东北部圪丑沟小流域3种典型固沙植物(樟子松、沙柳和长柄扁桃)为研究对象,于2019—2021年生长期(5—10月)每月采集和测定植物木质部水及其潜在水源的同位素组成,结合MixSIAR模型研究了樟子松、沙柳和长柄扁桃的水分利用策略,并使用相似性比例指数表征了不同物种间的水文生态位分离与重叠度,以期干旱半干旱区荒漠生态系统植被建设树种的科学配置和水资源可持续利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究在毛乌素沙地东北部的圪丑沟小流域开展（38°11′—38°53′N，109°21′—110°03′E），流域面积约 45 km<sup>2</sup>，海拔 1 145~1 263 m。受半干旱大陆性季风气候影响，研究区降水和温度呈现显著的季节性变化，年均气温约为 9.1 °C，年均降水量（2001—2021 年）约为 361.5 mm，其中 60%以上的降雨集中在 7—9 月。流域内土壤类型单一，主要为干旱砂质新成土<sup>[22]</sup>。自 2000 年以来，为防治土壤荒漠化与水土流失，该区域内实施了大规模植被恢复措施并取得显著成效，当前植被覆盖率超过 50%，已成为全球荒漠化治理的典范<sup>[23]</sup>。生态恢复的植被类型为外来物种，主要为樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）、沙柳（*Salix psammophila*）、长柄扁桃（*Amygdalus pedunculata* Pall）、紫穗槐（*Amorpha fruticosa* L.）和沙蒿（*Artemisia desertorum* Spreng）等。受沙丘地貌影响，流域内地下水位呈显著空间差异，沙丘顶部地下水埋深 >15 m，而丘间洼地及沙丘底部，地下水位相对较浅，最高水位低于地表 1 m，为恢复植被提供了潜在的水源。

在对圪丑沟小流域植被全面调查的基础上，本研究选取了 3 个人工林地：樟子松林、沙柳林和长柄扁桃林。这些样地具有相似的气候、地形和土壤条件，林间距离 <2 km，从而最大程度地减少了环境变量的干扰。各林分样地（20 m×20 m）的详细信息见表 1。在试验开始前对各林地土壤基本理化性质进行调查，调查结果详见表 2。

表 1 樟子松、沙柳和长柄扁桃样地基本信息

Table 1 Basic information of *P. sylvestris*, *S. psammophila* and *A. pedunculata* plots

| 植物种类<br>Plant species      | 类型<br>Type | 树龄<br>Stand age/a | 海拔<br>Altitude/m | 地下水位<br>Ground water level/m | 植被盖度<br>Vegetation coverage/% | 胸径<br>Diameter at breast height/mm | 株高<br>Height/m |
|----------------------------|------------|-------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------|
| 樟子松 <i>P. sylvestris</i>   | 乔木         | 15                | 1261             | > 6 m                        | 55%                           | 101.3±8.0                          | 3.4±0.4        |
| 沙柳 <i>S. psammophila</i>   | 灌木         | 12                | 1262             | > 6 m                        | 50%                           | 24.2±4.2                           | 2.7±0.4        |
| 长柄扁桃 <i>A. pedunculata</i> | 灌木         | 12                | 1265             | > 7 m                        | 55%                           | 41.2±3.4                           | 2.1±0.5        |

表 2 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the studied soils

| 植物种类<br>Plant species         | 土层<br>Soil layer/cm | 容重<br>Bulk density/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 黏粒<br>Clay/% | 粉粒<br>Silt/% | 砂粒<br>Sand/% | 有机质<br>Soil organic matter/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮<br>Total nitrogen/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全磷<br>Total phosphorus/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------------|---------------------|----------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 樟子松<br><i>P. sylvestris</i>   | 0~40                | 1.62±0.11                                    | 1.85±0.69    | 1.61±0.33    | 96.54±1.02   | 1.74±0.33                                            | 0.99±0.18                                      | 0.93±0.30                                        |
|                               | 40~120              | 1.63±0.15                                    | 2.10±0.28    | 1.70±0.25    | 96.20±1.08   | 1.08±0.01                                            | 0.61±0.07                                      | 0.56±0.02                                        |
|                               | 120~200             | 1.64±0.16                                    | 0.12±0.05    | 0.20±0.19    | 99.68±1.24   | 0.93±0.05                                            | 0.56±0.14                                      | 0.51±0.01                                        |
|                               | 200~300             | —                                            | 0.04±0.02    | 0.10±0.09    | 99.86±0.89   | 0.56±0.04                                            | 0.44±0.15                                      | 0.40±0.02                                        |
| 沙柳<br><i>S. psammophila</i>   | 0~40                | 1.64±0.11                                    | 1.04±0.40    | 3.36±0.35    | 95.60±1.09   | 1.85±0.30                                            | 0.72±0.22                                      | 0.56±0.11                                        |
|                               | 40~120              | 1.64±0.06                                    | 1.23±0.21    | 1.52±0.20    | 97.25±1.24   | 1.24±0.10                                            | 0.65±0.20                                      | 0.47±0.12                                        |
|                               | 120~200             | 1.62±0.19                                    | 1.25±0.09    | 2.56±0.14    | 96.19±1.13   | 1.04±0.03                                            | 0.54±0.14                                      | 0.43±0.08                                        |
|                               | 200~300             | —                                            | 0.89±0.03    | 1.38±0.08    | 97.73±1.20   | 0.63±0.03                                            | 0.48±0.12                                      | 0.42±0.05                                        |
| 长柄扁桃<br><i>A. pedunculata</i> | 0~40                | 1.63±0.08                                    | 1.93±0.39    | 2.42±0.31    | 95.65±1.12   | 1.50±0.01                                            | 0.89±0.24                                      | 0.68±0.11                                        |
|                               | 40~120              | 1.65±0.04                                    | 1.62±0.18    | 1.12±0.20    | 97.26±1.07   | 1.04±0.04                                            | 0.40±0.11                                      | 0.47±0.07                                        |
|                               | 120~200             | 1.62±0.03                                    | 1.38±0.06    | 1.01±0.15    | 97.61±1.14   | 0.92±0.04                                            | 0.38±0.15                                      | 0.45±0.09                                        |
|                               | 200~300             | —                                            | 0.69±0.02    | 2.23±0.09    | 97.08±0.79   | 0.53±0.04                                            | 0.38±0.12                                      | 0.37±0.02                                        |

