

基于氢氧稳定同位素技术的东北红豆杉水分来源

韩丽冬*, 沃晓棠, 刁云飞
(黑龙江省生态研究所, 哈尔滨 150081)

摘要: 极小种群植物东北红豆杉 (*Taxus cuspidata*) 对水分的适应策略是其响应气候变化的基础, 基于稳定同位素技术的研究尚属空白。以东北红豆杉为研究对象, 通过测定植物木质部水和土壤水的氢同位素比值 (δD) 和氧同位素比值 ($\delta^{18}O$) 值, 利用直接对比法和多元线性混合模型 (Iso-Source) 分析东北红豆杉水分来源和水分利用策略。结果表明, 东北红豆杉 0~40 cm 土层土壤含水量波动范围为 32.69%~54.29%, 呈先增后减的趋势; 40~100 cm 土层土壤含水量波动范围为 22.55%~25.73%, 变化幅度较小; 0~40 cm 土层土壤含水量大于 40~100 cm 土层土壤含水量。东北红豆杉 0~100 cm 土层土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别为 -84.26‰~-52.17‰和 -11.69‰~-7.49‰, 随土壤深度增加逐渐减小, 其中, 土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值在 0~40 cm 土层变化剧烈, 在 40~100 cm 土层则变化幅度较小。东北红豆杉主要水分来源为 0~40 cm 土层土壤水, 利用率为 89.55%, 对 40~70 cm 和 70~100 cm 土层土壤水的利用率分别为 5.15% 和 5.30%。研究结果反映全球变暖背景下东北红豆杉的水分适应情况, 可为评估未来气候变化下东北红豆杉生态系统的稳定性提供科学依据。

关键词: 极小种群; 东北红豆杉; 氢氧稳定同位素; 水分来源; Iso-Source

中图分类号: S718.45; S791.49

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.06.006

Water Sources of *Taxus cuspidata* Based on Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes Technique

HAN Lidong*, WO Xiaotang, DIAO Yunfei
(Heilongjiang Ecology Institute, Harbin 150081, China)

Abstract: The water adaptation strategy of extremely small population *Taxus cuspidata* is the basis of its response to climate change, and studies based on isotopes are still blank. By measuring the δD and $\delta^{18}O$ values of plant xylowater and soil water, direct correlation method and multiple linear mixing model (Iso-Source) were used to analyze the water sources and water use strategies of *Taxus cuspidata*. The results showed that: the fluctuation range of soil water content in 0-40 cm soil layer of *Taxus cuspidata* was 32.69% to 54.29%, and the trend was first increased and then decreased; the fluctuation range of soil water content in 40-100 cm soil layer was 22.55% to 25.73%, and the fluctuation range was small. The soil water content in the 0-40 cm soil layer was higher than that in the 40-100 cm soil layer. The δD and $\delta^{18}O$ values of soil water from 0 to 100 cm of *Taxus cuspidata* were -84.26‰ to -52.17‰ and -11.69‰ to -7.49‰, respectively, and decreased gradually with the increase of soil depth. The δD and $\delta^{18}O$ values of soil water changed sharply in 0-40 cm soil layer, but changed little in 40-100 cm soil layer. The main water source of *Taxus cuspidata* was 0-40 cm soil water, and the utilization rate was 89.55%, and the utilization rate of 40-70 cm and 70-100 cm soil water was 5.15% and 5.30%, respectively. This study reflects the water adaptation of *Taxus cuspidata* under the background of global warming, and the results can provide scientific basis for assessing the stability of *Taxus cuspidata* ecosystem under future climate change.

Keywords: Extremely small populations; *Taxus cuspidata*; stable hydrogen and oxygen isotopes; water source; Iso-Source

收稿日期: 2025-02-12

基金项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目 (CZKYF2023-1-B028; CZKYF2024-1-B014; SCZ2022-06)。

第一作者简介: 韩丽冬, 博士, 副研究员, 研究方向为森林生态。E-mail: hldruby@163.com

* 通信作者: 韩丽冬, 博士, 副研究员, 研究方向为森林生态。E-mail: hldruby@163.com

引文格式: 韩丽冬, 沃晓棠, 刁云飞. 基于氢氧稳定同位素技术的东北红豆杉水分来源[J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1156-1163.

HAN L D, WO X T, DIAO Y F. Water sources of *Taxus cuspidata* based on stable hydrogen and oxygen isotopes technique[J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1156-1163.

