

荒漠—绿洲过渡带多枝怪柳和白梭梭水分溯源研究

祖姆热提·于苏甫江^{1,2}, 董正武^{1,2}, 刘隋赞昊¹, 叶茂³, 马晓东¹, 苏志豪¹

(1.新疆师范大学生命科学学院, 乌鲁木齐 830054; 2.新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室, 乌鲁木齐 830054; 3.新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘要:以古尔班通古特沙漠西南缘荒漠—绿洲过渡带的多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)和白梭梭(*Haloxylon persicum*)为研究对象,通过分析植物木质部水与各潜在水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,结合 MixSIAR 模型,解析不同群落中多枝怪柳和白梭梭的水分来源及对各水源的利用比例。结果表明:(1)多枝怪柳和白梭梭灌丛下 0—60 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化幅度较大,随土层深度的增加 $\delta^{18}\text{O}$ 值趋于稳定,说明表层土壤受外界环境影响较大。(2)在多枝怪柳和白梭梭共生群落中,多枝怪柳在整个生长季主要利用 300—500 cm 土层土壤水,而白梭梭在春、秋季主要利用 60 cm 土层以下土壤水,且对各层土壤水的利用较为均匀,夏季主要获取 0—60 cm 土层土壤水,且利用比例高达 88.0%。表明多枝怪柳和白梭梭水分利用策略存在水文生态位的分离,有利于其在水分亏缺的条件下合理利用有限的水资源;多枝怪柳在单一群落和共生群落中具有相似的水分利用来源,主要获取稳定的深层土壤水,反映出多枝怪柳根系吸水对外界环境的波动不敏感,无明显的季节性耗水变化。(3)单一白梭梭群落在春季对各层土壤水的利用较为均匀,夏季主要吸收 300—500 cm 土层土壤水,利用比例高达 76.4%,而秋季主要利用 60—300 cm 土层土壤水。人工白梭梭群落在春、夏季主要利用 0—60 cm 土层土壤水,贡献率分别为 64.2%, 80.6%;而秋季主要吸收 120—300 cm 土层土壤水,利用比例高达 93.9%。表明自然生长的白梭梭具有相对较宽的水源范围,反映出其对干旱环境较强的适应能力;而人工种植白梭梭则对降水敏感,在水分利用方面表现出机会主义特性。

关键词:多枝怪柳; 白梭梭; 稳定氧同位素; 水分来源; MixSIAR 模型

中图分类号:Q948.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2022)06-0213-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.027

Analysis of Water Sources in *Tamarix ramosissima* and *Haloxylon persicum* Communities in the Desert—oasis Transition Zone

ZUMRAT · Yusufjan^{1,2}, DONG Zhengwu^{1,2}, LIU Suiyunhao¹, YE Mao³, MA Xiaodong¹, SU Zhihao¹

(1.College of Life Sciences, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054;

2.Xinjiang Key Laboratory of Special Species Conservation and Regulatory Biology, Urumqi 830054; 3.College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054)

Abstract: *Tamarix ramosissima* and *Haloxylon persicum* in the desert-oasis transition zone of the southwest edge of the Gurbantunggut Desert were used as research objects, and the $\delta^{18}\text{O}$ values of plant xylem water and potential water sources were analyzed in combination with the MixSIAR model, and the water sources and utilization ratio of each water source of *T. ramosissima* and *H. persicum* in different communities were analyzed. The results showed that: (1) The $\delta^{18}\text{O}$ values of soils in the 0—60 cm layer under *T. ramosissima* and *H. persicum* thickets varied widely, and the $\delta^{18}\text{O}$ values tended to be stable with the increasing of soil depth, indicating that the surface soil was greatly affected by the external environment. (2) In the symbiotic communities of *T. ramosissima* and *H. persicum*, *T. ramosissima* mainly used soil water in the 300—500 cm soil layer throughout the growing season, and *H. persicum* mainly used soil water below the 60 cm soil layer in spring and autumn, and used soil water in each layer more evenly. It mainly obtained soil water in the 0—60 cm soil layer in summer, and the utilization ratio was as high as 88.0%. It showed that there was ecohydrologic niche separation of water use strategies between *T. ramosissima* and *H.*

收稿日期:2022-04-15
资助项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01B71);新疆师范大学优秀青年教师科研启动基金项目(XJNU202011);新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室招标项目(XJDX414-2021-01)
第一作者:祖姆热提·于苏甫江(1998—),女,在读硕士研究生,主要从事荒漠植物生理生态研究。E-mail:1321768548@qq.com
通信作者:董正武(1988—),男,博士,副教授,主要从事荒漠植物水分利用及植物土壤耦合关系研究。E-mail:dongzw2018@sina.com

persicum, which was conducive to their rational use of limited water resources under water deficit conditions. *T. ramosissima* had similar water use sources in single and symbiotic communities and mainly obtained stable deep soil water, indicating that the root water absorption of *T. ramosissima* was insensitive to fluctuation of the external environment and had no obvious seasonal variation in water consumption. (3) The single *H. persicum* community made more uniform use of soil water in each layer in spring, and mainly absorbed soil water in the 300—500 cm soil layer in summer, and the utilization ratio was as high as 76.4%, while in autumn, it mainly used soil water in the 60—300 cm soil layer. Artificial *H. persicum* communities mainly utilized soil water in the 0—60 cm soil layer in spring and summer with contribution rates of 64.2% and 80.6%, respectively, while they mainly absorbed soil water in the 120—300 cm soil layer in autumn with a utilization rate of 93.9%. The result showed that the natural growing *H. persicum* had a relatively wide range of water sources, reflecting its strong adaptability to arid environments, while the artificial cultivated *H. persicum* was sensitive to precipitation and showed opportunistic characteristics in water use.

Keywords: *Tamarix ramosissima*; *Haloxylon persicum*; stable oxygen isotope; water source; MixSIAR model

在干旱荒漠区,水分是限制植物生长、发育及繁殖的主要因素^[1]。尤其在荒漠绿洲过渡带,水分决定着绿洲化和荒漠化这 2 类既对立又统一的生态环境演化过程。由于降水的稀缺性和不确定性,荒漠植物普遍处于长期或周期性的缺水状态^[2-3],导致荒漠植物的用水来源存在较大的不确定性。荒漠植物可利用的水源主要有降水、土壤水及地下水等^[4],其中,由于降水在水分运移形成土壤水及地下水过程中会发生同位素的分馏^[5],从而使各水源稳定氢氧同位素值存在一定的差异。已有研究^[6]发现,陆地植物根系吸收的水分在通过茎木质部运输到未栓化的幼嫩枝条或叶片之前一般不会发生氢氧同位素的分馏,因此,可利用氢氧稳定同位素技术探测植物的水分来源。有研究^[6]认为,部分旱生和盐生植物根系吸收水分过程中氢同位素会发生分馏,而氧同位素未发生分馏。因此,氧同位素可作为判断荒漠植物水分来源的有效工具^[7-8]。