## 1.2 样品采集

由于植物对土壤水分变化的响应存在一定的滞后性，采样频率过高或过低都可能导致植物水分来源变化无法得到真实、有效的反映。因此，本研究依据樟子松、沙柳和长柄扁桃生长特性并结合前人在相似区域的研究，将采样频率定为每月采集一次。于 2019 至 2021 年连续 3 个生长季（5—10 月），每月定期采集植物木质部、土壤和降水样品，共计 18 次采样。采集时间为每月中旬植物蒸腾较强的 09:00~14:00。在每个样地选取 3 株长势基本一致的植物，于同一高度从不同冠层方向采集健康、直径约 2 cm 的枝条，用小刀迅速去除韧皮部后，剪成 3~5 cm 段，将其混合后置于 Parafilm 封口的玻璃瓶中保存。共收集了 54 个植物木质部样品（3 个采样点×每月 1 个混合样×每年 6 个月×连续 3 年）。通过这种样品混合的方式可以在降低分析成本的同时，减少个体差异带来的随机误差，提高样品的均一性。

采集植物木质部样品的同时，在各样地设置 3 个采样点，使用土钻（直径 5 cm）采集

0~300 cm 土壤样品,用于土壤含水量和稳定同位素测定。采样深度设置为:0~60 cm 每 20 cm 一层,60~150 cm 每 30 cm 一层,150 cm 以下每 50 cm 一层。同层土壤样品混合后均分为两份,一份于 105°C 烘至恒重以测定土壤含水量,另一份装入 Parafilm 封口玻璃瓶用于稳定同位素分析,共收集了 486 个土壤样品(3 个采样点×每月 1 个混合样×9 个深度区间×每年 6 个月×连续 3 年)。此外,降雨发生后,立即收集雨量筒中的雨水,并保存于 Parafilm 封口玻璃瓶。在同位素分析前,木质部、土壤和降水样品均储存在-20°C 冰箱中。

2021 年生长季结束后,采用直径 9 cm 的根钻对植物根系进行调查采样。该方法在野外根系研究中应用广泛,能够实现分层、标准化取样,并尽可能减少对周围根系和土壤结构的扰动。在植物冠幅二分之一处设置采样点( $n=3$ ),按 0~100 cm 每 10 cm 一层,100 cm 以下每 20 cm 一层采集植物根系样品,直至无根系检出。根系经清水冲洗后,65°C 烘至恒重,用来测定细根(<2 mm)生物量。

气象数据(气温与降雨)由样地附近的气象站(RGB M002, Onset, Bourne, USA)长期监测获取。

### 1.3 稳定同位素分析

采用 LI-2000 低温真空冷凝抽提系统提取植物木质部和土壤样品中的水分。样品抽提结束后,将样品分别在 105°C 和 205°C 下干燥 12 h 以计算抽提效率,仅保留抽提效率>98% 的样品用于分析。为避免杂质,抽提的水分和降水样品均使用 0.44  $\mu\text{m}$  微孔滤膜过滤。土壤水和降水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  使用液态水同位素分析仪(L2130i, Picarro, Santa Clara, USA)测定,分析精度分别为 $\pm 0.1\text{‰}$ 和 $\pm 0.025\text{‰}$ 。使用稳定同位素比质谱仪(MAT253, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany)测定植物木质部水  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$ ,分析精度分别为 $\pm 0.5\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$ 。该方法可有效抑制低温真空抽提过程中共馏有机物(如甲醇和乙醇)对质谱信号的干扰。此外,使用液态水同位素分析仪和稳定同位素比质谱仪对土壤水和降水样品同时进行测定,结果显示两种方法测定结果高度一致,偏差很小( $\delta^2\text{H}$ :  $R^2=0.996$ ,  $P<0.001$ ;  $\delta^{18}\text{O}$ :  $R^2=0.992$ ,  $P<0.001$ ),表明无有机物污染情况下两种仪器的测定结果具有一致性和可比性。前人研究同样证实液态水同位素分析仪和稳定同位素比质谱仪对上述水源同位素组成的测定结果无显著差异<sup>[24-25]</sup>,因此两种仪器的使用不会影响后续分析。同位素比值计算如下:

$$\delta X(\text{‰}) = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

式中, $X$ 为  $^2\text{H}$  或  $^{18}\text{O}$ ,  $R_{\text{sample}}$  和  $R_{\text{standard}}$  分别为测试样品和标准样品的  $^2\text{H}/^1\text{H}$  或  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 。

### 1.4 数据分析

为量化植物水源的相对贡献,本研究采用 MixSIAR 模型计算潜在水源贡献率。MixSIAR 模型融合了 MixSIR 和 SIAR 两者的优势,模型精度更高,考虑了源数据的不确定性、连续协变量(包括固定和随机变量)以及先验信息,更适合复杂、需要精细调整的生态环境系统分析,能够有效处理小样本量问题<sup>[26-27]</sup>。在本研究中,将各层土壤水同位素均值和标准差作为“源数据”,木质部水同位素值作为“混合数据”。由于植物吸水过程中不存在显著的同位素分馏作用,因此模型判别因子设为 0。马尔可夫链蒙特卡洛运行长度设置为“very long”(chain length=1 000 000; burn=500 000; thin=500; chains=3),以确保充分采样和稳定的后验估计。采用 Gelman-Rubin(<1.05)和 Geweke(<1.96)验证模型是否收敛。为提高植物水源贡献的预测精度,模型仅纳入差异显著的潜在水源,并引入残差误差结构以捕捉未解释的不确定性,设置无信息先验分布( $\alpha=1$ ),即假定植物从各潜在水源吸水的概率均等。模型计算结果取平均值作为植物对各潜在水源的利用率。模型输出的精度较高,后验分布窄且稳定,所有关键水源贡献率 95% 后验可信区间均不包含零,表明这些水源对植物水分吸收具有高度可信的正贡献,估算结果可靠。基于土壤含水量和氢氧同位素组成的垂直变异特征,将 0~300 cm 土层划分为 4 个潜在水源:(1) 0~40 cm: 土

