

DOI: 10.20103/j.stxb.202211023132

葛照欣, 蔡体久, 段北星, 徐志鹏, 郎明翰, 满秀玲. 寒温带兴安落叶松和白桦生长季水分利用特征. 生态学报, 2023, 43(24): 10142-10155.

Ge Z X, Cai T J, Duan B X, Xu Z P, Lang M H, Man X L. Water use characteristics of *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* in the cold temperate zone during the growing season. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10142-10155.

寒温带兴安落叶松和白桦生长季水分利用特征

葛照欣^{1,2}, 蔡体久^{1,2}, 段北星^{1,2}, 徐志鹏^{1,2}, 郎明翰³, 满秀玲^{1,2,*}

1 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

2 东北林业大学森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

3 辽宁章古台科尔沁沙地生态系统国家定位观测研究站, 阜新 123000

摘要: 植物水分利用在生态系统水文循环及其生产力中起着重要作用。气候变化下寒温带森林水分胁迫逐渐加剧, 对其典型树种水分利用特征的研究有助于理解寒温带森林生态系统的稳定性及可持续性。以大兴安岭北部典型树种兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) (L) 和白桦 (*Betula platyphylla*) (B) 为研究对象, 利用稳定同位素技术测定降雨、木质部水和土壤水中氢氧稳定同位素值 (δD 和 $\delta^{18}O$), 揭示不同水源 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的分布特征, 并利用多源线性混合模型及树干边材液流量, 分析不同水源对 2 树种的利用率和利用量, 揭示生长季兴安落叶松和白桦生长季水分利用特征变化。结果表明: (1) 研究区的大气降雨和土壤水同位素均受蒸发的影响发生了一定程度的分馏, 且土壤水同位素分馏程度存在树种间的差异, 兴安落叶松分馏程度大于白桦。(2) 降雨和蒸发对 2 个林分土壤含水率和土壤水稳定同位素值在上层土壤 (0—10cm) 影响强烈, 而对中下层影响较小, 且各层土壤水稳定同位素值表现出显著差异 ($P < 0.05$)。 (3) 在 5 月和 9 月兴安落叶松和白桦主要利用上层土壤水分, 对上层土壤水分的利用率分别为 64.7%、61.3% (L); 61.5%、66.0% (B), 日均利用量分别为 2.00kg/d、1.10kg/d (L); 6.74kg/d、2.75kg/d (B)。在 6—8 月兴安落叶松和白桦主要利用下层 (20—40cm) 土壤水分, 对下层土壤水分的利用率分别为 44.5%、48.1%、70.3% (L); 49.3%、63.6%、74.7% (B), 日均利用量分别为 2.58kg/d、2.76kg/d、3.89kg/d (L); 12.69kg/d、14.77kg/d、14.19kg/d (B)。生长季两树种表现出相似的水分来源, 但对各土层土壤水的利用率存在差异, 这种差异主要表现在 6—8 月白桦对下层土壤水的利用率显著大于兴安落叶松。这些发现说明在未来水分胁迫加剧的情况下, 兴安落叶松比白桦具有更高的环境适应性。

关键词: 寒温带; 大兴安岭北部; 兴安落叶松; 白桦; 稳定同位素; 水分利用特征

Water use characteristics of *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* in the cold temperate zone during the growing season

GE Zhaoxin^{1,2}, CAI Tijiu^{1,2}, DUAN Beixing^{1,2}, XU Zhipeng^{1,2}, LANG Minghan³, MAN Xiuling^{1,2,*}

1 School of forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

3 Liaoning Zhanggutai Desert Ecosystem Research Station, Fuxin 123000, China

Abstract: Plant water use plays an important role in regulating the hydrological cycle and productivity of the ecosystem. Water stress in cold temperate forests gradually is intensifying under climate change. Thus, studying characteristics in water utilization of typical tree species in cold temperate forest ecosystems is helpful to understand ecosystem stability and sustainability. In this study, in two typical forests, larch (*Larix gmelinii*) and birch (*Betula platyphylla*) forests, using the stable isotope methods, the stable isotope value of hydrogen and oxygen (δD and $\delta^{18}O$) of precipitation, xylem water of both larch and birch, and soil water in both forests were measured to explore distribution characteristics of δD and $\delta^{18}O$

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31971451)

收稿日期: 2022-11-02; 网络出版日期: 2023-11-10

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

values in the northern Greater Hinggan Mountains. Meanwhile, combined the multi-source linear mixed model and sapwood sap flux, we analyzed the contribution of different water sources on the two species to explore the variations in water utilization characteristics of larch and birch during the growing season. The results showed that (1) the atmospheric rainfall and soil water isotopes in the study area were affected by evaporation that induced a certain degree of fractionation. However, the isotopic fractionation degree of soil water was different between the two species, which was higher in larch forest than that in birch forest. (2) Soil water content and soil water stable isotope value in the upper soil (0—10 cm) were strongly influenced by rainfall and evaporation in the two forests. The soil water stable isotope value in each layer showed significant differences ($P < 0.05$). (3) In May and September, the soil water utilization of larch and birch was mainly from the upper layer. The soil water utilization rates were 64.7% and 61.3% in larch and 61.5% and 66.0% in birch, respectively. The average daily utilization was 2.00 kg/d and 1.10 kg/d in larch and 6.74 kg/d and 2.75 kg/d in birch, respectively. From June to August, soil water utilization was mainly from the lower layer (20—40 cm). The utilization rates of were 69.1%, 69.0%, and 93.3% in larch forest and 73.5%, 86.4%, and 87.0% in birch, respectively. The average daily utilization was 4.01 kg/d, 3.96 kg/d, 5.16 kg/d in larch and 16.35 kg/d, 20.06 kg/d, 16.52 kg/d in birch, respectively. Our study suggested that there was a similar water source but a different water utilization rate between the two species. This difference was mainly from the water utilization from June to August when the water utilization rate from the lower layer of birch was significantly higher than larch. Thus, in the context of intensive water stress, the larch will have stronger viability than the birch.

Key Words: cold temperate zone; northern Greater Hinggan Mountains; *Larix gmelinii*; *Betula platyphylla*; stable isotope; water utilization characteristics

水分作为森林生态系统生态过程和功能重要的限制因子,对植物生长发育起着极其关键的作用^[1-2]。全球气候变化加剧了降雨格局的变异性,导致季节性干旱的频率和强度增加^[3],水分短缺会直接改变植物分布及其水分利用特征和模式,进而会对植物的生长适应性和分布格局造成严重影响^[4]。因此,认识森林生态系统植物水分利用特征是正确理解其对气候变化响应的关键。植物水分利用特征主要与气候和植被生理及土壤水分特征有关^[5]。在湿润和半湿润地区,上层土壤往往水分含量较高,植物通常扎根较浅并主要使用上层土壤水^[6]。而在干旱或半干旱地区,蒸发需求超过降雨,上层土壤往往水分含量很少,植物通过深根从中下层土壤获取水分^[7-8]以应对干旱环境。而在一些季节性干旱地区,一些植物是“可塑性二型根系”,在水分充足时,大部分水分来源于上层土壤;而在上层土壤水分有限时,可以利用到下层土壤水或浅层地下水^[9]。由于土壤水分分布不均匀,导致土壤水分不足以维持植物正常生理活动^[10],将主要水源从浅层改变到深层(或从深层改变到浅层)的能力对植物的生长非常重要。因此分析植物水分利用特征对于了解植物在水分有限环境中的生长策略至关重要。

植物水分利用来源和利用率是评价其水分利用特征的重要指标。早期判断植物水分利用来源通常采用挖掘法或根钻法^[11],不但费时费力,而且植物根系活性会因土壤含水率的变化而异,导致较大的不确定性。而稳定氢氧同位素技术作为一种新的研究手段已广泛应用于树木水分来源的研究中^[12-13]。通过对比分析树木木质部水与各水源的同位素组成,即可揭示植物水分来源^[14],同时结合多元线性模型可进一步量化各水源对树木水分利用的贡献比例^[15]。以往使用氢氧同位素对植物水分利用来源研究主要集中在干旱和半干旱地区^[16-18]、湿润地区混交林中植物的水分利用^[19-20]以及农林复合系统的水分利用特征等方面^[21]。也有部分学者对同一地区不同树种水分来源及影响因素进行研究,例如 Liu 等^[22]研究发现的阔叶和针叶树种的水分来源具有季节变化特征。在浅土层水分有限的旱季,树木利用深层根系主要吸收中层和下层的水分,在雨季主要吸收上层水分。Del Castillo 等^[23]在地中海地区发现阔叶和针叶树种生长季主要利用中下层水分。针叶和阔叶树种会通过自身根系分布来适应土壤水分的可利用性^[24]。Nie 等^[25]研究发现,细根分布是调节植物

