

DOI: 10.20103/j.stxb.202407111626

张雪, 田丽慧, 杨宗雨, 李石开, 范明彦, 杨帅. 西宁市区不同配置模式人工林地树木的水分利用特征. 生态学报, 2025, 45(13): - .
Zhang X, Tian L H, Yang Z Y, Li S K, Fan M Y, Yang S. Characteristics of water uses of trees in plantations with different configuration patterns in Xining City. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

西宁市区不同配置模式人工林地树木的水分利用特征

张 雪^{1,2}, 田丽慧^{1,*}, 杨宗雨¹, 李石开^{1,2}, 范明彦^{1,2}, 杨 帅²

1 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016

2 青海大学农牧学院, 西宁 810016

摘要:水是植物生存最主要的限制因子,对城市植物水分利用的研究已成为城市生态保护和植被建设的关键。以青海省西宁市青海大学校园林地青杨(*Populus cathayana*)纯林、青海云杉(*Picea crassifolia*)纯林、青杨—青海云杉混交林和青杨—暴马丁香(*Syringa reticulata*)—榆叶梅(*Amygdalus triloba*)混交林为研究对象,基于氢氧稳定同位素技术结合 MixSIAR 模型,分析植物生长季(5—10月)的水分利用来源。研究表明:2023年5—10月研究区的降水量为406.88mm,占全年总降水量(454.7mm)的89%。在生长季初期,纯林中的青杨和青海云杉主要利用60cm深度以上的土壤水,利用比例分别为(70.58±58.15)%和(72.21±61.33)%。混交林中的树种对各深度层次的土壤水均有利用。进入生长季中期,降水增加,土壤含水量增加,青杨、青海云杉和暴马丁香主要利用表层土壤水,但MPSA的榆叶梅仍利用各层土壤水。生长季末期,降水减少,土壤含水量保持较为稳定的状态(13.61±0.94)%,纯林中的青杨和青海云杉以中层20—60cm土壤水作为主要水源,利用比例分别为(35.90±29.63)%和(43.17±33.73)%,混交林的青杨和青海云杉及暴马丁香转而利用中层和深层土壤水,而榆叶梅仍对各层土壤水均有利用。以上结果表明,植物的水分来源具有明显的季节变化特征,同种植物在不同配置模式的林地(纯林和混交林)中水分利用格局存在差异。林地配置模式改变了种间和种内对水分来源的竞争效应,混交林中不同物种间的水分竞争与纯林中同一物种个体间的水分竞争具有不同的效应。植物对土壤水分的利用模式与其林地配置模式、根系分布和下方土壤含水量密切相关。
关键词:季节变化;稳定氢氧同位素;校园绿地;植物水分来源;不同配置模式

Characteristics of water uses of trees in plantations with different configuration patterns in Xining City

ZHANG Xue^{1,2}, TIAN Lihui^{1,*}, YANG Zongyu¹, LI Shikai^{1,2}, FAN Mingyan^{1,2}, YANG Shuai²

1 State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China

2 College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China

Abstract: Water was the primary limiting factor for plant survival, and understanding water utilization in urban plantations was critical for ecological conservation and sustainable vegetation management. This study focused on the water use characteristics of species in four distinct plantation configurations on the campus of Qinghai University in Xining, Qinghai Province: pure *Populus cathayana* plantations, pure *Picea crassifolia* plantations, mixed *P. cathayana* and *P. crassifolia* plantations, and mixed *P. cathayana*, *Syringa reticulata*, and *Amygdalus triloba* plantations. Using hydrogen and oxygen stable isotope techniques combined with the MixSIAR model, we analyzed the water sources of species in these plantations during the 2023 growing season (May—October). The results revealed that the total precipitation from May to October was 406.88 mm, accounting for 89% of the annual precipitation (454.7 mm). In the early growing season, *P. cathayana* and *P. crassifolia* in pure plantations primarily utilized soil water from above 60 cm depth, with utilization ratios of (70.58±

基金项目:青海大学科研实力提升项目(2025KTST03);国家自然科学基金(42301062)

收稿日期:2024-07-11; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lhtian@qhu.edu.cn

58.15)% and (72.21±61.33)%, respectively. In contrast, species in mixed plantations exhibited a more diversified water uptake strategy, utilizing soil water from all depth layers. During the mid-growing season, increased precipitation led to higher soil water content, and most species, except *A. triloba* in the MPSA community, predominantly absorbed surface soil water (0—20cm depth). At the end of the growing season, as precipitation decreased, soil water content stabilized at (13.61±0.94)%. In pure plantations, *P. cathayana* and *P. crassifolia* shifted to using soil water from the 20—60 cm depth as their main source, with utilization ratios of (35.90±29.63)% and (43.17±33.73)%, respectively. In mixed plantations, these species, along with *S. reticulata*, began to utilize deeper soil water, while *A. triloba* continued to use water from all soil layers throughout the growing season. These findings indicated that the water sources for plants exhibited significant seasonal variation, and the water utilization patterns of the same species differed between pure and mixed plantations. The configuration of plantations altered the competitive dynamics of water sources both between and within species. In mixed plantations, interspecific competition for water resources led to niche partitioning, enabling different species to utilize water from varying soil depths, thereby reducing direct competition. In contrast, pure plantations exhibited intraspecific competition, where individuals of the same species competed for similar water sources, potentially leading to resource depletion in specific soil layers. The water utilization patterns of plants were closely related to their plantation configuration, root distribution, and the spatial-temporal variability of soil water content.

Key Words: seasonal variation; stable hydroxide isotopes; campus green space; plant water sources; different configuration patterns

林地是我国重要的自然资源,也是森林赖以生存和发展的基础,关乎经济发展和人民生活^[1]。城市林地承担着净化空气和保护生态资源的使命,对于城市水文系统及生物多样性维持、减污净化、改善小气候、提供休憩旅游等方面发挥着重要作用^[2-8]。城市林地可显著影响局地水循环,较高的降雨入渗增强了水分在城市区域的滞留,这既降低了局部洪涝风险^[9],又增加了土壤储水量和地下水补给量^[10]。在城市林地建设中,纯人工林一直占据主导地位^[11-12]。近年来,越来越多的研究认为,与纯林相比,混交人工林是一种更优化的营林模式,混交人工林可以形成分层的林分结构,显著提高资源(水、热、光、养分)利用效率,改善林分条件,促进森林生产力,增强对自然灾害的抵抗能力,增强生态系统的稳定性等^[13-15]。因此,开展不同配置模式人工林地的生态水文过程研究对于城市林地的设计具有重要的指导意义。

在干旱区生态系统中,土壤水分作为植被生长的关键制约因子,不仅决定植被的形态建成与生理代谢过程,还影响着植被群落的水平分布边界、垂直层次结构及其优势种群的演替方向^[16],土壤水分可利用性是决定造林植被能否充分发挥其生态效益的限制因素^[17]。同时,人工林地植被通过参与水分循环影响着局地土壤水文过程的变化,其影响效果取决于立地类型以及植被的类型、结构和组成^[18-20]。已有研究表明,干旱区植物普遍存在“浅层土壤水优先、深层水适度调用”的两层用水模式^[21-22],该研究较多集中在黄土高原和荒漠地区^[23]。还有研究表明,与纯林相比,混交林中的植被显著提高了浅层土壤水的利用比例,相应地减少了深层土壤水地耗竭,通过共生种的水文生态位分离以抵抗水分胁迫^[24-26]。在高原干旱地区的城镇绿化中营造的纯林和混交林,其用水模式如何?还有待进一步的研究。因此,基于不同配置模式的城镇绿化树种,探究植被的水分利用来源,对于水分受限地区实施人工林营造具有重要的指导意义。

氢氧同位素(δD 和 $\delta^{18}O$)是存在于降水、土壤水、地下水与植物木质部水的良好示踪剂,灵敏度和准确性都较高,被广泛应用于追踪植物的潜在水源^[27-33]。已有研究表明,除超旱生和盐生植物外,大部分植物在吸水并输送至茎部时,不与外界交换物质,也未观察到同位素分馏现象^[34-38],因此,通过木质部同位素比值,可以反映植物根系吸收水源的混合同位素比值^[39-41]。为探究高原城市人工植被的水分利用特征,本研究以青海大学校园内的人工林地作为实验样地,采用稳定氢氧同位素示踪方法,系统比较了纯林与混交林中的植物在不同季节的水分来源差异。通过设置不同配置模式的实验样地,分析植被水分利用的季节性动态变化规

律,旨在为高原地区人工林建设提供一定的理论参考。

1 研究区概况

研究区位于青海省西宁市,海拔 2261m,属于大陆性高原半干旱气候。年平均气温 7.6℃,昼夜温差较大。年平均潜在蒸发量 1100mm^[42]。年平均降水量约 469.6mm^[43],主要集中在 5—10 月。本区植物的生长季与雨季较为一致。

2023 年 4 月初,在位于青海省西宁市城北区的青海大学校园内(31°39′—39°19′N,89°35′—103°04′E)选择四块人工林地作为研究样地,分别为青杨纯林(以下简称 PC₁)、青海云杉纯林(以下简称 PC₂)、青杨—青海云杉混交林(以下简称 MPP)和青杨—暴马丁香—榆叶梅混交林(MPSA)(详见表 1),通过查证相关资料和走访校内负责管理绿化人员,明确每个样地的绿化树种。在每处样地分别设置 3 个 10m×10m 的固定样方,用于后续植物和土壤样品的采集。10 月,对样方内的植物进行调查,测定高度、冠幅等指标,并计算郁闭度、密度等指标,具体数据参见表 1。