白梭梭 (*Haloxylon persicum*) 和多枝怪柳 (*Tamarix ramosissima*) 分别属于藜科和怪柳科小乔木或灌木,具有极强的抗旱、耐高温等特性,在防风固沙、维持荒漠生态系统稳定等方面发挥着重要作用。目前关于白梭梭和多枝怪柳水分利用已有大量的研究^[4,9-13]。已有的研究^[4,14]发现,在古尔班通古特沙漠南缘地区,白梭梭春季主要利用浅层土壤水和地下水,夏季主要利用深层土壤水和地下水;多枝怪柳在整个生长季主要利用深层土壤水和地下水^[11,15-16]。然而,在古尔班通古特沙漠西南缘荒漠—绿洲过渡带,由于受全球气候变化及人类对水资源过度利用的影响,该地区降水格局发生明显的改变,且地下水位大幅下降(地下水位超过 30 m 甚至更深)^[17],多枝怪柳和白梭梭在其自然生境如何获取水分,水分来源于哪里? 不同群落中 2 种植物获取的水

源是否存在差异,尚未见报道。基于此,本文以古尔班通古特沙漠西南缘荒漠—绿洲过渡带多枝怪柳和白梭梭生长的 4 种群落(单一多枝怪柳群落、单一白梭梭群落、多枝怪柳群和白梭梭共生群落及人工白梭梭群落)为研究对象,运用氧稳定同位素技术,明晰多枝怪柳和白梭梭在不同群落的水分来源,量化其对各水源的利用比例,揭示不同群落多枝怪柳和白梭梭的水分利用策略,为干旱荒漠区生态环境的恢复与建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

古尔班通古特沙漠(84.52°—90.00°E, 44.18°—46.33°N)地处新疆维吾尔自治区准噶尔盆地中心,面积约为 5.11×10^4 km²,是中国第二大沙漠。地貌类型主要为各种类型的沙垄、沙丘链及蜂窝状沙丘。该地区年均温度约为 5~8℃,年平均降水量约为 114.89 mm,主要发生于冬季(降雪)和春季(降雨),冬季积雪厚度约为 13 cm,最厚可达 27 cm^[18]。春夏两季为风季,控制本区域的风系主要为西风气流和蒙古高压形成的西北和东北风系,起沙风速达 6 m/s,以 4~6 月最强盛,最大风速达 20 m/s。年均潜在蒸发量超过 2 000 mm,为典型温带干旱荒漠气候^[19]。除了短命和类短命植物及少数生长营养期 1 年生植物外,该地区的大多数植物为旱生和超旱生灌木^[20],主要优势植物有梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、白梭梭 (*Haloxylon persicum*)、多枝怪柳 (*Tamarix ramosissima*)、麻黄 (*Ephedra sinica*) 等。

1.2 样地选择

本研究通过野外采样、室内分析及模型分析相结合的方法,在古尔班通古特沙漠西南缘莫索湾地区,以多枝怪柳和白梭梭共生群落、单一多枝怪柳群落、

单一白梭梭群落及人工白梭梭群落为研究对象,分别选择形态、大小较为一致的灌丛各 3 个,用于定期采集土壤样品及植物样品。

1.3 样品采集

于 2021 年 5 月 3 日、7 月 12 日、9 月 4 日在古尔班通古特沙漠西南缘莫索湾沙漠研究站附近选取自然生长的单一白梭梭群落(单一白梭梭群落)、人工种植的单一白梭梭群落(人工白梭梭群落)、自然生长的单一多枝怪柳群落(单一多枝怪柳群落)及自然生长的多枝怪柳和白梭梭共生群落(多枝怪柳和白梭梭共生群落),在样株上随机选择已栓化的直径约 0.5 cm,长 3~5 cm 的枝条,迅速剥离枝条的外皮和韧皮部,保留木质部。将植物木质部样品迅速装入玻璃瓶内,拧紧瓶盖并迅速用 Parafilm 膜密封后,带回实验室放入-20℃的冰箱保存用于稳定同位素的测定。

在已选定的每个灌丛下选取 3 个样点进行土壤样品采集,运用直径为 5 cm 的土钻从表层开始,每 20 cm 为 1 层进行取样。其中人工白梭梭群落取样深度为 0—300 cm。多枝怪柳和白梭梭共生群落以及单一白梭梭群落 5 月土壤取样深度为 0—400 cm。其余群落土壤取样深度为 0—500 cm。将每层钻取的土壤样品分为 2 份:一份装入铝盒带回实验室用于土壤含水量的测定,另一份带回实验室在-20℃以下密封冷冻保存,用于土壤稳定同位素的测定。

在试验期间,运用自制的集雨装置在研究区附近的莫索湾沙漠研究站对降水进行收集,收集的降水样品立即装入特制玻璃瓶中并用封口膜密封,避免因蒸发而引起同位素含量的误差,对于冬季固态降水(降雪),则先装入密封的容器里,在室温下完全融化后,再装入水样瓶中加以密封,并记录降水日期。所有的降水样品收集后冷藏保存(2℃),用于同位素测定。

地下水样品采集于距离样区约 5 km 附近的井水,将采集的地下水装入特制玻璃瓶中并用封口膜密封,带回实验室存储于冰箱中(2℃)用于同位素测定。

1.4 样品测定与分析

所取样品在新疆师范大学新疆干旱区湖泊环境与资源实验室进行处理及测定。采集的水样均需先用孔径为 0.22 μm 的一次性针式过滤器过滤。植物样品和土壤样品采用由北京理加联合科技有限公司生产的全自动超低压无馏水分无损提取系统 LI-2100Pro 装置抽提水分,该仪器在样品水分抽提过程中不会发生同位素分馏,水分提取率在 98% 以上。抽提出的水分冷藏密封保存,等待测定。最后采用由 Los Gatos Research 公司生产的 LGR DLI-100 液态水同位素分析仪测定地下水、降水和抽提的植物木质部水和土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{R_{\text{sa}}}{R_{\text{st}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中: R_{sa} 为样品中元素的重轻同位素丰度之比($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$); R_{st} 为国际通用标准物稳定同位素丰度之比(O 稳定性同位素采用 v-SMOW)。

土壤含水量的测定:含水量测定采用烘干称重法,土壤含水量(SWC)计算公式为:

$$\text{SWC} = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_1 为烘干前铝盒加湿土的重量(g); W_2 为烘干后铝盒加干土的重量(g); W_0 为空铝盒的重量(g)。

1.4.1 直接对比法 将植物木质部水分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与各潜在水源进行对比,认为交叉点或相近区域的水源为植物主要利用的潜在水源,且二者相距越近,植物对该潜在水源吸收利用的比例越大^[21]。

1.4.2 MixSIAR 模型 贝叶斯混合模型 MixSIAR 是运用于 R 语言里的 1 个安装包,用以确定各潜在水源对植物水分的贡献率。该模型主要通过选择固定/随机效应、源数据类型、先验分布和误差项来更准确地估算源的贡献比例,融合了贝叶斯混合模型的最新成果。MixSIAR 模型输入数据包括源数据(各潜在水源的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值)、混合物数据(木质部 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值)和馏留数据,马尔科夫链蒙特卡罗(MCMC)运行步长设置为“long”,模型误差选取“Process only”,模型结果使用 Gelman 和 Geweke 诊断确定模型是否收敛,模型不收敛则增加 MCMC 运算时长(long, very long)^[22-23]。