0 引言

近年来,全球变暖加剧,极端天气频发,改变了全球降水格局,群落的水分环境也随之发生变化,进而影响到植物生长^[1-2]。植物通过根系吸收土壤中的水分,以满足自身生存和生长需求,其水分利用模式受到降水、土壤储水、植被类型等多种因素影响^[3-4]。植物水分利用模式反映了生态系统对水分条件的响应,是植被适应降水格局变化的重要表征,是植被恢复与保护重点关注的问题之一^[5-6]。植物可利用的潜在水源包括降水、土壤水、地下水和河水等,具有多源性^[7-9]。土壤水是大多数陆地生态系统植物的主要水分来源,根系分布特征及其生理特征使得植物对不同土层土壤水的水分利用能力存在差异性^[10-12]。

传统植物水分利用来源研究方法,如全根系挖掘法、树干液流技术和植物水势法等,耗时耗力,不利于动态观测^[13]。氢氧同位素作为天然示踪剂,可以在不干扰植物根系和生长环境前提下精准断定植物水分利用来源,成为一种探索植物水源的高灵敏性新技术^[14-15]。由于水循环的不同,不同类型水体的氢氧同位素特征存在显著差异,这使得识别植物水源和确定各种潜在水源的利用机制成为可能。一般来说,植物从根部吸收的水分通过木质部输送至植株各部的过程中不发生同位素分馏^[16-19]。因此,可以利用直接对比法和多元线性混合模型(Iso-Source)分析植物水分来源和水分利用策略。采用直接对比法,可以初步判断植物根系吸收水分的有效区域,一般通过对比植物木质部水与不同潜在水源的氢同位素比值(δD)和氧同位素比值($\delta^{18}O$)来判断植物水分利用来源。假设植物潜在水源为不同土层土壤水,当植物木质部水的氢同位素比值(δD)和氧同位素比值($\delta^{18}O$)与某一土层土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值有交叉或相近时,则认为植物利用了该土层水源^[20]。直接对比法只能初步确定植物的吸水层位,而植物对各潜在水源的利用率则需要利用模型计算获得,结合多元线性混合模型可进一步量化各水源的具体贡献率。近年来,稳定同位素技术作为植物水分利用模式和机理研究的重要手段被广泛应用于识别和量化植物对不同水源的利用率^[21-26],从而探究植物水分适应特征^[27],这对于科学揭示森林水文-土壤-植物的调节互作机制具有正向作用。

极小种群植物东北红豆杉(*Taxus cuspidata*)是我国重点保护濒危植物,对于生长环境要求较为严苛,探究全球变暖背景下东北红豆杉对水分的适应性,明确东北红豆杉水分利用响应机制,是东北红豆杉种群保护和恢复的必要手段,更是东北地区生物多样性保育

工作全面实施的关键环节。基于此,本研究以极小种群植物东北红豆杉为研究对象,运用氢氧稳定同位素技术测定植物木质部和土壤水的同位素组成,采用直接对比法和多元线性混合模型分析东北红豆杉吸水层位,量化各潜在水源的贡献率,探究全球变暖背景下东北红豆杉水分来源和水分利用策略。研究结果可为东北红豆杉种群保护及科学管理提供基础数据支持,为评估未来气候变化下东北红豆杉生态系统的稳定性提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省穆稜东北红豆杉国家级自然保护区(130°00′—130°28′E, 43°49′—44°06′N),海拔为500~700 m,属于温带大陆性季风气候,最低气温-44.1℃,最高气温35.7℃,年平均降水量530 mm,无霜期约126 d,日照时间2 613 h,土壤为暗棕壤,地带性植被是以红松(*Pinus koraiensis*)为主的温带针阔叶混交林。东北红豆杉动态监测样地为正方形,面积25 hm²,样地内森林群落优势种明显,垂直层次复杂,是典型的复层异龄林。2018年,对样地内所有胸径大于1 cm的乔木进行逐个调查,记录种名、胸径和坐标等基本信息,并挂牌标记永久监测,样地内现有东北红豆个体516株。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

由于降水需转化为土壤水才能被植物利用,本研究选择在晴天进行样品采集,且采样之前的5 d未发生降水事件,因此本研究只对植物木质部样品和土壤样品进行采集来分析东北红豆杉的水分来源,未将降水作为东北红豆杉的潜在水源。

1)植物样品采集。于2022年7月上旬,在东北红豆杉动态监测样地内选定人畜扰动较少的东北红豆杉标准地(30 m×30 m)为试验样地,在样地选取5株胸径、树高、冠幅相近的植株作为样树,随后对样地进行管理以避免扰动与污染。2022年8月5日,为避免光照、温度等对试验的影响,于北京时间08:00—10:00在样树中上部向阳面剪取直径0.3~0.5 cm的2年生枝条(避免1年生枝条上因气孔蒸腾作用导致氢、氧同位素富集),迅速用枝剪除去韧皮部(防止韧皮部通过皮孔吸水污染木质部),留下木质部3~5 cm。随后将保留的木质部立即装入干净的聚乙烯瓶(50 mL)中,用Parafilm封口膜封口后装入便携式冰盒防止同位素分馏蒸发,带回实验室冷藏保存。每株样树取3个重复植物样品,共计15个样品。

2)土壤样品采集。土壤样品取样时间与植物样品的取样时间一致。在样树1 m处以10 cm为间隔钻取0~100 cm深度的土壤样品,3个重复。将采集的土壤样品中的砾石等杂物剔除,一部分立即装入干净的聚乙烯瓶(50 mL)中,用Parafilm封口膜密封,迅速放入便携式冰盒防止同位素分馏蒸发,带回实验室冷冻保存(-20 °C),用于测定土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值;另一部分装入铝盒,用于测定土壤含水量。

