

DOI: 10.13866/j.azr.2023.03.10

# 天山不同海拔雪岭云杉生长季水分来源

田胜川<sup>1,2,3</sup>, 赵善超<sup>4</sup>, 郑新军<sup>1,2,3</sup>, 王玉刚<sup>1,2</sup>, 李彦<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院阜康荒漠生态系统国家站, 新疆 阜康 831505; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 新疆维吾尔自治区天然林保护中心, 新疆 乌鲁木齐 830001)

**摘要:** 森林生态系统在全球陆地水循环过程中扮演重要的角色, 在保护水资源方面有关键作用。雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)是我国天山森林生态系统的建群种, 雪岭云杉的水分来源研究有助于理解植物对于旱区山地环境的适应。采用氧稳定同位素和IsoSource混合模型估算2200 m、1800 m和1450 m 3个海拔雪岭云杉生长季(4—9月)的水分来源并分析其动态变化。结果表明:(1) 3个海拔土壤水的<sup>18</sup>O在4月贫化, 5—9月富集, 1450 m海拔茎秆水 $\delta^{18}O$ 值在月份之间变化幅度最大, 6—9月3个海拔雪岭云杉茎秆水<sup>18</sup>O逐渐富集;(2) 整个生长季0~0.2 m土壤水为3个海拔雪岭云杉贡献一半以上的水源, 表层土壤水平均贡献率从高海拔到低海拔依次为61.37%、51.35%和58.42%, 在5—6月雪岭云杉倾向平均利用各层土壤水, 雪岭云杉生长季的水分吸收层没有明显地转移。雪岭云杉主要吸收0~0.2 m土壤水, 在发生降雨时可以快速吸收水分, 改善水文状况, 减小极端降雨的危害, 因此, 加强雪岭云杉林的保护与抚育管理, 可以有效提高了森林水源涵养能力, 充分发挥其生态效益。

**关键词:** 雪岭云杉; 稳定同位素; IsoSource模型; 水分来源

陆地森林生态系统储存了约45%的陆地碳, 贡献了约50%的陆地净初级生产力<sup>[1]</sup>, 在维持生物多样性、减少碳排放、水土保持和维护人类健康等方面具有非常重要的作用<sup>[2]</sup>。新疆位于亚欧大陆腹地, 典型的山-盆结构, 属温带大陆性气候, 北部中纬度西风带和地形的相互作用在天山山脉迎风坡形成较多降水<sup>[3-4]</sup>, 形成了天山森林草原生态系统。然而长时间的不合理放牧导致天山森林草原处于非健康状态<sup>[5-6]</sup>, 水源涵养能力严重退化<sup>[7]</sup>, 可能会加剧区域水资源不合理配置, 造成森林生态系统结构单一和功能退化, 生物多样性丧失<sup>[8]</sup>, 甚至是树木死亡<sup>[9]</sup>。

雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)是天山森林生态系统的唯一建群种和优势种, 主要分布在海拔1400~2800 m的中山带<sup>[10]</sup>。雪岭云杉森林处于冰川和沙漠之间, 要对山区降水和冰雪融水进行拦截与调节, 在水源涵养、水土保持和维持生物多样性等方面发挥不可替代的作用<sup>[11]</sup>。已有研究表明<sup>[12]</sup>, 天

山地区森林水源涵养量与森林面积密切相关, 乌鲁木齐河流域的雪岭云杉林面积每增加1%, 区域与森林水源涵养总量可分别增加 $0.437 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、 $0.522 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。目前, 雪岭云杉的有关研究包含种群结构动态<sup>[13]</sup>、碳氮循环<sup>[14]</sup>、古气候<sup>[15]</sup>等方面, 缺乏对云杉水分来源的研究。植物水分来源研究可以帮助深入认识植物与自然环境的适应策略<sup>[16]</sup>, 对地区水分循环和林地管理具有重要意义。本研究以天山北坡不同海拔雪岭云杉为研究对象, 利用稳定同位素技术, 量化不同海拔雪岭云杉生长季的水分来源, 为区域水资源模型构建提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于天山北坡无人干扰的天然雪岭云杉纯林分布区(88°6′~88°13′E, 43°55′~43°56′N), 海拔在1400~2300 m多年平均气温为-2.8~2.5 °C, 空气相对湿度在60%, 年平均降水量400~600 mm<sup>[17]</sup>,