1.4.3 水源的划分 为了便于分析与对比,本研究根据不同深度土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的相似性及变化趋势对土壤剖面进行组合分层,将潜在水源划分为 4 个:0—60 cm 土层,土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值由于降水和蒸发的作用波动最大;60—120 cm 土层,土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值季节及土层间变化相对缓和;120—300 cm 土层,土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随土层的增加而减小;300—500 cm 土层,由于受外界环境影响较小,土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随土层深度的增加趋于稳定。

土壤分层合并加权处理得 $\delta^{18}\text{O}$ 值公式为:

$$\delta_{\text{WT}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{SWC}_x \times \delta_x)}{\sum_{i=1}^n \text{SWC}_x} \quad (3)$$

式中: δ_{WT} 为土壤层合并后加权处理的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值; SWC_x 和 δ_x 分别为 x 层的土壤含水量与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

1.5 数据处理

本文运用 SPSS 26.0 对数据进行分析,使用单因素方差分析(one-way ANOVA)对不同季节各层土壤含水量、土壤水及植物木质部水同位素值差异显著性进行检验。运用 Origin 2019 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量变化

在多枝桤柳—白梭梭共生群落中,5 月,0—60 cm 土层土壤含水量偏低,约为 $(1.59\pm0.34)\%$ (图 1);60—120 cm 土层土壤含水量显著增加($p<0.05$),达到 $(5.19\pm1.84)\%$,这主要是由于冬春积雪于 3 月底全部融化,其土壤水增加主要是由于融雪水的渗透补给。120—300,300—400 cm 土层土壤含水量降低,且两者土壤含水量差异较小($p>0.05$)。7 月,0—60,60—120,120—300 cm 土层间土壤含水量差异不明显($p>0.05$);而在 300—500 cm 土层,土壤含水量随土层深度的增加显著升高,土壤含水量达到 $(7.36\pm4.35)\%$ ($p<0.05$)。9 月,由于受到强烈蒸发的影响,0—60 cm 土层土壤含水量较低 $(0.89\pm0.50)\%$,在 60—120,120—300,300—500 cm 土层土壤含水量升高,均显著高于 0—60 cm 土层($p<0.05$)。

单一多枝桤柳群落中,5 月,0—60,60—120 cm 层土壤含水量相对较高,分别为 $(4.85\pm3.09)\%$, $(4.56\pm0.38)\%$,显著高于 120—300 cm 土层土壤含水量($p<0.05$);300—500 cm 土层土壤含水量呈明显上升趋势,达到 $(7.67\pm4.24)\%$ ($p<0.05$)。7 月,0—60,60—120 cm 土层土壤含水量随土层深度的增加而增大,120—300 cm 土层土壤含水量减小;300—500 cm 土层土壤含水量明显升高,高达 $(8.00\pm4.51)\%$ ($p<0.05$)。9 月,0—60,60—120,120—300 cm 土层间土壤含水量差异较小($p>0.05$),而 300—500 cm 土层土壤含水

量显著增加,达到 $(6.78\pm3.64)\%$ ($p<0.05$)。

在单一白梭梭群落中,5 月,0—60,60—120 cm 土层土壤含水量较高,分别为 $(4.77\pm2.66)\%$, $(5.22\pm1.35)\%$;120—300 cm 土层土壤含水量显著降低($p<0.05$),300—400 cm 土层土壤含水量增大趋势不明显。7 月,0—60,60—120,120—300 cm 土层土壤含水量随深度的增加逐渐升高,土壤含水量分别为 $(1.12\pm0.31)\%$, $(2.61\pm1.09)\%$ 及 $(3.08\pm1.81)\%$;300—500 cm 土层土壤含水量显著增加,达到 $(5.31\pm3.68)\%$ ($p<0.05$)。9 月,0—60,60—120 cm 土层土壤含水量呈现上升趋势,而在 120—300 cm 层土壤含水量显著降低 $(2.62\pm1.26)\%$ ($p<0.05$);300—500 cm 土层土壤含水量明显增大,达到 $(6.79\pm2.61)\%$ ($p<0.05$)。人工白梭梭群落的土壤含水量整体保持较高水平。5 月、7 月和 9 月各土层间土壤含水量差异不显著($p<0.05$),波动范围分别为 $(4.07\pm0.47)\%\sim(5.58\pm3.55)\%$, $(6.00\pm0.65)\%\sim(3.44\pm4.29)\%$, $(5.46\pm2.25)\%\sim(7.53\pm0.30)\%$ 。

就不同季节而言,多枝桤柳—白梭梭共生群落中,0—60,60—120,120—300 cm 土层土壤含水量季节差异不显著($p>0.05$);在 300—500 cm 层,7 月土壤含水量显著高于 5 月和 9 月($p<0.05$)。在单一白梭梭群落 0—60,120—300,300—500 cm 土层土壤含水量没有明显的季节变化($p>0.05$);在 60—120 cm 土层,7 月土壤含水量显著低于 5 月和 9 月($p<0.05$);单一多枝桤柳和人工白梭梭群落土壤含水量没有明显的季节差异($p>0.05$)。