水分吸收的主要驱动因素,在干旱前期,针叶树种吸收浅土层水分,在干旱后期转向深土层;阔叶树种总是依赖于近期雨水或浅土水。但是对寒温带森林针叶和阔叶树种的生长季水分利用特征变化研究还有待进一步探索。大兴安岭林区是我国最大的原始林区,也是我国唯一的高纬度寒温带林区^[26],研究表明大兴安岭林区正在经历一个变暖的环境和日益加剧的水分胁迫^[27],植物水分利用越来越受到全球气候变暖和极端天气事件的影响^[4]。兴安落叶松林和白桦林作为大兴安岭林区典型的森林类型,面积占整个大兴安岭地区森林面积的80%以上^[28],对该区域的碳水平衡起到重要的作用。因此了解该地区兴安落叶松和白桦的水分利用特征,对预测未来气候变化下兴安落叶松林和白桦林对环境变化的适应性具有重要意义。因此本研究以大兴安岭地区兴安落叶松和白桦为研究对象,利用稳定同位素技术研究两树种生长季水分来源及利用率,并结合热扩散技术(TDP)分析两者的耗水情况,旨在(1)揭示生长季兴安落叶松和白桦水分利用特征及其差异;(2)分析兴安落叶松和白桦水分利用特征差异的原因。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于大兴安岭北部漠河森林生态系统国家定位观测研究站(122°06'—122°27'E, 53°17'—53°30'N)(图1)。研究区属连续多年冻土区,寒温带大陆性季风气候^[29]。年平均气温-3.7℃,最低气温-52.3℃,最高气温35.2℃。年均降雨量为460mm,降雨多集中在6—8月份,占全年降雨的70%—80%。无霜期每年约有100—120d,年均潜在蒸散量约为700mm^[30]。该地区典型植被是以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为主的明亮针叶林,此外还分布有大面积的白桦(*Betula platyphylla*)次生林和少量的樟子松(*Pinus sylvestris* var.

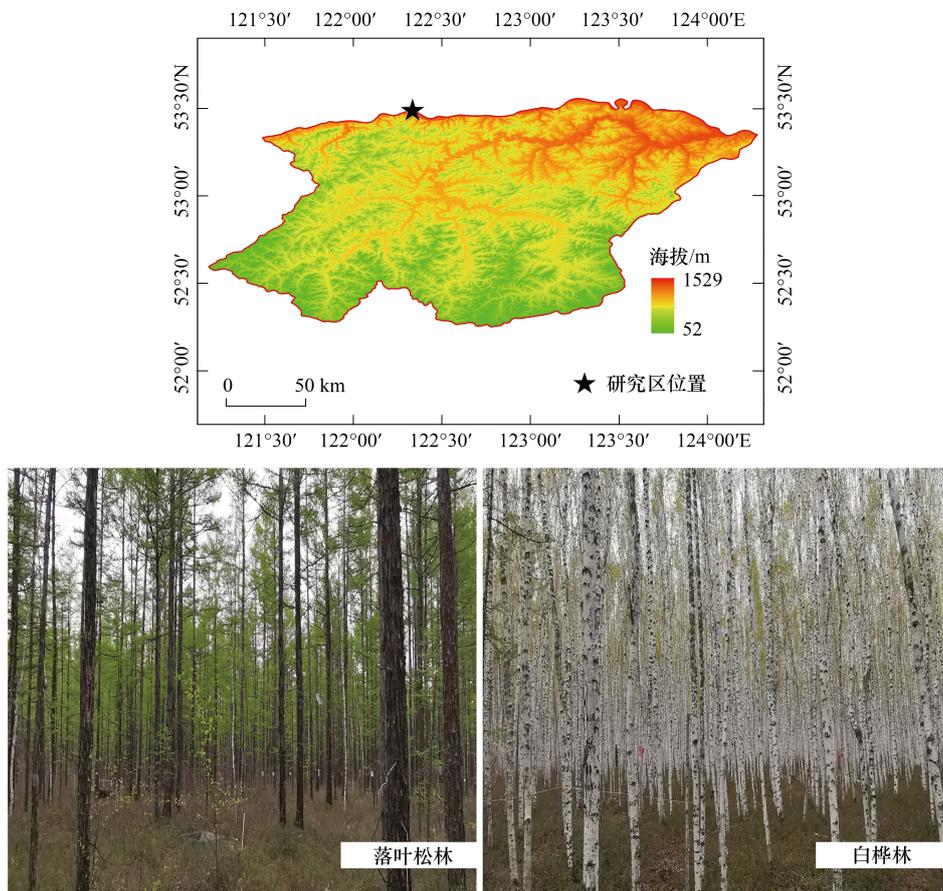


图1 研究区位置图和采样点林地景观图

Fig.1 Location of the study area and scape of sampling site

mongolica) 林及山杨 (*Populus davidiana*) 林等。该地区土壤类型以棕色针叶林土为主, 土层浅薄, 厚度约为 40cm^[31-33]。

1.2 样地设置和样品采集

根据前期调查, 选择具有代表性的兴安落叶松纯林(L)和白桦纯林(B), 每种林型设置调查样地 3 块, 每块样地面积 20m×30m。并对林分特征进行调查, 包括树高、胸径、林龄、林分密度、坡度、林下组成(表 1), 同时测定土壤基本物理性质(表 2)等。根据调查结果在每个样地内选择 3 株标准木作为样树。对样树木质部及其附近的土壤样品进行采集, 样品取样时间为 2019 年 5—9 月, 采样频率为每月一次, 且保证每次采样前 3 天无降雨。具体采样步骤如下:

表 1 兴安落叶松林和白桦林样地基本情况表

Table 1 Basic situation plot of larch forest and birch forest

林型 Forest Type	兴安落叶松林 larch forest	白桦林 birch forest
林龄 Stand age	75—90	60—65
郁闭度 Canopy density	0.60±0.05	0.7±0.1
林分密度 Stand density/(株/hm ²)	1300±130	1820±250
树高 Mean tree height/m	16.6±3.4	17.2±3.5
胸径 Mean DBH/cm	10.13±0.35	19.13±3.0
海拔 Elevation/m	320±6	354±4
坡度 Slope/(°)	3±1	4±1
树种组成 Species composition	10 兴安落叶松	10 白桦
边材面积 Sap wood area/cm ²	45.89±3.77	217.91±58.78
凋落物厚度 litter layer thickness/cm	3.17±0.76	5.23±1.12
林下植被 Understory species including	兴安刺玫 (<i>Rosa multiflora</i> var. <i>cathayensis</i>)、兴安杜鹃 (<i>Rhododendron dauricum</i>)、北国红豆 (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)、矮生悬钩子 (<i>Rubus clivicola</i>)、笃斯越桔 (<i>Vaccinium uliginosum</i>)、凤毛菊 (<i>Saussurea japonica</i>)、红花鹿蹄草 (<i>Pyrola incarnata</i>)、杜香 (<i>Ledum palustre</i>)、越桔 (<i>V. vitis-idaea</i>)	兴安杜鹃 (<i>Rhododendron dauricum</i>)、北国红豆 (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)、矮生悬钩子 (<i>Rubus clivicola</i>)、笃斯越桔 (<i>Vaccinium uliginosum</i>)、凤毛菊 (<i>Saussurea japonica</i>)、红花鹿蹄草 (<i>Pyrola incarnata</i>)

