

DOI: 10.20103/j.stxb.202408101885

王亚萍, 王家鑫, 张敏佳, 秦婧雯, 靳文晰, 张淑兰. 秦岭南麓 3 种典型植物水分利用来源及水文生态位特征. 生态学报, 2025, 45(8): 3946-3956.
Wang Y P, Wang J X, Zhang M J, Qin J W, Jin W X, Zhang S L. Water use sources and their hydrological niche characteristics of three typical plants in the south slope of Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3946-3956.

秦岭南麓 3 种典型植物水分利用来源及水文生态位特征

王亚萍^{1,*}, 王家鑫², 张敏佳¹, 秦婧雯¹, 靳文晰¹, 张淑兰¹

¹ 安康学院化学与环境学院, 安康 725000

² 西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100

摘要: 水分是限制植物生长的关键因子, 植物的水分利用来源反映了植被对环境变化响应的生态水文过程, 成为植被建设重要关注点之一, 然而当前关于秦岭地区典型植物的水分利用模式尚不明晰。以秦岭主要造林树种锐齿栎 (*Quercus aliena* var. *acutiserrata*)、麻栎 (*Quercus acutissima* Carr.) 和马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb) 为对象, 通过测定降雨、土壤水和植物木质部水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的同位素, 借助 MixSIAR 模型定量分析植物的水分利用特征, 并应用 Levins 指数和相似性比例指数 (PS 指数) 计算水分生态位宽度和重叠度。结果表明: 不同树种在同时期的水分来源不同, 同一树种在降雨前后水分来源也有别。降雨前锐齿栎主要利用 20—40 cm 土壤水 (42.9%), 雨后则逐步转移到浅层 0—20 cm 土层 (56.3%—58.2%); 麻栎雨前主要利用深层 40—60 cm 土壤水 (45.3%), 雨后逐渐转移为浅层, 且随着降雨量的增加, 浅层水源利用比例增大 (40% 增加到 58.7%)。马尾松在降雨前和小雨事件后的水分利用来源变化不明显, 而发生大雨 (259 mm) 之后, 对浅层 0—20 cm 的水分利用由 38% 增加到 91.1%。锐齿栎-麻栎林的 PS 指数为 77.3%, 二者间水分竞争较弱, 而锐齿栎-马尾松林、麻栎-马尾松林之间存在明显的水分竞争关系 (PS 指数在 80% 以上)。结论: 锐齿栎-麻栎混交林是比较适宜的搭配树种, 二者对同一土层水分竞争相对较弱。而麻栎和马尾松在降雨前后的水分利用策略相似, 表现出明显的水分竞争关系。因此, 在未来植被建设中, 建议选择合理的树种配置, 以实现森林的可持续管理。

关键词: 水分来源; 氢氧稳定同位素; MixSIAR; 水文生态位; 秦岭

Water use sources and their hydrological niche characteristics of three typical plants in the south slope of Qinling Mountains

WANG Yaping^{1,*}, WANG Jiaxin², ZHANG Minjia¹, QIN Jingwen¹, JIN Wenxi¹, ZHANG Shulan¹

¹ School of Chemistry and Environment, Ankang University, Ankang 725000, China

² College of Natural Resource and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: Water is a key factor limiting plant growth; plant water uptake sources reflect the ecological hydrological processes and vegetation responses to environmental changes, thus becoming an important focus in vegetation construction. However, the water use patterns of the typical vegetation in the Qinling Mountains remain unclear. This study focused on the main afforestation species in the Qinling Mountains, including *Quercus aliena* var. *acutiserrata*, *Quercus acutissima* Carr. and *Pinus massoniana* Lamb. By analyzing $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in precipitation, soil water, and xylem water, we employed the MixSIAR model to quantitatively assess water utilization characteristics, and calculated niche width and overlap using the Levins index and proportion similarity index. Results showed that the plants had varying water use sources

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目 (2023JCQN0369); 陕西省教育厅项目 (22JK0238); 安康学院高层次人才引进项目 (2021AYQDZR10); 安康学院校级科研项目 (2024AGPY06)

收稿日期: 2024-08-10; **网络出版日期:** 2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyaping0410@163.com

during the same period, and the same tree species also had varying water sources before and after precipitation. *Quercus aliena* var. *acutiserrata* mainly took water from the 20—40 cm soil layer (42.9%) before the rainfall, yet transitioned to the shallower 0—20 cm layer after precipitation (56.3%—58.2%). Before the rain, *Quercus acutissima* Carr. primarily utilized soil water from the deep layers of 40—60 cm (45.3%), which gradually shifted to shallow soil layer after the rain, and the proportion increased from 40% to 58.7% with the increase of rainfall. The water use sources of *Pinus massoniana* Lamb exhibited no significant alterations before and after minor rainfall events; however, following heavy rainfall (259 mm), the contribution of soil water from the shallow 0—20 cm layer rose from 38% to 91.1%. The PS index of *Quercus aliena* var. *acutiserrata* and *Quercus acutissima* Carr. forest was 77.3%, indicating weak water competition between the two plant species. However, there was a clear water competition relationship between *Quercus aliena* var. *acutiserrata* and *Pinus massoniana* Lamb. forests, *Quercus acutissima* Carr. and *Pinus massoniana* Lamb. forest (PS index>80%). In conclusion, the mixed forests comprising *Quercus aliena* var. *acutiserrata* and *Quercus acutissima* Carr. represent a suitable combination of tree species, demonstrating relatively weak competition for water within the same soil layer. However, the water use strategies of *Quercus acutissima* Carr. were similar to *Pinus massoniana* Lamb before and after the precipitation, showing competition for water resources. Therefore, in order to maintain sustainable forest management, it is suggested to choose a reasonable tree species configuration in future vegetation construction.

Key Words: water source; hydrogen and oxygen stable isotopes; MixSIAR; hydrological niche; Qinling

水分是限制植物分布和生长发育的关键因子,植物通过根系吸收土壤中的水分,以满足自身生存和生长需求,其水分利用模式受到降水、土壤储水、植被类型等多种因素影响^[1-2]。近年来,全球变暖导致极端降水和干旱事件频发,区域降雨格局也不断变化,改变了群落的水分环境,进而影响到植物生长^[3-4]。当降水有限时,植物的生存繁衍几乎完全依赖于土壤水分条件及用水模式,植物的水分利用模式便成为植被适应干旱环境的重要表征,同时也是植被建设需要重点关注的问题之一^[5-6]。因此,明确不同植物对水分的吸收、利用及对降水的响应,是揭示共生植物间竞争与共存机制、量化森林生态水文平衡过程的重要理论依据。