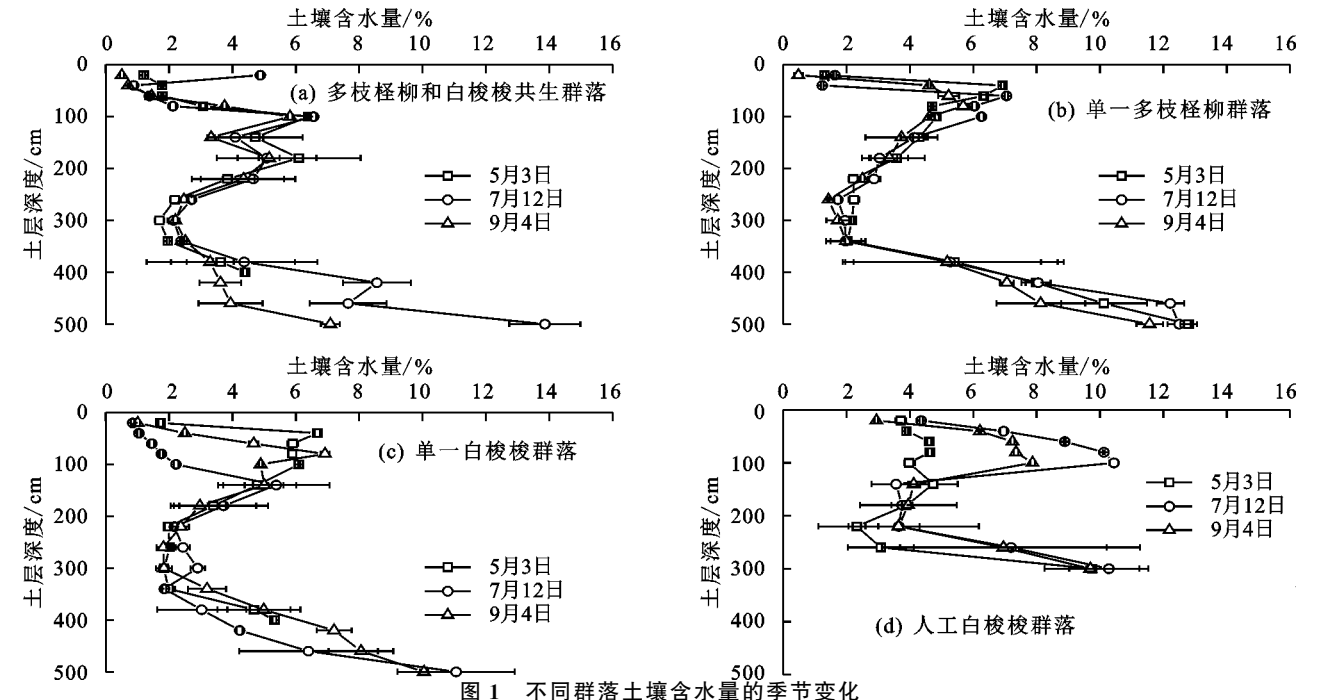


图 1 不同群落土壤含水量的季节变化

2.2 土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化特征

在多枝桤柳—白梭梭共生群落中,5 月,0—60

cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $(-0.26\pm1.10)\text{‰}$,呈富集现象;60—120,120—300 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显小

于0—60 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($p < 0.05$); 300—400 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 随土层深度的增加逐渐贫化, 并显著低于其他土层 ($p < 0.05$) (图 2)。7 月, 0—60 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值变幅较小, 波动范围 $-2.74\% \sim -2.54\%$ 。60—120, 120—300, 300—500 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值随土层深度的增加逐渐贫化。9 月, 由于干旱的加剧, 土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 0—60 cm 土层出现富集现象, 60—120 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著降低 ($p < 0.05$); 120—300, 300—500 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值随土层深度的增加进一步降低, 分别为 $(-6.75 \pm 0.43)\%$, $(-6.72 \pm 0.61)\%$ 。

单一多枝怪柳群落中, 5 月, 0—60, 60—120, 120—300 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值均随土层深度的增加呈逐渐贫化的趋势, 且各土层间土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值没有明显差异 ($p > 0.05$); 300—500 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著降低 ($p < 0.05$)。7 月, 0—60, 60—120 cm 土层间土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值变幅较小, 波动不明显; 120—300, 300—500 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著减小 ($p < 0.05$)。9 月, 0—60 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现富集, 显著高于 60—120, 120—300 cm 土层 ($p < 0.05$); 在 300—500 cm 土层, 土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值贫化程度最大 ($p < 0.05$)。

单一白梭梭群落中, 5 月, 0—60 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现富集 $[(-0.91 \pm 1.37)\%]$, 显著高于 60—120 cm 土层 $[(-2.89 \pm 0.45)\%]$ ($p < 0.05$); 120—300, 300—

400 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值随土层深度的增加逐渐贫化。7 月, 受强烈蒸发影响, 0—60 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $(-0.68 \pm 1.29)\%$, 60—120 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著降低 ($p < 0.05$); 在 120—300, 300—500 cm 土层, 随土层深度的增加土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值贫化程度较高。9 月, 0—60 cm 土层存在同位素的富集现象, 60—120, 120—300 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏低 ($p < 0.05$)。随着土层深度的增加, 土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值贫化程度明显增大 ($p < 0.05$)。

人工白梭梭群落中, 5 月, 0—60, 60—120, 120—300 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐减少, 各土层间 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在明显差异 ($p < 0.05$)。7 月, 受降雨影响, 0—60 cm 土层土壤同位素含量偏低, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $(-5.04 \pm 0.47)\%$; 60—120, 120—300 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 更为贫化, 明显低于 0—60 cm 土层 ($p < 0.05$)。9 月, 0—60, 60—120, 120—300 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值随土层深度增加逐渐降低, 各层间土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现显著差异 ($p < 0.05$)。

就不同季节而言, 在多枝怪柳和白梭梭共生群落中, 由于降水补充了 0—60 cm 土层土壤水, 7 月土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著小于 5 月和 9 月 ($p < 0.05$)。在单一多枝怪柳群落和单一白梭梭群落, 由于各月份土壤含水量间没有明显变化, 土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值间差异不显著 ($p > 0.05$)。在人工白梭梭群落中, 5 月土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著大于 7 月和 9 月的土壤 $\delta^{18}\text{O}$ ($p < 0.05$)。