表中数值表示平均值±标准差

表 2 兴安落叶松林和白桦林土壤基本物理性质

Table 2 Basic soil physical properties plot of larch forest and birch forest

土壤深度 Soil depths/cm	兴安落叶松林 larch forest				白桦林 birch forest			
	土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³)	总孔隙度 Soil total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	砾石含量 Coarse fragments (>2 mm)/%	土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³)	总孔隙度 Soil total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	砾石含量 Coarse fragments (>2 mm)/%
0—5	0.95±0.07Da	62.78±5.97Aa	53.44±3.47Aa	14.83±2.27Ca	0.67±0.03Db	56.13±5.79Ab	44.74±2.37Ab	12.27±1.16CDa
5—10	1.33±0.32Ca	49.16±4.24Ba	43.78±2.99Ba	18.77±3.61Ba	0.98±0.10Cb	50.34±4.31Ba	39.93±3.17Ab	15.07±3.19Cb
10—20	1.70±0.03Ba	44.10±4.60CDa	43.03±3.48Ba	25.75±6.15Aa	1.16±0.16Cb	39.84±3.28Cb	29.68±2.75Bb	9.91±2.31Db
20—30	1.83±0.14Aa	40.03±4.12CDa	38.45±2.54Ca	29.82±4.26Aa	1.70±0.09Aa	36.66±5.56CDb	30.85±3.10Bb	22.99±3.18Aa
30—40	1.85±0.12Aa	38.88±2.87Da	36.97±2.21Ca	24.05±5.18Aa	1.68±0.08Bb	34.21±1.02Db	29.85±2.42Bb	17.06±3.91Bb

表中数值表示平均值±标准差;表中同一列的不同大写字母表示同一树种不同土层的 0.05 水平存在显著差异;同一列中不同的小写字母表示不同树种在同一土层的 0.05 水平上存在显著差异

植物样本:在采样日早 8:00—9:00 之间采集样地内标准木的已栓化、成熟的枝条(直径约 1—3 cm), 每株采集 3 个样品重复。将采集的枝条去掉外皮和韧皮部后放入干净的聚乙烯瓶(50mL)中, 用 Parafilm 封口膜密封, 并迅速放入便携式冰箱中, 防止同位素分馏蒸发, 随后进一步冷冻(-20℃)至水分抽提。

土壤样品:同一时间, 在已选定的标准木附近, 使用手动螺旋钻挖掘土壤剖面, 分别从 0—5cm、5—10cm、

10—20cm、20—30cm 和 30—40cm 的 5 个深度采集土壤样品,每个深度重复 3 次。将样品中砾石等杂物去除,然后放入干净的聚乙烯瓶(50mL)中,用 Parafilm 封口膜密封,迅速放入便携式冰箱中,防止同位素分馏蒸发,随后进一步冷冻(-20℃)至同位素分析。由于实测采样地点浅层地下水深度大于 20m,远远超过最大生根深度,因此,本研究不考虑浅层地下水为潜在水源。

降雨样品在漠河森林生态系统国家定位观测研究站内的标准气象场采集。使用三个自制的 PVC 桶收集降雨样品,在每个桶的顶部放置一个装有乒乓球的漏斗,以防止同位素分馏蒸发。收集的样品迅速转移到清洁聚乙烯瓶(50mL)中,用 Parafilm 封口膜密封并记录降雨日期,带回实验室冷冻(-20℃)至同位素分析。2019 年 5 月至 9 月共采集 52 个降雨样品,每个样品采集 3 次重复。

1.3 根系样品采集与测定

根系调查采用钻取土芯法,在所选取的样树旁沿 S 形等距离选取 8 个样点,取样点避开乔木及灌木的基部,用内径 10cm 的根钻在各样点钻取土芯,按照 5cm、10cm、20cm、30cm 和 40cm 深度取样。土壤样品中的根系挑出,冲洗干净,使用游标卡尺测量根系直径,按照细根(<2mm)、中根(2—5mm)、粗根(>5mm)对根系进行分类并称重,随后于 65℃ 烘箱烘干至恒重测定干重。根系生物量沿土壤剖面的垂直分布占比(表 3)。

表 3 兴安落叶松和白桦根系生物量沿土壤剖面的垂直分布占比

Table 3 Vertical distribution of the root biomass of *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* along the soil profiles

土壤深度 Soil depths/cm	兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>			白桦 <i>Betula platyphylla</i>		
	细根 Fine root/%	中根 Middle root/%	粗根 Crude root/%	细根 Fine root/%	中根 Middle root/%	粗根 Crude root/%
0—5	20.35±6.08Bb	14.66±0.57Ba	12.66±6.42Ba	23.33±2.51Aa	12.15±2.01Bb	11.66±3.05Ca
5—10	29.01±4.58Aa	32.66±3.51Aa	32.01±7.81Aa	24.01±2.64Ab	30.33±1.15Aa	27.05±6.55Bb
10—20	20.33±7.63Bb	29.01±4.35Ab	33.32±8.05Ab	23.66±0.57Aa	34.66±4.04Aa	40.23±2.64Aa
20—30	18.66±4.16Ca	16.33±1.52Ba	15.67±4.93Ba	17.66±2.51Ba	15.90±4.00Ba	14.73±5.56Ca
30—40	11.65±3.05Da	7.34±1.73Ca	6.34±2.93Ca	11.34±2.50Ca	6.96±1.73Ca	6.33±2.51Da

表中数据为细、中、粗根总生物量的百分比;林分平均±林分内标准差;同一列的不同大写字母表示同一树种不同土层的 0.05 水平存在显著差异;同一列中不同的小写字母表示不同树种在同一土层的 0.05 水平上存在显著差异

1.4 气象数据和土壤含水率的测定

气象数据来源于漠河生态站标准气象场。1.5m 处的空气温度利用被动式 HMP155 屏蔽探针(Vaisala, Finland)观测。降雨量使用 TE525 非加热倒斗式雨量筒(Campbell Science, Logan, United States)观测。兴安落叶松和白桦样地内土壤含水率(soil water content, SWC)利用 5 个 CS650 综合土壤探针(Campbell Science, Logan, United States)在 5cm、10cm、20cm、30cm 和 40cm 深度进行观测。数据记录间隔 30min,储存于 CR3000 数据采集器(Campbell Science, Logan, United States)。

1.5 水分提取与同位素测定

首先将采集的土壤和木质部样品恢复至室温,然后利用 LI-2000 真空低温蒸馏提取系统对样品进行水分抽提^[34],随后使用液态水同位素分析仪(LGR-DLT-100, USA)测定其 δD 和 $\delta^{18}O$ 。 δD 和 $\delta^{18}O$ 值是以相对于 VSMOW 的千分率(‰)计算得出,精度分别为 0.30‰和 0.10‰,计算公式为:

$$\delta X = (R_{sa} - R_{st}) / R_{st} \times 1000\% \quad (1)$$

式中, δX 为 δD 或 $\delta^{18}O$; R_{sa} 和 R_{st} 分别样品和 VSMOW 中的 D 或 ^{18}O 浓度。

1.6 植物利用潜在水源比例计算

根据同位素质量守恒原理,植物可利用潜在水源比例的计算利用^[35]提出的多元混合线性模型实现。该模型已被广泛用于基于稳定同位素计算每个水源的吸水比例。源增量定义为 1%,质量平衡公差定义为 0.1‰。通过计算平均值,将具有相似同位素值的相邻土层一般聚集成单一水源,便于后续对潜在水源进行分析和比较^[36]。

在计算植物对多个水源的水分利用比例时,不同土壤深度和各潜在水源的相对贡献率用以下方程表示:

$$\begin{aligned}\delta D_p &= \sum f_i \delta D_i \\ \delta^{18} O_p &= \sum f_i \delta^{18} O_i \\ \sum f_i &= 1\end{aligned}\quad (2)$$

式中, δD_p 或 $\delta^{18} O_p$ 分别代表植物木质部水的氢、氧同位素值; δD_i 或 $\delta^{18} O_i$ 分别代表不同潜在水源*i*中的氢、氧同位素值; f_i 代表不同潜在水源*i*对植物的贡献率。根据各土层同位素值将整个土壤剖面(0—40cm)分为三个潜在水源上土层(0—5cm和5—10cm)、中间土层(10—20cm)、下土层(20—30cm,30—40cm)。依据如下:(1)上层(0—5cm和5—10cm)处的土壤水分中,SWC和同位素值的不稳定性最大,随月份和土壤深度变化显著。(2)中层(10—20cm)土壤水分中,比上土层SWC和同位素值变化较稳定。(3)下层(20—30cm,30—40cm)处土壤水分中,SWC和同位素值相对均匀,无明显月变化。