收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2022-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(U1803342); 中国科学院西部之光项目(XBBS201001); 新疆林草局天然林保护工程项目(E1310102)

作者简介: 田胜川(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事植物水分关系研究。E-mail: tianshengchuan20@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 郑新军。E-mail: zhengxj@ms.xjb.ac.cn

6—9月整个生长季平均温度在10℃,降水量占全年的60%以上<sup>[18]</sup>。土壤为褐色森林土,腐殖质较多,容重小,孔隙度大,在林窗、林缘分布有少量灌木。研究区域2021年月平均温度和月降水量如图1所示。

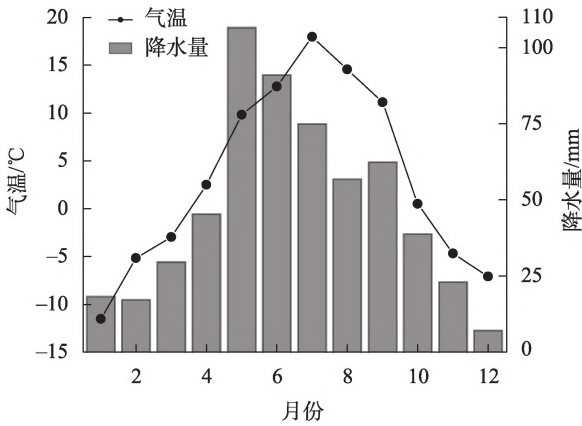


图1 研究区2021年月平均温度和月降水量  
Fig. 1 Air temperature and precipitation in the study area in 2021

## 1.2 样品采集

样品采集在2021年生长季每月的10日进行,在研究区域内,选择2200 m、1800 m和1450 m 3个海拔梯度,每个海拔梯度随机选取4个采样区,每个采样区内随机选择4株健康状况良好的雪岭云杉为固定采样对象(表1)。受地形条件的限制,土壤深度并不均匀,因此本试验统一将土层分为0~0.2 m、0.2~0.4 m、>0.4 m土壤样品。植物样品剪取栓化小枝,去除叶片,剪成小段树枝,放入样品瓶后,立即用Parafilm膜密封。将收集的土壤和植物样品放入随身携带的冰盒中,进入实验室,立即放入冰箱冷冻保存。

表1 不同海拔雪岭云杉样本性状

Tab. 1 Characteristics of *Picea schrenkiana* at different elevations

海拔/m	胸径/cm	冠幅/m	树高/m
2200	92.31±3.77	6.11±0.46	50.75±2.28
1800	83.00±10.45	6.21±0.65	45.19±6.16
1450	119.13±9.14	6.69±0.25	67.81±6.48

注:数据为平均值±标准误,n=4。

## 1.3 样品测定

土壤含水率(Soil Water Content, SWC)采用烘干法测定,将研究区采回的湿润土壤取适量放入铝盒中,连带铝盒称其湿重( $S_w$ ),之后将铝盒放入烘箱

105℃烘干至恒重,此时干重( $S_d$ ),铝盒自重为 $W$ ,则SWC计算公式为:

$$SWC = \frac{S_w - S_d}{S_w - W} \times 100\% \quad (1)$$

同位素样品的抽提和测定工作在中国科学院新疆阜康荒漠生态系统国家野外科学观测研究站进行。利用低温真空抽提系统(LI-2000,北京理加联合科技有限公司),抽提效率可达98%以上,土壤和植物抽提的具体操作参考文献[19]。同位素样品的测定使用稳定同位素红外光谱技术的液态水同位素分析仪(LWIA, DLT-100, Los Gatos Research, Mountain View, USA), $\delta^{18}O$ 值分析测量精度误差小于 $\pm 0.25\text{‰}$ 。氧同位素比率表示为:

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

式中: $R_{\text{sample}}$ 是样品中氧元素的重轻同位素丰度之比; $R_{\text{standard}}$ 是国际通用标准物中氧元素的重轻同位素丰度之比,标准采用V-SMOW<sup>[20]</sup>(Vienna Standard Mean Ocean Water)所给出的千分率(‰)。本研究中,甲醇和乙醇会对测量结果带来误差,因此,采用校正曲线对受到污染的样品进行校正,具体参考文献[21]。

## 1.4 数据处理

植物水分来源采用IsoSource模型计算<sup>[22]</sup>, increment设置为1%, tolerance设置为0.1%。其原理为同位素质量守恒,对每个采样区不同土层和雪岭云杉的 $\delta^{18}O$ 值数据建立方程得到所有可能性解,之后求得所有解的算数平均值,即为每个采样区云杉不同土层水分相对贡献率。方差分析采用SPSS 21软件,多重比较为LSD法,图形绘制使用Origin 2018。

## 2 结果与分析

### 2.1 生长季海拔与土层对土壤水 $\delta^{18}O$ 值和SWC的影响

由表2可知,月份、海拔和土层对SWC和土壤水 $\delta^{18}O$ 值皆有显著影响,而且有显著的交互作用。说明海拔、月份、土层与SWC和 $\delta^{18}O$ 值之间既存在简单主效应,又存在交互作用。月份、海拔及两者交互作用对植物茎秆水 $\delta^{18}O$ 值有极显著效应( $P < 0.01$ )。

### 2.2 不同月份各海拔土壤含水量变化

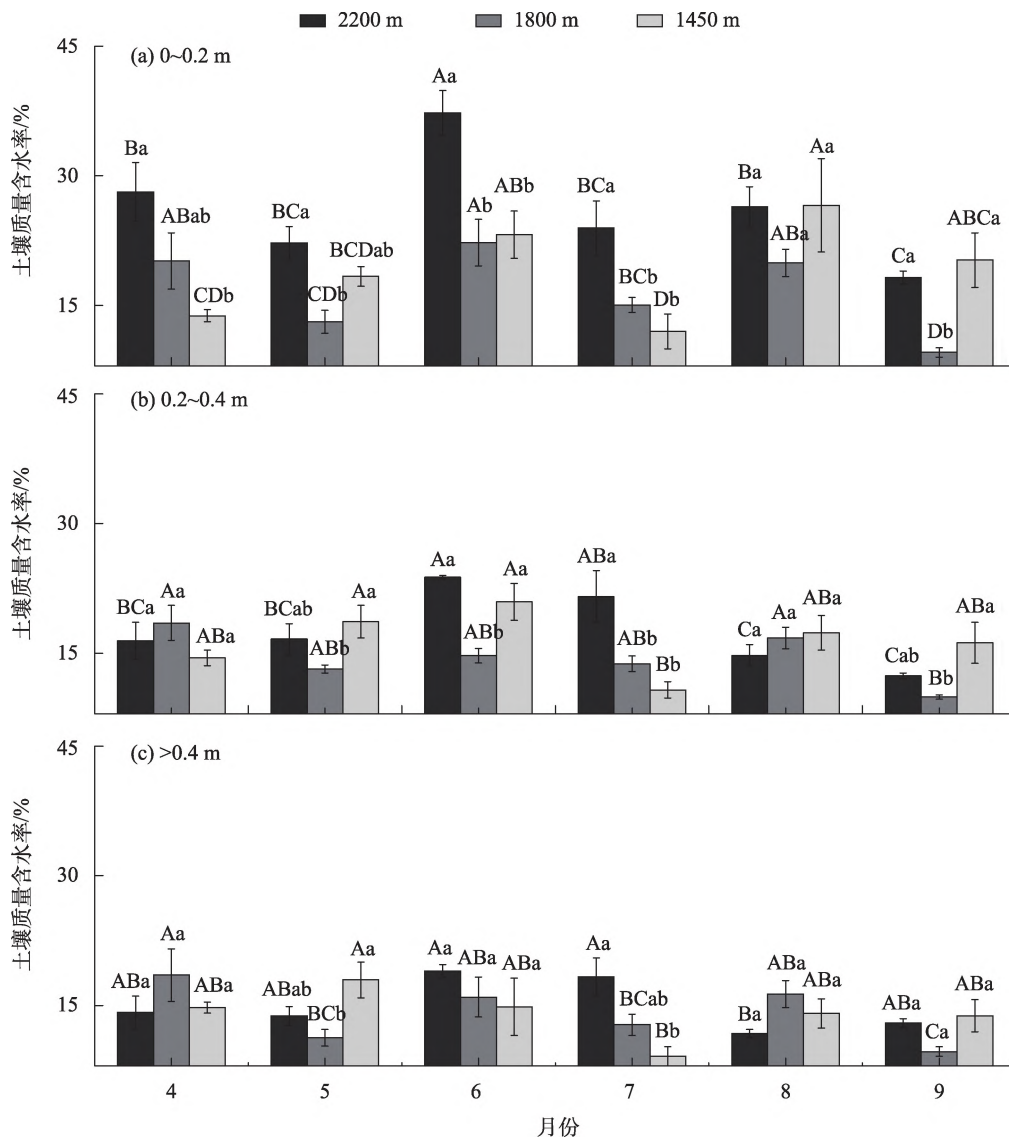
由生长季3个海拔梯度和不同土层SWC的月变化可知(图2)。2200 m海拔0~0.2 m土层SWC在