1.2.2 稳定同位素测定

利用全自动真空冷凝抽提系统(Li-2100)进行水分抽提。低温真空抽提时间可能会影响木质部水和土壤水的提取率,水分的不完全提取会导致实测同位素值与实际同位素值出现偏移,影响结果的准确性^[28]。因此,本研究中东北红豆杉木质部和土壤的抽提时间均为6 h,提取率大于99%。

利用稳定同位素质谱仪(IsoPrime100)测定氢氧稳定同位素值(式中记为 δ_D 和 δ_O^{18})。计算公式为

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

$$\delta_O^{18} (\text{‰}) = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000\text{‰} \quad (2)$$

式中: R_{standard} 为国际通用标准物中的重轻同位素丰度之比; R_{sample} 为样品中的重轻同位素丰度之比。

为了去除有机污染物对氢氧稳定同位素值的影响,本研究中同位素数据均用光谱污染校正曲线校正。

1.2.3 水源划分

本研究根据土壤剖面的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值随土壤深度增加的变化幅度,划分3个潜在水源,依据如下所述。

1)浅层土壤水(0~40 cm): δD 和 $\delta^{18}O$ 值随土壤深度的增加,变化幅度最大。

2)中层土壤水(40~70 cm): δD 和 $\delta^{18}O$ 值随土壤深度的增加,变化幅度较小。

3)深层土壤水(70~100 cm): δD 和 $\delta^{18}O$ 值随土壤深度的增加,变化幅度最小且趋于稳定。

东北红豆杉木质部水同位素特征为各潜在水源同位素特征值的混合^[29]。采用Iso-Source混合模型量化东北红豆杉对各潜在水源的利用率^[30]。本研究输入的源数据包括0~40、40~70、70~100 cm土层土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值数据,混合物数据为东北红豆杉的木质部水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值数据。来源增量(source increment)设置为1%,质量平衡差(mass balance tolerance)设置为0.01%^[31]。计算公式为

$$a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + \dots + a_n X_n = X \quad (3)$$

$$a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n = 1 \quad (4)$$

式中: X 为东北红豆杉木质部水的 δD 或 $\delta^{18}O$ 值,‰; $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 分别为各潜在水源的 δD 或 $\delta^{18}O$ 值,‰; $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 分别为东北红豆杉对各潜在水源的利

用率。

1.2.4 气象因子监测

使用微气象观测系统对东北红豆杉生态系统降水、空气温度进行原位监测。

1.2.5 土壤含水量测定

用烘干法测定土壤含水量(soil water content, SWC,式中记为 S_{WC}),计算公式为

$$S_{WC} = (W_1 - W_2)/(W_2 - W_3) \times 100\% \quad (5)$$

式中: W_1 为湿土和铝盒质量,g; W_2 为干土和铝盒质量,g; W_3 为铝盒质量,g。

1.2.6 数据分析

运用SPSS 19.0软件对数据进行分析,运用单因素方差法对东北红豆杉各层土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值进行显著性差异分析($P < 0.05$),运用SigmaPlot 14.0软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 研究区气温和降雨量变化特征

研究区2022年气温和降雨量均呈单峰变化,如图1所示,气温最高值出现在7月份,为21.94 °C,最小值(-20.19 °C)出现在1月份。7月份是降雨量最高月份,为199 mm,占全年降雨量(709.6 mm)的28.04%。

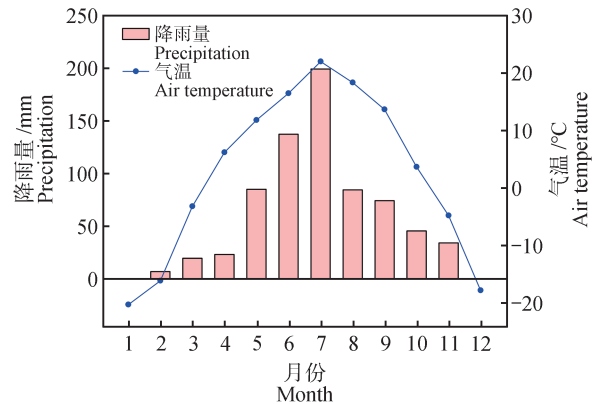


图1 2022年气温和降雨量变化

Fig. 1 Variations of temperature and precipitation in 2022

2.2 土壤含水量变化特征

由图2可知,东北红豆杉不同土层土壤含水量特征不同。东北红豆杉0~40 cm土层土壤含水量受外界环境条件的影响较大,变化较为剧烈,波动范围为32.69%~54.29%,呈先增后减的趋势,20 cm深度处土壤含水量最高,40 cm深度处土壤含水量最低。40~100 cm土层土壤含水量整体上随着土层深度的增加呈递减趋势,变化幅度较小,波动范围为22.55%~25.73%,较为稳定。0~40 cm土层土壤含水量大于40~100 cm土层土壤含水量。