1.7 树干液流的测定

将兴安落叶松和白桦样地内选择的标准木作为测定样树(详见表1)。基于热扩散原理,使用TDP探针测量液流速率^[37]。TDP探针安装在树干北部1.3m高度处,并外裹铝箔避免太阳辐射的影响。采用CR1000-XT(Campbell Scientific, UT, USA)采集器记录数据,数据采集频率为5min。液流通量的计算公式为^[37-38]:

$$J_s = 0.0119 \times 3600 \times \left[\frac{\Delta V_{\max} - \Delta V}{\Delta V} \right]^{1.231} \quad (3)$$

$$W = \int_0^{J_s} A_s t \times 24 \times 1000 \quad (4)$$

式中, W 为树干液流通量(kg/d), A_s 为边材面积(cm^2),利用颜色变化法^[39]与心材进行区分,确定每棵树的边材厚度,计算出边材面积; t 为对应液流密度的时间, J_s 表示为树干液流密度($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$), ΔV_{\max} 代表液流为0时的探针最大电压(mV), ΔV 指测定时刻输出的瞬时电压(mV)。

1.8 统计分析

使用SPSS 21.0(Armonk, NY, USA)软件进行统计学分析。双因素方差分析比较土壤层深度和月份对土壤含水率、木质部和土壤水分中 δD 和 $\delta^{18} O$ 值影响。单因素方差分析检验兴安落叶松和白桦的液流通量,以及各土壤深度(0—5cm、5—10cm、10—20cm、20—30cm、30—40cm)可利用水源比例的差异。图表中数据为平均值±标准偏差。

2 结果与分析

2.1 温度、降雨量和降雨同位素值变化特征

观测期内降雨量呈现先升高后下降的趋势(图2)。总降雨量为233.9mm,7月降雨量最高,为104.3mm,占整个观测期间的44.6%,6月降雨量最低,为26.9mm,占整个观测期间的11.5%。温度变化范围在3.01—22.62℃之间,日平均温度为14.05℃。观测期间 δD 变化范围为-194.34‰—-44.90‰,日加权值为-99.32‰, $\delta^{18} O$ 变化范围为-26.02‰—-4.81‰,日加权值为-12.82‰。7月降雨同位素富集程度最高, δD 和 $\delta^{18} O$ 平均值分别为-87.37‰和-11.17‰。9月降雨同位素富集程度最低, δD 和 $\delta^{18} O$ 平均值分别为-128.20‰和-17.03‰。

2.2 兴安落叶松林和白桦林SWC和土壤水同位素变化特征

观测期内两块林地SWC呈现先升高后降低的趋势(图3)。其中两块林地5月平均SWC最高,分别为24.9%(L)和29.1%(B),8月平均SWC最低分别为18.7%(L)和15.2%(B)。差异显著性检验表明,除兴安落叶松林7、9月和白桦林8、9月SWC不存在差异外($P>0.05$),其他月份间兴安落叶松林和白桦林SWC均存在显著差异($P<0.05$)。此外,5—6月白桦林各层SWC显著高于兴安落叶松林各层SWC($P<0.05$),7—9月白

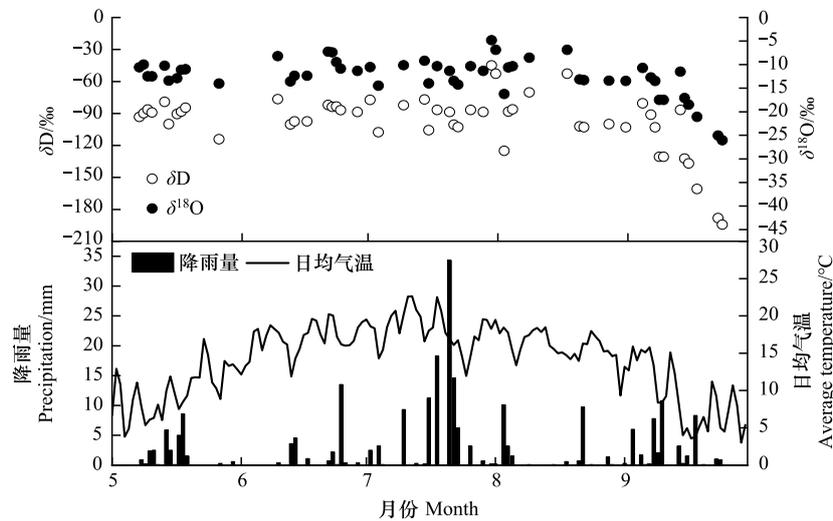


图2 研究区气温、降雨量和降雨中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化特征

Fig.2 The variation characteristic of air temperature, precipitation amount, δD and $\delta^{18}O$ of precipitation in the study area

桦林各层 SWC 显著低于兴安落叶松林各层 SWC ($P < 0.05$), 而整个生长季两林地 SWC 无显著差异。可见除 5 月两块林地可能是由于积雪融化的原因导致 10cm 的 SWC 极显著高于下层外, 其余各月随土层深度增加 SWC 相对稳定。

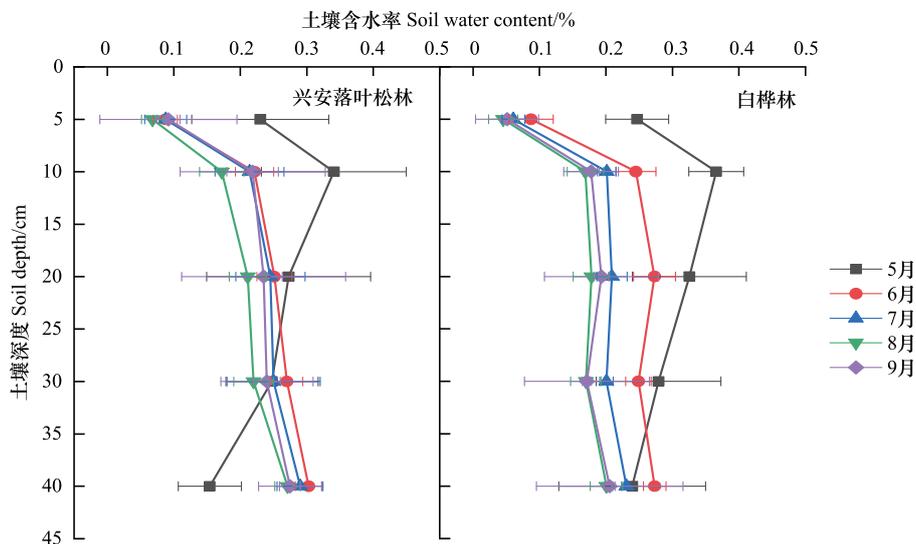


图3 兴安落叶松林和白桦林土壤含水率变化特征

Fig.3 Characteristics of soil water content changes in larch forest and birch forest

兴安落叶松林和白桦林土壤水分 δD 值变化范围在 -118.61 — -137.44 和 -110.66 — -132.54 之间, $\delta^{18}O$ 值变化范围在 -14.69 — -18.42 和 -13.20 — -17.13 之间(图 4)。兴安落叶松林土壤水分同位素值表现为 7 月最高, 9 月最低。白桦林土壤水分同位素值表现为 5 月最高, 7 月最低。5—9 月两林地土壤水分的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值均表现出随土壤深度的增加而下降的趋势。差异显著性检验表明, 两林地 5—9 月 5cm 和 10cm 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值显著高于 30cm 和 40cm 土层 ($P < 0.05$), 而 20cm 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值存在一定波动性。因此, 本研究将 0—10 cm 土层划分为上层, 将 20cm 土层划分为中层, 将 20—40cm 土层划分为下层。此外, 除 7 月白桦林土壤水分的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值与兴安落叶松林差异不显著 ($P > 0.05$), 其他月份白桦林各层土壤水分 δD 和 $\delta^{18}O$ 值