表 1 研究样地植物生长特征

Table 1 Ecological characteristics of plants at study site

样地名称 Sample plot name	树种 Tree species	树龄 Age of trees/a	高度 Height/m	胸径 Diameter of chest/m	北-南宽度 North-South length/m	西-东宽度 West-East length/m	郁闭度 Canopy density/%	密度 Densities/ 株	群落 丰富度 Richness
PC ₁	青杨	12	14.01±3.38	0.62±0.16	3.06±1.37	3.32±2.13	90	10	1
PC ₂	青海云杉	10	5.87±0.69	0.46±0.06	4.19±0.59	3.74±0.35	88.89	9	1
MPP	青杨	13	12.04±1.78	0.60±0.19	5.36±1.81	4.90±1.71	87.5	11	2
	青海云杉	11	3.64±0.74	0.18±0.027	2.03±0.46	1.95±0.54		5	
MPSA	暴马丁香	6	5.00±1.09	0.34±0.02	4.55±0.51	4.38±0.49	76.47	5	5
	青杨	13	10.98±1.58	0.55±0.17	5.50±2.45	5.60±2.43		4	
	青海云杉	12	5.50	0.42	2.69	2.98		1	
	毛桃	6	3.33±0.38	0.29±0.13	3.82±1.04	3.65±0.89		3	
	榆叶梅	5	2.55±0.25	0.14±0.09	3.74±1.65	3.53±1.80		4	

数据表示平均值±标准误,PC₁:青杨纯林 pure *P. cathayana* plantations; PC₂:青海云杉纯林 pure *P. crassifolia* plantations; MPP:青杨-青海云杉混交林 mixed *P. cathayana* and *P. crassifolia* plantations; MPSA:青杨-暴马丁香-榆叶梅混交林 mixed *P. cathayana*, *Syringa reticulata* and *Amygdalus trilobal* plantations

青杨(*Populus cathayana*)(以下简称 Pc₁)是杨柳科杨属的落叶乔木,我国特有的速生造林物种,在西宁地区具有显著的生态适应性。该树种不仅表现出优异的抗寒、抗旱特性,而且对贫瘠土壤具有较强的耐受能力,在区域水土保持和水源涵养方面发挥着重要作用^[42]。青海云杉(*Picea crassifolia*)(以下简称 Pc₂)是中国青藏高原东北边缘特有种,也是当地典型的造林树种,具备突出的耐寒、耐旱和耐瘠薄的能力,其根系呈明显的水平分布,无主根,在水土保持和生态维护方面具有显著功效^[44]。暴马丁香(*Syringa reticulata*)(以下简称 Sr)属于木犀科丁香属,作为多年生灌木或小乔木,在我国东北、华北和西北等地均有分布,喜光抗寒性强,具有较强的耐旱性^[45]。榆叶梅(*Amygdalus triloba*)(以下简称 At)属蔷薇科李属落叶小乔木或灌木,在不同环境中都展现出较强的适应性,具有喜光、耐干旱瘠薄、耐寒、耐盐碱等特性^[46]。研究区域内各植物样本均呈现出良好的生长状态,完全满足实验研究的各项条件。

2 研究方法

2.1 植物样品采集

2023 年 5—10 月,在以上选定的样方内,每月中旬和月底选择晴天正午分别采集以上植物样的木质部样本。在每个样方内,选取三株生长状况优良的优势种进行标记,作为实验样本。在 MPSA 样方中,以密度较大

的青杨、暴马丁香和榆叶梅作为取样植株。从每株标记树木上截取 3 根长度 3—5cm、直径 0.3—0.6cm 的木栓化枝条,经过去皮处理后,将其切割成 3—4cm 的短段,随后置于 10ml 螺纹口玻璃瓶内,使用 Parafilm 封口膜进行密封处理,并迅速转移至低温保存装置中进行冷藏。

2.2 土壤样品采集

在以上采样树木根系 50cm 半径范围内,用土钻(直径 50mm)在 0—10cm(去除枯枝落叶层)、10—20cm、20—40cm、40—60cm、60—80cm、80—100cm 的土层中采集土壤样品,每层土壤取 3 个平行样本。采集的各层土壤样品分别进行不同处理:一部分置于铝盒内,采用烘干法测定其含水量;另一部分则装入 10ml 螺纹玻璃瓶,并用 Parafilm 封口膜密封以确保气密性,随后转移至冷藏箱并迅速送至实验室,在-18℃ 冷冻环境中保存,待后续进行水分提取以测定氢氧同位素含量。在 10 月,将以上土壤样品收集,利用 Mastersizer 3000 激光粒度仪(Marveln Lit., 英国)测定土壤粒度组成,依据美国土壤分级标准对测定结果进行分类^[47](表 2)。本研究所有实验均在青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室内完成。

表 2 研究样地 0—100cm 深度土壤粒度组成/%

Table 2 Particle size composition (%) at study sites

样地名称 Sample plot name	黏粒 Clay <0.005 mm	粉粒 Silt 0.005—0.05 mm	极细砂 Very-fine sand 0.05—0.1 mm	细砂 Fine sand 0.1—0.25 mm	中砂 Medium sand 0.25—0.5 mm	粗砂 Coarse sand 0.5—1 mm	极粗砂 very coarse sand 1—2 mm
PC ₁	13.81±4.38	71.40±2.14	7.90±1.72	0.84±0.16	0.13±0.05	3.50±1.27	2.12±0.85
PC ₂	11.93±1.27	73.02±1.03	5.75±0.82	0.90±0.25	0.61±0.48	4.48±1.00	2.87±0.68
MPP	8.30±0.41	76.90±2.15	7.63±0.92	0.56±0.11	0.16±0.04	4.06±1.69	2.08±0.93
MPSA	10.03±1.84	77.73±1.80	7.30±2.66	0.64±0.26	0.23±0.22	2.56±1.52	1.31±0.89

2.3 降水样品收集

在本区植物生长季期间,在研究样地 PC₂ 和 MPP 没有遮挡的平坦区域分别设置两个采样装置收集降水样品。降水收集采用漏斗型采样器,顶部放置乒乓球以抑制水分蒸发。每次降水结束后,即刻测定降雨量并收集降水样本。样本被分装至 10ml 带螺纹的玻璃瓶中,使用 Parafilm 膜进行密封处理,并在玻璃瓶表面标注采集日期。所有样本均在采集后迅速转移至实验室,于 4℃ 恒温环境中保存,待后续进行氢氧同位素检测。针对短时降水(<1h),在降水终止时完成取样;对于长历时降水(>12h),则在每日北京时间 8:00 和 20:00 增加一次采样^[48]。研究期间共监测到 68 次降水事件,其中小雨(日降水量<10mm)事件出现频次显著高于中雨(10mm≤日降水量<25mm)和大雨(25mm≤日降水量<50mm)事件。

研究区地下水的埋深深度为 1.8—27.3m^[49],本研究土壤取样深度为 100cm 范围内,不考虑地下水对植物水分利用来源的影响。

2.4 同位素分析

实验工作均在青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室开展,采用 Li-2100 Pro 型全自动真空冷凝抽提装置(北京理加联合科技有限公司)进行样品处理,该装置可精准获取植物木质部及土壤中的水分样本。样本预处理阶段,分别选用 0.45μm 和 0.22μm 孔径的滤芯对土壤水与木质部水进行过滤处理,随后将过滤后的水样转移至 2mL 进样瓶中。基于液态水同位素分析仪(ABB, Canada),对样品中氢氧稳定同位素进行定量测定。测定结果以维也纳标准平均海水(VSMOW)为基准,采用‰为单位表示同位素比值($\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$),具体计算公式如下:

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

式中, R_{sample} 和 R_{standard} 分别表示样品和标准品的 $^2\text{H}/\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 值。其中, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测试的误差分别为 $\delta^2\text{H} \leq 1.2\text{‰}(\sigma)$, $\delta^{18}\text{O} \leq 0.3\text{‰}(\sigma)$ 。

同时,为了降低甲醇、乙醇等有机污染物对实验结果造成的潜在偏差,确保数据的准确性和可靠性,本研究采用 LGR 软件(LWIA-Spectral Contamination Identifier v1.0,LWIA-SCI)检查光谱污染样品,随后,利用 DLT-100 分析仪,对一系列不同浓度的乙醇和甲醇溶液进行逐一测定,以此为基础构建 $\delta^{18}\text{O}$ 的修正曲线^[50-51]。具体如下:

甲醇光谱污染校正曲线:

$$\Delta \delta^{18}\text{O} = -0.049 \ln(NB)^2 + 1.426 \ln(NB) - 2.3267 (R^2 = 0.9681) \quad (2)$$

乙醇光谱污染校正曲线

$$\Delta \delta^{18}\text{O} = -9.692 \ln(BB) + 9.7429 (R^2 = 0.9526) \quad (3)$$

式中, $\Delta \delta^{18}\text{O}$ 为真值 $\delta^{18}\text{O}$ 值的偏差值,NB 和 BB 值可以通过光谱诊断软件(LWIA-Spectral Contamination Identifier v1.0,LWIA-SCI)直接得出。

2.5 数据分析

通过 MixSIAR 模型评估各类水源对植被的贡献比例^[40]。该模型在分析过程中充分考虑了来源端与混合体系同位素数据的波动特征及其不确定性,用公式表示为:

$$\delta_p = \sum_{i=1}^n f_i \delta_{s_i} \quad (4)$$

式中, δ_p 表示植物木质部水的同位素比值($\delta^2\text{H}$ 或 $\delta^{18}\text{O}$); δ_{s_i} 表示第 i 种潜在水源的同位素比值; f_i 表示第 i 种水源的相对贡献率; n 表示水源总数。

综合考虑土壤水源同位素比值和土壤含水量的变异性,将土壤水分划分为以下三层:

(1) 表层土壤水(0—20cm): 土壤水同位素值及水分含量的变异性均呈现出显著的高水平特征,降水和蒸发的季节变化对其影响也较大;

(2) 中层土壤水(20—60cm): 表现出较低的同位素组成,相较于表层土壤水,其同位素组成受季节变化的影响较小,显示出更为稳定的特性;