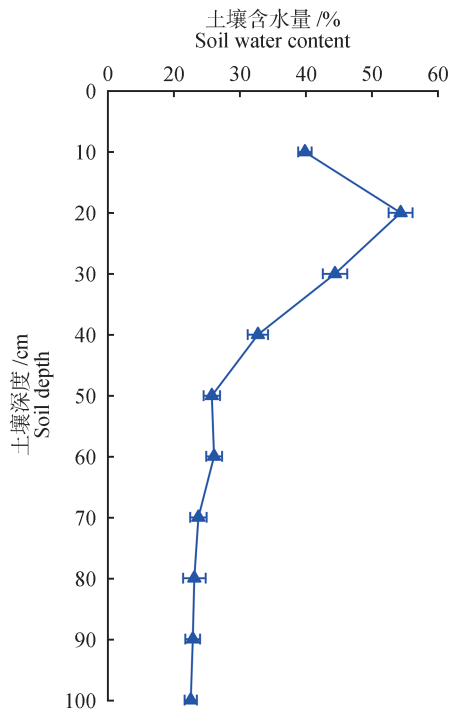


图 2 东北红豆杉土壤含水量变化

Fig. 2 Variations of soil water content of *Taxus cuspidata*

2.3 不同水体氢氧同位素组成

由图 3 可知, 东北红豆杉木质部水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别为 -71.20‰ 和 -9.46‰ 。东北红豆杉土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值随土壤深度的增加呈逐渐减少的变化趋势, 0~100 cm 土层土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别分布在 -84.26‰ ~ -52.17‰ 和 -11.69‰ ~ -7.49‰ 。其中, 0~40 cm 土层土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值变化较为剧烈, 分别在 -84.26‰ ~ -52.17‰ 和 -11.69‰ ~ -7.49‰ 波动, 随土层深度增加有明显减小趋势。40~100 cm 土层土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别在 -83.83‰ ~ -80.09‰ 和 -10.97‰ ~ -10.30‰ 波动, 数值变化幅度较小, 趋于稳定。

利用直接对比法, 通过东北红豆杉木质部水和不同深度土壤水同位素交点图可直观对比分析东北红豆杉木质部水和各层土壤水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值, 以此来初步判断东北红豆杉可能利用的水分来源。通过结果对比, 发现东北红豆杉木质部水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值和 0~40 cm 土层土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值较为接近, 初步判断东北红豆杉主要利用 0~40 cm 土层土壤水。

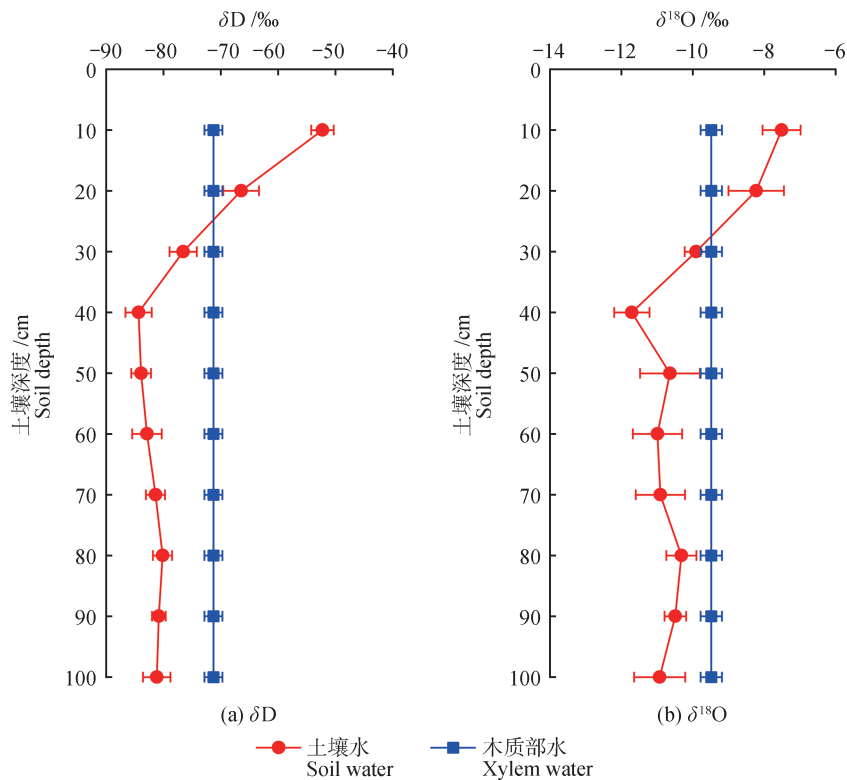


图 3 东北红豆杉土壤水和植物木质部水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值变化

Fig. 3 Variation of δD and $\delta^{18}O$ in soil water and plant xylem water of *Taxus cuspidata*