与纯林相比,混交林具备更稳定的林分结构,在提高资源利用率,改善林分条件和维持生态系统稳定性等方面发挥着更为积极的作用^[7]。然而,混交林不同物种间存在着复杂的相互关系,包括对有限资源的竞争和种间的相互促进,进而影响树木生长与固碳能力^[6, 8]。一方面,在不同降水和土壤水分条件下,植物水分利用模式具有较强的适应性,即降水补给后的浅层土壤水会被植物通过浅根吸收,而旱季植物则倾向利用深层土壤水,尽管这种“雨季浅、旱季深”的水分利用模式有助于植物应对干旱胁迫,但也会因利用相同深度的土壤水而产生竞争,进而影响到植物生长^[9]。例如, Han 等^[2]研究发现半干旱区沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)和柠条(*Caragana korshinskii*)的水文生态位重叠度高,二者形成的乔灌混交林对水分竞争激烈,导致深层土壤水分亏缺。另一方面,混交林不同物种间植物根系吸水模式的差异会形成水文生态位分离,可通过时间或空间上的生态位分化,最大程度地弱化种间水分竞争,提高对水资源的利用^[10-12]。例如,有研究指出,和纯林相比,小叶杨(*Populus simonii*)与紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)组成的乔灌混交林可以缓解深层土壤水分流失,促进共生物种间的水文生态位分离^[4];枣树—油菜(*Brassica napus*)农林复合种植可因种间水分互补利用提高对极端干旱的适应能力^[13]。由此可见,水文生态位分离是不同物种实现稳定共存的重要机制,生活在同一群落的多个物种可充分利用不同植物根系对土壤水分利用深度的互补,促进水资源的高效利用,但不恰当的植被混合种植可能会加剧植物间的水分竞争,并对植物生长产生不利影响^[8, 14-16]。因此,在当前气候变化背景下,混交林共生植物水分利用来源关系以及水文生态位特征还需深入研究。

秦岭作为我国南北地理分界线和重要的生态安全屏障,具有调节气候、保持水土、涵养水源等诸多功能^[17-18]。然而,该区森林曾在 20 世纪 60 年代被大量砍伐,现存森林主要是恢复的天然次生林,近年来出现生长滞缓、地力衰退等问题,加上该区沟谷深切,土薄石多,土壤储水能力低,导致植被调节功能减弱,进而威

胁到秦岭的生态安全^[18]。目前,较多研究通过恢复植被、调控改造林分结构等来改善林水关系,提升其水文功能^[19];尽管当前关于不同植物水分利用模式的报道较多,但关于该区典型植物水分利用来源及共生植物水文生态位特征研究尚不明晰。此外,受植被类型、降水、土壤等因素的综合影响,植物水分利用模式呈现高度的异质性和复杂性^[20–23],即使是同一个植物种,不同生境条件下,其水分利用模式也会有别^[24]。因此,定量研究秦岭地区典型植物水分利用来源及其对降水的响应,并用水文生态位量化植物间水文关系,能够深入揭示秦岭典型林分结构下的水分利用策略,对于指导秦岭植被的合理恢复建设具有重要理论意义。

基于此,本研究以秦巴山区典型树种锐齿栎 (*Quercus aliena* var. *acutiserrata*)、麻栎 (*Quercus acutissima* Carr.)和马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 为研究对象,借助氢氧稳定同位素技术,采用贝叶斯混合模型 MixSIAR 定量分析比较树木在降雨前后的水分来源及其同位素特征,并用水文生态位指标量化不同林分下的竞争与协调关系,了解不同树种水分利用对降水的响应机制,进而为该区造林树种的优化、配置和森林的可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验选择在陕西安康凤凰山国家森林公园开展 (108°22′—108°35′E, 30°42′—32°54′N), 海拔 317—2128 m, 平均海拔约 1200 m。研究区气候类型属北亚热带湿润季风气候, 多年平均气温 15.1℃, 多年平均降水量约 1000 mm, 降水多集中在 7—9 月。土壤主要是花岗岩母质发育起来的棕壤土, 土层厚度约 50—60 cm。研究区主要以针阔混交林为主, 森林覆被率达 90%, 植被生长茂盛, 物种丰富。主要成林树种有马尾松、麻栎、锐齿栎等, 林下有灌木华北绣线菊 (*Spiraea fritschiana*)、忍冬 (*Lonicera japonica*)。草本主要有唐松草 (*Thalictrum aquilegifolium*)、苔草 (*Carex remotiuscula*) 等。

本研究在对凤凰山植被进行调查后, 分别选择锐齿栎林、麻栎林以及马尾松林 3 个不同林分类型, 每种林分类型建立三块 20 m×20 m 的样地, 样地内植物生长状态良好, 无病虫害, 其基本信息见表 1。

表 1 采样地基本信息
Table 1 Basic information of the sampling site

林分类型 Forest type	树龄 Stand age/a	坡度 Slope/(°)	坡向 Slope aspect	海拔 Altitude/m	胸径 Diameter at breast height/m	郁闭度 Canopy density
锐齿栎林 (<i>Quercus aliena</i> var. <i>acutiserrata</i> forest)	40	8	阳坡	510	12.2	0.7
麻栎林 (<i>Quercus acutissima</i> Carr. forest)	45	10	阴坡	543	10.3	0.75
马尾松林 (<i>Pinus massoniana</i> Lamb. forest)	45	5	阳坡	561	21	0.8

数据为平均值±标准差

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集时间

于 2023 年 9—10 月开展样品的采集工作, 根据天气预报情况, 在 9 月 9 日采集了土壤样品 (前 14 d 无降水时间发生), 其中在 9 月 12 日—9 月 13 日和 10 月 1 日—10 月 6 日, 分别有 44.78、258.59 mm 的降水, 于降水结束后的第三天, 即 9 月 15 日、10 月 9 日采集样品。在采样日的每天上午采集植物枝条和土壤样品。另外, 收集了 9—11 月的降水样品。

1.2.2 植物木质部、土壤样品采集

首先, 在每个样地内选择 3 棵代表性植株采集植物样品, 在树冠四个方向选择 3—4 cm 长枝条, 迅速除去韧皮部, 保留木质部, 样品采集后立刻密封在取样瓶中, 用 Parafilm 密封并做好编号, 带回实验室 -20℃ 保存。在采样植株附近, 分别选择地势相对均一的三个土壤采样点, 按照 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50、50—60 的土层深度, 采用人工打钻取土的方式逐层采集土壤样品, 最终采集到 27 个植物样品和 54 个土壤样

品。为防止土壤水分蒸发导致同位素分馏,将所采集的一部分土壤样品装入玻璃瓶密封于 -20°C 冷冻保存待测;另一部分样品装入铝盒中用烘干法测定土壤含水率。

1.2.3 降水样品采集

在样地内布设漏斗形的降水收集器,降水样品采集点位于林外的空旷地,在采集点放置 3 个收集桶,并布设为漏斗形的降水收集器,漏斗上方放置乒乓球防止水分蒸发,在每次降水事件结束后采集降水样品,并转移到 50 mL 的聚乙烯瓶中并用 Parafilm 膜密封,然后再冷冻储存,直至进行同位素分析。本次试验期间共采集到 45 个降水样品。