(3) 深层土壤水(60—100cm): 展现了相对恒定的土壤含水量和同位素组成,显示出较高的稳定性。

在 MixSIAR 模型中,将各土层土壤水及木质部水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值和标准差分别作为来源值与混合值输入,并将分馏系数设置为 0,同时将模型运行次数设定为 1000000。

为了深入探究土壤含水量、土壤水的同位素组成以及水分利用比例之间的差异性,利用 SPSS 27.0 对得到的数据进行单因素方差分析(ANOVA),并采用最小显著性差异检验法(LSD)显著性水平设为 0.05,分析其显著性。以上所有数据均在 Excel 2021 中处理,并在 Origin Pro 2021 中绘图。

3 结果与分析

3.1 研究区降水和土壤含水量特征

从图 1 可知,2023 年 5—10 月期间,累积降雨量达到 406.88mm,占全年总降水量(454.7mm)的 89%。在观测周期内,8 月和 9 月成为降水最为集中的月份,其降雨量分别为 85.85mm 和 68.45mm,相比之下,相比之下,6 月和 10 月则呈现出较低的降水水平,分别为 56.48mm 和 62.25mm。大气温度的变化范围为 3—23℃,月平均气温 7 月最高,为 18.12℃,10 月最低,为 7.14℃。

土壤含水量的季节变化特征表明(图 2),研究区 5—10 月土壤含水量的变化范围为 6.86%—21.48%,10 月最高,为(13.61±0.94)%,5 月次之,为(12.32±0.51)%。8 月最低,为(9.88±0.39)%。土壤水分在不同林地之间差异性不显著($P > 0.05$), PC_2 的土壤含水量最高(13.39±0.46)%,MPP 的土壤含水量最低(10.04±0.51)%, PC_1 和 MPSA 的土壤含水量差别不大,分别为(11.01±0.55)%和(10.55±0.47)%。

不同林地类型下土壤水分随深度的变化特征如图 3 所示。 PC_1 中的土壤含水量在表层 20cm 呈现递增规律,随后递减至 60cm 以下趋于平稳,其峰值出现在 10—20cm 土层。相较之下, PC_2 、MPP 与 MPSA 中的土壤

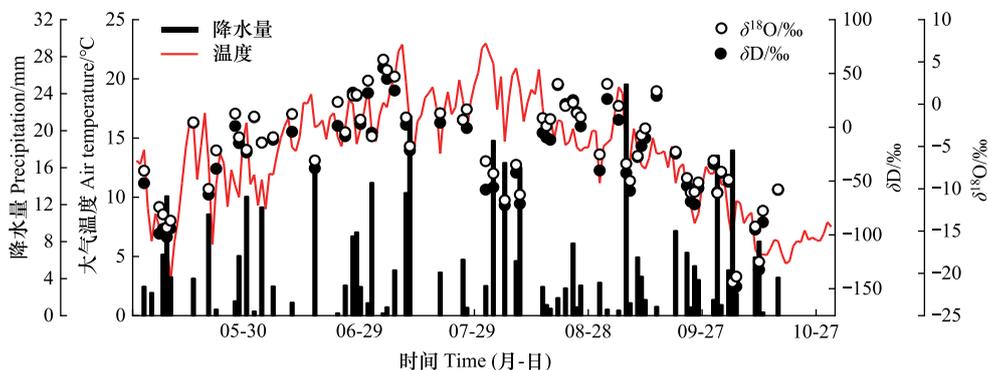


图1 研究区大气温度、降水量和降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素组成

Fig.1 Seasonal variations of air temperature, precipitation amount and isotopic compositions

含水量均表现为随深度增加而递减的特征,并在 40cm 深度后趋于稳定。具体而言,PC₂ 中的土壤含水量约稳定在 12%,其最低值出现在 40—60cm 深度区间;MPP 中的土壤含水量维持在 10% 水平,80—100cm 深度达到最低值;MPSA 中的土壤含水量约稳定在 8%,其最低值出现在 40—60cm 深度范围。

3.2 降水、土壤水、木质部水同位素组成特征

降水同位素的季节变化表明(图 1),5—10 月降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化范围分别为 -21.05‰ — 5.28‰ 和 -153.39‰ — 55.13‰ ,平均最高值出现在 7 月,平均最低值出现在生长季末期的 10 月。拟合降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 的关系得到当地大气降水线(LMWL): $\delta\text{D} = 7.92\delta^{18}\text{O} + 14.30$, $R^2 = 0.98$ (图 4),接近全球大气降水线(GMWL): $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$,说明采集的降水样品未发生明显的蒸发富集作用,截距大于全球大气降水线说明本区降水受地表水蒸发水汽的影响较大。

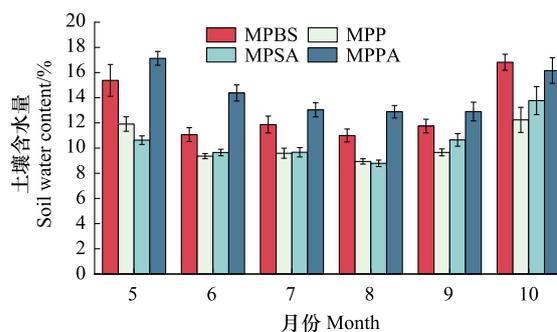


图2 不同样地土壤含水量的季节变化特征

Fig.2 Seasonal variation of soil water content at different sites

不同大写字母表示不同样地在同一季节差异显著 ($P < 0.05$),不同小写字母表示同一样地在不同季节差异显著 ($P < 0.05$);PC₁: 青杨纯林; PC₂: 青海云杉纯林; MPP: 青杨—青海云杉混交林; MPSA: 青杨—暴马丁香—榆叶梅混交林

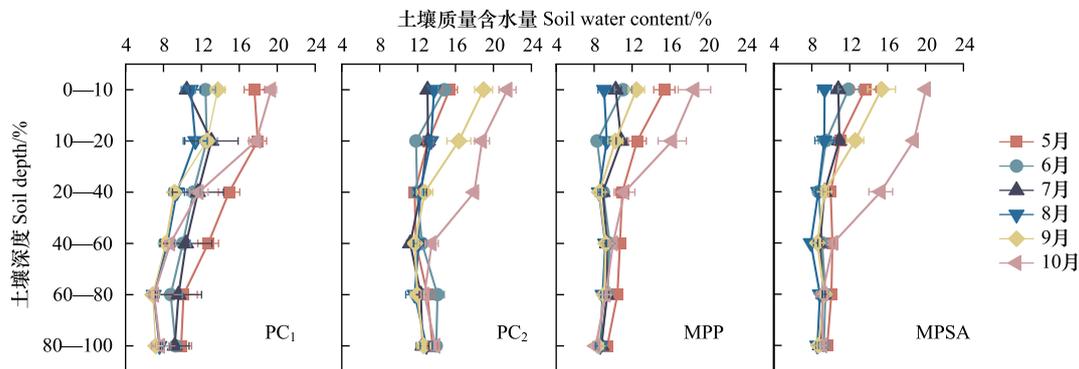


图3 不同样地土壤含水量的垂直变化

Fig.3 Vertical variation of soil water content at different sites

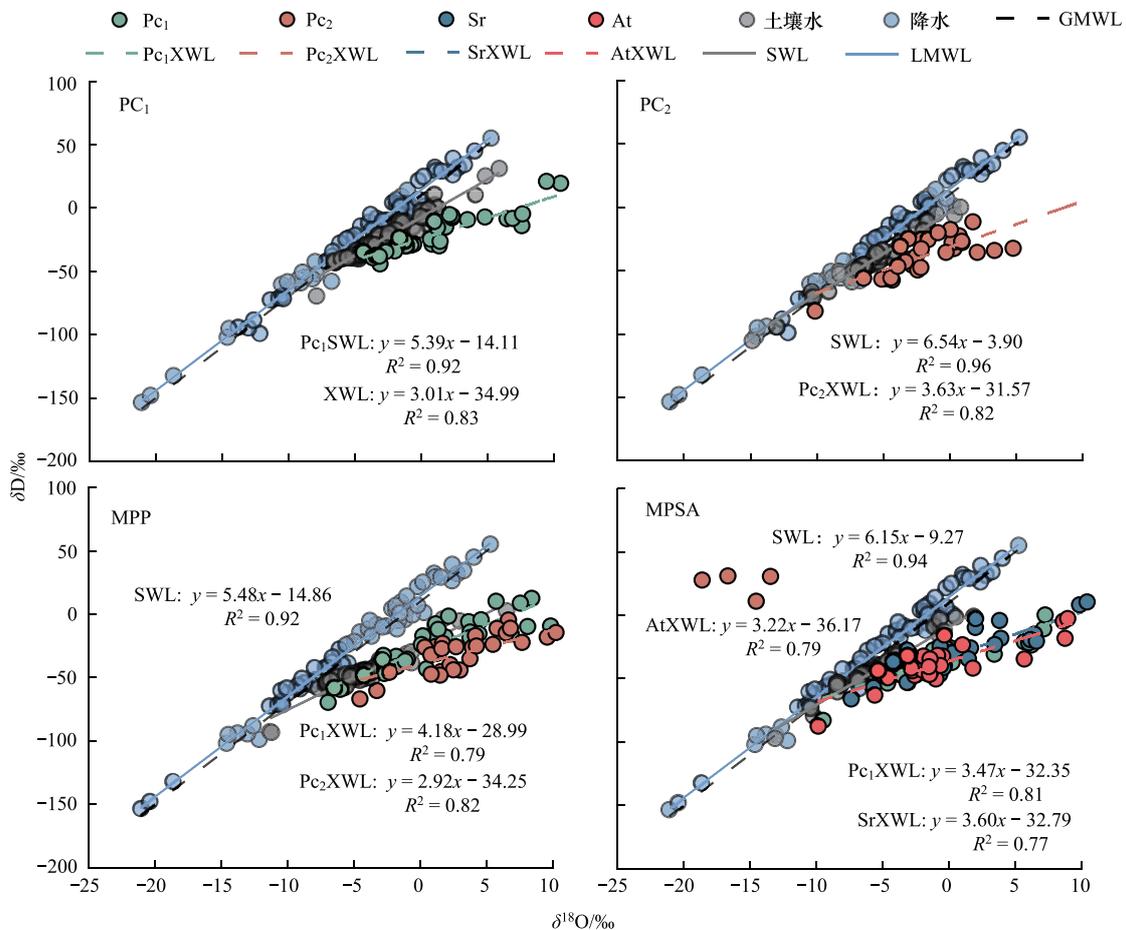


图 4 研究区大气降水、土壤水和植物枝条水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 的线性关系

Fig. 4 Linear regression relationship between δD and $\delta^{18}O$ in precipitation, soil water and xylem water at the experimental site