表2 SWC、土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和植物水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的因子差异贡献

Tab. 2 Differential contributions of factors for SWC, soil water  $\delta^{18}\text{O}$  values, and plant water  $\delta^{18}\text{O}$  values

因子	SWC		土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值		植物水 $\delta^{18}\text{O}$ 值	
	F值	变异贡献率/%	F值	变异贡献率/%	F值	变异贡献率/%
月份	12.25**	13.59	54.95**	35.28	44.32**	56.67
海拔	17.94**	7.96	13.59**	3.49	5.18**	2.60
土层	35.02**	15.54	5.63**	1.45	-	-
月份×海拔	6.13**	13.61	18.87**	24.23	11.21**	28.16
月份×土层	2.02*	4.48	6.49**	8.34	-	-
海拔×土层	6.26**	5.56	2.26	1.16	-	-
月份×海拔×土层	0.75	3.33	2.04**	5.25	-	-

注:\*表示  $P < 0.05$ ; \*\*表示  $P < 0.01$ , 变异贡献率为因子方差占总方差百分比。



注:小写字母为相同月份不同海拔间多重比较;大写字母为相同海拔不同月份间多重比较( $P < 0.05$ )。

图2 生长季3个海拔和土层的土壤含水率

Fig. 2 Soil water content at three elevations and soil layers during the growing season

4—7月显著高于1450 m和1800 m海拔0~0.2 m土层SWC, 8—9月显著高于1800 m海拔0~0.2 m土层SWC, 与1450 m海拔0~0.2 m土层SWC差异不显著。1800 m海拔0~0.2 m土层SWC在4—8月与1450 m海拔0~0.2 m土层SWC差异不显著, 9月显著小于1450 m海拔0~0.2 m土层SWC。表明研究区在海拔1450~2200 m, 随海拔升高, 0~0.2 m土层SWC有增加趋势, 但是海拔越低差异越小。

2200 m海拔0~0.2 m土层SWC在4—5月和7—8月显著低于6月0~0.2 m土层SWC, 显著高于9月0~0.2 m土层SWC。3个海拔0.2~0.4 m和>0.4 m土层SWC在月份间的变化趋势与0~0.2 m土层相同。从4—9月SWC总体先上升后下降, 呈现单峰变化, 6月最高, 9月达到最小, 与月总降水量变化相似(图1)。