1.2.4 样品处理及测定

对于装入铝盒的土壤样品采用烘干法测定土壤含水率,即带回实验室后迅速称取鲜重,随后在烘箱中 105°C 烘干至恒重并再次称重,然后计算土壤含水率。装入玻璃瓶的土壤和植物样品利用全自动真空冷凝抽提系统(Li-2100, LICA, 中国)进行水分抽提,抽提时间设定为 3 h。之后,采用液态水同位素分析仪(DLT-100, LGR, USA)测定土壤、植物、降水样品的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。每个样品进行 6 次重复测样,为了消除仪器记忆效应,剔除前 2 次的测定值,取剩余 4 次的平均值作为样品的测定值,精度分别为 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 0.03\text{‰}$,测定结果为维也纳标准平均海水(V-SMOW)对应的千分差值, $\delta^2\text{H}$ 或 $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ 的计算公式为:

$$\delta^2\text{H} \text{ 或 } \delta^{18}\text{O} = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000 \quad (1)$$

式中, R_{sample} 、 R_{standard} 分别表示测试样品和标准样品中某一元素的重同位素丰度与轻同位素丰度之比(即 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 和 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)。

1.2.5 同位素水源划分

采用基于 R 脚本的贝叶斯模型 MixSIAR 计算不同水源对植物的相对贡献率。模型假设所有来源总贡献率为 100%,然后再确定每个水分来源的贡献率,用公式可表示为:

$$\delta_p + \sigma_p = \sum_{i=1}^n f_i (\delta s_i + \sigma s_i) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1 \quad (3)$$

式中, δ_p 和 δs_i 分别表示植物木质部和潜在水源的 $\delta^2\text{H}$ 或 $\delta^{18}\text{O}$; σ_p 和 σs_i 分别表示植物木质部水和潜在水源的 $\delta^2\text{H}$ 或 $\delta^{18}\text{O}$ 的标准差, i 表示第 i 种水源; n 表示总水源数, f_i 表示第 i 种水源的相对贡献率。综合考虑土壤水源同位素比值和土壤含水量的变异性,将植物水源划分为 3 个潜在水源。将不同土层土壤水分与茎秆水分的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的均值及标准差文件分别作为来源值与混合值输入 MixSIAR 模型。然后设置运算次数,运行模型,计算植物对各潜在水源的吸收利用比例,其中分馏系数设置为 0,模型迭代运算次数设置为 10000。

1.2.6 水文生态位指标计算

水文生态位指标可以用来量化植物的种间关系。采用 Levins 指数计算水文生态位宽度,用相似性比例指数(PS 指数)来表征水文生态位重叠度,即物种间利用某一资源的相似程度^[2]。具体计算分别如下:

① Levins 指数

$$B_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2} \quad (4)$$

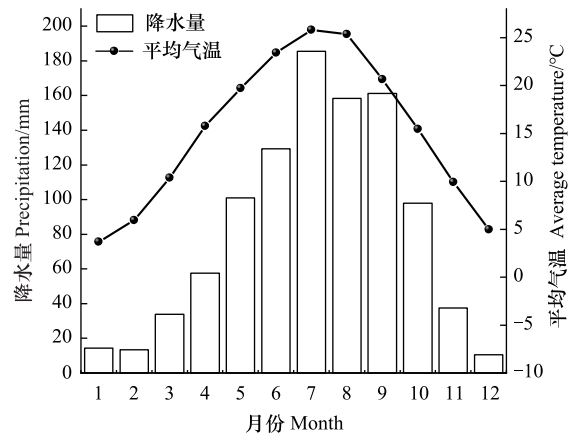


图 1 研究区多年逐月平均降水量及平均气温分布

Fig.1 Distribution of monthly precipitation and temperature in the research area over the years

式中, B_i 为物种 i 的水文生态位宽度; P_{ij} 为物种 i 对第 j 土层土壤水的利用比例, $\sum_{j=1}^r P_{ij} = 1$, r 为总土层数。Levins 指数反映了物种对某一资源的利用程度, 其范围在 0—1 之间, 值越大说明该物种生态位宽度越宽。

② 相似性比例指数 (PS 指数)

$$PS = 1 - 0.5 \sum_{j=1}^r |P_{ij} - P_{kj}| \quad (5)$$

式中, P_{ij} 和 P_{kj} 分别表示植物 i 和 k 对第 j 种水源的利用率, r 为水源总数。PS 指数越大, 表明两种植物对同一水源的利用比例越大, 即二者对同一水源的竞争越大, 而当两个物种之间的水源没有重叠时, PS 值最小 (0%), 表明两种植物主要利用的水源不同, 对同一水源的竞争越小。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 进行基础数据整理, 利用 SPSS 23.0 进行数据统计分析, 采用单因素方差分析比较不同降水量、不同水体 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值以及不同植物对土壤水源吸收比例的差异, 事后检验采用 Tukey 检验, 显著性水平设置为 0.05。借助 R 软件完成植物水分利用来源计算, 采用 Origin 2016 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量剖面分布特征

首先分析了三个林分剖面土壤含水量在降水前后的差异。可以看出, 受降水补给影响, 各样地剖面土壤含水量均在降雨之后有所增加, 但变化趋势有别 (图 2)。具体来看, 在降雨之前, 锐齿栎林、麻栎林和马尾松林下 0—60 cm 土层的土壤含水量均随着深度增加而减少, 其剖面平均土壤含水率分别为 8.14%, 7.07% 和 7.39%。发生 44.78、258.59 mm 的降雨后, 剖面土壤含水量均出现明显增加, 其中锐齿栎林下 0—60 cm 剖面土壤含水量分别增加了 3.05% 和 5.39%, 而麻栎林分别增加了 2.80% 和 6.74%, 马尾松林两次降雨后剖面土壤含水量比较接近, 增加了 10.48%—10.64%。整体上来看, 马尾松林样地下的剖面土壤含水量在两次降雨后无明显差异, 麻栎林和锐齿栎林下的剖面土壤含水量则呈明显增加, 其中麻栎林大雨事件后的剖面平均土壤含水量显著高于小雨后 ($P < 0.05$)。