壤含水量和氢氧同位素组成的季节变化较大 ( $CV > 40\%$ )，易受蒸发和季节性降水补给的影响；（2）40 ~ 120 cm：土壤含水量和氢氧同位素组成的季节变化较小 ( $25\% < CV < 40\%$ )，受降水入渗影响；（3）120 ~ 200 cm：与上述两个土层相比，土壤含水量和氢氧同位素组成的变化较小 ( $10\% < CV < 25\%$ )；（4）200 ~ 300 cm：土壤含水量和氢氧同位素组成保持相对稳定 ( $CV < 10\%$ )。

最近的研究表明，植物根系吸水过程存在同位素分馏效应<sup>[28-29]</sup>，导致木质部水和潜在水源之间的同位素偏移，从而影响植物水分来源的识别。当土壤水是植物的唯一水分来源时，可以利用木质部与其相应土壤水线之间的  $\delta^2H$  偏移（即 SW-excess）对木质部水同位素组成进行校正<sup>[30]</sup>：

$$SW - excess = \delta^2H - a_s \delta^{18}O - b_s \quad (2)$$

式中， $a_s$  和  $b_s$  分别为特定地点和日期土壤水线的斜率和截距。

为评估物种间水分竞争强度，我们采用相似性比例指数（PSI）对水文生态位重叠度进行量化<sup>[31]</sup>：

$$PSI = 1 - 0.5 \sum_{i=1}^n |P_{ai} - P_{bi}| \quad (3)$$

式中， $P_{ai}$  和  $P_{bi}$  分别为物种  $a$  和  $b$  对同一水源  $i$  的吸收比例， $n$  为潜在水源的数量。PSI 能够用于衡量不同树种在相同土层内的水分利用关系，揭示了物种间的水文生态位重叠度。PSI 值介于 0 ~ 1 之间，PSI 值越大，表明两个物种的水文生态位重叠度越高，对同一水源的竞争越激烈。

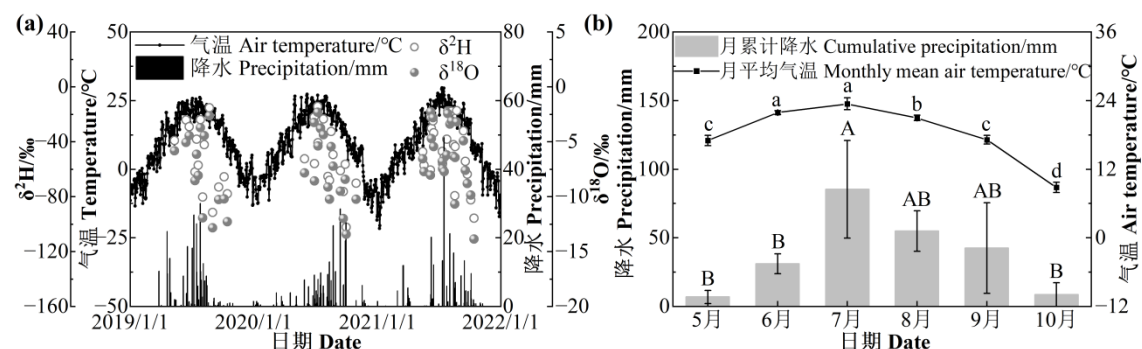
使用 SPSS 25.0 对数据进行统计分析，包括描述性统计分析和单因素方差分析，显著性水平设置为 0.05。使用 R 软件计算植物对不同水源的吸收利用比例，使用 Origin 2023 软件对数据进行绘图。

## 2 结果

### 2.1 水文气象条件与降水氢氧同位素组成季节变化特征

研究区降水量和气温表现出明显的季节变化特征（图 1）。观测期间年均降水量为 275 mm，其中 65% 以上集中在 7 月—9 月，年均气温为 9.5°C。2019 年、2020 年和 2021 年累计降水量与均温分别为 281 mm、279 mm、263 mm 和 9.8°C、9.3°C、9.2°C，年际间差异较小（图 1a）。月累计降水量与月均气温均在 7 月达到最高值，7 月均温显著高于 5 月、8 月、9 月和 10 月 ( $P < 0.05$ )，5 月、6 月和 10 月降水较少。整体而言，降水和气温的季节变化基本一致，雨热同期（图 1b）。结合研究区气象要素特征，本研究将 7 月—9 月划分为雨季，5 月、6 月和 10 月划分为旱季。

受水汽来源的影响，研究区降水同位素组成也表现出明显的季节变化特征， $\delta^2H$  和  $\delta^{18}O$  的变化范围分别为  $-102.25\text{‰} \sim -14.38\text{‰}$  和  $-13.86\text{‰} \sim -2.26\text{‰}$ 。从 5 月至 7 月，降水同位素组成逐步富集重组分，随后贫化（图 1a）。