均显著高于兴安落叶松林($P<0.05$)。

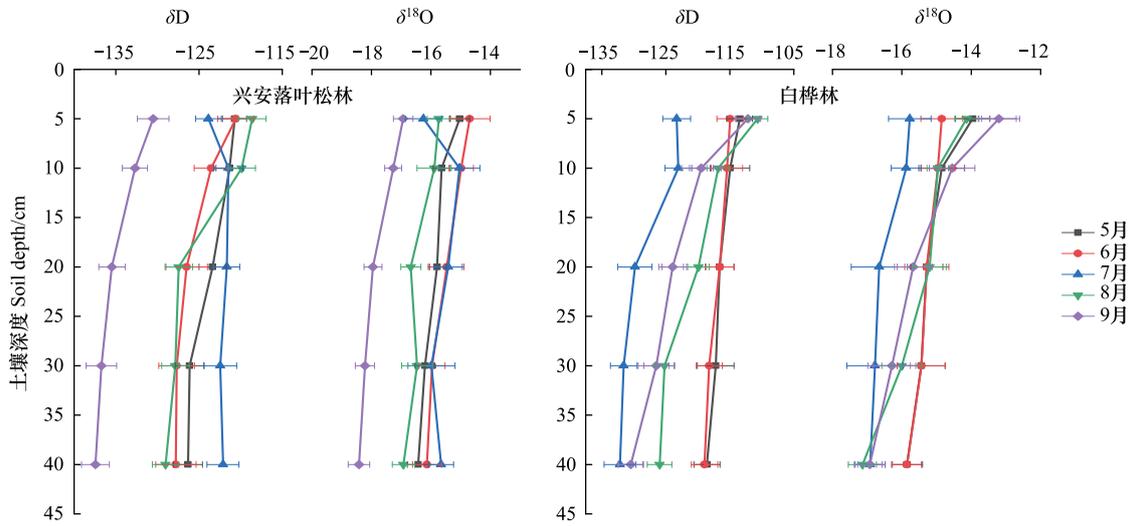


图 4 兴安落叶松林和白桦林土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 变化特征

Fig.4 Characteristics of soil water δD and $\delta^{18}O$ changes in white larch forest and birch forest

2.3 降雨、土壤水、木质部水中氢氧同位素分布特征

5—9月研究区大气降雨线(LMWL): $\delta D = 6.70\delta^{18}O - 14.09$ ($R^2 = 0.95, n = 52$), 相对于全球大气水线(GMWL: $\delta D = 8.17\delta^{18}O + 10.56$)^[40], 研究区大气降雨线斜率和截距均较低(图5)。兴安落叶松土壤水线(LSWC): $\delta D = 4.70\delta^{18}O - 49.76$ ($R^2 = 0.82, n = 75$)和白桦土壤水线(BSWC): $\delta D = 5.35\delta^{18}O - 37.61$ ($R^2 = 0.79, n = 75$)的斜率和截距均低于LMWL,同时BSWC斜率高于LSWC。此外白桦和兴安落叶松茎干水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值均在各自土壤水线周围分布,说明兴安落叶松和白桦利用了各自不同深度的土壤水分。

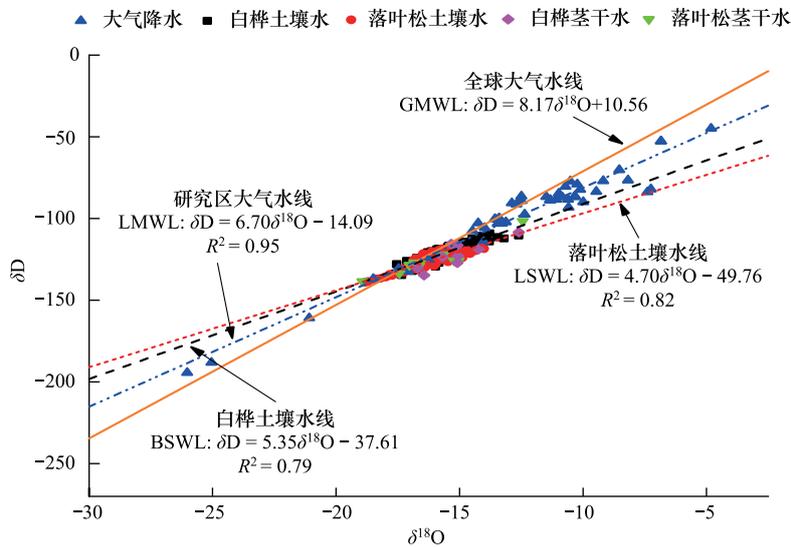


图 5 研究区大气降雨、土壤水和木质部水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 分布特征

Fig.5 δD and $\delta^{18}O$ distribution characteristics of atmospheric rainfall, soil water, and xylem water in the study area

全球大气水线:(GMWL, global meteoric water line), 研究区大气水线:(LMWL, local meteoric water line), 白桦土壤水线:(Birch soil water line), 兴安落叶松土壤水线:(Larch soil water line)

2.4 兴安落叶松和白桦液流通量变化特征

5—9月兴安落叶松和白桦液流通量均表现为6月最高分别为5.82kg/d、25.76kg/d,9月最低分别为1.80kg/d、4.18kg/d(图6)。在整个观测期内,白桦的液流通量均大于兴安落叶松,平均是兴安落叶松的3.77倍。差异性检验表明,兴安落叶松6—8月液流通量差异不显著($P>0.05$),但与5月和9月差异显著($P<0.05$)。白桦日均液流通量除6、7月差异不显除外($P>0.05$),其他月份均差异显著($P<0.05$)。兴安落叶松和白桦液流通量在各月份间存在极显著差异($P<0.01$)。上述结果说明生长季各月份阔叶白桦比针叶兴安落叶松蒸腾强烈。

2.5 兴安落叶松和白桦对水源的利用特征

兴安落叶松5月和9月对上层土壤水的利用率分别是64.7%和61.3%,日平均利用量分别是2.00kg和1.10kg(表4)。白桦5月和9月对上层土壤水的利用率分别是61.5%和66.0%,日平均利用量分别是6.74kg和2.75kg。兴安落叶松和白桦在6—8月主要利用下层的土壤水分,而对上中层土壤水分利用相对较少。其中兴安落叶松在6—8月对下层土壤水的利用率分别是44.5%、48.1%和70.3%,日平均利用量分别是2.58kg、2.76kg和3.89kg。白桦6—8月对下层土壤水的利用率分别是49.3%、63.6%和74.7%,日平均利用量分别是12.69kg、14.77kg和14.19kg。差异性检验表明,白桦在不同月份对各层土壤水的利用量显著高于兴安落叶松($P<0.05$)。上述结果说明兴安落叶松和白桦在不同月份对各层水源有着相似的水分来源,但利用率和利用量存在显著差异。

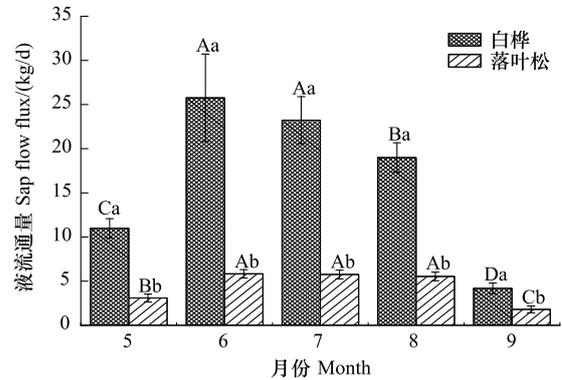


图6 兴安落叶松和白桦日均液流通量变化

Fig.6 Changes in the daily average liquid circulation of *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla*

不同大写字母表示同一树种不同月份的0.01水平存在显著差异,不同小写字母表示不同树种同一月份的0.05水平存在显著差异

表4 不同月份兴安落叶松和白桦对各水源的利用特征

Table 4 Utilization characteristics of various water sources by *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* in different months