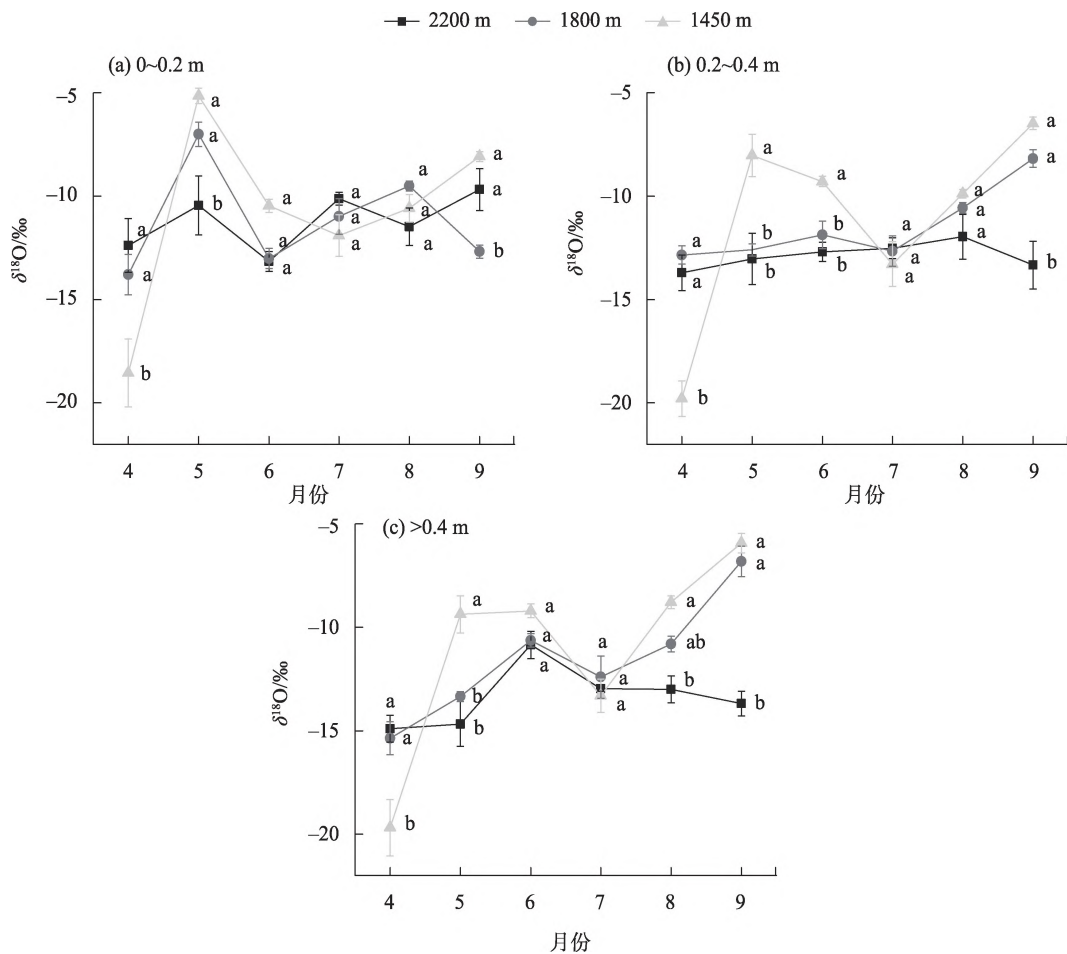
0~0.2 m、0.2~0.4 m和>0.4 m土层的平均SWC分别为20.58%、16.15%和14.39%, SWC随土层加深

有下降趋势, 表明研究区SWC随土层加深逐渐减小。

### 2.3 不同海拔及月份对土壤水、植物水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响

由生长季3个海拔和土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值月变化可知(图3), 1450 m、1800 m和2200 m海拔的3个土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的平均值依次为 $-10.99\text{‰}$ 、 $-11.39\text{‰}$ 和 $-12.48\text{‰}$ , 随着海拔升高土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐减小, 1450 m与1800 m海拔土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 差值小于2200 m和1800 m海拔之间的差值, 表明海拔越高, 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值越小, 土壤水中 $^{18}\text{O}$ 逐渐贫化。

在采样月份, 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化情况复杂, 从4—9月土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随月份波动增大, 表明 $^{18}\text{O}$ 逐渐富集。1450 m海拔土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围 $-19.79\text{‰}$ ~ $-5.15\text{‰}$ , 1800 m和2200 m海拔土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围分别是 $-6.82\text{‰}$ ~ $-15.36\text{‰}$ 和 $-9.68\text{‰}$ ~ $-14.91\text{‰}$ 。



注:小写字母表示相同月份不同海拔间多重比较( $P<0.05$ )。下同。

图3 生长季3个海拔和土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值

Fig. 3 Soil water  $\delta^{18}\text{O}$  values of three elevations and soil layers during the growing season