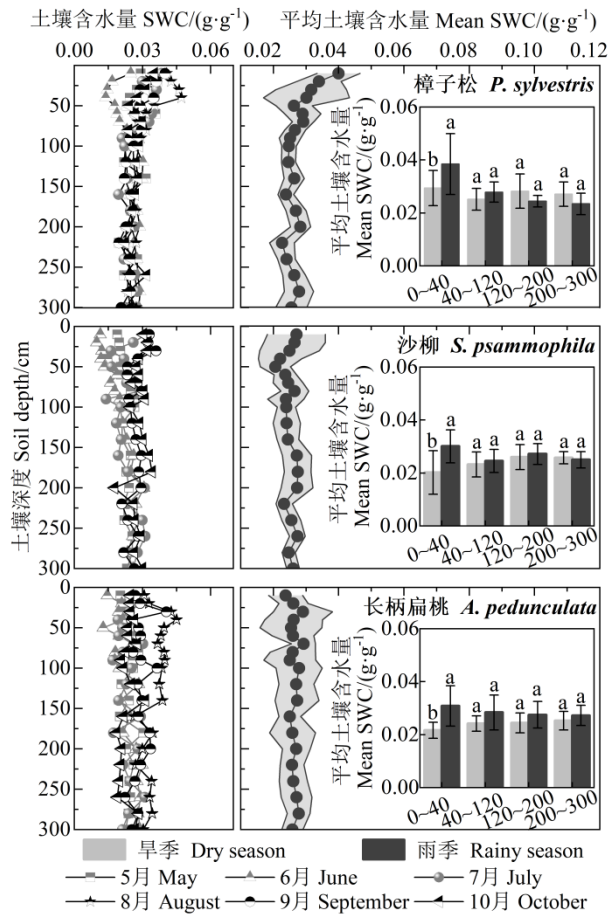
注：图（b）中不同字母表示在  $P<0.05$  时有显著差异。Note: Different letters in panel (b) indicate significant differences at  $P<0.05$ .

图 1 观测期间降水、气温和降水同位素组成（a）及累计降水和月均气温（b）变化特征

Fig. 1 Variations of precipitation, air temperature, and  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  for the precipitation (a) and the cumulative precipitation and monthly mean air temperature (b) during the period of observation

## 2.2 土壤水分含量垂直变化特征

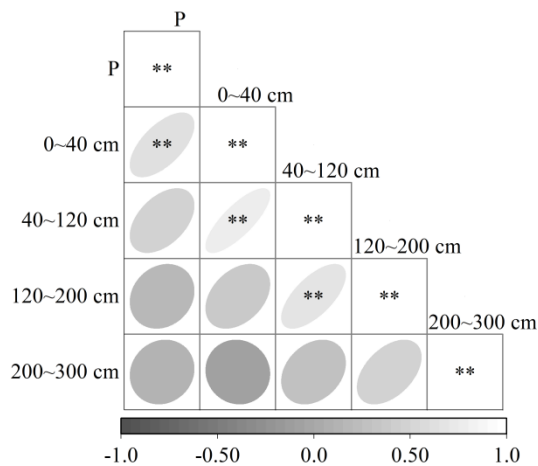
樟子松、沙柳和长柄扁桃土壤含水量的垂直和季节变化特征如图 2 所示。3 种植物样地土壤含水量垂直变化趋势相似：受降水和蒸发作用的共同影响，0~40 cm 土层的变异幅度显著大于 40~300 cm 土层。季节尺度上，雨季（7—9 月）的土壤含水量普遍高于旱季（5 月、6 月和 10 月）。其中，0~40 cm 土层含水量在雨季显著高于旱季（ $P<0.05$ ），而 40~300 cm 土层含水量无显著季节差异（ $P>0.05$ ）（图 2）。0~40 cm 土层含水量与降水量呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），表明浅层水分主要由降水直接补给驱动。降水量与土壤含水量的关系随土层深度的加深而逐渐降低（图 3），反映出降水渗透作用随土层深度的增加而逐渐减弱。



注：柱状图中的不同字母表示在  $P<0.05$  时有显著差异。Note: Different letters in the bar charts indicate significant differences at  $P<0.05$ .

图 2 观测期间樟子松、沙柳和长柄扁桃土壤含水量的垂直和季节变化

Fig. 2 The vertical and seasonal variation of soil water content for *P. sylvestris*, *S. psammophila* and *A. pedunculata* plots during observation period



注：P 为降水量，\*\*表示 0.01 水平显著相关。Note: P is precipitation, \*\* indicates a significant correlation at the 0.01 level.

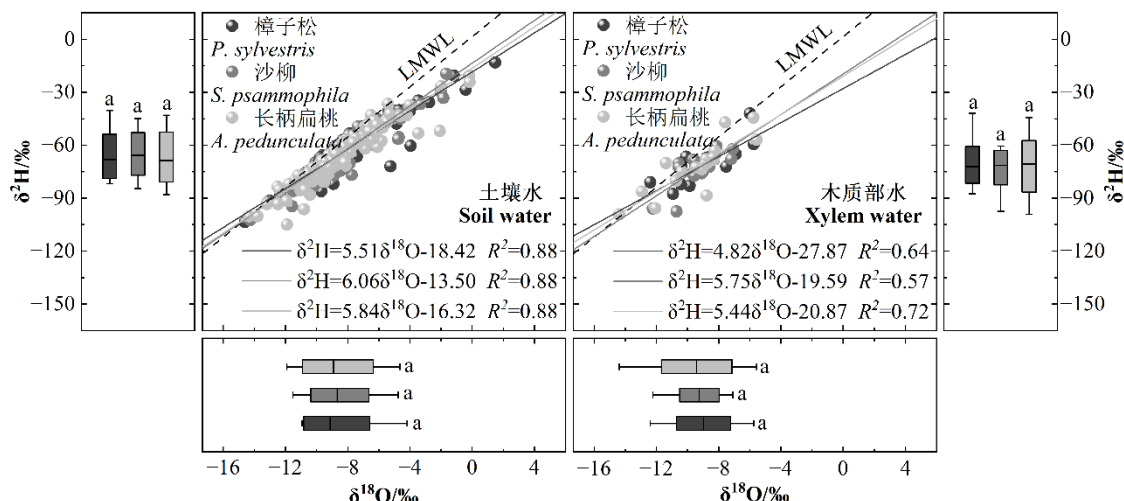
图 3 降水量与不同土层含水量相关关系

Fig. 3 The correlation between precipitation and water content in different soil layers

### 2.3 不同水源氢氧同位素组成

基于 2019 年至 2021 年采集的 53 个降水样品，拟合了当地大气降水线 ( $\delta^2\text{H}=7.10\delta^{18}\text{O}+1.54$ ,  $R^2=0.96$ ) (图 4)。当地大气降水线斜率显著低于全球大气降水线 ( $\delta^2\text{H}=8\delta^{18}\text{O}+10$ )，表明区域蒸发强度高于全球平均水平。研究区地处西北旱区，降水稀少且蒸发强烈，导致雨水降落过程中经历更强的同位素分馏。