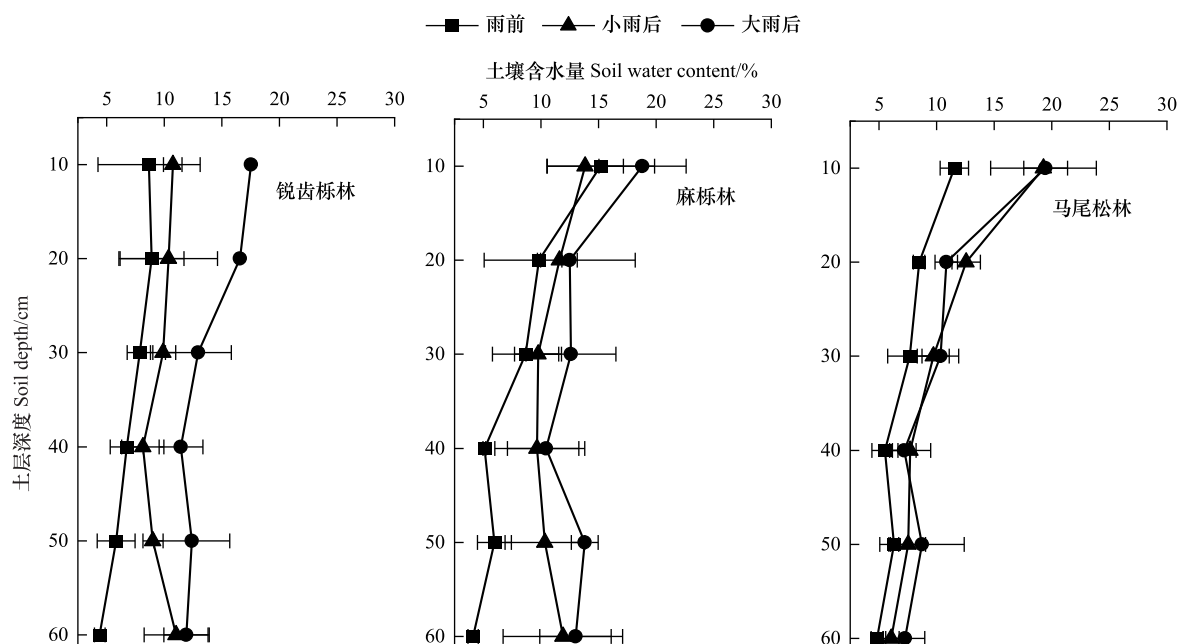


图 2 降雨前后土壤含水量剖面分布特征

Fig.2 Distribution of soil water content along the profile before and after the rain

2.2 降水、土壤水和木质部水同位素组成特征

图 3 分析了研究区大气降水的氢氧同位素值分布特征。可以看出,观测期内,研究区降水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -106.52‰ — -31.72‰ 和 -15.24‰ — -6.73‰ ,平均值分别为 -75.37‰ 和 -12.09‰ 。根据收集当地降水样品中的氢氧稳定同位素组成,拟合了当地大气降水线方程(LMWL, $y = 8.56x + 28.06$, $R^2 = 0.98$,图 4)。LMWL 的斜率和截距均大于全球大气降水线(GMWL),表明降雨过程中,雨滴从云层降落到地面过程较少发生蒸发现象;发生大降水事件时,同位素明显偏负,表现出雨量效应,呈现出随着降雨量的增大,降水氢氧稳定同位素组成趋于贫化的特点。降雨前后锐齿栎林、麻栎林和马尾松林的植物木质部水同位素值几乎都标绘在 LMWL 的右下侧,木质部水同位素值在降雨后更趋近大气降水线。此外,降雨前后,三个林分下的植物木质部水氢、氧同位素值随林龄和采样时间的不同而变化,同一树种木质部水同位素组成在降雨前后存在显著差异($P < 0.05$)。

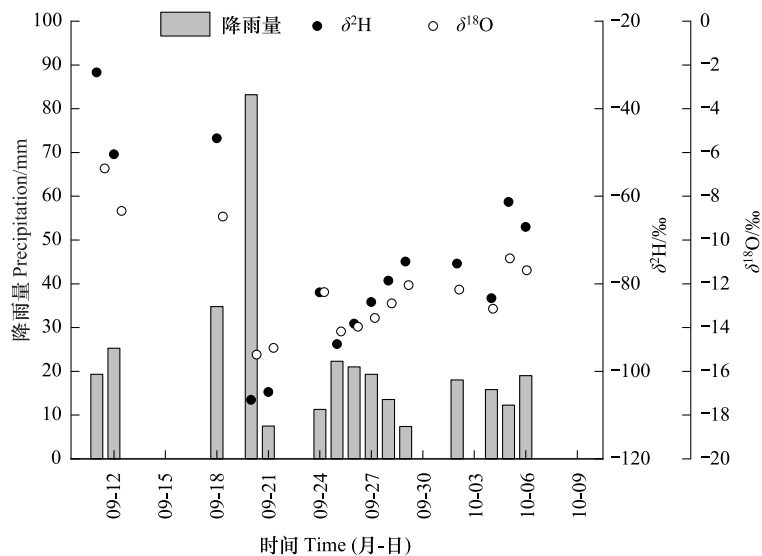


图 3 观测期内降水量及其 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of precipitation and its $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values during the observation period

如图 5 所示,锐齿栎林和马尾松林样地下土壤氢氧同位素均随着土壤深度的增加呈现减少的趋势,麻栎林下的土壤氢氧同位素在小雨后呈现先减少后增加的趋势。三个林分植物木质部水氢氧同位素也呈现明显差别。具体来看,三个林分样地下浅层 0—20 cm 土壤水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 较为富集,其值变化范围为 -79.43‰ — -48.86‰ 和 -12.39‰ — -7.72‰ ,且变异程度较大,而中层及以下水的同位素值变异较小,这主要是浅层土壤水容易受到降水和蒸发的影响。进一步通过方差分析,发现对同一林分植物而言,大雨之后土壤水的氢氧同位素值发生明显贫化,其土壤水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 显著低于雨前和小雨后($P < 0.05$),而雨前和小雨后土壤水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 差异不明显,仅有麻栎林样地下的土壤水同位素值存在显著差异($P < 0.05$),马尾松林下层 20—60 cm 土壤水的 $\delta^2\text{H}$ 也有显著差异。

2.3 不同植物水分来源差异

通过 MixSIAR 模型分析三个样地植物水分利用来源在降水前后的差异(图 6)。可以看出,降雨前后三个林分的主要水分利用源发生变化,降雨事件不同程度地促进各植物对浅层土壤水利用率的提高。具体来看,降雨前锐齿栎林主要吸收 20—40 cm 土壤水,占总利用来源的 42.9%,发生 44.78、258.59 mm 的降雨后,该植物对浅层 0—20 cm 土壤水的利用比例增加,分别达到 58.2%和 56.3%。对麻栎林而言,雨前主要利用深层 40—60 cm 土壤水(45.3%),而发生降雨之后,逐渐转移为浅层土壤水源,且随着降雨量的增加,浅层水源利用比例增大,降雨前、小雨和大雨后对浅层 0—20 cm 土层上土壤水的利用来源分别为 18.4%、40%和 58.7%。马尾松林在降雨前和小雨事件后的水分利用来源变化不明显,对浅层 0—20 cm 土壤水利用来源分别为 33.1%