2.4 东北红豆杉对各潜在水源的利用率

直接对比法只能初步定性分析植株的吸水层位,

而植株对各潜在水源的利用率的定量分析则需要模型计算来获得。东北红豆杉的潜在水源为浅层土壤水、

中层土壤水和深层土壤水,利用 Iso-Source 模型可以定量分析东北红豆杉对不同土层土壤水的利用率。由于模型输入 δD 或 $\delta^{18}O$ 值计算不同土层土壤水利用率时结果相近,本研究用平均值作为不同土层土壤水的利用率。由图4可知,东北红豆杉对不同土层土壤水

的利用率存在差异,东北红豆杉主要利用浅层(0~40 cm)土壤水,利用率高达 89.55%;对中层(40~70 cm)土壤水和深层(70~100 cm)土壤水的利用率分别为 5.15% 和 5.30%。

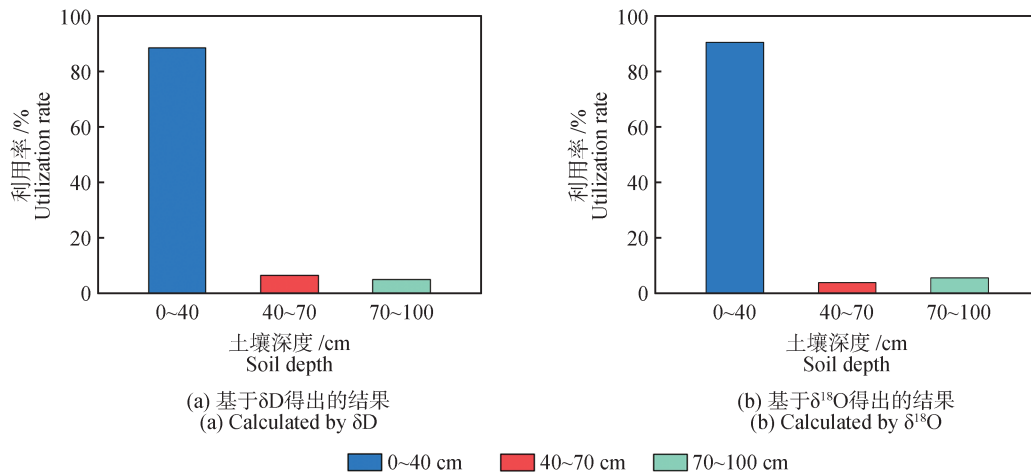


图4 东北红豆杉对不同土层土壤水的利用率
Fig. 4 Utilization rate of soil water in different soil layers of *Taxus cuspidata*

3 讨论

3.1 土壤水的氢氧同位素组成

土壤水是陆地生态系统重要的组成部分^[32-33],是影响植被生长发育和分布格局的关键因子^[7-8]。受降水渗入和土壤蒸发的耦合影响,不同深度土壤含水量存在差异,导致不同深度土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值存在差异^[34]。本研究中,浅层土壤水(0~40 cm) δD 值($-52.17‰$ ~ $-84.26‰$)和 $\delta^{18}O$ 值($7.49‰$ ~ $-11.69‰$)波动较大,变化较为剧烈,中层土壤水和深层土壤水(40~100 cm)的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值则波动较小($-80.09‰$ ~ $-83.83‰$ 和 $-10.30‰$ ~ $-10.97‰$)。这是由于浅层土壤容易受水文、气象和人类活动等生物和非生物因素的影响,处于不断变化的状态,而中层土壤水和深层土壤水受外界因素影响较小,因此 δD 和 $\delta^{18}O$ 值较为稳定,波动较小^[35]。此外,东北红豆杉土壤水的氢氧同位素组成呈垂直梯度变化,与深层土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值相比,浅层土壤水中同位素富集,随着土壤深度的增加,土壤水中同位素变得更加贫化^[36-37], δD 和 $\delta^{18}O$ 值逐渐变小,这与前人的研究结果相似,即浅层土壤水稳定同位素值大于深层土壤水,随着土层深度增加,土壤水的稳定同位素值变小^[34, 38-39]。

3.2 东北红豆杉水分来源

植物可利用的潜在水源包括降水、土壤水、地下水和河水等^[7-9]。植物水分利用来源一般受到降水、温度

等气象因子、土壤理化性质以及植物自身生理特性的综合影响。土壤水分条件是影响植物水分利用的关键因素^[40-42],植物本身的水分生态位也会影响植物水分利用^[43]。植物生长于土壤之中,土壤水是大多数陆地生态系统植物的主要水分来源^[10-12],不同深度的土壤水是植物的直接水源^[44],而降水为植物的间接水源^[45]。本研究选择在晴天进行样品采集,且采样前5 d内未发生降水事件,因此未将降水作为东北红豆杉的潜在水源。本研究将东北红豆杉的潜在水源划分为浅层土壤水、中层土壤水和深层土壤水。一般情况下,当浅层土壤水充足时,树木会优先利用浅层土壤水^[46-47],吴应明等^[46]研究发现,刺槐(*Robinia pseudo-acacia*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)主要利用浅层土壤水。李蓓蓓等^[47]研究发现,枣树(*Ziziphus jujuba*)对深层土壤水的利用存在滞后效应。本研究也得到相似结果,东北红豆杉对浅层(0~40 cm)土壤水的利用率高达 89.55%。这是因为浅层土壤水对输入水的响应较为敏感,受降水补给等影响,东北红豆杉浅层土壤含水量迅速增加,而降水渗入到深层土壤存在时间延迟^[48]。