樟子松、沙柳和长柄扁桃土壤水的  $\delta^2\text{H}$  平均值分别为  $-66.31\pm 12.49\text{‰}$ 、 $-65.00\pm 12.03\text{‰}$  和  $-66.67\pm 14.01\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$  平均值分别为  $-8.69\pm 2.13\text{‰}$ 、 $-8.50\pm 1.86\text{‰}$  和  $-8.62\pm 2.25\text{‰}$ 。木质部水的  $\delta^2\text{H}$  平均值分别为  $-71.09\pm 10.18\text{‰}$ 、 $-72.68\pm 9.45\text{‰}$  和  $-72.04\pm 14.16\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}$  平均值分别为  $-8.97\pm 1.68\text{‰}$ 、 $-9.24\pm 1.23\text{‰}$  和  $-9.41\pm 2.20\text{‰}$ 。3 种植物土壤水及木质部水的  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  均值均无显著差异 ( $P>0.05$ )。土壤水线和木质部水线的斜率 ( $4.82\sim 6.06$ ) 低于当地降水线，且二者同位素值主要分布于当地大气降水线右下侧，表明土壤水和木质部水主要来源于降水 (图 4)。



注：LMWL 代表当地大气降水线。箱线图中相同的小写字母表示 ( $P>0.05$ ) 样地之间无显著差异。Note: The LMWL represent the local meteoric water line. The same lowercase letter on the box indicates no significant difference between plots ( $P>0.05$ ).

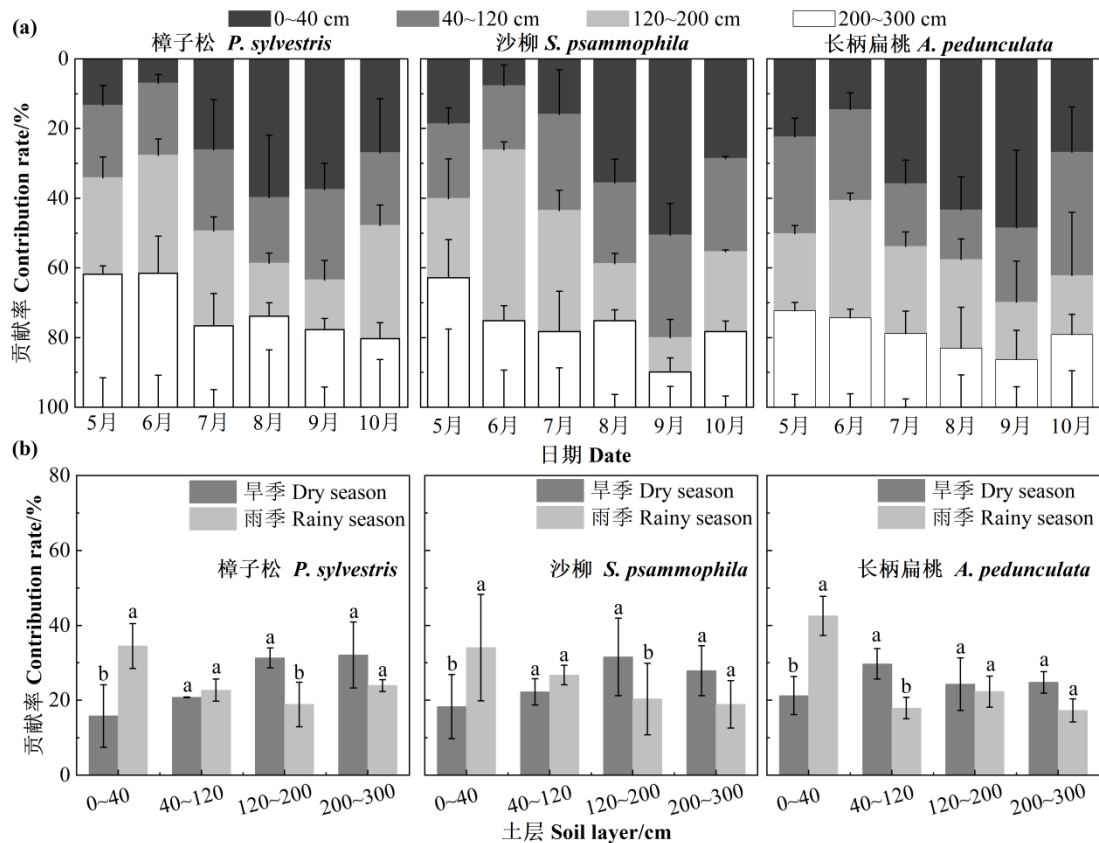
图 4 樟子松、沙柳和长柄扁桃土壤水和木质部水同位素组成的散点图和箱线图

Fig. 4 Scatter and box plots of the isotopic composition of soil water and xylem water for *P. sylvestris*, *S.*

## 2.4 樟子松、沙柳和长柄扁桃水分来源差异及比例相似性

图 5 显示樟子松、沙柳和长柄扁桃各潜在水源的贡献率及季节变化。旱季樟子松 ( $63.43 \pm 8.42\%$ ) 和沙柳 ( $59.46 \pm 11.93\%$ ) 主要依赖 120~300 cm 土壤水, 而长柄扁桃主要吸收 40~200 cm 土壤水 ( $54.00 \pm 4.16\%$ )。雨季降水补给后, 樟子松、沙柳和长柄扁桃的主要水源均上移至 0~120 cm 土层 (分别为  $57.18 \pm 5.84\%$ 、 $60.78 \pm 15.00\%$  和  $60.43 \pm 6.80\%$ ), 其浅层土壤水 (分别为  $34.49 \pm 6.00\%$ 、 $34.06 \pm 14.19\%$  和  $42.53 \pm 5.20\%$ ) 贡献率显著高于旱季 (分别为  $15.79 \pm 8.34\%$ 、 $18.32 \pm 8.53\%$  和  $21.26 \pm 5.07\%$ ) ( $P < 0.05$ ), 增幅分别为 54.22%、46.20% 和 50.03%。此外, 雨季樟子松和沙柳对 120~200 cm 土壤水分的吸收 (分别为  $18.87 \pm 5.91\%$  和  $20.32 \pm 10.56\%$ ) 显著低于旱季 (分别为  $31.34 \pm 2.64\%$  和  $31.58 \pm 12.34\%$ ) ( $P < 0.05$ ), 而雨季长柄扁桃对 40~120 cm 土壤水的吸收 ( $17.90 \pm 2.87\%$ ) 显著低于旱季 ( $29.72 \pm 4.05\%$ ) ( $P < 0.05$ )。