和 38%,而发生大雨之后,浅层土壤水分利用的贡献率增加到 91.1%。总体来看,麻栎林对浅层土壤水的利用来源随着降雨量的增加而增加,锐齿栎林雨前和降雨之后水分利用来源有所变化,但降雨之后的水分利用来源受降雨量影响较小,而马尾松林在发生大雨事件后会明显转移利用浅层土壤水。

2.4 不同植物水分利用来源的水文生态位特征

进一步分析了三个林分下不同植物水分利用来源的水文生态位特征(表 2)。可以看出,降雨前马尾松林的水分生态位宽度(2.91)略高于锐齿栎林(2.82)和麻栎林(2.7),表明马尾松林的水分利用能力最强。发生降雨后,锐齿栎林的生态位宽度有所下降,在 2.34—2.43 范围内变化,而麻栎林和马尾松林则呈现先上升后下降的变化趋势,小雨后的水文生态位宽度最高,分别为 2.94 和 2.96。其次,计算了锐齿栎—麻栎林、锐齿栎—马尾松林和麻栎—马尾松林下的 PS 指数,结果表明,在未发生降雨事件时,锐齿栎—麻栎林的生态位重叠指数为 77.3%,表明二者间的水分竞争较弱,其次为麻栎—马尾松混交林,其值为 80.9%,而锐齿栎—马尾松林的生态位重叠指数达到 96.4%,表明二者混交种植会存在明显的水分竞争,而大雨之后的生态位重叠指数降到 65.3%。由此可见,在无雨条件下,锐齿栎—麻栎混交林是比较适宜的搭配树种,二者对同一土层上的水分的竞争相对较弱。

表 2 降雨前后不同林分下的水分生态位宽度和相似性比例指数

Table 2 Water niche width and proportion similarity index under different forest stands before and after the rain				
指标 Index	林分类型 Stand type	雨前 Before rain	小雨后 After light rain	大雨后 After heavy rain
Levins 指数	锐齿栎林	2.82	2.34	2.43
	麻栎林	2.7	2.94	2.33
	马尾松林	2.91	2.96	1.2
相似性比例指数(PS)/%	锐齿栎-麻栎林	77.3	81.8	97.5
	锐齿栎-马尾松林	96.4	79.8	65.3
	麻栎-马尾松林	80.9	98	67.65

3 讨论

3.1 植物水分利用对降水的响应

植物水分利用来源受到气象条件(如降水)、土壤以及植物自身特性的影响^[25—27]。受上述因素影响,植物的吸水模式呈现差别,其中降水和土壤水分的时空变化是影响植物水分利用策略的主导因子之一^[20,28—29]。近年来,气候变暖导致极端降水的频率、强度和范围不断增加,打破了水分的供需平衡。多数研究表明,降水输入会改变土壤水分的空间分布,进而影响到植物水分利用来源变化^[21,30]。通常情况下,植物在旱季倾向利用深层土壤水,而雨后则转向利用浅层水源,原因主要有以下两点:一方面,旱季表层土壤含水量较低,植物为维持正常的生理活动,转移利用深层的土壤水分;另一方面,受降水补给,浅层土壤含水量迅速增加,而降水从入渗到深根植物的根区存在时间延迟,植物为了减少能量消耗,在雨后便转向利用浅层土壤水。吴应明等^[30]研究发现,刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)和侧柏(*Platycladus orientalis*)在高降雨量时主要利用浅层土壤水,低

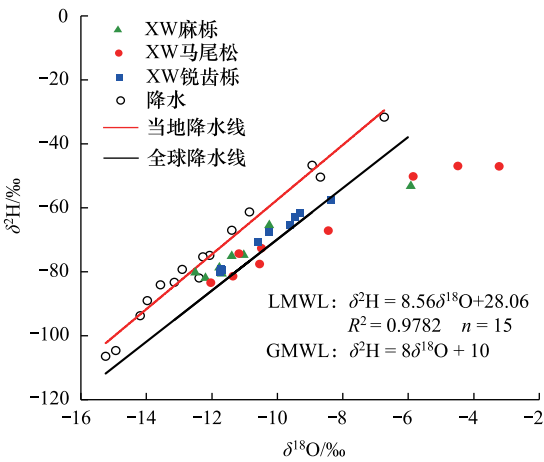
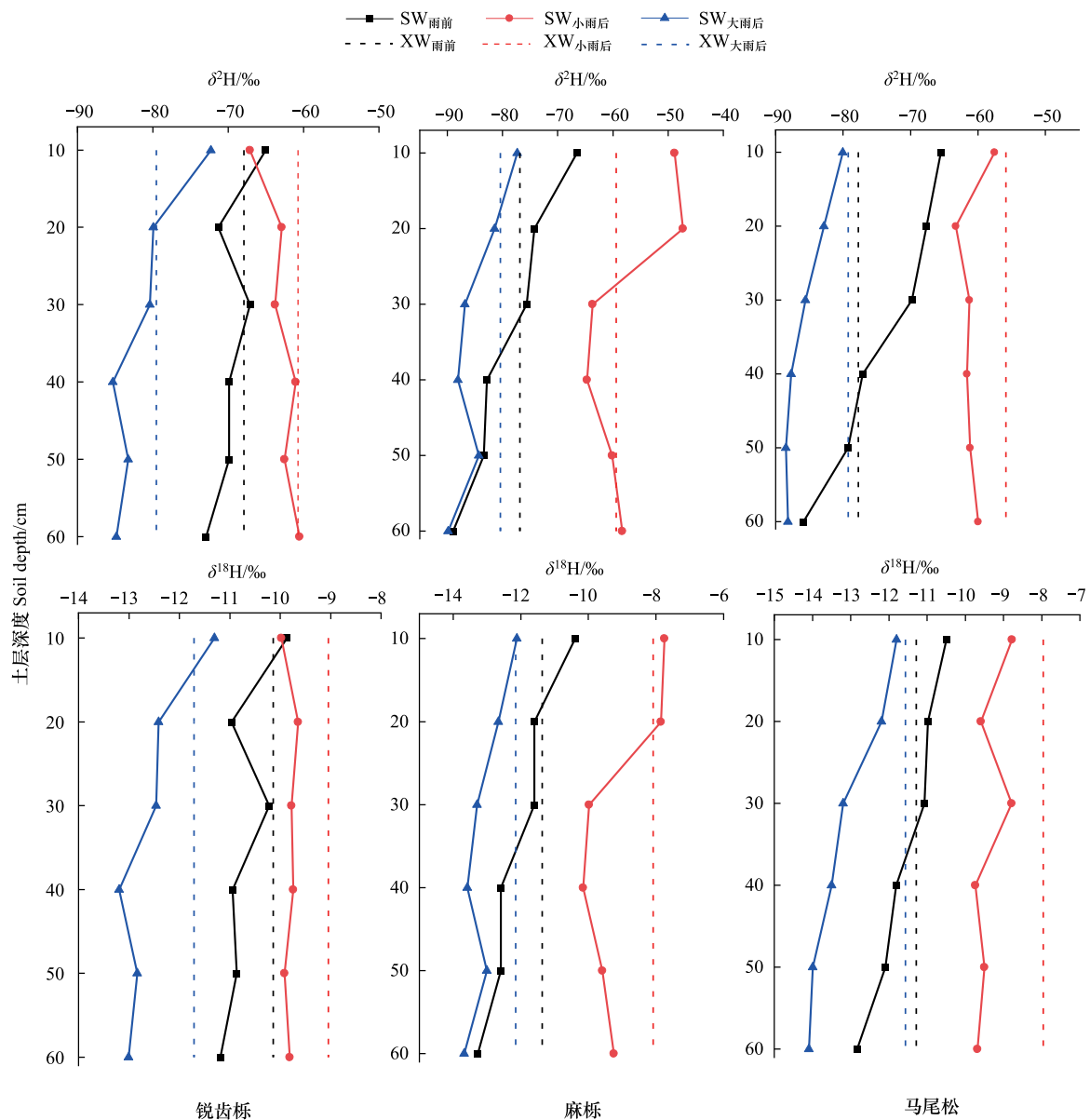