GMWL: 全球大气降水线; LMWL: 当地大气降水线; SWL: 土壤水线; XWL: 木质部水线; PC₁XWL: 青杨木质部水线; PC₂XWL: 青海云杉木质部水线; SrXWL: 暴马丁香木质部水线; AtXWL: 榆叶梅木质部水线

拟合土壤水 $\delta^{18}O$ 与 δD 的关系得到 PC₁、PC₂、MPP 和 MPSA 的土壤水线 (SWL), 分别为 $\delta D = 5.39\delta^{18}O - 14.11$ ($R^2 = 0.92, P < 0.01$)、 $\delta D = 6.54\delta^{18}O - 3.90$ ($R^2 = 0.96, P < 0.01$)、 $\delta D = 5.48\delta^{18}O - 14.86$ ($R^2 = 0.92, P < 0.01$) 和 $\delta D = 6.15\delta^{18}O - 9.27$ ($R^2 = 0.94, P < 0.01$) (图 4), 皆位于大气降水线的下方, 土壤水线的斜率较小, 这一特征表明土壤水分经历了显著的蒸发过程, 因此, 表层土壤水的 $\delta^{18}O$ 同位素富集现象明显, PC₁ 和 MPP 的 SWL 的斜率和截距相近, PC₂ 和 MPSA 的 SWL 的斜率和截距相近, SWL 的斜率和截距都低于 LMWL 和 GMWL。土壤水 δD 与 $\delta^{18}O$ 的时空变化模式大致相同 (图 5)。不同季节的土壤水同位素值存在差异, 5—10 月 PC₁0—100cm 土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围分别为 -80.84‰ — -11.01‰ 和 -10.12‰ — 0.06‰ , PC₂0—100cm 土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围分别为 -105.13‰ — -7.56‰ 和 -14.86‰ — -0.82‰ , MPP0—100cm 土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围分别为 -93.50‰ — -3.00‰ 和 -12.20‰ — -1.74‰ , MPSA0—100cm 土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围分别为 -97.13‰ — -4.52‰ 和 -13.08‰ — 0.40‰ 。从图 5 可知, 不同样地土壤水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的富集程度相似, 所有样地浅层土壤水都比深层土壤水富集 δD 和 $\delta^{18}O$, 土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的富集峰值都出现在 6—8 月的表层附近; 贫化值都出现在 5—6 月的中层附近。

拟合 $\delta^{18}O$ 与 δD 散点, 分别得到青杨木质部水线 (PC₁XWL)、青海云杉木质部水线 (PC₂XWL)、暴马丁香木质部水线 (SrXWL) 和榆叶梅木质部水线 (AtXWL)。如图 4 所示, 无论是纯林还是混交林, 植物木质部水的

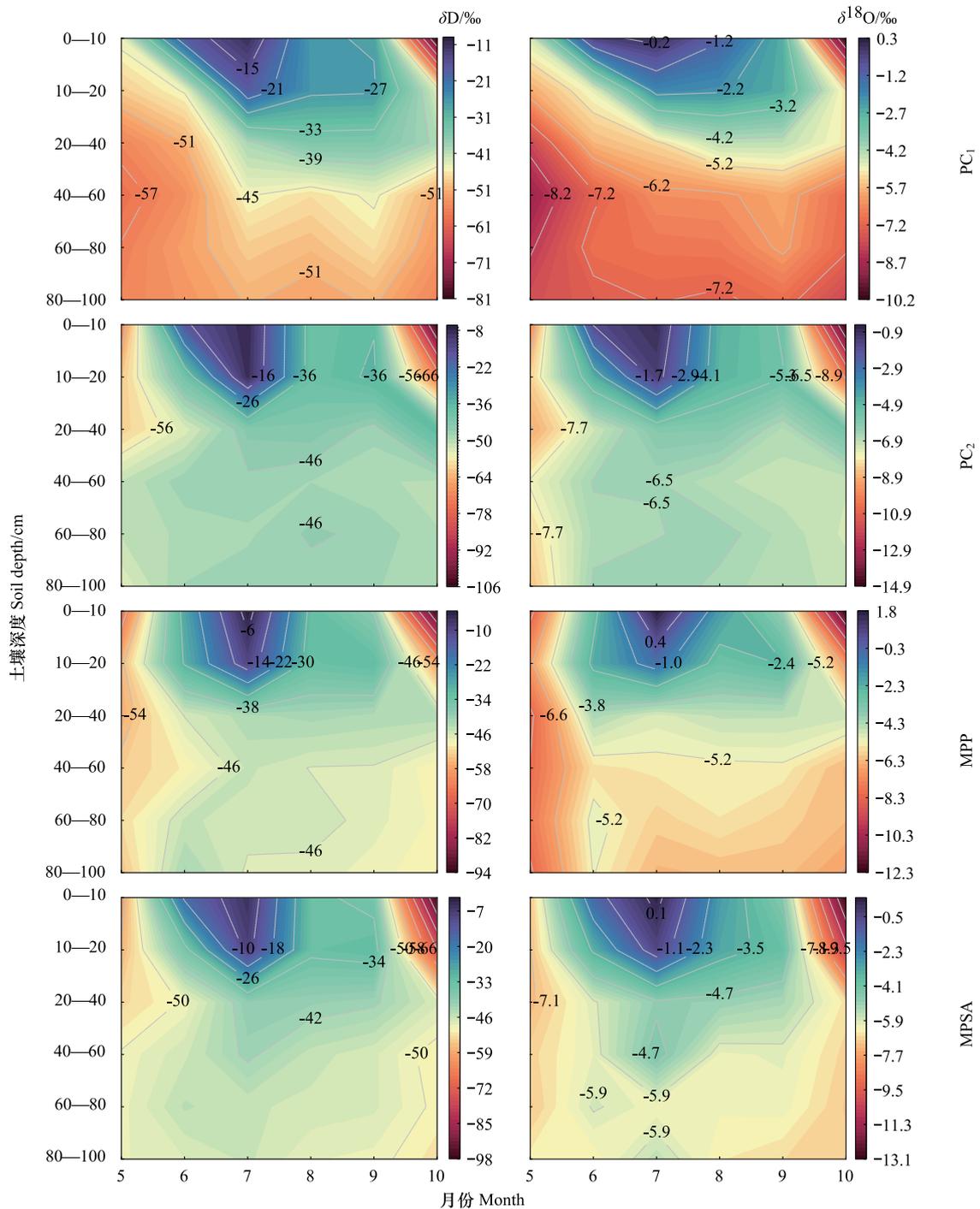


图5 研究区不同深度土壤中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的季节性变化特征

Fig.5 Seasonal variation of δD and $\delta^{18}O$ in soil water at different depths at the experimental site

$\delta^{18}O$ 和 δD 同位素值均紧密围绕土壤水同位素值分布,这表明植物主要依赖于不同土壤深度层次的水分供给。随着降水的季节性波动,植物木质部水中的 δD 和 $\delta^{18}O$ 同位素值亦随之呈现先上升后下降的变化趋势(图6),7月达到峰值,10月降至最低值。这种变化模式与土壤水 δD 及 $\delta^{18}O$ 的季节性动态表现出高度一致性,表明植物在水分利用策略上对降水季节变化具有明确的适应性响应。