东北红豆杉 0~40 cm 土层土壤含水量大于 40~100 cm 土层土壤含水量,浅层土壤水充足且较为稳定,对于东北红豆杉而言,吸收浅层土壤水能满足自身生长所需的蒸腾和水分,而且吸收利用浅层土壤水相对于深层土壤水消耗的能量更低,这与吴应明等^[46]研究

发现植物为了减少能量消耗,一般优先利用含水量较高的浅层土壤水的研究结果一致,是植物对水分环境的积极响应,体现了东北红豆杉对水分的敏感性。根系是植物吸收水分的主要器官,树木水分利用模式与根系分布有关,根系分布特征在一定程度上决定其水分利用特点。刘丹^[49]对吉林省东北红豆杉分布区的研究指出,东北红豆杉为浅根系植物,这为其利用浅层土壤稳定水源提供了生理生态基础。由此可见,利用浅层土壤水是东北红豆杉自身生理特性和其生态可塑性共同作用的结果。

4 结论

东北红豆杉不同土层土壤含水量特征不同。0~40 cm 土层土壤含水量变化较为剧烈(32.69%~54.29%);40~100 cm 土层土壤含水量较为稳定(22.55%~25.73%);0~40 cm 土层土壤含水量大于40~100 cm 土层土壤含水量;随着土壤深度增加,东北红豆杉土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值逐渐减小,土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值在0~40 cm 土层变化剧烈,在40~100 cm 土层则变化幅度较小;东北红豆杉主要水分来源为由降雨补给的0~40 cm 土层土壤水,利用率为89.55%。这是东北红豆杉自身生理特性和其生态可塑性共同作用的结果。本研究反映全球变暖背景下东北红豆杉的水分适应情况,确定东北红豆杉水分利用模式,未来应进一步研究东北红豆杉生理生态过程,深入探讨气候变化对东北红豆杉水分利用策略季节动态的影响,为东北红豆杉种群保护和可持续管理提供基础数据支持。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Z, ZHANG L, XU H, et al. Forest water-use efficiency: Effects of climate change and management on the coupling of carbon and water processes[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 534: 120853.
- [2] DAI J, LI Y, WANG L. Mixed-species plantations alleviate deep soil water depletion and facilitate hydrological niche partitioning compared to pure plantations[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 539: 121017.
- [3] KANG X, LIU T, HAO L, et al. Variation in water use patterns of three typical plants in a dune-meadow cascade ecosystem of the Horqin Sandy Land: Implications from stable isotope compositions[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 298: 108854.
- [4] HAN L, LIU L, PENG L, et al. Mixing of tree species with the same water use strategy might lead to deep soil water deficit[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 534: 120876.
- [5] SHI P, GAI H, LIU W, et al. Links of apple tree water uptake strategies with precipitation and soil water dynamics in the deep loess deposits[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 623: 129829.
- [6] ZHAO Y, WANG L, CHUN K P, et al. Dynamic hydrological niche segregation: How plants compete for water in a semi-arid ecosystem[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 630: 130677.
- [7] YEH H F, LIN H I, LEE C H, et al. Identifying seasonal groundwater recharge using environmental stable isotopes[J]. *Water*, 2014, 6(10): 2849-2861.
- [8] 蒋晓晴, 郝帅, 叶茂, 等. 塔里木河下游不同地下水埋深下胡杨水分利用来源研究[J]. *干旱区地理*, 2025, 47(12): 2017-2029.
- JIANG X Q, HAO S, YE M, et al. Water utilization sources of *Populus euphratica* under different ground water depths in the lower Tarim River[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 47(12): 2017-2029.
- [9] MIGUEZ-MACHO G, FAN Y. Spatiotemporal origin of soil water taken up by vegetation[J]. *Nature*, 2021, 598(7882): 624-628.
- [10] SCHREEL J D, VON DER CRONE J S, KANGUR O, et al. Influence of drought on foliar water uptake capacity of temperate tree species[J]. *Forests*, 2019, 10(7): 562.
- [11] FORT F, VOLAIRE F, GUILIONI L, et al. Root traits are related to plant water-use among rangeland Mediterranean species[J]. *Functional Ecology*, 2017, 31(9): 1700-1709.
- [12] KÖCHER P, HORNA V, LEUSCHNER C. Stem water storage in five coexisting temperate broad-leaved tree species: Significance, temporal dynamics and dependence on tree functional traits[J]. *Tree Physiology*, 2013, 33(8): 817-832.
- [13] 余绍文, 张溪, 段丽军, 等. 氢氧稳定同位素在植物水分来源研究中的应用[J]. *安全与环境工程*, 2011, 18(5): 1-6.
- YU S W, ZHANG X, DUAN L J, et al. Application of stable hydrogen and oxygen isotope to the study of plant water use sources[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2011, 18(5): 1-6.
- [14] ZHAO Y, WANG Y, HE M, et al. Transference of *Robinia pseudoacacia* water-use patterns from deep to shallow soil layers during the transition period between the dry and rainy seasons in a water-limited region[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 457: 117727.
- [15] GOW L, BARRETT D, O'GRADY A, et al. Subsurface water-use strategies and physiological responses of subtropical eucalypt woodland vegetation under changing water-availability conditions[J]. *Agricultural and Forest*