1450 m海拔土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动范围大于另外两个海拔。4月1450 m海拔0~0.2 m、0.2~0.4 m和>0.4 m土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值最小,与海拔1800 m和2200 m的3个土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异显著,5月1450 m海拔0~0.2 m、0.2~0.4 m和>0.4 m土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值最大,且与1800 m和2200 m海拔对应土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异显著。5月1800 m海拔3个土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值均高于2200 m海拔对应土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值,两个海拔0~0.2 m土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异显著。表明4—5月,月份与海拔之间有交互作用,且1450 m海拔区域交互作用大于1800 m海拔区域,表层土壤更容易受到月份与海拔交互作用影响。随着采样时间延续,海拔与月份之间的交互作用逐渐减小。

0~0.2 m、0.2~0.4 m和>0.4 m土层平均土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为-11.06‰、-11.82‰和-11.99‰,随土层加深逐渐变小,说明在山区表层土壤水 $^{18}\text{O}$ 更富集,深层土壤水 $^{18}\text{O}$ 更贫化。

不同海拔雪岭云杉茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在差异(图4)。4月1450 m海拔茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著低于1800 m和2200 m海拔茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值,1800 m和2200 m海拔之间茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异不显著。5月3个海拔茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值均高于4月对应值,1800 m海拔茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著高于其他两个海拔,表明4—5月雪岭云杉茎秆水 $^{18}\text{O}$ 逐渐富集,且不同海拔的富集程度不同。6月1450 m海拔茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著高于其他两个海拔,7月1450 m海拔茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值月在3个海拔中最小。1450 m海拔茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在月份之间变化幅度最大,6—9月3个海拔茎秆水 $^{18}\text{O}$ 逐渐富集。

2.4 不同月份及海拔水分利用状态

利用IsoSource模型计算得到3个海拔的雪岭云

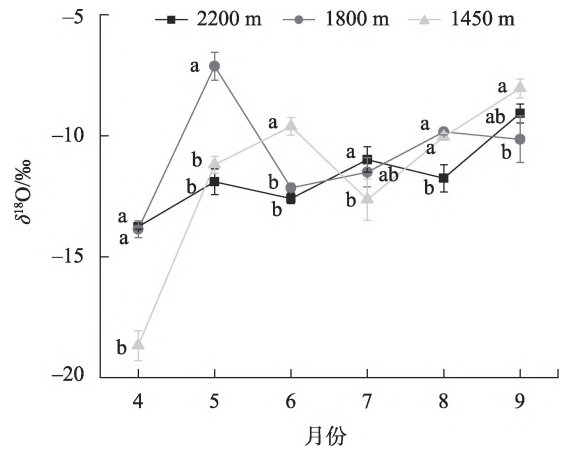


图4 生长季3种海拔雪岭云杉茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值  
Fig. 4 Xylem water  $\delta^{18}\text{O}$  values of *Picea schrenkiana* at three elevations during the growing season

杉在生长季对各层土壤水的吸收比例,结果表明所有海拔雪岭云杉都主要利用0~0.2 m土层土壤水(表3)。整个生长季0~0.2 m、0.2~0.4 m和>0.4 m土层土壤水平均贡献率分别为57.0%、25.8%和17.1%,表明在整个生长季,0~0.2 m土层是雪岭云杉主要的水源。0~0.2 m土壤水在4—9月的贡献率依次为61.8%、42.2%、37.1%、60.1%、59.5%和81.6%,先下降后上升的趋势明显,5月和6月贡献率低于其他月份,9月高于其他月份,表明雪岭云杉的土壤水贡献率与采样月份或季节有关。3种海拔云杉对0~0.2 m土壤水的利用率在采样月间波动方向相同,振幅不同,说明海拔与月份之间存在交互作用。

4月1450 m海拔云杉对0~0.2 m土层土壤水的利用高于另外两个海拔对应值;5—6月各海拔云杉均对0~0.2 m土壤水利用率下降,云杉倾向平均利

表3 生长季雪岭云杉植物水分来源统计

Tab. 3 Water sources used by *Picea schrenkiana* at three elevations during the growing season