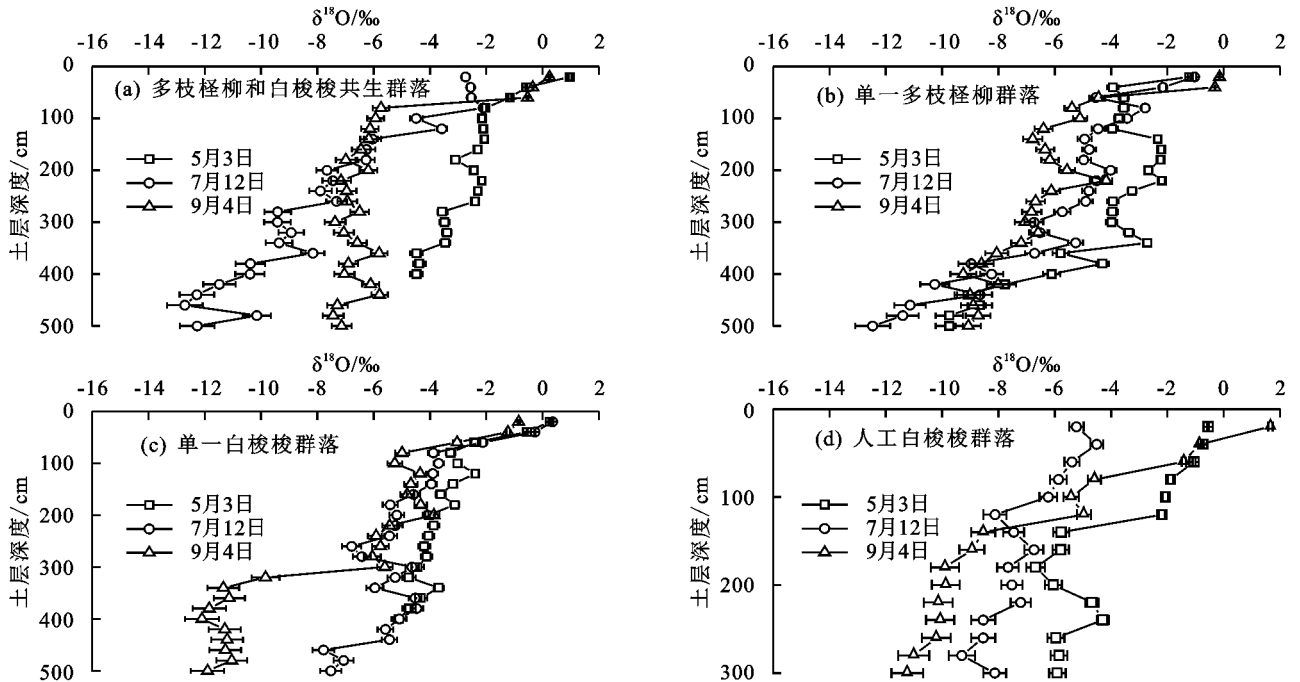


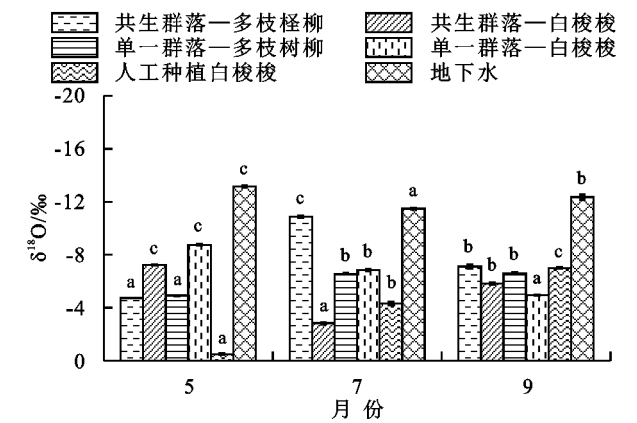
图 2 不同群落土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变化

2.3 植物木质部水和地下水的季节变化

在整个生长季, 共生群落—多枝怪柳、单一多枝怪柳群落和人工白梭梭群落木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 5 月表现出最大值, 分别为 $(-4.72 \pm 0.03)\%$, $(-4.91 \pm 0.04)\%$ 和 $(-0.48 \pm 0.07)\%$ (图 3)。共生群落—白

梭梭和单一白梭梭群落木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别在 7 月和 9 月呈现最大值, 为 $(-2.82 \pm 0.09)\%$, $(-4.94 \pm 0.06)\%$ 。单一多枝怪柳群落木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 7 月和 9 月没有明显差异 ($p > 0.05$), 其他各群落木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在各月份均呈显著差异 ($p < 0.05$)。地

下水氧同位素值表现出一定的季节性差异 ($p < 0.05$)。不同月份之间氧同位素值总体表现为 7 月最高 $[-11.47 \pm 0.08]\text{‰}$, 9 月次之 $[-12.35 \pm 0.19]\text{‰}$, 5 月最小 $[-13.16 \pm 0.09]\text{‰}$ 。



注: 柱图上方不同字母表示同一群落内的植物木质部水及地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节差异显著 ($p < 0.05$)。

图 3 不同群落植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变化

2.4 植物水源的定性分析

土壤水、木质部水同位素值主要位于当地大气降水线 ($\delta\text{D}=7.54\delta^{18}\text{O}+7.98$) 的右下方 (图 4), 较降水相对富集, 表明降水入渗过程中同位素发生了分馏。地下水氢氧同位素变化范围为: δD 为 $-71.84\text{‰} \sim -71.02\text{‰}$, 变幅为 0.82‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-13.16\text{‰} \sim -11.47\text{‰}$, 变幅为 1.69‰ 。植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 与土壤水交叉分布在大气水线下方, 表明植物主要利用土壤水。

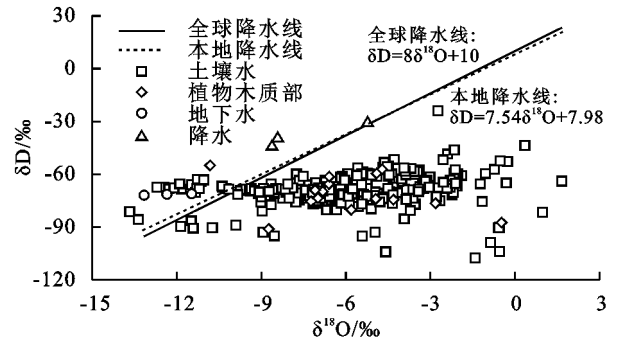


图 4 降水、土壤水、地下水、植物木质部水 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的线性回归关系

多枝桤柳和白梭梭共生群落中, 5 月, 多枝桤柳木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 360—400 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近, 白梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 300—400 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较为接近 (图 5); 推测多枝桤柳主要利用 360—400 cm 土层土壤水, 白梭梭主要利用 300—400 cm 土层土壤水。7 月, 多枝桤柳木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 380—500 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值有 3 处交点, 白梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近于 0—80 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值; 表明多枝桤柳主要利用 380—500 cm 土层土壤水, 而白梭梭可获取 0—80 cm 土层土壤水。9 月, 多枝桤柳木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 180—500 cm

土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值有多个交叉点, 白梭梭木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 80—160, 360, 420—440 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相交, 表明旱季多枝桤柳主要获取中、深层土壤水, 而白梭梭具有相对较宽的水源范围。

单一多枝桤柳群落中, 植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 5 月与 340—400 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相交, 7 月与 280—360 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值有多处交点, 9 月与 120—320 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相交; 表明多枝桤柳在 5, 7, 9 月可能分别利用 340—400, 280—360, 120—320 cm 土层土壤水。单一白梭梭群落中, 5 月, 植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 300—400 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近, 表明白梭梭可能利用深层土壤水; 7 月, 其木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 260—280, 440—500 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相交, 9 月与 80—300 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值有多处交叉; 推测白梭梭在 7 月和 9 月可能分别以 260—500, 80—300 cm 土层土壤水为主要水源。在人工白梭梭群落, 5 月和 7 月植物木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值均与 0—60 cm 土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相交, 表明白梭梭在春、夏季可能主要利用 0—60 cm 土层土壤水; 9 月, 其木质部水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 120—140 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近, 表明白梭梭可能利用中层土壤水。

2.5 植物对各水源利用的定量分析

在多枝桤柳与白梭梭共生群落中, 多枝桤柳在 5, 7, 9 月均以 300—500 cm 土层土壤水为主要水源, 利用比例分别为 56.3%, 65.6%, 53.2% (图 6); 其次利用 120—300 cm 土层土壤水, 贡献率分别为 20.1%, 19.4% 和 27.8%。白梭梭在 5 月主要利用 60—120, 120—300, 300—500 cm 土层土壤水, 利用比例分别为 26.3%, 25.2%, 36.1%; 7 月, 白梭梭增加对 0—60 cm 土层土壤水的吸收, 利用比例为 88.0%。9 月, 由于干旱的影响, 白梭梭减少对 0—60 cm 土层土壤水的利用, 增加对 60—120, 120—300, 300—500 cm 土层土壤水分的利用比例, 贡献率分别为 24.9%, 28.6%, 30.0%。单一多枝桤柳群落中, 多枝桤柳在 5, 7, 9 月主要利用 300—500 cm 土层土壤水, 利用比例分别为 58.7%, 58.3%, 68.1%。单一白梭梭群落中, 5 月, 白梭梭对各层土壤水的利用较为均匀, 各层土壤水的贡献率分别为 18.5%, 22.6%, 30.5%, 28.4%; 7 月, 其主要吸收 300—500 cm 土层土壤水, 利用比例为 76.4%; 9 月, 白梭梭主要获取 60—120 cm 土层土壤水, 利用比例为 46.1%; 其次利用 0—60, 120—300, 300—500 cm 土层土壤水, 分别占其水分来源的 23.3%, 19.5%, 11.2%。在人工白梭梭群落, 5, 7 月主要利用 0—60 cm 土层土壤水, 贡献率分别为 64.2%, 80.6%; 9 月主要获取 120—300 cm 土层土壤水, 利用比例为 93.9%。