- Meteorology, 2018, 248: 348–360.
- [16] MEIBNER M, KÖHLER M, SCHWENDENMANN L, et al. Soil water uptake by trees using water stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) – a method test regarding soil moisture, texture and carbonate [J]. *Plant Soil*, 2014, 376: 327–335.
- [17] ELLSWORTH P Z, WILLIAMS D G. Hydrogen isotope fractionation during water uptake by woody xerophytes [J]. *Plant Soil*, 2007, 291: 93–107.
- [18] 曹燕丽, 卢琦, 林光辉. 氢稳定性同位素确定植物水源的应用与前景 [J]. *生态学报*, 2002, 22(1): 111–117.
CAO Y L, LU Q, LIN G H. Review and perspective on hydrogen stable isotopes technique in tracing plant water sources researches [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 111–117.
- [19] BARBETA A, MEJÍA-CHANG M, OGAYA R, et al. The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1213–1225.
- [20] 段德玉, 欧阳华. 稳定氢氧同位素在定量区分植物水分利用来源中的应用 [J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 655–660.
DUAN D Y, OUYANG H. Application of stable hydrogen and oxygen isotope in analyzing plant water use sources [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 655–660.
- [21] CHEN Z, WANG G, YANG X, et al. Water competition among the coexisting *Platyclusus orientalis*, *Prunus davidiana* and *Medicago sativa* in a semi-arid agroforestry system [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 279: 108206.
- [22] HERBERICH M M, GAYLER S, ANAND M, et al. Hydrological niche segregation of plant functional traits in an individual-based model [J]. *Ecological Modelling*, 2017, 356: 14–24.
- [23] 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.
WAN Y B, SHI Q D, DAI Y, et al. Water sources of *Populus euphratica* with different tree ages in the oasis of desert hinterland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(2): 353–359.
- [24] 彭丽萍, 戴岳, 师庆东. 新疆准东荒漠区5种典型植物水分来源 [J]. *干旱区研究*, 2018, 35(5): 1146–1152.
PENG L P, DAI Y, SHI Q D. Water Sources of five typical plant species in desert in the East Junggar Basin, Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(5): 1146–1152.
- [25] SCHWENDENMANN L, PENDALL E, SANCHEZ-BRAGADO R, et al. Tree water uptake in a tropical plantation varying in tree diversity: Interspecific differences, seasonal shifts and complementarity [J]. *Ecohydrology*, 2015, 8(1): 1–12.
- [26] QIN J, SI J, JIA B, et al. Water use strategies of *Nitraria tangutorum* in the lake-basin region of the Badain Jaran Desert [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1240656.
- [27] 刘树宝, 陈亚宁, 李卫红, 等. 黑河下游不同林龄胡杨水分来源的D、 ^{18}O 同位素示踪 [J]. *干旱区地理*, 2014, 37(5): 988–995.
LIU S B, CHEN Y N, LI W H, et al. Application of D and ^{18}O stable isotopes in analyzing the water sources of different ages of *Populus euphratica* in the lower reaches of the Hei River [J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(5): 988–995.
- [28] CHEN Y, HELLIKER B R, TANG X, et al. Stem water cryogenic extraction biases estimation in deuterium isotope composition of plant source water [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(52): 33345–33350.
- [29] JACKSON P C, MEINZER F C, BUSTAMANTE M, et al. Partitioning of soil water among tree species in a Brazilian Cerrado ecosystem [J]. *Tree Physiology*, 1999, 19(11): 717–724.
- [30] PHILLIPS D L, GREGG J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources [J]. *Oecologia*, 2003, 136: 261–269.
- [31] 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.
ZHANG Y, ZHANG M J, WANG S J, et al. Comparison of different methods for determining plant water sources based on stable oxygen isotope [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(4): 1356–1368.
- [32] MARTÍN-GÓMEZ P, AGUILERA M, PEMÁN J, et al. Contrasting ecophysiological strategies related to drought: the case of a mixed stand of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and a submediterranean oak (*Quercus subpyrenaica*) [J]. *Tree Physiology*, 2017, 37(11): 1478–1492.
- [33] LIU J, WU H, CHENG Y, et al. Stable isotope analysis of soil and plant water in a pair of natural grassland and understory of planted forestland on the Chinese Loess Plateau [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 249: 106800.
- [34] 翟巧婷, 张铁钢, 许丽, 等. 基于稳定氧同位素的毛乌素沙地旱柳和小叶杨水分来源 [J]. *地球科学与环境学报*, 2024, 46(6): 804–815.
ZHAI Q T, ZHANG T G, XU L, et al. Water source of *Salix Matsudana* and *Populus Simonii* in Mu Us Sandy