海拔/m	土层深度/m	月份						
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	
2200	0~0.2	49.0	54.8	38.1	67.1	61.3	97.9	
	0.2~0.4	32.9	28.1	46.7	17.8	29.6	1.3	
	>0.4	18.1	17.1	15.2	15.1	9.0	0.9	
1800	0~0.2	47.5	29.5	43.7	65.9	71.4	50.1	
	0.2~0.4	29.9	37.4	38.1	15.7	15.7	28.3	
	>0.4	22.6	33.1	18.2	18.4	12.8	21.6	
1450	0~0.2	89.0	42.2	29.4	47.2	45.8	96.9	
	0.2~0.4	5.3	34.4	36.4	26.4	39.2	1.8	
	>0.4	5.7	23.4	34.2	26.4	15.0	1.3	

用各层土壤水;7—8月每个海拔都加大了对表层土壤水的利用程度,但1450 m海拔的增加幅度小于另外两个海拔;9月1800 m海拔对0~0.2 m土层土壤水吸收率下降,但是另外两个海拔利用率上升。

### 3 讨论

#### 3.1 不同月份 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化

土壤-植物-大气连续体(SPAC)中稳定同位素组成之间是相互联系的整体,已有研究表明,降水在SPAC中起主要控制作用<sup>[23]</sup>。降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化直接影响土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化,天山北坡4—5月冰雪融水(即冬季降水)补给土壤水,造成 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著偏小,6—8月(夏季) $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏大。本研究4—9月土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化可以佐证天山地区降水冬季贫化,夏天富集的基本特征<sup>[24]</sup>。

在土层方面,3个海拔土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值均随土层加深逐渐减小,较沙漠土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与土层深度关系相同<sup>[25]</sup>,表明干旱区的沙漠和山区土壤水中的 $^{18}\text{O}$ 都受蒸发影响,氧同位素在表层富集<sup>[26-27]</sup>。

#### 3.2 水分来源分析

大量研究表明山区植物在雨季和旱季拥有不同的水分利用方式。谢聪等<sup>[28]</sup>在研究黑河流域青海云杉(*Picea crassifolia*)时发现,旱季青海云杉主要利用15~90 cm的土壤水,雨季主要利用0~0.2 m的土壤水。Zhu等<sup>[29]</sup>研究发现青海云杉在雨季使用浅层土壤水,在旱季使用深层土壤水,另外雪融水对青海云杉的贡献率可达33%。在本研究中整个生长季,雪岭云杉主要利用0~0.2 m土层土壤水,在5—8月对0~0.2 m土层土壤水吸收减弱,不过依然占据主导地位。与青海云杉生境相比,天山北坡主要受到西风带影响<sup>[30]</sup>,生长季降雨相对均匀<sup>[18]</sup>,0~0.2 m土层土壤含水量高,云杉没有受到明显的干旱胁迫,因此,雪岭云杉主要吸收表层土壤水分。在青海云杉分布的祁连山地区,大气水汽除了来自西风带外,还有偏南季风和东亚季风水汽,夏季这些水汽占降水总量的一半以上<sup>[31]</sup>,季风造成祁连山地区有明显干湿季交替现象。青海云杉的季节性吸水策略和雪岭云杉的表层水吸收体现了各自对环境的适应。

随天山垂直带海拔升高,降水量逐渐增大且温度逐渐降低<sup>[32-33]</sup>,初春1450 m海拔温度最高,冰雪

和表层土壤先一步解冻,而1800 m和2200 m高海拔的积雪融化慢,低海拔雪岭云杉比高海拔雪岭云杉先一步获得表层可利用水源并恢复生命活动,因此茎秆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低。生长季1450 m海拔温度高,土壤蒸发量大,相对于另外两个海拔更加干旱,雪岭云杉更倾向平均利用各层土壤水。受温度和降水的综合作用的水分供给差异,造成雪岭云杉光合作用和蒸腾速率不同<sup>[34]</sup>,进一步影响不同海拔云杉生长速率<sup>[35]</sup>,因此不同海拔雪岭云杉对水分的需求差异原因是温度和降水。