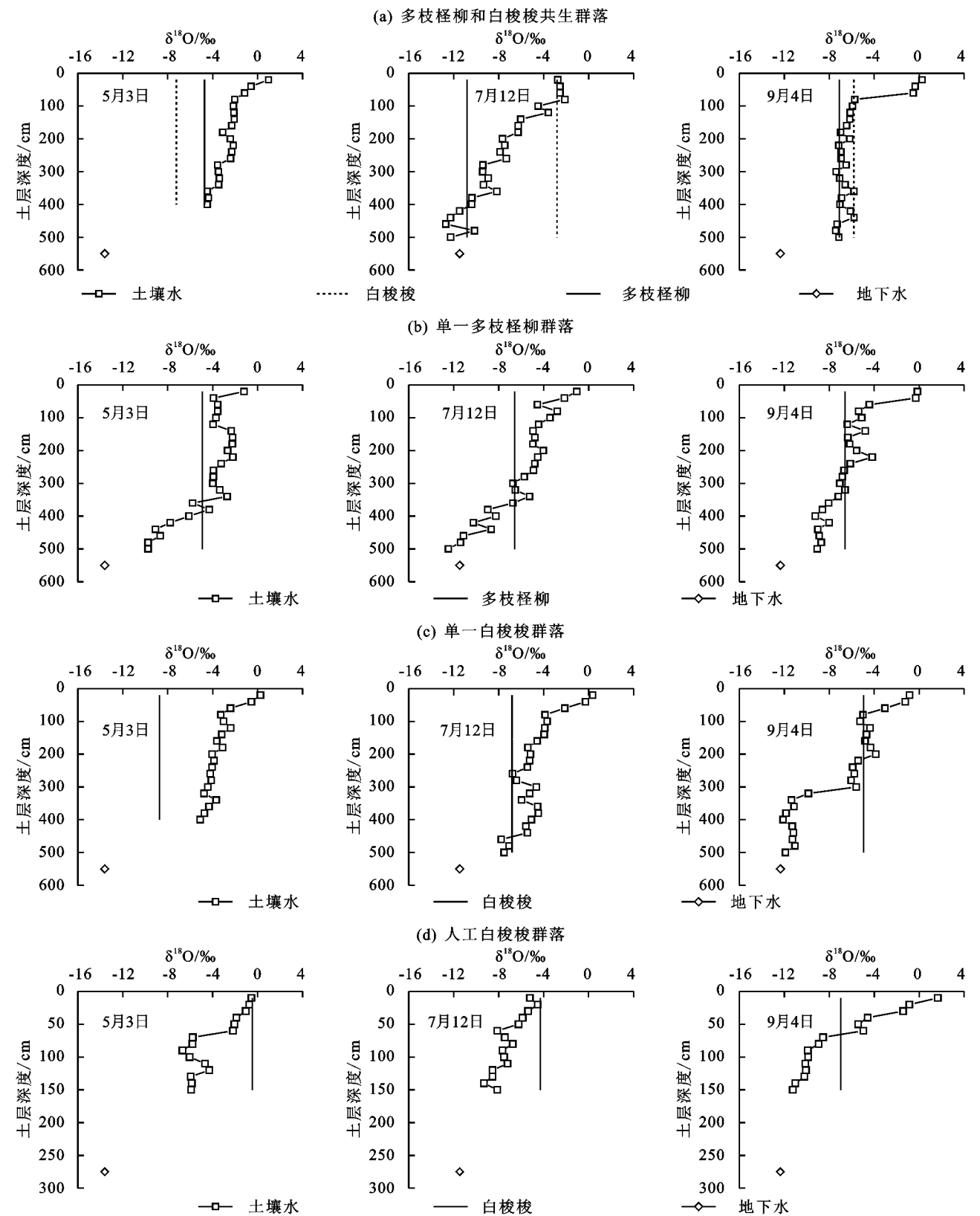


图 5 土壤水、地下水与植物(木质部)水分 $\delta^{18}\text{O}$ 值季节变化特征

3 讨论

3.1 多枝桤柳和白梭梭土壤同位素变化特征

土壤水是当年降水和原有土壤水的混合,其主要受降水、地表蒸发、土壤类型的差异等多种因素影响^[10]。本研究发现,2种植物在4个群落的土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值随采样时间和土层深度的变化而变化。不同土壤质地导

致不同群落稳定同位素特征及土壤含水量的差异(图1、图2)。在单一多枝桤柳群落中,春季0—60 cm土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值的富集效应并不明显,这可能与多枝桤柳群落表层土壤存在黏土有关,春季积雪融化,温度较低,蒸发较弱,使黏土颗粒与水分结合较为紧密^[24],从而使稳定氧同位素分馏不明显。而单一白