图 4 大气降水、植物木质部水的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 特征

Fig.4 Characteristics of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and plant xylem water
XW: 木质部水 Xylem water; GMWL: 全球大气降水线 Global atmospheric precipitation line; LMWL: 当地大气降水线 Local atmospheric precipitation line

图 5 各样地土壤水和植物木质部水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化Fig.5 Changes of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in soil water and plant xylem water in various plots

SW_{雨前}、SW_{小雨后}和SW_{大雨后}分别代表雨前、小雨后及大雨后土壤水中的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值;W_{雨前}、XW_{小雨后}和XW_{大雨后}分别代表雨前、小雨后及大雨后植物木质部中水的同位素值

降雨量时则主要利用深层土壤水;Liu 等^[28]的研究表明,侧柏和栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume)可以根据土壤水分条件调整其水源的利用。在本研究中,在不同降雨量条件下,三个林分植物的水分利用来源有较大差异,特别是当发生较大降水事件后,植物主要的水分利用来源均转移到浅层土壤,这和前人的研究一致。这可能是因为受降水入渗补给影响,浅层土壤水分条件明显改善,进而促进了植物的根系吸收。这也说明植物根系吸收水分具有较强的适应性,可在不同降雨条件下调整水分利用来源,改善自身水分条件,以应对干旱胁迫。

尽管植物可以通过改变利用的水源以适应降水条件,但是受植物特性、土壤水分状况影响,同一生境下 3 种植物表现出不同的水分利用模式。例如,马尾松在降雨前和小雨事件后的主要水源无明显变化,仅在大雨事件之后才改变主要的水分来源,而麻栎和锐齿栎根系能够尽快响应土壤水分变化并及时调整水分利用来