3.3 植物的潜在水源贡献率

如图7所示,本研究区的植物主要依赖3个潜在的水源进行水分获取。 PC_1 的青杨在生长季的初期

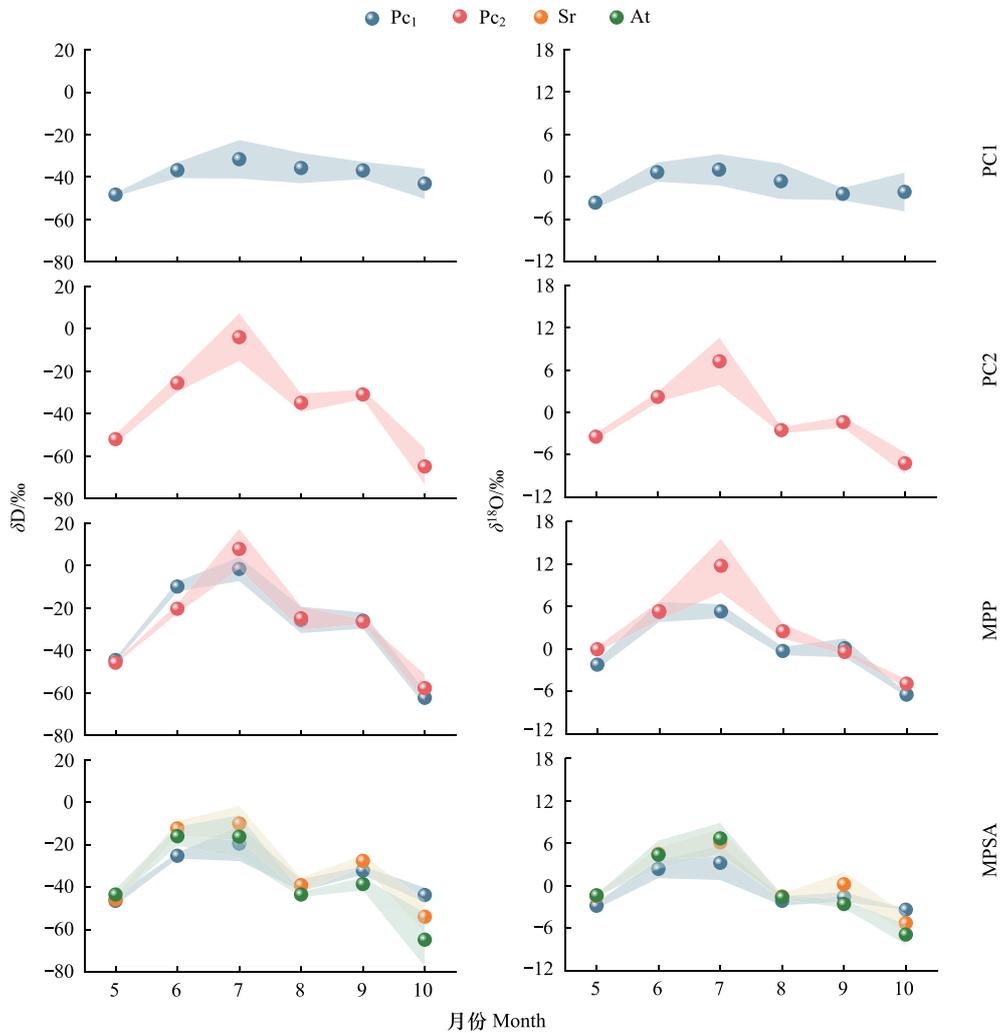


图 6 不同样地植物木质部水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的季节变化特征

Fig.6 Seasonal variation of δD and $\delta^{18}O$ in xylem water of plants at different sites

图中阴影代表误差棒

(5 月), 主要利用的是表层土壤水 (38.45%), 进入生长旺盛季(7 月), 仍将表层土壤水作为主要水分来源, 然而到生长季的末期(10 月), 又转而利用中层土壤水。PC₂ 的青海云杉在生长季初期的 5 月主要利用中层土壤水 (39.93%), 7 月转而利用表层土壤水 (39.13%), 进入 10 月, 又以中层土壤水为主要水源 (43.17%)。MPP 中的青杨和青海云杉在生长季初期会利用各层土壤中的水分, 进入 7 月的生长旺盛期后, 对表层土壤水分的依赖程度显著提升, 其利用比例分别达到 41.28% 和 40.92%, 到了生长季末期, 植物根系对水分吸收的重心逐渐转移至中、深层土壤区域。MPSA 的青杨、暴马丁香和榆叶梅在生长初期的 5 月对各层土壤水均有利用, 青杨和暴马丁香在生长旺盛季的 7 月主要利用表层土壤水, 利用比例分别为 35.5% 和 37.35%, 而到了生长季的末期, 青杨和暴马丁香又更多利用中层和深层的土壤水, 但 MPSA 的榆叶梅在整个生长季均对各层土壤水有利用, 只是生长旺盛季的 7 月对表层土壤水利用稍多 (34.45%)。

由此可见, 不同配置模式中的同种植物在不同生长季的利用水源不同, 生长季初期(5 月), 纯林的青杨和青海云杉主要利用 60cm 深度以上的土壤水, 利用比例分别为 $(70.58 \pm 58.15)\%$ 和 $(72.21 \pm 61.33)\%$ 。混交林中的树种对各深度层次的土壤水均有利用。进入生长季中期(7 月), 降水增加, 土壤含水量增加, 青杨、青海云杉和暴马丁香主要利用表层土壤水, 但 MPSA 的榆叶梅仍利用各层土壤水。生长末期(10 月), 降水减少,

土壤含水量保持较为稳定的状态 (13.61 ± 0.94)%, 纯林中的青杨和青海云杉以中层 20—60cm 土壤水作为主要水源, 利用比例分别为 (35.90 ± 29.63)% 和 (43.17 ± 33.73)%, 混交林中的青杨、青海云杉及暴马丁香转而利用中层和深层土壤水, 而榆叶梅仍对各层土壤水均有利用。

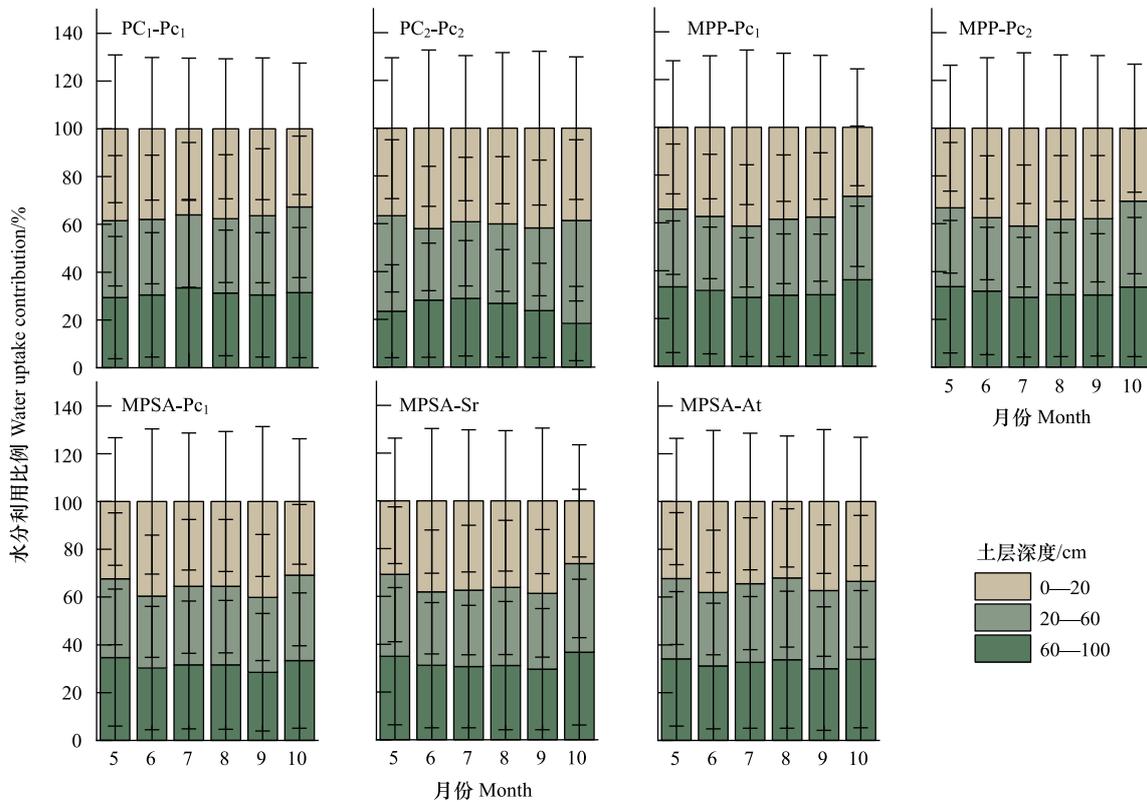


图 7 不同样地植物的潜在水源贡献比例

Fig.7 Proportion of potential water contribution from plants at different habitats

PC₁-Pc₁: 青杨纯林中的青杨; PC₂-Pc₂: 青海云杉纯林中的云杉; MPP-Pc₁: 青杨-青海云杉混交林中的青杨; MPP-Pc₂: 青杨-青海云杉乔木混交林中的云杉; MPSA-Pc₁: 青杨-暴马丁香-榆叶梅混交林中的青杨; MPSA-Sr: 青杨-暴马丁香-榆叶梅混交林中的暴马丁香; MPSA-At: 青杨-暴马丁香-榆叶梅混交林中的榆叶梅

4 讨论

4.1 土壤水分在不同配置模式林地的差异性

土壤含水量在空间上的分布易受到土壤质地及植被密度、郁闭度以及类型等的影响^[52-54]。根据图 2 和图 3 可知, 土壤含水量在青海大学 4 个绿化林地的分布差异性不显著 ($P > 0.05$), PC₂ 的土壤含水量最高, 达到 (13.64 ± 0.39)%, MPP 的土壤含水量最低, 仅有 (10.23 ± 0.38)%, PC₁ 和 MPSA 的土壤含水量差别不大, 分别为 (11.01 ± 0.55)% 和 (10.55 ± 0.47)%。土壤含水量与土壤组成的研究发现, 在干旱和半干旱地区, 土壤含水量一般与土壤黏粒含量呈正相关, 与土壤砂粒含量呈负相关^[55], 对比表 2 可知, MPP 样地的土壤黏粒含量最少, 仅为 (8.30 ± 0.41)%, 显著低于其他样地 ($P < 0.05$), 其土壤含水量也最低。PC₂ 与 PC₁ 的土壤黏粒含量都较高, 分别为 (11.93 ± 1.27)% 和 (13.81 ± 4.38)%, 但土壤含水量的分布也易受到植被的影响, 根据表 1 可知, PC₁ 青杨的高度及郁闭度高于 PC₂ 的青海云杉, 其对土壤水分的需求较高, 因此 PC₂ 的土壤含水量较高。

降水量的变化是调控土壤水分季节性分布的关键驱动因素^[56], 同时, 初始土壤含水量、植物蒸腾作用以及地表蒸发效应均会对水分动态产生重要影响^[57], 这些因素共同作用于土壤水分的动态平衡, 体现了土壤水文过程的复杂性和多样性。5 月, 各样地的土壤水分位于全年次高值 (图 2), 这一现象主要是由于土层解冻