梭梭群落浅层土壤沙粒含量较高,大孔隙较多,且受夏季强烈蒸发作用的影响,导致在夏季降雨后该群落表层土壤仍存在重同位素富集的现象^[8,25]。

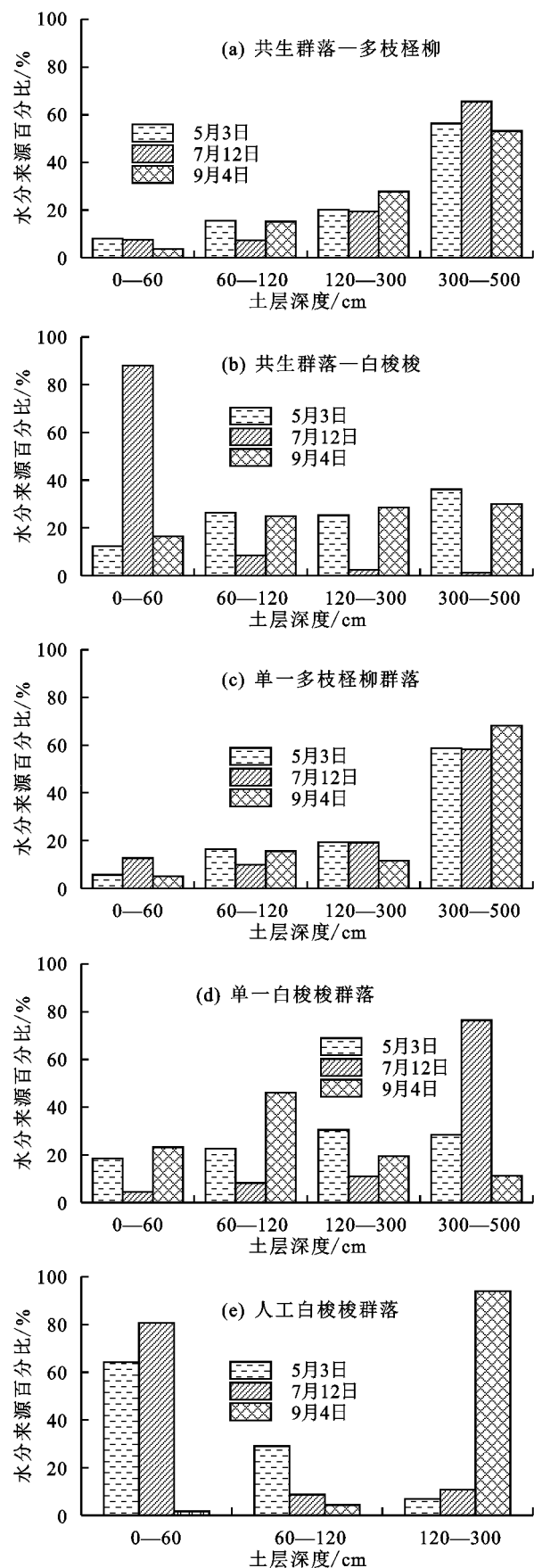


图 6 不同群落中植物对不同水分来源的利用比例

在春、秋季,多枝怪柳和白梭梭共生群落及人工白梭梭群落 0—60 cm 层土壤氧同位素富集效应明显,这可能是由于该地区干旱少雨,蒸发作用强烈,导致表层土壤水的同位素产生分馏,轻同位素发生分馏而重同位素在地表富集^[26],这与张文龙等^[1]对石羊河下游人工梭梭 0—60 cm 土层根际土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究结果相似。而夏季 0—60 cm 土层土壤未发生重同位素富集现象,这可能与 7 月采样前 1 天发生降雨事件有关,从而使降水与表层土壤水进行混合,导致表层土壤有较低的稳定氧同位素值,表明表层土壤稳定氧同位素值易受外界环境的影响。

3.2 多枝怪柳和白梭梭的水分利用特征

在干旱荒漠区,植物对土壤水的利用主要取决于其活性根系的分布范围^[27]。怪柳为深根系植物,其根系主要分布于深层土壤中^[28-29]。本研究中,多枝怪柳在共生群落和单一群落中均主要利用深层土壤水(图 5, 6),这与陈小丽等^[30]对黑河下游怪柳以深层土壤水为主要水源的结论较为一致,表明多枝怪柳根系吸水对外界环境的波动不敏感,未表现出明显的季节性耗水变化。在准噶尔盆地东南缘,多枝怪柳主要利用深层土壤水和地下水^[16]。然而,本研究认为多枝怪柳未对地下水进行利用,这主要是由于该地区地下水埋深较深,目前已超过 30 m,植物根系可能无法达到地下水,表明当地下水埋藏较深时,多枝怪柳主要获取深层土壤水作为生长发育的稳定水源,从而有效避免植物因干旱胁迫而影响其正常生长。

在荒漠地区,同一群落中的植物之间存在水分竞争的现象^[15]。本研究发现,在春、秋季,共生群落中的白梭梭减少了对深层土壤水的利用,而主要利用浅、中层土壤水,表明在土壤水分充足时,白梭梭可以通过增加对多层土壤水的利用来减弱植物间的水分竞争。夏季,白梭梭以浅层土壤水为主要水源,这是由于白梭梭根系发达,具有迂回生长的特点^[31],当降水发生时白梭梭能够获取由降水补充的浅层土壤水,与多枝怪柳形成水文生态位的分离,这也反映出白梭梭可利用其二态型根系系统调节自身的生长发育,从而最大程度地获取生长所需的水分,以确保在长期的水资源竞争环境下能够与其他物种共存。单一白梭梭群落在夏季主要利用 300—500 cm 深层土壤水,而人工白梭梭群落在春、夏季以 0—60 cm 土层土壤水为主要水源。由此可见,当不存在水分竞争时,自然生长的白梭梭趋向于吸收更稳定的土壤水,表现出积极进取的水分利用策略。而人工白梭梭群落在水分较为充足的湿季及降水事件发生时能够及时响应,并对降水更为敏感,在水源利用方面呈现出一定程度的机会主义特性。

4 结 论

(1)多枝怪柳和白梭梭灌丛下 0—60 cm 土层土壤 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化幅度较大,且随土层深度的增加 $\delta^{18}\text{O}$ 值趋于稳定,说明表层土壤受外界环境影响较大。

(2)在多枝怪柳和白梭梭共生群落中,多枝怪柳在整个生长季主要利用 300—500 cm 土层土壤水,而白梭梭在春、秋季主要利用 60 cm 土层以下土壤水,且对各层土壤水的利用较为均匀,夏季主要获取 0—60 cm 土层土壤水,利用比例高达 88.0%,表明多枝怪柳和白梭梭水分利用策略存在水文生态位的分离,有利于其在水分亏缺的条件下合理利用有限的水资源。多枝怪柳在单一群落和共生群落中具有相似的水分利用来源,主要获取稳定的深层土壤水,反映出多枝怪柳根系吸水对外界环境的波动不敏感,无明显的季节性耗水变化。

(3)单一白梭梭群落在春季对各层土壤水的获取较为均匀,夏季主要吸收 300—500 cm 土层土壤水,利用比例高达 76.4%,而秋季主要利用 60—300 cm 土层土壤水。人工白梭梭群落在春、夏季主要利用 0—60 cm 土层土壤水,贡献率分别为 64.2%,80.6%;而秋季主要吸收 120—300 cm 土层土壤水,利用比例高达 93.9%。表明自然生长的白梭梭具有相对较宽的水源范围,反映出其对干旱环境具有较强的适应能力,而人工白梭梭群落则对降水较为敏感,在水分利用方面表现出机会主义特性。

参考文献:

[1] 张文龙,赵鹏,朱淑娟,等.石羊河下游人工梭梭水分利用策略季节变化[J].草业科学,2021,38(5):880-889.

[2] Grossiord C, Sevanto S, Limousin J M, et al. Manipulative experiments demonstrate how long-term soil moisture changes alter controls of plant water use[J]. Environmental and Experimental Botany,2018,152:19-27.

[3] 许浩,张希明,闫海龙,等.塔克拉玛干沙漠腹地多枝怪柳茎干液流及耗水量[J].应用生态学报,2007,18(4):735-741.

[4] 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.

[5] 王家鑫,张明军,张宇,等.基于稳定同位素示踪的黄河兰州段河漫滩土壤水特征分析[J].干旱区地理,2021,44(5):1449-1458.

[6] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition[J]. Plant, Cell and Environment,1992,15(9):1073-1082.

[7] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes[J]. Plant and Soil,2007,291(1/2):93-107.

[8] 张宇,张明军,王圣杰,等.基于稳定氧同位素确定植物水分来源不同方法的比较[J].生态学杂志,2020,39(4):1356-1368.

[9] 李宁,周海,任珩,等.不同地下水位处梭梭(*Haloxylon ammodendron*)水分来源特征[J].中国沙漠,2021,41(4):79-86.

[10] 苏文旭,贾德彬,高瑞忠,等.浑善达克沙地南缘人工固沙植被水分利用特征[J].应用生态学报,2021,32(6):1980-1988.