月份 Month	土层深度 Soil depth/cm	兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>			白桦 <i>Betula platyphylla</i>			
		日均液流通量 The daily of Sap flow density/kg	利用率 Utilization ratio/%	日均利用量 The daily utilization/kg	日均液流通量 The daily of Sap flow density/kg	利用率 Utilization ratio/%	日均利用量 The daily utilization/kg	
5	上层	0—5	3.09±0.54Bb	33.0±1.8Aa	1.02±0.15Ab	10.97±2.29Ca	31.9±2.02Aa	3.50±0.84Aa
		5—10		31.7±1.5Aa	0.98±0.14Ab		29.6±2.21Aa	3.24±0.62Aa
	中层	10—20		17.7±2.2Ba	0.54±0.08Bb		17.4±1.5Ba	1.90±0.19Ba
		20—30		9.0±2.1Ca	0.27±0.04Cb		11.3±1.53Ca	1.24±0.12Ca
		30—40		8.6±1.6Ca	0.26±0.03Cb		9.8±1.23Ca	1.07±0.10Ca
6	上层	0—5	5.82±0.94Ab	12.3±1.2Ba	0.71±0.06Bb	25.76±3.29Aa	7.3±1.49Cb	1.88±0.45Ba
		5—10		18.6±1.4Ba	1.08±0.09Bb		19.2±0.95Ba	4.94±0.94Ba
	中层	10—20		24.6±0.8Aa	1.43±0.17Ab		24.2±1.90Aa	6.23±1.19Aa
		20—30		22.4±1.5Aa	1.30±0.10Ab		21.1±1.45Aa	5.43±1.04Aa
		30—40		22.1±1.4Ab	1.28±0.11Ab		28.2±2.5Aa	7.26±2.89Ba
7	上层	0—5	5.75±1.35Ab	11.9±3.0Ca	0.68±0.06Cb	23.23±3.45Aa	6.9±0.82Cb	1.60±0.38Ca
		5—10		19.1±2.6Ba	1.09±0.10Bb		6.7±1.10Cb	1.55±0.27Ca
	中层	10—20		20.9±2.3Ba	1.20±0.10Bb		22.8±2.05Ba	5.29±1.60Ba
		20—30		23.4±2.1Ab	1.34±0.12Ab		31.3±2.12Aa	7.27±1.83Aa
		30—40		24.7±1.9Ab	1.42±0.12Ab		32.3±0.96Aa	7.50±1.85Aa
8	上层	0—5	5.53±1.63Ab	3.1±0.4Ca	0.17±0.02Cb	19.00±3.83Ba	4.8±1.4Da	0.91±0.08Da

续表

月份 Month	土层深度 Soil depth/cm	兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>			白桦 <i>Betula platyphylla</i>			
		日均液流量 The daily of Sap flow density/kg	利用率 Utilization ratio/%	日均利用量 The daily utilization/kg	日均液流量 The daily of Sap flow density/kg	利用率 Utilization ratio/%	日均利用量 The daily utilization/kg	
	5—10		3.6±0.8Cb	0.20±0.02Cb		8.2±1.73Ca	1.55±0.13Ca	
	中层	10—20	23.0±2.4Ba	1.27±0.11Bb		12.3±1.21Bb	2.33±0.90Ba	
	下层	20—30	29.1±2.1Bb	1.61±0.14Bb		35.9±1.95Aa	6.82±1.60Aa	
		30—40	41.2±3.5Aa	2.28±0.20Ab		38.8±2.11Aa	7.37±1.65Aa	
9	上层	0—5	1.80±0.60Cb	31.8±3.8Ab	0.57±0.12Ab	4.18±0.75Da	43.2±3.10Aa	1.80±0.25Aa
		5—10		29.5±3.3Aa	0.53±0.11Ab		22.8±2.41Ab	0.95±0.13Aa
	中层	10—20		15.6±1.2Ba	0.28±0.06Bb		13.9±1.82Ba	0.58±0.08Ba
	下层	20—30		12.3±0.4Ba	0.22±0.05Bb		11.3±2.30Ba	0.47±0.07Ba
		30—40		11.0±0.2Ba	0.19±0.04Bb		8.7±1.85Ba	0.36±0.05Ba

表中数值表示平均值±标准差;同一列的不同大写字母表示同一树种不同土层的 0.05 水平存在显著差异;同一列中不同的小写字母表示不同树种在同一土层的 0.05 水平上存在显著差异

3 讨论

3.1 降雨同位素组成变化特征

森林生态系统水分输入主要来源于降雨^[41],降雨中同位素组成变化会对其他水体(土壤水、木质部水等)同位素组成产生直接影响^[42]。在本研究中,LMWL($\delta D = 6.70\delta^{18}O - 14.09$)的斜率和截距小于 GMWL($\delta D = 8.17\delta^{18}O + 10.56$),说明水汽在运输和降雨的过程中,受到蒸发的影响,存在不同程度的分馏。研究表明降雨同位素组成变化主要受温度和降雨量的共同影响^[43],在本研究中降雨中 δD 值与温度呈正相关($\delta D = 2.94T - 137.68, R^2 = 0.28, T$ 为温度),与降雨量呈负相关($\delta D = -0.19P - 96.81, R^2 = 0.04, P$ 为降雨量),这与前人的研究相似^[44]。一般来说,水汽在运输过程中会受到蒸发及运输距离的影响,降雨中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值在温度较高的月份富集,相比之下,受降雨量和当地水汽源的影响,降雨量高的月份 δD 和 $\delta^{18}O$ 值富集程度更大^[45]。但在本研究中 5 月和 9 月降雨量相对较高,而降雨中 δD 和 $\delta^{18}O$ 却低于 6—8 月份。这说明研究区降雨同位素组成存在明显的温度效应。Liu 等^[46]在北京降雨同位素季节组成中也发现了相似的结果。

3.2 SWC 和土壤水中稳定同位素组成变化特征

土壤水分季节变化主要受降水补给的影响^[47],同时与土壤初始含水率和土壤蒸发强度密切相关^[10]。在本研究中,5 月生长季初期两块林地 SWC 最高是因为积雪融化,同时植物开始萌芽所需水分较少的原因。6—8 月植物进入生长季旺盛时期,随着温度升高土壤蒸发强度增大同时蒸腾作用所需水分增加,导致 SWC 开始下降。此外,8 月 SWC 降至整个生长季的最低值,这可能是 8 月降雨补给较少,同时土壤蒸发最为强烈导致的。9 月植物进入生长季末期,但仍有降水补充,同时温度较低,土壤蒸发强度和蒸腾作用减弱,致使 SWC 开始升高,最终导致生长季两块林地 SWC 呈现先降低后升高的趋势变化。土壤水分的垂直分布变化受到降雨入渗和植物根系分布等因素的影响而存在时空异质性^[48]。本研究发现,生长季两块林地土壤 SWC 随土层深度增加而逐渐增大,这是由于根系垂直分布生物量占比较高的土层 SWC 也相对较低^[49],这与两块林地根系垂直分布规律一致(表 4)。同时两块林地上层 SWC 对降雨的响应比中下层土壤更敏感,这是因为在降雨入渗过程中,上层土壤在下渗过程中的储水量较大,入渗至中下层的水量相对较小,且上层土壤与大气相通,受蒸发的影响也较下层更剧烈^[50]。生长季两林地之间各层 SWC 存在差异,是由于生长季不同时期两林地郁闭度和土壤特性的差异(表 2)造成降雨补给和入渗程度不同导致的。

土壤水分中的同位素组成主要受降雨中同位素组成和土壤蒸发的影响而产生不同程度的分馏^[51]。本研究两个林地上层土壤水同位素分馏程度大于中下层,而中下层土壤水同位素相对稳定,两林地土壤水中的

δD 和 $\delta^{18}O$ 值均随土壤深度的增加而逐渐减小,这与 Chen 等^[52]在黄土高原的研究结果相似。这是由于上层土壤存在较强的蒸发效应^[53],导致上层土壤同位素分馏效应明显,而随着土壤深度的增加蒸发量和蒸发强度会逐渐减弱,分馏效应也相对减小,所以与上层相比,中层和下层土壤水同位素组成分馏程度较小且呈现逐渐降低的趋势。兴安落叶松林 9 月土壤水分的同位素组成显著低于其他月份,而白桦林 7 月显著低于其他月份。这可能由于不同月份降雨中同位素组成及两林地土壤蒸发强度不同^[51],导致土壤水分同位素组成在不同月份分馏程度不同。同时研究发现,除 7 月白桦林土壤水分的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值与兴安落叶松林差异不显著,其他月份白桦林 δD 和 $\delta^{18}O$ 值均显著高于兴安落叶松林。这说明除 7 月降雨量高限制了两林地的蒸发外,其他月份兴安落叶松林土壤水同位素的分馏程度要高于白桦林,白桦林土壤水线斜率高于兴安落叶松林土壤水线也可以证明这一差异(图 5)。此外,由于两林地土壤特性及枯落物厚度的差异(表 1、表 2),导致兴安落叶松林蒸发强度和蒸发量大于白桦林,造成兴安落叶松林土壤水同位素组成的分馏程度高于白桦林。该结果与刘自强等^[54]和 Loik 等^[55]的研究结论相一致。