- Land, China based on stable oxygen isotopes [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2024, 46 (6) : 804–815.
- [35] 刘自强,余新晓,娄源海,等. 北京山区侧柏水分利用策略[J]. *生态学报*, 2017, 37(11): 3697–3705.
LIU Z Q, YU X X, LOU Y H, et al. Water use strategy of *Platycladus orientalis* in Beijing mountainous area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3697–3705.
- [36] 田超,孟平,张劲松,等. 黄河小浪底库区降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 季节变化特征及水汽来源[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3579–3587.
TIAN C, MENG P, ZHANG J S, et al. Seasonal characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in precipitation and its water vapor sources in the Xiaolangdi Reservoir area of Yellow River, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (12): 3579–3587.
- [37] PEI Y, HUANG L, SHAO M, et al. Patterns and drivers of seasonal water sources for artificial sand-fixing plants in the northeastern Mu Us sandy land, Northwest China [J]. *Pedosphere*, 2024, 34(1): 63–77.
- [38] 孜尔蝶·巴合提,贾国栋,余新晓,等. 基于稳定同位素分析不同退化程度小叶杨水分来源[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 1807–1816.
ZI E D·B H T, JIA G D, YU X X, et al. Assessing water sources for *Populus simonii* with different degrees of degradation based on stable isotopes [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 1807–1816.
- [39] 李涛,罗光明,董克鹏,等. 克里雅河尾间河岸不同生长阶段胡杨的水分利用[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 989–997.
LI T, LUO G M, DONG K P, et al. Water use of *Populus euphratica* in different development stages growing near the riverbank at the tail of the Keriya River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4): 989–997.
- [40] WANG J, FU B, WANG L, et al. Water use characteristics of the common tree species in different plantation types in the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 288–289: 108020.
- [41] 刘子赫,贾国栋,刘自强,等. 北京山区侧柏用水来源随水分条件变化的多时间尺度[J]. *林业科学*, 2022, 58(3): 40–47.
LIU Z H, JIA G D, LIU Z Q, et al. Water source change of *Platycladus orientalis* under different water regimes in Beijing mountainous area: A multi-timescale study [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(3): 40–47.
- [42] LIU Z, JIA G, YU X, et al. Water use by broadleaved tree species in response to changes in precipitation in a mountainous area of Beijing [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 132–140.
- [43] 柳利利,韩磊,王娜娜,等. 宁夏河东沙区柠条和新疆杨在纯林和混交林中的水分利用策略[J]. *林业科学*, 2024, 60(10): 40–49.
LIU L L, HAN L, WANG N N, et al. Water use strategies of *Caragana korshinskii* and *Populus bolleana* in pure and mixed plantations in the eastern sandy land of the Yellow River in Ningxia [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, 60 (10): 40–49.
- [44] 周海,郑新军,唐立松,等. 准噶尔盆地东南缘多枝柽柳、白刺和红砂水分来源的异同[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(7): 665–673.
ZHOU H, ZHENG X J, TANG L S, et al. Differences and similarities between water sources of *Tamarix ramosissima*, *Nitraria sibirica* and *Reaumuria soongorica* in the southeastern Junggar Basin [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(7): 665–673.
- [45] 李亚飞,于静洁,陆凯,等. 额济纳三角洲胡杨和多枝柽柳水分来源解析[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(5): 519–528.
LI Y F, YU J J, LU K, et al. Water sources of *Populus euphratica* and *Tamarix ramosissima* in Ejina Delta, the lower reaches of the Heihe River, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(5): 519–528.
- [46] 吴应明,韩璐,刘柯言,等. 晋西黄土区不同土壤水分条件下刺槐和侧柏人工林的水分利用来源[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(3): 588–596.
WU Y M, HAN L, LIU K Y, et al. Water source of *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* plantations under different soil moisture conditions in the Loess Plateau of Western Shanxi, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(3): 588–596.
- [47] 李蓓蓓,张明军,车存伟,等. 基于稳定同位素示踪的不同覆砂厚度下枣树水分利用策略[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(9): 1202–1212.
LI B B, ZHANG M J, CHE C W, et al. Water utilization strategy of *Ziziphus jujuba* under different sand cover thicknesses based on stable isotope tracing [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(9): 1202–1212.
- [48] TETZLAFF D, BUTTLE J, CAREY S K, et al. Stable isotopes of water reveal differences in plant–soil water relationships across northern environments [J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(1): e14023.
- [49] 刘丹. 极小种群东北红豆杉回归保护策略研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2024.
LIU D. Conservation strategy for population reintroduction of extremely small populations, *Taxus cuspidata* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.