[11] 孟德坤,闵孝君,臧永新,等.塔克拉玛干沙漠南缘人工防护林和自然群落多枝怪柳叶片养分特征与水分利用策略[J].生态学杂志,2019,38(11):3245-3253.

[12] 李彦,许皓.梭梭对降水的响应与适应机制:生理、个体与群落水平碳水平衡的整合研究[J].干旱区地理,2008,31(3):313-323.

[13] 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.

[14] 戴岳,郑新军,唐立松,等.古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态[J].植物生态学报,2014,38(11):1214-1225.

[15] 麦尔哈巴·尼加提,比拉力·依明,师庆东,等.沙漠腹地达里雅布依绿洲怪柳幼苗的水分利用来源[J].干旱区资源与环境,2021,35(8):159-166.

[16] 周海,郑新军,唐立松,等.准噶尔盆地东南缘多枝怪柳、白刺和红砂水分来源的异同[J].植物生态学报,2013,37(7):665-673.

[17] 杨艳凤,周宏飞,徐利岗.古尔班通古特沙漠原生梭梭根区土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2011,22(7):1711-1716.

[18] 董正武,李生宇,毛东雷,等.古尔班通古特沙漠西南缘怪柳沙包土壤粒度分布特征[J].水土保持学报,2021,35(4):64-72.

[19] 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.

[20] 蒋超亮,吴玲,安静,等.古尔班通古特沙漠旱生植物时空分布特征[J].生态学报,2019,39(3):936-944.

[21] 傅思华,胡顺军,杨涛,等.古尔班通古特沙漠南缘地下水深埋区幼龄梭梭春夏季土壤水分利用动态[J].水土保持学报,2016,30(5):230-234.

[22] 周艳清,高晓东,王嘉昕,等.柴达木盆地灌区枸杞根系水分吸收来源研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(2):400-409.

[23] 曾祥明,徐宪立,钟飞霞,等.MixSIAR 和 IsoSource 模型解析植物水分来源的比较研究[J].生态学报,2020,40(16):5611-5619.

[24] 郑博文,胡顺军,周智彬,等.古尔班通古特沙漠南缘风沙土土壤水分特征与毛管水最大上升高度[J].干旱区地理,2020,43(4):1059-1066.

[24] Bai J J, YU Y, Di L P. Comparison between TVDI and CWSI for drought monitoring in the Guanzhong Plain, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(2): 389-397.

[25] 张巧凤,刘桂香,于红博,等.锡林郭勒草原土壤含水量遥感反演模型及干旱监测[J].草业学报,2017,26(11):1-11.

[26] 李虹雨,马龙,刘廷玺,等.1951—2014 年内蒙古地区气温、降水变化及其关系[J].冰川冻土,2017,39(5): 1098-1112.

[27] Jackson R, Idso S, Reginato R, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133-1138.

[28] Jackson R, Kustas W, Choudhury B. A reexamination of the crop water stress index[J]. Irrigation Science, 1988, 9(4): 309-317.

[29] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116(1): 770-799.

[30] 张强,邹旭恺,肖风劲,等.GB/T 20481—2017 气象干旱等级[M].北京:中国标准出版社,2017.

[31] 阿迪来·乌甫,玉素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,等.基于 MODIS 数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析[J].地理研究,2017,36(7):1245-1256.

[32] 赵舒怡,宫兆宁,刘旭颖.2001—2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J].地理学报,2015,70(5):717-729.

[33] 张翔,朱晓昱,沈贝贝,等.呼伦贝尔植被蒸散发时空变化研究[J].中国农业资源与区划,2020,41(4):308-316.

[34] 张煦庭,潘学标,徐琳,等.基于降水蒸发指数的 1960—2015 年内蒙古干旱时空特征[J].农业工程学报,2017, 33(15):190-199.

[35] 刘继遥,春喜,梁文军,等.基于 SPI 指数的内蒙古干旱时空分布特征研究[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2016,45(4):533-539.

[36] 崔俊杰,白洁,郑磊,等.新疆地区遥感、融合和陆面模式模拟的蒸散产品的不确定性分析[J].干旱区研究, 2018,35(3):597-605.

[37] 黄文琳,张强,孔冬冬,等.1982—2013 年内蒙古地区植被物候对于干旱变化的响应[J].生态学报,2019,39(13): 4953-4965.

(上接第 221 页)

[25] 程立平,王亚萍,刘沛松,等.基于稳定同位素的黄土塬区村庄涝池对地下水补给的定量分析[J].水土保持通报,2021,41(5):60-66.

[26] 万彦博,师庆东,戴岳,等.沙漠腹地天然绿洲不同林龄胡杨水分利用来源[J].应用生态学报,2022,33(2): 353-359.

[27] 李涛,彭丽萍,师庆东,等.新疆准噶尔盆地不同径级梭梭和白梭梭的水分来源[J].生态学报,2020,40(6): 2099-2110.

[28] Wu X, Zheng X J, Yin X W, et al. Seasonal variation

in the groundwater dependency of two dominant woody species in a desert region of Central Asia[J]. Plant and Soil, 2019, 444(10): 39-55.

[29] 王勇,赵成义,王丹丹,等.塔里木河流域不同林龄胡杨与怪柳的水分利用策略研究[J].水土保持学报,2017, 31(6):157-163.

[30] 陈小丽,陈亚宁,陈亚鹏,等.黑河下游荒漠河岸林植物水分利用关系研究[J].中国生态农业学报,2014,22(8):972-979.

[31] 赵之旭,陈玉桂,邱池美,等.腾格里沙漠沙生植物梭梭根系的研究[J].陕西林业科技,2013,1(3):6-8.

(上接第 230 页)

[30] Bai J H, Deng W, Zhu Y M, et al. Spatial variability of nitrogen in soils from land/inland water ecotones [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35(5/6): 735-749.

[31] 董乙强,孙宗玖,安沙舟,等.禁牧对中度退化伊犁绢蒿荒漠草地土壤养分的影响[J].草地科学,2016,33(8): 1460-1468.

[32] 邵新庆,石永红,韩建国,等.典型草原自然演替过程中土壤理化性质动态变化[J].草地学报,2008,16(6):566-571.

[33] 张丽,张磊,鲁剑巍,等.添加尿素和秸秆对三熟制水旱轮作土壤各形态氮素的影响[J].土壤,2017,49(1):13-18.

[34] 蒋跃利,赵彤,闫浩,等.宁南山区不同草地土壤原位矿

化过程中氮素的变化特征[J].环境科学,2014,35(6): 2365-2373.

[35] 高丽娟,吕光辉,王芸,等.艾比湖地区盐生植物群落土壤氮素的垂直分布特征[J].干旱区研究,2014,31(1): 51-56.

[36] 张雪梅.干旱区盐生植物的土壤氮素特征研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2011.

[37] 张斌,张福韬,陈曦,等.土壤有机质周转过程及其矿物和团聚体物理调控机制[J].土壤与作物,2022,11(3): 235-247.

[38] 赵丹阳,毕华兴,侯贵荣,等.晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2021,35(1):181-187.