3.3 兴安落叶松和白桦水分利用变化特征

研究表明植物的水分利用区域的变化主要受控于根系垂直分布、根系生物量和 SWC 的影响^[56]。因为根系是植物吸收水分的主要方式之一,根系垂直分布和根系生物量会直接影响植物吸收水分的深度和利用量^[57]。本研究中,兴安落叶松和白桦具有相似的根系分布特征,均是浅根型树种且根系生物量随土层深度增加而呈下降趋势,细根($\leq 2\text{mm}$)主要分布在上层和中层土壤中(表 3),导致了生长季兴安落叶松和白桦表现出相似的水分来源。相似的结果在其他地区也得到了验证^[58]。在生长季,植物很少从单一土壤深度吸收水分,它们通常会根据 SWC 和环境条件的变化而改变吸水来源^[59]。由于研究区 5 月处于生长季初期,融雪和降雨输入的原因导致上层土壤 SWC 显著高于中下层,两树种通过含有大量根毛的细根从上层土壤获取主要水分。6—8 月处于生长季旺盛时期,两树种蒸腾耗水增加,同时由于蒸发的原因导致上层 SWC 较低,为了维持正常生理活动,两树种通过根系从中下层土壤获取主要水分。而 9 月处于生长季末期,虽然上层土壤水分含量较低,但是已经足够维持两树种正常生理活动。两树种由于环境条件的变化而从不同土层吸水,表明两树种均具有“可塑性二型根系^[7]”。然而,由于两树种生理特征和各层 SWC 的差异,导致两树种不同深度土壤水分利用率存在一定差异,这种差异主要表现在 6—8 月白桦对下层土壤水的利用率显著大于兴安落叶松。这与 Langs 等^[60]的研究结果相似。其次,本研究发现 2 个树种 6—8 月液流通量要显著高于 5 月和 9 月,因为相对于 5 月生长季初期和 9 月生长季末期来说,6—8 月叶面积指数和叶量增加需水量增大,在降雨量增大的情况下,土壤水势升高,土壤对水的吸持能力减弱,根系吸收水分的阻力变小,土壤-植物-大气的水势梯度增加,提升了液流速率^[61],液流通量也随之增大。导致 5 月和 9 月对上层水分的利用率和利用量比 6—8 月高。而在各月份阔叶白桦的液流通量大于针叶兴安落叶松,对各层土壤水的利用量,白桦也显著高于兴安落叶松。这可能是两树种不同的生理特征导致了不同的用水模式,其原因可能是阔叶白桦对土壤水分吸收速率较快^[62-63],对各层土壤水消耗量大,使土壤环境中的有效水分被快速消耗,而针叶兴安落叶松水分消耗速率较慢,吸水能力较弱,对各层土壤水消耗量小。

综上,虽然白桦和兴安落叶松在不同月份表现出相似水分来源,但对各土层水分利用率和利用量存在显著差异。由于大兴安岭北部森林生态系统在全球气候变化下水分胁迫趋势的增加^[27],导致植物因土壤水分的变化而调整其潜在水源和生长条件。在未来气候变暖^[3]的情况下,土壤水分的损耗可能会增加,可能会导致植物逐渐退化^[2],这种潜在威胁可能对白桦尤其严重。因此,从水分利用特征的角度来说,大兴安岭北部地区兴安落叶松要比白桦具有更大的稳定性和可持续性。

4 结论

在大兴安岭北部,降雨及其稳定同位素组成具有明显的季节变化。两树种的生理特征、土壤性质及土壤水分均存在差异,在多因素的共同作用下,生长季兴安落叶松和白桦对土壤水分的利用层次存在明显的季节

差异。在 5 月和 9 月兴安落叶松和白桦主要利用上层(0—10cm)土壤水分,而在 6—8 月转为两树种主要利用下层(20—40cm)土壤水分。生长季两树种对各层土壤水的利用率和利用量存在显著差异,致使生长季白桦和兴安落叶松表现出不同的水分利用特征。因此,在未来潜在的低降雨期内,兴安落叶松会比白桦表现出更高的稳定性和可持续性,而白桦可能更容易受到水分胁迫的影响。

参考文献(References):

- [1] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, Bousquet P, Ciais P, Peylin P, Braswell B H, Apps M J, Baker D, Bondeau A, Canadell J, Churkina G, Cramer W, Denning A S, Field C B, Friedlingstein P, Goodale C, Heimann M, Houghton R A, Melillo J M, Moore B, Murdiyarso D, Noble I, Pacala S W, Prentice I C, Raupach M R, Rayner P J, Scholes R J, Steffen W L, Wirth C. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414(6860): 169-172.
- [2] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears D D, Hogg E H, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim J H, Allard G, Running S W, Semerci A, Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660-684.
- [3] IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [4] Knapp A K, Briggs J M, Koelliker J K. Frequency and extent of water limitation to primary production in a mesic temperate grassland. *Ecosystems*, 2001, 4(1): 19-28.
- [5] Jurena P N, Archer S. Response of two perennial grasses to root barriers and fissures. *Journal of Arid Environments*, 2005, 61(2): 185-192.
- [6] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, Tan W, Deng P Y, Yang J. Seasonal water use patterns of woody species growing on the continuous dolostone outcrops and nearby thin soils in subtropical China. *Plant and Soil*, 2011, 341(1): 399-412.
- [7] 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.
- [8] Romero-Saltos H, da S L Sternberg L, Moreira M Z, Nepstad D C. Rainfall exclusion in an eastern Amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake. *American Journal of Botany*, 2005, 92(3): 443-455.
- [9] Quesada C A, Hodnett M G, Breyer L M, Santos A J B, Andrade S, Miranda H S, Miranda A C, Lloyd J. Seasonal variations in soil water in two woodland savannas of central Brazil with different fire history. *Tree Physiology*, 2008, 28(3): 405-415.
- [10] Chimner R A, Cooper D J. Using stable oxygen isotopes to quantify the water source used for transpiration by native shrubs in the San Luis Valley, Colorado U.S.A. *Plant and Soil*, 2004, 260(1): 225-236.
- [11] Dawson T E, Pate J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: a stable isotope investigation. *Oecologia*, 1996, 107(1): 13-20.
- [12] Asbjornsen H, Mora G, Helmers M J. Variation in water uptake dynamics among contrasting agricultural and native plant communities in the Midwestern U.S. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121(4): 343-356.
- [13] Zhang W, Cheng B, Hu Z, Shu Q, Zhen X, Yong Z, Jun C, Qing X. Using stable isotopes to determine the water sources in alpine ecosystems on the east Qinghai-Tibet plateau, China. *Hydrological Processes*, 2010, 24(22): 3270-3280.
- [14] Ellsworth P Z, Williams D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes. *Plant and Soil*, 2007, 291(1): 93-107.
- [15] Moreno-Gutiérrez C, Battipaglia G, Cherubini P, Delgado Huertas A, Querejeta J I. Pine afforestation decreases the long-term performance of understorey shrubs in a semi-arid Mediterranean ecosystem: a stable isotope approach. *Functional Ecology*, 2015, 29(1): 15-25.
- [16] 高阳, 韩磊, 柳利利, 王娜娜, 彭苓, 周鹏, 展秀丽. 宁夏河东沙地不同坡度柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)水分利用策略差异. *干旱区地理*, 2022, 45(4): 1212-1223.
- [17] 赵鹏, 徐先英, 姜生秀, 徐高兴, 柴成武, 张逸君, 马玉莲, 臧福俊, 高德才, 张国平. 石羊河下游不同衰退程度多枝怪柳灌丛水分利用格局研究. *生态学报*, 2022, 42(17): 7187-7197.
- [18] 丁丹, 贾文雄, 马兴刚, 王洁. 祁连山亚高山灌丛优势植物水分来源. *生态学报*, 2018, 38(4): 1348-1356.
- [19] 聂云鹏, 陈洪松, 王克林, Schwinning Susanne. 采用稳定同位素技术判定喀斯特地区植物水分来源的挑战与可能应对方案. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2361-2368.
- [20] Fan T, Wang Y, Guo L, Li J. Stable isotope analysis of water uptake sources of secondary forests in the central Yunnan Karst Plateau. *Advanced Materials Research*, 2014, 955: 3795-3798.
- [21] Rong L, Chen X, Chen X H, Wang S J, Du X L. Isotopic analysis of water sources of mountainous plant uptake in a Karst Plateau of southwest China. *Hydrological Processes*, 2011, 25(23): 3666-3675.