物种间水分竞争强度分析表明: 旱季樟子松-沙柳的相似性比例指数 ( $PSI = 0.81 \pm 0.03$ ) 显著高于樟子松-长柄扁桃 ( $PSI = 0.73 \pm 0.10$ ) ( $P < 0.05$ ), 雨季二者 PSI 虽无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但仍维持樟子松-沙柳 > 樟子松-长柄扁桃的格局。由此可见, 樟子松和长柄扁桃的水文生态位重叠度相对较低, 对同一水源的竞争较弱, 表明二者混交配置可优化水分互补性。



注: 图 (b) 中不同字母表示不同季节植物水源有显著差异 ( $P < 0.05$ )。Note: Different letters in panel (b) indicate significant differences in the sources of plant water between seasons ( $P < 0.05$ ).

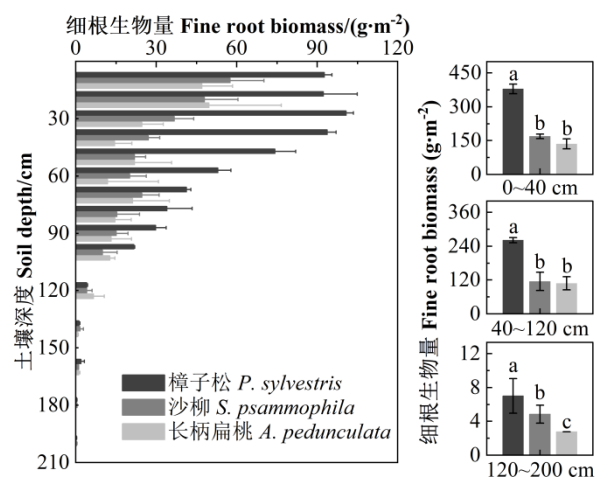
图 5 樟子松、沙柳和长柄扁桃对各潜在水源利用的月度 (a) 和季节性 (b) 变化特征

Fig. 5 Characteristics of the monthly (a) and seasonal (b) changes of potential water sources utilization by *P. sylvestris*, *S. psammophila* and *A. pedunculata*

## 3 讨论

### 3.1 不同固沙植物水分利用策略差异

植物的用水策略因植被类型<sup>[25]</sup>、水源供给方式<sup>[32]</sup>和季节动态<sup>[33]</sup>而异。对潜在水源的定量研究表明, 樟子松、沙柳和长柄扁桃的水分利用模式表现出相似的季节变化特征。旱季3种植物主要依赖120~300 cm (樟子松和沙柳) 和40~200 cm (长柄扁桃) 土壤水, 而雨季则转向0~120 cm 浅层土壤水 (图5)。在干旱半干旱地区, 随着降水量的减少, 乔木<sup>[34-35]</sup> (例如: 胡杨和苹果树) 和灌木<sup>[36]</sup> (例如: 柠条) 倾向于从更深的土层中获取水分。旱生植物通常具有根系功能二态性, 即旱季植物通过主根吸收深层土壤水或地下水, 而雨季则通过侧根主要吸收浅层土壤水, 随土壤水分可利用性变化灵活地转换水源<sup>[37]</sup>。樟子松、沙柳和长柄扁桃 >55% 的细根生物量分布于0~40 cm 土层 (图6), 从而支撑雨季浅层土壤水的高效利用。Curt 和 Prévosto<sup>[38]</sup>以及 Pei 等<sup>[39]</sup>也报道了樟子松、沙柳和长柄扁桃的根系功能二态性, 为它们在不同水分条件下灵活转换水源提供了有利条件。樟子松和沙柳在120~200 cm 土层的细根生物量分别为 7.03 g·m<sup>-2</sup> 和 4.84 g·m<sup>-2</sup>, 显著高于长柄扁桃 (2.77 g·m<sup>-2</sup>) ( $P<0.05$ )。此外, 樟子松和沙柳具有更深的根系分布 (樟子松和沙柳均为 200 cm, 长柄扁桃为 160 cm) (图6), 使得二者在旱季能够更有效地吸收深层土壤水。另一方面, 水分供耗动态也是驱动植物用水策略变化的重要因素之一, 旱季浅层土壤水供耗失衡 (降水少、蒸腾强) 迫使植物转向深层水源以缓解干旱胁迫; 雨季浅层土壤水受充沛的降水补给, 加之植物为降低水分传输能耗, 优先利用浅层土壤水。已有研究表明, 不同气候区 (例如, Barbeta 等<sup>[40]</sup>在地中海森林, Wu 等<sup>[41]</sup>在喀斯特临界带, Wang 等<sup>[42]</sup>在干旱半干旱荒漠生态系统) 植物水分吸收深度随干旱胁迫程度加剧而逐渐加深。



注: 不同字母表示不同植物根系生物量有显著差异 ( $P<0.05$ )。Note: Different letters indicate significant differences in root biomass between plants ( $P<0.05$ ).