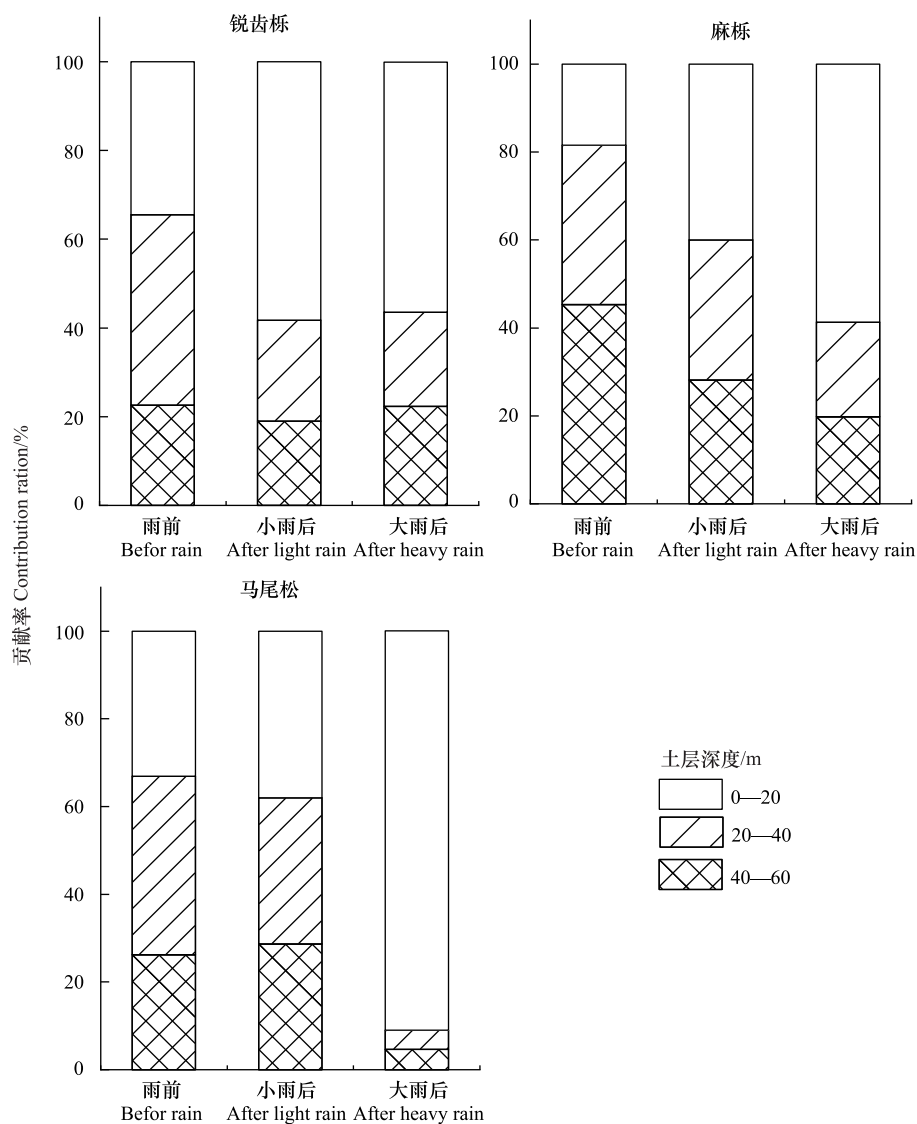


图6 三种植物对各潜在水源的利用比例

Fig.6 Proportions of potential water sources in the three plants

源,表明二者对外界水分条件变化十分敏感,倾向于利用含水量较高的土层,体现其较强的干旱适应性。植物水分来源对降水前后的响应差别可能与植物根系分布及生理活性有关,首先,植物根系分布差异也会影响到水分利用来源,Chang 等^[31]的研究发现,植物根系分布与获取的水分来源具有显著的正相关关系;另一方面,干旱条件下严重的土壤水分亏缺可能影响到植物的根系活动,降低了根系的水分吸收能力^[30, 32]。此外,本研究中发现的马尾松在干旱期利用深层土壤水的结果与雷自然等^[11]和张岁梦等^[20]的研究结果相反,这可能与植物生活的土壤环境有关。有研究指出,同一区域沙丘与戈壁的土壤质地差异,导致沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)可利用水源的不同^[24]。此外,不同植物的水分利用来源会呈现季节性的变化,例如 Yang 等^[33]研究表明,马尾松、湿地松(*Pinus elliottii*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等均在非干旱期利用浅层土壤水,而在干旱期则转向利用深层土壤水,He 等^[23]也发现热带次生林植物通过采取不同形态或生理策略来改变水分来源,以适应变化的水分条件。以上研究均表明,为了应对降水模式的改变,这些植物会采取不同的吸水模式来适应波动的水分条件,此外,植物的水分利用来源和土壤水分条件具有密切相关性,土壤水分与根系分布是探究植物水分来源的关键,关于本研究区典型植物水分利用来源的季节性规律及其与根系分布的关系有待进

一步研究。

3.2 共生植物种间水分利用关系

就植物间利用水分而言,水文生态位分离是不同植物实现稳定共存的重要机制,共生植物可以通过不同物候、根系吸收水分等活动实现水文生态位分离,最大程度弱化种间水分竞争,进而实现对有限资源高效利用^[34]。当水分有限时,共生植物之间可能会因为利用相同深度的土壤水而产生竞争,也可能通过“水分利用生态位分离”避免竞争,从而提高水分可利用性、并应对极端干旱^[2,4,5]。在某一特定的气候条件下,不同用水规律的植物物种组合可形成良好的群落配置,以弥补不同物种对水资源利用的不足^[35]。例如,Dai 等^[36]研究发现西南的红山茶(*Camellia pitardii*)和板栗(*Castanea mollissima*)组成的混交经济林可以合理分配利用土壤水资源,发挥其生态经济效益;Liu 等^[8]指出干旱胁迫前后,混交林内侧柏和栓皮栎通过“错位”利用水分利用来源来提高水分利用效率,增强环境适应性,类似的例子在黄土高原的沙蒿(*Artemisia ordosica*)与沙柳(*Salix psammophila*)、柠条等物种组成的群落结构中得到了验证^[6]。在本研究中,麻栎生态位宽度受降雨影响较小,而马尾松生态位宽度受降雨影响较大,表明二者的水分利用对降水的适应性不同,进一步证实了前人的研究^[9]。原因可能是麻栎根系的垂直分布较广,雨后仍然可以从多个土层吸收水分^[20]。PS 指数可以反映不同树种对同一深度土壤水的利用状况,在未发生降雨事件时,锐齿栎-麻栎林的 PS 指数为 77.3%,表明二者间的水分竞争较弱,是比较适宜的搭配树种。而马尾松-麻栎林在降雨前后对同一水源的利用比例相近,表现出明显的水分竞争关系。受全球气候变化影响,未来暖干化的频率和强度可能会逐渐增加,这加剧了植物水分胁迫的风险,严重影响到森林生态系统安全。因此,在未来的森林经营管理中,必须考虑物种的水分利用特性和土壤特性,引入具有互补利用水分特征的树种组合,以实现秦岭地区物种多样性和植被恢复的可持续性。

由于降水-土壤水-木质部水的循环是一个复杂的过程,本研究仅从同位素视角阐述秦岭南麓典型植物下水分利用来源在降水前后的差异,借助水文生态位指标探讨不同植物间的水分竞争与互补关系,但是尚未揭示不同植物水分利用的季节性差异及其与植物的生理生态调节机制,后期应将植物水分策略与植物生理生态过程综合考虑,以深入探讨气候变化对植物水分利用策略的影响,从而为秦岭地区造林树种的优化、配置和森林的可持续管理提供可靠的决策支持。

4 结论

在秦岭,锐齿栎、马尾松和麻栎不同植物的水分利用模式有明显差异,在降水前后表现出不同的水分利用策略。麻栎会根据自身需水状态来调节利用不同土层上的水分,以维持自身的生长发育。锐齿栎林在雨前和降雨之后水分利用来源有所变化,但是降雨后的水分利用来源受降雨量的影响较小。马尾松林在降水前和小雨后偏向利用浅层土壤水,对单一水源依赖较高,仅在大雨后调节水分利用方式。从水文生态位角度来看,在无雨条件下,锐齿栎-麻栎混交林是比较适宜的搭配树种,二者对同一土层上的水分的竞争相对较弱,而马尾松、麻栎在降雨前后的水分利用策略相似,表现出明显的水分竞争关系。在后期森林经营管理中,建议优先选择具有水分互补利用的物种配置,以实现植被恢复的可持续性。此外,在极端气候变化背景下,未来应进一步综合考虑植物水分策略与植物生理生态过程,深入探讨气候变化对植物水分利用策略的影响,从而为秦岭地区造林树种的优化和森林的可持续管理提供决策支持。

参考文献(References):