- [22] Liu Z Q, Yu X X, Jia G D. Water utilization characteristics of typical vegetation in the rocky mountain area of Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 249-258.
- [23] del Castillo J, Comas C, Voltas J, Ferrio J P. Dynamics of competition over water in a mixed oak-pine Mediterranean forest: Spatio-temporal and physiological components. *Forest Ecology and Management*, 2016, 382: 214-224.
- [24] Schwinning S. The water relations of two evergreen tree species in a Karst savanna. *Oecologia*, 2008, 158(3): 373-383.
- [25] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, Yang J. Water source utilization by woody plants growing on dolomite outcrops and nearby soils during dry seasons in Karst region of Southwest China. *Journal of Hydrology*, 2012, 420: 264-274.
- [26] 段北星, 满秀玲, 宋浩, 刘家霖. 大兴安岭北部不同类型兴安落叶松林土壤呼吸及其组分特征. *北京林业大学学报*, 2018, 40(2): 40-50.
- [27] Gago J, Douthe C, Florez-Sarasa I, Escalona J M, Galmes J, Fernie A R, Flexas J, Medrano H. Opportunities for improving leaf water use efficiency under climate change conditions. *Plant Science*, 2014, 226: 108-119.
- [28] Rittenhouse C D, Rissman A R. Changes in winter conditions impact forest management in north temperate forests. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149: 157-167.
- [29] 蒋延玲, 周广胜. 兴安落叶松林碳平衡和全球变化影响研究. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 481-484.
- [30] Gao W F, Yao Y L, Liang H, Song L Q, Sheng H C, Cai T J, Gao D W. Emissions of nitrous oxide from continuous permafrost region in the Daxing'an Mountains, Northeast China. *Atmospheric Environment*, 2019, 198: 34-45.
- [31] 黄明, 黄杰. 大兴安岭主要森林土壤类型的分析鉴别. 培养创新型人才、推进科技创新、推动转变经济发展方式——内蒙古自治区第六届自然科学学术年会优秀论文集. 呼和浩特, 2011: 504-506.
- [32] 楚旭. 大兴安岭地区主要树种细根生物量及受火干扰影响研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- [33] Duan B X, Man X L, Cai T J, Xiao R H, Ge Z X. Increasing soil organic carbon and nitrogen stocks along with secondary forest succession in permafrost region of the Daxing'an Mountains, northeast China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 24: e01258.
- [34] Li Y J, Deng W P, Jia G, Yu X X, Liu Y J. Determination of minimum extraction times for water of plants and soils used in isotopic analysis. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2012, 10: 1035-1040.
- [35] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [36] Snyder K A, Williams D G. Water sources used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105(2): 227-240.
- [37] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [38] Wullschlegel S D, King A W. Radial variation in sap velocity as a function of stem diameter and sapwood thickness in yellow-poplar trees. *Tree Physiology*, 2000, 20(8): 511-518.
- [39] Xu Z P, Man X L, Cai T J, Shang Y X. How potential evapotranspiration regulates the response of canopy transpiration to soil moisture and leaf area index of the boreal larch forest in China. *Forests*, 2022, 13(4): 571.
- [40] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [41] Duan L L, Man X L, Kurylyk B L, Cai T J, Li Q. Distinguishing streamflow trends caused by changes in climate, forest cover, and permafrost in a large watershed in northeastern China. *Hydrological Processes*, 2017, 31(10): 1938-1951.
- [42] Alessio G A, De Lillis M, Brugnoli E, Lauteri M. Water sources and water-use efficiency in Mediterranean coastal dune vegetation. *Plant Biology: Stuttgart, Germany*, 2004, 6(3): 350-357.
- [43] Tian L D, Yao T D, Numaguti A, Sun W Z. Stable isotope variations in monsoon precipitation on the Tibetan Plateau. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2001, 79(5): 959-966.
- [44] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [45] Johnson K R, Ingram B L. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: implications for paleoclimate reconstructions. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 220(3-4): 365-377.
- [46] Liu Z Q, Yu X X, Jia G D, Jia J B, Lou Y H, Lu W W. Contrasting water sources of evergreen and deciduous tree species in rocky mountain area of Beijing, China. *Catena*, 2017, 150: 108-115.
- [47] 王海燕, 刘廷玺, 王力, 吴尧, 王天帅, 童新. 科尔沁沙地坳甸交错区土壤水分的空间变异规律. *干旱区研究*, 2013, 30(3): 438-443.
- [48] 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.
- [49] 赵鑫, 辛一凡, 张应龙, 朱超, 郑云珠, 田晓飞, 孙树臣, 翟胜. 不同植被类型对毛乌素沙地背风坡土壤水分时空变化的影响. *西北林学院学报*, 2021, 36(3): 36-43.
- [50] 吴华武, 李小雁, 蒋志云, 李静, 郑肖然, 赵殿智. 基于 δD 和 $\delta^{18}O$ 的青海湖流域芨芨草水分利用来源变化研究. *生态学报*, 2015, 35(24): 8174-8183.

- [51] Gazis C, Feng X H. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma*, 2004, 119(1-2): 97-111.
- [52] Chen Z X, Wang G H, Pan Y H, Yang X L, Shen Y Y. Water use patterns differed notably with season and slope aspect for *Caragana korshinskii* on the Loess Plateau of China. *Catena*, 2021, 198: 105028.
- [53] Wu H W, Li X Y, Jiang Z Y, Chen H Y, Zhang C C, Xiao X. Contrasting water use pattern of introduced and native plants in an alpine desert ecosystem, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 182-191.
- [54] 刘自强, 余新晓, 贾国栋, 贾剑波, 娄源海, 张坤. 北京山区侧柏和栓皮栎的水分利用特征. *林业科学*, 2016, 52(9): 22-30.
- [55] Loik M E, Breshears D D, Lauenroth W K, Belnap J. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: climatology and ecohydrology of the western USA. *Oecologia*, 2004, 141(2): 269-281.
- [56] 刘雨, 高光耀, 王棣, 焦磊, 李宗善, 田立德, 傅伯杰. 不同疏伐强度下黄土丘陵区刺槐林的水分利用特征. *生态学报*, 2023, 7: 1-11.
- [57] Ward D, Wiegand K, Getzin S. Walter's two-layer hypothesis revisited: back to the roots!. *Oecologia*, 2013, 172(3): 617-630.
- [58] Saurer M, Kirdyanov A V, Prokushkin A S, Rinne K T, Siegwolf R T W. The impact of an inverse climate-isotope relationship in soil water on the oxygen-isotope composition of *Larix gmelinii* in Siberia. *The New Phytologist*, 2016, 209(3): 955-964.
- [59] Zeng X M, Xu X L, Yi R, Zhong F X, Zhang Y H. Sap flow and plant water sources for typical vegetation in a subtropical humid Karst area of southwest China. *Hydrological Processes*, 2021, 35(3): e14090.
- [60] Langs L E, Petrone R M, Pomeroy J W. A $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ stable water isotope analysis of subalpine forest water sources under seasonal and hydrological stress in the Canadian Rocky Mountains. *Hydrological Processes*, 2020, 34(26): 5642-5658.
- [61] Li S G, Romero-Saltos H, Tsujimura M, Sugimoto A, Sasaki L, Davaa G, Oyunbaatar D. Plant water sources in the cold semiarid ecosystem of the upper Kherlen River Catchment in Mongolia: a stable isotope approach. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(1): 109-117.
- [62] 刘浩, 张秋良, 田原. 兴安落叶松天然林蒸腾特征及其影响因素研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2021, 49(10): 56-63.
- [63] 刘潇潇, 李国庆, 闫美杰, 杜盛. 黄土高原主要树种树干液流研究进展. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 369-373.