后,土壤中先前冻结的水分得以释放,从而导致土壤初始含水量的显著增加。此时的土壤水分足够支撑树木萌芽需求,此时树木的耗水较少。进入6月,除PC₂外,其他林地的土壤含水量呈现下降趋势。由于PC₁的植被个体最大,其生长过程对水分的需求也相对较高,因此该林地土壤含水量的下降速度最为显著。在7月,尽管降水量相较于6月有所增加,但土壤含水量的变化并不显著,这表明降水能够有效地补充因植物快速生长所消耗的水分,因此无需进一步消耗深层土壤中的水分资源。在植物生长最为旺盛的8月,尽管降水量达到高峰(本月降水量为85.85mm),土壤含水量却下降至整个生长季的最低水平。这主要是由于此时植物的蒸腾作用达到顶峰,同时地表蒸发也最为强烈,这两个因素共同导致了土壤水分的显著消耗。相比于其他林地,PC₁的土壤含水量下降速度最快,这一现象说明高大植物在此地的蒸腾作用尤为显著。9月的降水量仍保持在较高水平(本月降水量为68.45mm),但由于植物逐渐进入生长季末期,其蒸腾作用和地表蒸发均有所减弱,这促进土壤含水量逐渐回升。10月,本区降水明显减少(本月降水量为62.25mm),植物开始萎蔫,土壤含水量增加至全年最高值。研究区域内的土壤水分动态变化与降水量变化呈现同步性,然而植被个体的水分利用特性致使各样地间土壤含水量存在空间异质性。

土壤水分的垂直分布特征是由降水入渗过程以及植物根系吸水活动的共同作用所决定的^[55-58]。从图3可知,青海大学校园林地土壤表层40cm深度的变化较大,这表明本区降水的入渗深度一般在40cm以内。已有研究表明,土壤含水量的垂直分布格局与植物根系的分布特点存在密切的关系,当根系集中分布在某一层时,该层土壤中的含水量往往呈现较低的状态^[59]。青杨和青海云杉的细根主要集中分布于土壤表层0—60cm的范围内^[60-61],暴马丁香的细根一般分布在土壤表层10—20cm的范围内^[62]。PC₁中,表层10cm的土层显示出强烈蒸发,青杨的根系主要集中分布于土壤20—60cm的垂直深度范围内进行水分吸收,60cm以下土壤水含量维持在一个相对稳定的水平,几乎无明显波动。PC₂中,青海云杉的根系同样集中分布在地表60cm以上的土层内,但由于青海云杉植株矮小的特性,其根系无需深入土壤以持续补充蒸腾作用所消耗的水分,因此,PC₂样地的土壤含水量较高,并且在土层深度的递增下,土壤含水量呈现出稳定的状态。MPP中青杨和青海云杉的根系都集中分布在0—60cm范围内,60cm以下的土层中,土壤含水量相对稳定,无明显波动,表层土壤含水量较低。MPSA是乔灌混交林,暴马丁香和榆叶梅是西北地区城镇绿化中的主要灌木,灌木根系的水平延展性有助于对表层水分的充分利用,可减少与乔木对中层土壤水分的利用,60cm以下的土壤水分趋于稳定。

4.2 降水和土壤水同位素季节差异的影响因素

植物的水分补给主要依赖于降水、灌溉水以及地表径流等,然而,这些水源在成为植物可利用的水分之前,必须经历土壤或地下环境的转化过程,转化为土壤水或地下水,进而通过植物根系被吸收和利用^[63]。土壤水稳定同位素的组成会受到大气降水同位素的影响,而后者又与水汽来源、水汽输送路径、气温条件及降水过程密切相关^[64-65],观测数据表明,研究区域呈现显著的季节性降水分布,夏季降水量占比超过49%,该时段 δD 和 $\delta^{18}O$ 的波动主要受区域水汽循环的影响^[66],从空间分布来看,西宁地区降水同位素特征的形成机制可归因于多重因素的综合效应,具体表现为东南季风、地形差异导致的垂直梯度以及地表蒸发过程等^[67]。此外,研究区小降水事件(<10mm)频发,夏季为中降水事件的集中期,且降水入渗显著(7—8月各样地表层土壤水含量增加幅度大于其他月份,图3)。随着降水进入土壤并与原有水分发生混合,土壤水系统的组成逐渐发生变化,这一过程中,土壤水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 稳定同位素组成也随之产生相应变化^[57]。降水同位素的变化趋势(图1)可通过土壤剖面图 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的波动情况体现(图5)。

作为植物获取水资源的直接途径,土壤水分主要来源于大气降水,但其同位素值受到水文循环过程如近期降水事件的潜在影响^[57]。土壤对降水响应的复杂机制源于多种因素的相互作用,包括土壤、地形地貌、植被覆盖以及降水模式,这些因素共同导致了土壤水分在空间分布上的显著差异^[68]。土壤颗粒的组成在调控水分有效性方面发挥着关键作用,并进一步塑造了植被的空间分布模式。具体而言,具有较高比表面积和较强黏结特性的细颗粒土壤,因其卓越的水分吸附和保持能力,能够为植物提供更为充足的水分储备^[55]。研究

样地土壤以粉粒为主(表2),这更利于水分贮存。土壤水及其稳定同位素(δD 及 $\delta^{18}O$)的时间变化受降水特性(强度、同位素值)、初始含水量及植物物候的综合影响^[69]。如图3和图5所示,表层20cm土壤含水量及其同位素(δD 和 $\delta^{18}O$)值变化显著,而60cm以下保持稳定,这反映了蒸发和降水再分配对土壤水同位素组成的显著影响^[70]。土壤表层的蒸发强烈,随着土壤深度增加,蒸发减弱^[71],导致表层土壤含水量较低且同位素值较高。

本研究样地土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值无明显的空间差异($P>0.05$),但季节变化较为明显。5月至6月,因温度与降水量均较低,土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值偏低,贫化现象出现在中层。至7月,气温达到峰值,地表受高辐射影响,表层同位素显著富集,土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值达到最高。8月至9月,降水丰富但气温下降,地表蒸发减弱,在植被冠层的遮蔽下,降水入渗超过地表蒸发,土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值逐渐降低。10月,大气温度最低,降水量也最少(62.25mm),植物蒸腾和土壤蒸发都较低,此时土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值也最低。由此可知,土壤水氢氧同位素的季节变化是降水、地表蒸发及植物蒸腾耗水共同作用的结果。

4.3 不同配置模式人工林地水分来源差异的影响因素

植被水分获取的季节性波动是干旱区植物对土壤水分动态的适应性表现^[63-64],这种波动主要源于土壤含水量与降水季节性分布的协同效应。植物的水分来源具有明显的季节变化特征(图7),不同样地树木的可利用主要水源与植被群落的土壤含水量呈正相关(图3)。同一样地中不同物种间水分利用格局的季节变化无显著差异,但同种植物在不同配置模式的林地(纯林和混交林)中水分利用格局存在差异。春季(5月),土层解冻后土壤初始含水量增多,青杨和青海云杉纯林主要利用60cm深度以上的土壤水。此时,混交林的树种对各深度层次的土壤水均有利用,以满足其萌发的需求。8月植物生长旺盛期,植物蒸腾耗水增加,同期降水量也增加(当月降水量为85.85mm),此时,地表20cm土壤含水量最高(图3),各样地树木的吸水层位也主要集中在该层。相关研究表明,浅层土壤水分在降雨充沛阶段往往成为植被吸收的主要来源,其原因在于该区域更易积累根系代谢所需的养分和氧气^[57]。进入秋季,研究样地树木的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值显著降低(图6, $P<0.05$),植被凋萎导致蒸腾作用减弱,同时地表蒸发也减少,青杨和青海云杉纯林主要利用表层和中层土壤水,混交林中的植被更倾向于利用中层和深层土壤水^[57]。在本研究中,混交林中的榆叶梅在整个生长季对不同层次的土壤水分都有利用,其对土壤水分利用的可塑性水平较低。

纯林和混交林中的同种树木水分来源具有显著性差异($P<0.05$),这可能与土壤含水量、林地配置模式和林分结构(如树高、胸径、密度等)等的不同有关^[72-74]。春季和秋季,纯林的土壤含水量高于混交林,纯林中的树种主要利用表层和中层壤水,混交林中的树种增加了对深层土壤水的利用。林地配置模式改变了种间和种内对水分来源的竞争效应,混交林中不同物种间的水分竞争与纯林中同一物种个体间的水分竞争具有不同的效应^[23]。研究表明,混交林中的种间竞争使得各树种建立了不同的水文生态位来进行水分吸收,从而提高水分利用效率^[75]。混交林的林分结构与纯林不同,会影响林内的水分循环和蒸散发过程。混交林的林冠层更加多样性,具有不同的水分蒸发和蒸腾特性,进而影响树木的水分来源。由此可知,纯林和混交林中的同种树木水分来源的差异是由土壤含水量、林地配置模式和林分结构等多种因素共同作用的结果。这些因素的相互作用决定了植物在不同生长阶段的水分利用策略,从而影响其生长和生存。

4.4 西宁市绿化树种与其他地区树木水分来源的差异性比较

本文中,青杨和青海云杉在生长季初期主要利用中层土壤水(20—60cm),而在生长季中期则转向表层土壤水(0—20cm)。但在黄土高原地区,常见的绿化树种侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinustabuliformis*)等树种更多通过利用深层土壤水来应对干旱^[76]。这种差异可能与两地的气候条件、土壤水分分布及树种差异有关。黄土高原地区土壤水分较为贫乏,存在较为明显的土壤干层,乔木树种更多通过深层土壤水来应对干旱^[77-78]。本区0—1m土壤水分受降水和蒸发对影响波动较大,乔木和灌木树种通过自身调节灵活利用水源^[79]。

与荒漠地区的植物在极端干旱条件下通常依赖于深层土壤水或地下水来维持生存的模式不同,城镇绿化

树种的主要水源供给是中层土壤水分^[80]。这一现象的产生机制可能源于区域间土壤水分有效性的差异以及植物根系结构的分布特征。荒漠地区的土壤水分极为贫乏,植物根系通常深入地下以获取深层水源^[80]。而研究样地的土壤水分相对较为丰富,植物根系主要分布在 0—60cm 的土层内,能够通过中层土壤水满足其水分需求。此外,研究样地的混交林通过种间互补提高了水分利用效率,减少了深层土壤水的消耗^[81]。