- [1] Kang X, Liu T X, Hao L N, He C, Duan L M, Wu R, Wang G L, Singh V P. Variation in water use patterns of three typical plants in a dune-meadow cascade ecosystem of the Horqin Sandy Land: Implications from stable isotope compositions. *Agricultural Water Management*, 2024, 298: 108854.
- [2] Han L, Liu L L, Peng L, Wang N N, Zhou P. Mixing of tree species with the same water use strategy might lead to deep soil water deficit. *Forest Ecology and Management*, 2023, 534: 120876.
- [3] Zhang Z Q, Zhang L, Xu H, Creed I F, Blanco J A, Wei X H, Sun G, Asbjornsen H, Bishop K. Forest water-use efficiency: Effects of climate change and management on the coupling of carbon and water processes. *Forest Ecology and Management*, 2023, 534: 120853.
- [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. *Forest Ecology and Management*, 2023, 539: 121017.
- [5] Shi P J, Gai H Q, Liu W Z, Li Z. Links of apple tree water uptake strategies with precipitation and soil water dynamics in the deep loess deposits. *Journal of Hydrology*, 2023, 623: 129829.
- [6] Zhao Y, Wang L, Chun K P, Ziegler A D, Evaristo J. Dynamic hydrological niche segregation: How plants compete for water in a semi-arid ecosystem. *Journal of Hydrology*, 2024, 630: 130677.
- [7] Feng Y H, Schmid B, Loreau M, Forrester D I, Fei S L, Zhu J X, Tang Z Y, Zhu J L, Hong P B, Ji C J, Shi Y, Su H J, Xiong X Y, Xiao J, Wang S P, Fang J Y. Multispecies forest plantations outyield monocultures across a broad range of conditions. *Science*, 2022, 376 (6595): 865-868.
- [8] Liu Z Q, Ye L M, Jiang J, Liu R L, Xu Y K, Jia G D. Increased uptake of deep soil water promotes drought resistance in mixed forests. *Plant, Cell & Environment*, 2023, 46(11): 3218-3228.
- [9] Chen Z X, Wang G H, Yang X L, Li Z F, Shen Y Y. Water competition among the coexisting *Platycladus orientalis*, *Prunus davidiana* and *Medicago sativa* in a semi-arid agroforestry system. *Agricultural Water Management*, 2023, 279: 108206.
- [10] Herberich M M, Gayler S, Anand M, Tielbörger K. Hydrological niche segregation of plant functional traits in an individual-based model. *Ecological Modelling*, 2017, 356: 14-24.
- [11] 雷自然, 王欣, 余新晓, 贾国栋. 庐山针阔混交林优势种水分利用来源季节变化及对降水的响应. *应用生态学报*, 2024, 35(4): 886-896.
- [12] Huo G, Gosme M, Gao X, Dupraz C, Yang J, Zhao X. Dynamics of interspecific water relationship in vertical and horizontal dimensions under a dryland apple-*Brassica* intercropping system: Quantifying by experiments and the 3D Hi-sAFé model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 310: 108620.
- [13] Gao X D, Liu Z P, Zhao X N, Ling Q, Huo G P, Wu P T. Extreme natural drought enhances interspecific facilitation in semiarid agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 444-453.
- [14] 户红红, 陈进豪, 牟洋, 方薇, 匡媛媛, 范弢. 滇东南岩溶山地不同恢复模式云南松水分利用策略的差异. *西北林学院学报*, 2021, 36(1): 37-44.
- [15] 杨菲, 林毅雁, 陈立欣, 韩璐, 吴应明, 喻雅洁. 晋西黄土区油松和刺槐 2 种人工林内乔灌优势种的土壤水分利用及水分生态位特征. *林业科学*, 2022, 58(6): 1-12.
- [16] Wu J, Zeng H, Zhao F, Chen C, Singh A K, Jiang X, Yang B, Liu W. Plant hydrological niches become narrow but stable as the complexity of interspecific competition increases. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 320: 108953.
- [17] 雷瑞德. 秦岭火地塘林区华山松林水源涵养功能的研究. *西北林学院学报*, 1984(1): 19-34.
- [18] 李君轶, 傅伯杰, 孙九林, 洪增林, 张百平, 王晓峰, 白红英, 王飞, 赵振斌, 曹小曙. 新时期秦岭生态文明建设: 存在问题与发展路径. *自然资源学报*, 2021, 36(10): 2449-2463.
- [19] 王作泉, 贺康宁. 祁连山东部地区不同林分水源涵养能力综合评估. *生态学报*, 2024, 44(17): 7662-7672.
- [20] 张岁梦, 叶丽敏, 周肄智, 王晓霞, 许元科, 姜姜, 刘自强. 南方丘陵区马尾松-麻栎群落水分利用来源及其影响因素. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1729-1736.
- [21] 刘雨, 高光耀, 李宗善, 王聪, 田立德. 内蒙古荒漠草原植物水分利用特征差异及对环境因子的响应. *生态学报*, 2023, 43(19): 7924-7935.
- [22] 陈晓莹, 陈林, 杨新国, 李敏岚, 余殿, 宋乃平, 陈应龙. 荒漠草原不同功能群优势植物的水分利用特征. *应用生态学报*, 2024, 35(8): 2119-2130.
- [23] He X F, Hui D F, Liu H, Wang F M, Yao K C, Lu H F, Ren H, Wang J. Responses of plant water uptake sources to altered precipitation patterns in a tropical secondary forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 355: 110138.
- [24] 王阿晴, 朱雅娟, 马媛, 蔺方春, 刘怀远, 李星. 乌兰布和沙漠两个沙冬青群落的水分来源差异. *应用生态学报*, 2024, 35(7): 1762-1770.
- [25] 王卓娟, 宋维峰, 吴锦奎. 哈尼梯田水源区典型树种西南山茶水分利用特征研究. *亚热带水土保持*, 2022, 34(2): 1-7.
- [26] 万彦博, 师庆东, 戴岳, 李涛, 彭磊, 李浩. 沙漠腹地天然绿洲不同林龄胡杨水分利用来源. *应用生态学报*, 2022, 33(2): 353-359.
- [27] 李旭, 牛耀彬, 荀梦瑶, 金俊逸, 李娜艳, 唐亚坤, 陈云明. 黄土丘陵区优势造林树种水分来源对季节性干旱的响应. *生态学报*, 2022, 42(10): 4101-4112.
- [28] Liu Z Q, Jia G D, Yu X X, Lu W W, Zhang J M. Water use by broadleaved tree species in response to changes in precipitation in a mountainous area of Beijing. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 132-140.
- [29] Wang J, Fu B J, Wang L X, Lu N, Li J Y. Water use characteristics of the common tree species in different plantation types in the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 288: 108020.
- [30] 吴应明, 韩璐, 刘柯言, 胡旭, 付照琦, 陈立欣. 晋西黄土区不同土壤水分条件下刺槐和侧柏人工林的水分利用来源. *应用生态学报*, 2023, 34(3): 588-596.
- [31] Chang E H, Li P, Li Z B, Xiao L, Zhao B H, Su Y Y, Feng Z H. Using water isotopes to analyze water uptake during vegetation succession on abandoned cropland on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2019, 181: 104095.
- [32] Zwetsloot M J, Bauerle T L. Repetitive seasonal drought causes substantial species-specific shifts in fine-root longevity and spatio-temporal production patterns in mature temperate forest trees. *New Phytologist*, 2021, 231(3): 974-986.
- [33] Yang B, Wen X F, Sun X M. Seasonal variations in depth of water uptake for a subtropical coniferous plantation subjected to drought in an East Asian monsoon region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 201: 218-228.
- [34] Forrester D I. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: From pattern to process. *Forest Ecology and Management*, 2014, 312: 282-292.
- [35] Wang P Y, Liu W J, Zhang J L, Yang B, Singh A K, Wu J, Jiang X J. Seasonal and spatial variations of water use among riparian vegetation in tropical monsoon region of SW China. *Ecophysiology*, 2019, 12(4): e2085.
- [36] Dai J J, Zhang X P, Wang L, Wang R, Luo Z D, He X G, Rao Z G. Water stable isotope characteristics and water use strategies of co-occurring plants in ecological and economic forests in subtropical monsoon regions. *Journal of Hydrology*, 2023, 621: 129565.