图6 樟子松、沙柳和长柄扁桃细根 (<2 mm) 生物量垂直分布特征

Fig. 6 Vertical distribution of fine root (<2 mm) biomass for *P. sylvestris*, *S. psammophila* and *A. pedunculata*

### 3.2 共生植物种间水分利用关系

水文生态位分离作为缓解物种间水分竞争的关键机制, 对维持多物种稳定共存具有重要作用<sup>[23-24]</sup>。植物通过物候差异和根系空间分布格局实现时空维度的水文生态位分离, 从而弱化种间水分竞争并提升有限水资源的利用效率<sup>[5]</sup>。水文生态位分离机制已被验证适用于热带雨林<sup>[43]</sup>、地中海气候区<sup>[44]</sup>、湿润草甸<sup>[45]</sup>和半干旱生态系统<sup>[15]</sup>等多种生境。例如: 亚热带季风区栗树和红茶混交林通过土壤水分再分配缓解竞争, 有助于提升林分抗旱能力与经济效益<sup>[20]</sup>。类似地, 黄土高原半干旱区小叶杨、柠条、沙柳及沙蒿群落则通过水源利用深度和水分利用效率的季节变化, 体现水文生态位分离动态特征<sup>[15]</sup>。本研究中, 旱季樟子松-沙柳的 PSI ( $0.81\pm0.03$ ) 显著高于樟子松-长柄扁桃 ( $0.73\pm0.10$ ), 而雨季二者虽无

显著差异 ( $P>0.05$ ), 但仍维持前者略高趋势。因此, 樟子松和长柄扁桃种间水分竞争相对较弱, 二者混交可优化水分互补。在全球气候暖干化加剧背景下<sup>[11-13]</sup>, 水资源竞争将更加激烈, 合理利用物种间水文生态位分离、科学配置混交树种, 对于缓解种间水分竞争、提升植被恢复的可持续性具有重要意义。

本研究通过稳定同位素揭示了植物水分来源的季节性差异与生态位分离特征, 但尚未解析降雨事件后植物水分吸收的时变过程及水分利用效率的生理调控机制, 一定程度上限制了对水文生态位分离形成机制与动态响应的深入认知。未来需融合多尺度监测 (高频同位素采样+生理参数同步测定), 结合木质部栓塞脆弱性与光合-水分权衡模型, 多维度解析植物的水分适应策略, 以更全面地揭示物种共存机理。

## 4 结论

本研究采用稳定同位素技术, 结合 MixSIAR 模型, 揭示了毛乌素沙地 3 种典型人工恢复植物的季节性水分利用策略。3 种植物在旱季和雨季的水分来源不同: 旱季樟子松 ( $63.43\pm 8.42\%$ ) 和沙柳 ( $56.12\pm 1.23\%$ ) 主要吸收 120~300 cm 土壤水, 长柄扁桃主要吸收 40~200 cm 土壤水; 雨季降水补给后, 樟子松、沙柳和长柄扁桃均主要依赖于 0~120 cm 土壤水 (分别为  $57.18\pm 5.84\%$ 、 $60.78\pm 15.00\%$  和  $60.43\pm 6.80\%$ )。植物根系分布和土壤水分含量的季节性变化是驱动植物水分利用策略变化的关键因素。整个生长季中, 樟子松-沙柳的水文生态位重叠度 (旱季:  $PSI=0.81\pm 0.03$ ; 雨季:  $PSI=0.79\pm 0.01$ ) 均高于樟子松-长柄扁桃 (旱季:  $PSI=0.73\pm 0.10$ ; 雨季:  $PSI=0.75\pm 0.06$ ), 表明樟子松和长柄扁桃这一组合的种间水分竞争相对较弱, 具备更优的共生适配性。未来应进一步探究降雨事件后植物水分吸收的时变过程及水分利用效率的生理调控机制, 从而为干旱半干旱地区造林树种的优化配置和人工恢复植被的可持续管理提供数据支持。

## 参考文献(References):

- [1] Carpenter S R, DeFries R, Dietz T, et al. Millennium ecosystem assessment: Research needs[J]. Science, 2006, 314(5797): 257-258.
- [2] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38-41.
- [3] Zhang M M, Wu X Q. The rebound effects of recent vegetation restoration projects in Mu Us Sandy land of China[J]. Ecological Indicators, 2020, 113: 106228.
- [4] Dai J J, Li Y Y, Wang L. Mixed-species plantations alleviate deep soil water depletion and facilitate hydrological niche partitioning compared to pure plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2023, 539: 121017.
- [5] Wang Y P, Wang J X, Zhang M J, et al. Water use sources and their hydrological niche characteristics of three typical plants in the south slope of Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3946-3956. [王亚萍, 王家鑫, 张敏佳, 等. 秦岭南麓 3 种典型植物水分利用来源及水文生态位特征[J]. 生态学报, 2025, 45(8): 3946-3956.]
- [6] Liu C L C, Kuchma O, Krutovsky K V. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future[J]. Global Ecology and Conservation, 2018, 15: e00419.
- [7] Gong C, Tan Q Y, Liu G B, et al. Impacts of tree mixtures on understory plant diversity in China[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 498: 119545.
- [8] Peng C J, Song Y D, Li C, et al. Growing in mixed stands increased leaf photosynthesis and physiological stress resistance in moso bamboo and mature Chinese fir plantations[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 649204.
- [9] Huang L M, Shao M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 199: 102962.
- [10] Pei Y W, Huang L M, Li R L, et al. Root water source of *Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* and influencing