但在湿润地区,森林生态系统的主要水源为降水补充下的表层土壤水,植被的水分利用策略相对单一^[82]。研究样地的植物在生长季的不同时期表现出更为复杂的水分利用模式,尤其是在混交林中,树种通过利用不同深度的土壤水来达到共存。这种差异反映了干旱半干旱地区植物在水分利用上的灵活性和适应性。在降水条件优越的湿润地区,植被对深层土壤水分的依赖性较低,因其可获得充足的地表水源供给。然而,当干旱半干旱区域面临降水匮乏时,当地植被会调整其水分获取策略,显著提升对深层土壤水分的利用效率,以此缓解水分胁迫带来的生存压力^[83]。

4.5 启示

植物的水分利用特征对校园绿地生态水文循环存在重要影响,植物能够从各潜在水源中获取水分供自身生长。植物对水分利用策略的调整主要取决于季节性变化及可利用水源条件^[84]。本研究表明西宁市的大学校园内,不同配置模式林地中的树木水分来源的季节变化存在差异,同种植物在不同配置模式的林地(纯林和混交林)中水分利用格局也存在差异。青杨和青海云杉纯林在降水较少的情况下(生长季初期)以 60cm 深度以上土壤水为主要水源,随着降水的增加(生长季旺盛期),浅层土壤水的利用比例逐渐增大。已有研究表明,混交林生态系统中,乔木和灌木通过差异化利用土壤垂直剖面的水分资源,实现种间共存的生态平衡^[57]。混交林中的树种在降水较少的情况下(生长季初期)对各深度层次的土壤水均有利用,随着降水的增加(生长季旺盛期),树木对浅层土壤水的利用比例较大。榆叶梅是西北地区城镇绿化的主要灌木,水平根幅可延伸至 100cm 左右,根深也可达 127cm 左右^[85],因此,其对水分的需求可根据土壤含水量随时调整保证自身的生长需求,在生长季对各层土壤水均有利用。纯林和混交林中的同种植物水分来源具有显著性差异($P < 0.05$)。相较于纯林,混交林中的树种在生长季中增加了对各层土壤水的利用比例,从而提高了水分利用效率,并将主要耗水从浅层转移到各层,这对于人工林地的水资源平衡及群落的稳定性维持具有重要意义。

综上所述,在半干旱区的城市绿地建设中,营造大规模乔木纯林可能引起地表 100cm 土壤水分的快速减少,在未来的造林实践中,营造多树种的乔灌混交林有助于利用多层次的土壤水,这对于区域水分平衡与水分循环是较好的选择。在造林过程中,造林树种的选择及林分结构及密度是开展“以水定绿,量水而行”生态建设工程的重要保障。本文只对 4 种校园植物在不同配置模式及降水条件下的各植被水分来源进行分析,未深入探讨植物根系分布、植物生理特征、植物叶片和茎干的水力特征、植物的水分利用效率等与植物水分来源的密切关联,尤其是植物根系及其他因子如何调控校园植物对水分的利用及各物种之间对水分利用的合理分配,这可能限制了半干旱区校园人工林地对水分的真实需求。同时,对观测样地进行长期监测及加大观测密度,有助于系统性地验证人工混交林优于纯林这一结论的准确性。

5 结论

在半干旱区校园绿化林地中,不同配置模式的植被在土壤水分利用层次上表现出显著的季节性差异。春季气温回升,冻土逐渐消融,表层土壤含水量显著提升。纯林的青杨和青海云杉主要依赖 60cm 以上深度的土壤水分维持生长;混交林中的不同树种对各层土壤水均有利用。夏季植物生理活动增强,蒸腾作用导致水分消耗加剧,同时降水补给使得 0—20cm 表层土壤水分得到有效补充,此时植被主要从浅层土壤获取所需水分。到了秋季,降水减少,土壤含水量保持较为稳定的状态,纯林中的青杨和青海云杉以中层 20—60cm 土壤水作为主要水源,混交林的青杨、青海云杉及暴马丁香转而利用中层和深层土壤水,而榆叶梅在整个生长季一直对各层土壤水均有利用。与纯林相比,混交林的树种增加了各层土壤水的利用比例,从而使整个生长季的主要耗水从浅层转移到各层,提高水分利用效率。本研究结果证实了在半干旱地区,相比于纯林,混交林能够

更高效利用土壤水分,促进水文生态位的再分配,这对于人工林地的水资源平衡及群落的稳定性维持具有极其重要的意义。

参考文献(References):

- [1] 李健,吕长伟. 庆安国有林场管理局森林资源动态分析及经营建议. 林业勘查设计, 2021, 50(5): 39-42.
- [2] 涂龙平. 城镇化进程中中国有林场林地保护利用存在问题与对策. 科技资讯, 2023, 21(13): 147-150.
- [3] 何依蔓. 山地城镇开发边界内碎片林地的保护与利用路径研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [4] 刘兆军. 谈城市林地在生态城市建设中的作用. 林业勘查设计, 2010(4): 49-51.
- [5] 张晓理. 城市林地的综合节能效应. 中国林业经济, 2012(5): 42-45.
- [6] 杨海江, 勾晓华, 马维斌, 唐呈瑞, 薛冰. 近 10 年中国森林生态系统服务功能价值评估研究进展. 生态学杂志, 2023, 1-13.
- [7] Chen W Y, Wang D T. Economic development and natural amenity: an econometric analysis of urban green spaces in China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(4): 435-442.
- [8] Braubach M, Egorov A, Mudu P, Wolf T, Ward Thompson C, Martuzzi M. Effects of urban green space on environmental health, equity and resilience//*Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas*. Cham: Springer International Publishing, 2017: 187-205.
- [9] Le T Q, Devisch O, Trinh T A. Flood-resilient urban parks: toward a framework. *Area*, 2019, 51(4): 804-815.
- [10] Dietz M E. Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 186(1): 351-363.
- [11] Gong C, Tan Q Y, Xu M X, Liu G B. Mixed-species plantations can alleviate water stress on the Loess Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2020, 458: 117767.
- [12] Xiang Y Z, Li Y, Luo X Q, Liu Y, Huang P, Yao B, Zhang L Y, Li W L, Xue J M, Gao H J, Li Y H, Zhang W. Mixed plantations enhance more soil organic carbon stocks than monocultures across China: Implication for optimizing afforestation/reforestation strategies. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153449.
- [13] Amazonas N T, Forrester D I, Oliveira R S, Brancalion P H S. Combining Eucalyptus wood production with the recovery of native tree diversity in mixed plantings: Implications for water use and availability. *Forest Ecology and Management*, 2018, 418: 34-40.
- [14] Dai E F, Zhu J J, Wang X L, Xi W M. Multiple ecosystem services of monoculture and mixed plantations: a case study of the Huitong experimental forest of Southern China. *Land Use Policy*, 2018, 79: 717-724.
- [15] Deng H Y, Shen L L, Yang J Q, Mo X Y. Stand stability of pure and mixed-Eucalyptus forests of different tree species in a typhoon-prone area. *Forests*, 2021, 12(4): 458.
- [16] Stocker B D, Zscheischler J, Keenan T F, Prentice I C, Seneviratne S I, Peñuelas J. Drought impacts on terrestrial primary production underestimated by satellite monitoring. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 264-270.
- [17] Liang X Y, Xin Z B, Shen H Y, Yan T F. Deep soil water deficit causes *Populus simonii* Carr degradation in the three north shelterbelt region of China. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128201.
- [18] Legates D R, Mahmood R, Levia D F, DeLiberty T L, Quiring S M, Houser C, Nelson F E. Soil moisture: a central and unifying theme in physical geography. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2011, 35(1): 65-86.
- [19] Wang C, Fu B J, Zhang L, Xu Z H. Soil moisture-plant interactions: an ecohydrological review. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 1-9.
- [20] Moser-Reischl A, Rahman M A, Pauleit S, Pretzsch, H., Rötzer, T. Growth patterns and effects of urban micro-climate on two physiologically contrasting urban tree species. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 183: 88-99.
- [21] Ryel R J, Ivans C Y, Peek M S, Leffler A J. Functional differences in soil water pools: a new perspective on plant water use in water-limited ecosystems//*Progress in Botany*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008: 397-422.
- [22] Ward D, Wiegand K, Getzin S. Walter's two-layer hypothesis revisited: back to the roots!. *Oecologia*, 2013, 172(3): 617-630.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Gao Q, Dang X, Meng Z, Liu Y, Lou J, Yan Y, Zhang X. Effects of drought on the water use strategies of pure and mixed shrubs in the mu us sandy land. *Plants*. 2024; 13(23):3261.
- [26] Forrester D I. Transpiration and water-use efficiency in mixed-species forests versus monocultures: effects of tree size, stand density and season. *Tree Physiology*, 2015, 35(3): 289-304.
- [27] Rothfuss Y, Javaux M. Reviews and syntheses: isotopic approaches to quantify root water uptake: a review and comparison of methods. *Biogeosciences*, 2017, 14(8): 2199-2224.

- [28] Dawson T E, Ehleringer J R. Plants, isotopes and water use; a catchment-scale perspective. *Isotope tracers in catchment hydrology*. Elsevier, 1998: 165-202.
- [29] 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. *Oecologia*, 1996, 107: 13-20.
- [30] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, cell & environment*, 1992, 15(9): 1073-1082.
- [31] Flanagan L B, Ehleringer J R, Marshall J D. Differential uptake of summer precipitation among co-occurring trees and shrubs in a pinyon-juniper woodland. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(7): 831-836.
- [32] Penna D, Hopp L, Scandellari F, Allen ST, Benettin P, Beyer M, Geris J, Klaus J, Marshall JD. Ideas and perspectives: Tracing terrestrial ecosystem water fluxes using hydrogen and oxygen stable isotopes - challenges and opportunities from an interdisciplinary perspective. *Biogeosciences*, 2018, 15(21): 6399-6415.
- [33] Zimmermann U, Ehhalt D, Münnich K O. Soil-water movement and evapotranspiration: changes in the isotopic composition of the water. *Isotopes in hydrology. Proceedings of a symposium*. 1967.
- [34] Brunel J P, Walker G R, Kennett-Smith A K. Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment. *Journal of Hydrology*, 1995, 167(1/2/3/4): 351-368.
- [35] Lin G H, da S L Sternberg L. 31 hydrogen isotopic fractionation by plant roots during water uptake in coastal wetland plants. *Stable Isotopes and Plant Carbon-Water Relations*, 1993: 497-510.
- [36] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes. *Plant and Soil*, 2007, 291(1): 93-107.
- [37] Dawson T E, Ehleringer J R. Isotopic enrichment of water in the "woody" tissues of plants: implications for plant water source, water uptake, and other studies which use the stable isotopic composition of cellulose. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(14): 3487-3492.
- [38] White J W C, Cook E R, Lawrence J R. The DH ratios of sap in trees: Implications for water sources and tree ring DH ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(1): 237-246.
- [39] Sprenger M, Leistert H, Gimbel K, Weiler M. Illuminating hydrological processes at the soil-vegetation-atmosphere interface with water stable isotopes. *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(3): 674-704.
- [40] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes; coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [41] Stock B C, Jackson A L, Ward E J, Parnell A C, Phillips D L, Semmens B X. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models. *Peer J*, 2018, 6: e5096.
- [42] 李永良. 气候因子与西宁市人工青杨林年高生长量的相关性分析. *安徽农业科学*, 2019, 47(11): 210-212.
- [43] 李京梅, 盛嘉誉, 唐仲涛. 近 60 年西宁地区气候变化及突变分析. *青海科技*, 2021, 28(5): 100-106.
- [44] 芦倩, 李毅, 刘贤德, 赵维俊. 祁连山排露沟流域青海云杉(*Picea crassifolia*)林土壤水分特征. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 142-148.
- [45] 何敏, 徐发辉. 暴马丁香乔化苗培育技术探讨. *甘肃林业*, 2024(1): 42-43.
- [46] 覃嘉佳, 张继红, 罗素梅, 贾万梅, 魏绪英. PP333 浸根处理对榆叶梅幼苗生长及叶绿荧光参数的影响. *北方园艺*, 2023(6): 47-54.
- [47] 李思瑶, 蒙仲举, 祁帅. 草原干涸湖床地表粒度特征及其对沙尘释放的影响. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 38-46.
- [48] 张昊, 肖薇, 谢成玉, 胡勇博, 楚漠然, 王晶苑, 李旭辉. 南京梅雨降水同位素组成从事件到年际尺度的变化特征. *应用生态学报*, 2024, 35(4): 951-960.
- [49] 李环环. 青藏高原河谷型城市地下水演化机制及承载力研究——以西宁市为例[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [50] 田丽慧, 汪海娇, 张登山, 王俏雨, 刘蕊娜. 高寒沙地典型固沙植物在沙丘不同地貌部位的水分利用特征. *生态学报*, 2021, 41(15): 6215-6226.
- [51] Jia G D, Nehemy M F, Chen L X, Yu X X, Liu Z Q. Ephemeral connectivity between trees and groundwater in a temperate forest in China. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127887.
- [52] 徐莹, 关晋宏, 邓磊. 高寒半干旱区沙地植被土壤水分变化特征及其影响因素. *生态学报*, 2024, 44(13): 5-12.
- [53] Jiao L, An W, Li Z, Gao, G., Wang, C. Regional variation in soil water and vegetation characteristics in the Chinese Loess Plateau. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106399.
- [54] Gómez-Plaza A, Martínez-Mena M, Albaladejo J, Castillo, V.M. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. *Journal of hydrology*, 2001, 253(1-4): 211-226.
- [55] 马生花, 谢应忠, 胡海英, 倪彪. 荒漠草原 2 种典型群落类型下土壤含水量与土壤粒径分布的关系. *中国水土保持*, 2019(7): 61-65.
- [56] Zhao Y L, Wang Y Q, Zhang X C, Wang L, Hu W, Wang T. Specific-scale correlations between soil water content and relevant climate forcing factors across two climate zones. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124800.
- [57] 刘泽琛, 张明军, 张宇, 杨晔, 田媛媛, 钟晓菲, 谷来磊. 基于氢氧稳定同位素示踪的侧柏与白榆水源对比. *生态学杂志*, 2024, 43(3): 694-700.
- [58] Xu G, Zhang T, Li Z, Li P, Cheng Y, Cheng S. Temporal and spatial characteristics of soil water content in diverse soil layers on land terraces of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2017, 158: 20-29.

- [59] Gou Q P, Zhu Q K. Response of deep soil moisture to different vegetation types in the Loess Plateau of northern Shannxi, China. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 15098.
- [60] 席本野. 杨树根系形态、分布、动态特征及其吸水特性. *北京林业大学学报*, 2019, 41(12): 37-49.
- [61] 芦倩. 祁连山排露沟流域植被类型变化对径流过程的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
- [62] 吴国喜, 张玉香. 暴马丁香硬枝扦插育苗技术研究. *西北园艺: 综合*, 2022(6): 63-65.
- [63] Wang J, Fu B J, Lu N, Zhang L. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 27-37.
- [64] Dai Y, Zheng X J, Tang L S, Li Y. Stable oxygen isotopes reveal distinct water use patterns of two *Haloxylon* species in the Gurbantonggut Desert. *Plant and Soil*, 2015, 389(1): 73-87.
- [65] Yu W, Yao T, Tian L, Ma Y, Ichiyangi K, Wang Y, Sun W. Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and air temperature and moisture origin on a south-north transect of the Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*, 2008, 87(2): 158-169.
- [66] 李晗薇, 姚俊强, 容韬, 张天洋, 高雅洁. 塔什库尔干河流域河谷大气降水同位素特征与水汽输送路径. *干旱区研究*, 2024, 41(3): 399-410.
- [67] 赵娟, 谢启玉, 沈洁, 朱宝文. 城市热岛效应对西宁地区夏季降水的影响. *河南科技*, 2020, 39(1): 152-158.
- [68] Tang K L, Feng X H. The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants' source water. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185(3/4): 355-367.
- [69] Xu Q, Liu S R, Wan X C, Jiang C Q, Song X F, Wang J X. Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in southwestern China. *Hydrological Processes*, 2012, 26(25): 3800-3809.
- [70] 钟晓菲, 张明军, 张宇, 王家鑫, 刘泽琛, 谷来磊. 基于稳定同位素的兰州市南北两山土壤水入渗模式. *干旱区研究*, 2023, 40(11): 1744-1753.
- [71] 何晓帆, 田丽慧, 汪海娇, 金耀涛, 李耀. 高寒沙地沙棘群落的土壤水分时空变异特征. *水土保持通报*, 2023, 43(2): 23-33.
- [72] 刘立才, 喻红阳, 胡景容. 柳杉针阔混交林造林试验. *四川林业科技*, 2015, 36(2): 127-128, 85.
- [73] Bachofen C, Tumber-Dávila S J, MacKay D S, McDowell N G, Carminati A, Klein T, Stocker B D, Mencuccini M, Grossiord C. Tree water uptake patterns across the globe. *New Phytologist*, 2024, 242(5): 1891-1910.
- [74] Song Z H, Shi P, Li P, Li Z B, Niu H B, Zu P J, Cao M H, Jia Y L. Effects of forest type on carbon storage in the hilly region of Loess Plateau, China. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2024
- [75] González de Andrés E, Camarero J J, Blanco J A, Imbert J B, Lo Y H, Sangüesa-Barreda G, Castillo F J. Tree-to-tree competition in mixed European beech-Scots pine forests has different impacts on growth and water-use efficiency depending on site conditions. *Journal of Ecology*, 2018, 106(1): 59-75.
- [76] 杨菲. 晋西黄土区典型林分水分利用策略及水分生态位特征[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
- [77] Huang L. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau. *Earth-Science Reviews*, 2019, 199: 102962.
- [78] Li B B, Li P P, Zhang W T, Ji J Y, Liu G B, Xu M X. Deep soil moisture limits the sustainable vegetation restoration in arid and semi-arid Loess Plateau. *Geoderma*, 2021, 399, 115-122.
- [79] 张秀芝, 司剑华. 西宁市南山典型林地土壤水分变化特征[J/OL]. *节水灌溉*, 1-13[2025-03-13].
- [80] Dai Y, Zheng X J, Tang L S, Li Y. Stable oxygen isotopes reveal distinct water use patterns of two *Haloxylon* species in the Gurbantonggut Desert. *Plant and Soil*, 2015, 389: 73-87.
- [81] Gong C, Tan Q, Xu M, Liu G. Mixed-species plantations can alleviate water stress on the Loess Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2020, 458, 242-252.
- [82] Xu Q, Liu S, Wan X, Jiang C, Song X, Wang J. Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in southwestern China. *Hydrological Processes*, 2012, 26(25), 3800-3809.
- [83] 赵影. 黄土高原半干旱区植物水分利用策略及机制[D]. 杨凌: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2022.
- [84] Qian J, Zheng H, Wang P F, Liao X L, Wang C, Hou J, Ao Y H, Shen M M, Liu J J, Li K. Assessing the ecohydrological separation hypothesis and seasonal variations in water use by *Ginkgo biloba* L. in a subtropical riparian area. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 486-500.
- [85] 宋恒川, 陈丽华, 吕春娟, 盖小刚, 王萍花. 华北土石山区白桦根系分布特征及力学性能研究. *浙江农业学报*, 2012, 24(4): 693-698.