- 
- factors in the southeastern part of Mu Us sandy land, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(5): 1336-1348. [裴艳武, 黄来明, 李荣磊, 等. 毛乌素沙地东南缘人工林樟子松根系吸水来源与影响因素[J]. *土壤学报*, 2022, 59(5): 1336-1348.]
- [11] Huang J, Li Y, Fu C, et al. Dryland climate change: Recent progress and challenges[J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(3): 719-778.
- [12] Wang J, Fu B J, Jiao L, et al. Age-related water use characteristics of *Robinia pseudoacacia* on the Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 301/302: 108344.
- [13] Zhang P, Jeong J H, Yoon J H, et al. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point[J]. *Science*, 2020, 370(6520): 1095-1099.
- [14] Silvertown J, Araya Y, Gowing D. Hydrological niches in terrestrial plant communities: A review[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(1): 93-108.
- [15] Zhao Y, Wang L, Chun K P, et al. Dynamic hydrological niche segregation: How plants compete for water in a semi-arid ecosystem[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 630: 130677.
- [16] Zhang B B, Xu Q, Gao D Q, et al. Altered water uptake patterns of *Populus deltoides* in mixed riparian forest stands[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 706: 135956.
- [17] Gao X D, Liu Z P, Zhao X N, et al. Extreme natural drought enhances interspecific facilitation in semiarid agroforestry systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 444-453.
- [18] Huang L M, Pei Y W, Shao M A, et al. Multi-species plantation intensifies soil water competition and groundwater depletion in a water-limited desert region[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 537: 120953.
- [19] Tang Y K, Wu X, Chen Y M, et al. Water use strategies for two dominant tree species in pure and mixed plantations of the semiarid Chinese Loess Plateau[J]. *Ecohydrology*, 2018, 11(4): e1943.
- [20] Dai J J, Zhang X P, Wang L, et al. Water stable isotope characteristics and water use strategies of co-occurring plants in ecological and economic forests in subtropical monsoon regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 621: 129565.
- [21] Huang Z, Liu Y, Qiu K Y, et al. Soil-water deficit in deep soil layers results from the planted forest in a semi-arid sandy land: Implications for sustainable agroforestry water management[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 254: 106985.
- [22] Gong Z T, Zhang G L, Chen Z C, et al. Pedogenesis and soil taxonomy[M]. Beijing: Science Press, 2007. [龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [23] Han C Q, Wang J, Zhao C L, et al. Phosphorus speciation characteristics of typical artificial vegetation rhizosphere soil in Mu Us sandy land[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(1): 165-176. [韩超群, 王娇, 赵春雷, 等. 毛乌素沙地典型人工植被根际土壤磷形态特征[J]. *土壤学报*, 2025, 62(1): 165-176.]
- [24] Wang J, Fu B J, Lu N, et al. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 27-37.
- [25] Huang L M, Wang Z W, Pei Y W, et al. Adaptive water use strategies of artificially revegetated plants in a water-limited desert: A case study from the Mu Us Sandy Land[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 644: 132103.
- [26] Deng T, Li Z, Lu L H, et al. Advances and prospects in stable isotope mixing model researches[J]. *Earth and Environment*, 2025, 53(6): 900-912. [邓通, 李哲, 鲁伦慧, 等. 稳定同位素混合模型研究进展与展望[J]. *地球与环境*, 2025, 53(6): 900-912.]
- [27] Parnell A C, Phillips D L, Bearhop S, et al. Bayesian stable isotope mixing models[J]. *Environmetrics*, 2013, 24(6): 387-399.
- [28] de la Casa J, Barbeta A, Rodríguez-Uña A, et al. Isotopic offsets between bulk plant water and its sources are larger in cool and wet environments[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(15): 4125-4146.
- [29] Vargas A I, Schaffer B, Li Y H, et al. Testing plant use of mobile vs immobile soil water sources using stable

---

isotope experiments[J]. *New Phytologist*, 2017, 215(2): 582-594.

[30] Barbeta A, Jones S P, Clavé L, et al. Unexplained hydrogen isotope offsets complicate the identification and quantification of tree water sources in a riparian forest[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(4): 2129-2146.

[31] Chen Z X, Wang G H, Yang X L, et al. Water competition among the coexisting *Platycladus orientalis*, *Prunus davidiana* and *Medicago sativa* in a semi-arid agroforestry system[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 279: 108206.

[32] Miguez-Macho G, Fan Y. Spatiotemporal origin of soil water taken up by vegetation[J]. *Nature*, 2021, 598(7882): 624-628.

[33] 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*, 2020, 457: 117727.

[34] Shi P J, Gai H Q, Liu W Z, et al. Links of apple tree water uptake strategies with precipitation and soil water dynamics in the deep loess deposits[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 623: 129829.

[35] Liu S B, Chen Y N, Chen Y P, et al. Use of  $2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$  stable isotopes to investigate water sources for different ages of *Populus euphratica* along the lower Heihe River[J]. *Ecological Research*, 2015, 30(4): 581-587.

[36] Jia X X, Bai X, Liu C G, et al. Differences in plant water use between check-dam land and slope land on the Loess Plateau: Significance for vegetation restoration[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 362: 108849.

[37] Dawson T E, Pate J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phreatophytic plants of dimorphic root morphology: A stable isotope investigation[J]. *Oecologia*, 1996, 107(1): 13-20.

[38] Curt T, Prévosto B. Root biomass and rooting profile of naturally regenerated beech in mid-elevation Scots pine woodlands[J]. *Plant Ecology*, 2003, 167(2): 269-282.

[39] Pei Y W, Huang L M, Shao M A, et al. Patterns and drivers of seasonal water sources for artificial sand-fixing plants in the northeastern Mu Us sandy land, Northwest China[J]. *Pedosphere*, 2024, 34(1): 63-77.

[40] Barbeta A, Mejía-Chang M, Ogaya R, et al. The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1213-1225.

[41] Wu Z, Behzad H M, He Q F, et al. Seasonal transpiration dynamics of evergreen *Ligustrum lucidum* linked with water source and water-use strategy in a limestone karst area, southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126199.

[42] Wang Z W, Huang L M, Pei Y W, et al. Age-dependent water-use strategies in *Amygdalus Pedunculata* pall. plantations: Implications for sustainable afforestation in desert ecosystems[J]. *Hydrological Processes*, 2025, 39(8): e70251.

[43] Wu J N, Zeng H H, Zhao F, et al. Plant hydrological niches become narrow but stable as the complexity of interspecific competition increases[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 320: 108953.

[44] Camarero J J, Sánchez-Salguero R, Sangüesa-Barreda G, et al. Tree species from contrasting hydrological niches show divergent growth and water-use efficiency[J]. *Dendrochronologia*, 2018, 52: 87-95.

[45] Araya Y N, Silvertown J, Gowing D J, et al. A fundamental, eco-hydrological basis for niche segregation in plant communities[J]. *New Phytologist*, 2011, 189(1): 253-258.

(责任编辑: 檀满枝)