#### 3.3 水分来源与水源涵养

植物根系与其水分来源密切相关,通常植物群落的根系在满足蒸腾耗水和生理用水的前提下,尽可能在土壤剖面中向表层分布<sup>[36]</sup>,较浅的根系不仅有利于减少植物在根系构建与维持方面的投入,也有利于高性价比的资源吸收<sup>[36]</sup>。在干旱区,降水首先浸润表层土壤,在表层分布的根系可以及时利用有限的水资源<sup>[37]</sup>,雪岭云杉是天山森林生态系统的唯一优势种,发展浅层根系可以在竞争中取得优势地位,另外天山北坡雪岭云杉林下土壤营养物质在表层聚集<sup>[38-40]</sup>,浅层根系利于养分和水分的同时吸收。植物根系还有锚固、加筋,降雨截留和削弱溅蚀等固土作用<sup>[41]</sup>,雪岭云杉根系在土壤表层聚集,主要吸收0~0.2 m土壤水,在发生降雨时可以快速吸收水分,减少表面径流;在旱季通过蒸腾作用促进区域水循环。雪岭云杉林调蓄径流量、改善水文状况的能力可以对暴雨“削峰填谷”,减小极端降雨的危害。因此加强雪岭云杉林的保护与抚育管理,可以有效提高森林水源涵养能力,充分发挥其生态效益。

### 4 结论

研究区域3个海拔土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和植物水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随月份波动变化,4—9月 $\delta^{18}\text{O}$ 值总体逐渐增大,与研究区域降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值特征吻合,高海拔0~20 cm土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值更容易受到月份与海拔交互作用的影响。整个生长季受西风带降水影响,3个海拔的温度和降水有很好的耦合效果,没有明显的水热分离,雪岭云杉生长季没有受到明显的干旱胁迫,雪岭云杉均主要利用0~0.2 m土层土壤水,低海拔云杉的水分吸收层变异程度高于高海拔云杉。

## 参考文献(References):

- [1] Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1444–1449.
- [2] Watson J E M, Evans T, Venter O, et al. The exceptional value of intact forest ecosystems[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(4): 599–610.
- [3] Rugenstein J K C, Chamberlain C P. The evolution of hydroclimate in Asia over the Cenozoic: A stable-isotope perspective[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 1129–1156.
- [4] Baldwin J, Vecchi G. Influence of the TianShan on arid extratropical asia[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(16): 5741–5762.
- [5] 乔郭亮, 金晓斌, 顾铮鸣, 等. 2000—2018年天山中段高海拔草地暖季承载力[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 253–261, 309. [Qiao Guoliang, Jin Xiaobin, Gu Zhengming, et al. Carrying capacity of high-altitude grassland in warm seasons in the middle section of Tianshan Mountain from 2000 to 2018[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 253–261, 309.]
- [6] 马静, 姚娟. 世界自然遗产地少数民族牧民生态补偿问题探索——以新疆天山天池为例[J]. *旅游研究*, 2016, 8(2): 52–57. [Ma Jing, Yao Juan. Ecological compensation problem research on the minority herdsmen in the world natural heritage site: Taking Tianchi in Tianshan of Xinjiang, the world heritage site as an example [J]. *Tourism Research*, 2016, 8(2): 52–57.]
- [7] 王国庆. 天山国有林保护中心天保二期工程建设实践和需要解决的问题[J]. *新疆林业*, 2020, 273(5): 42–44. [Wang Guoqing. Tianshan state forest protection center Tianbao II Project construction practices and problems to be solved[J]. *Forestry of Xinjiang*, 2020, 273(5): 42–44.]
- [8] Clark J S, Iverson L, Woodall C W, et al. The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(7): 2329–2352.
- [9] Anderegg W R L, Kane J M, Anderegg L D L. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 30–36.
- [10] 陈曦, 许文强, 罗格平, 等. 天山北坡不同环境条件下雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)林限土壤属性[J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 53–61. [Chen Xi, Xu Wenqiang, Luo Geping, et al. Soil properties at the tree limits of *Picea schrenkiana* forests in response to varying environmental conditions on the northern slope of Tianshan mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 53–61.]
- [11] 赵传燕, 别强, 彭焕华. 祁连山北坡青海云杉林生境特征分析[J]. *地理学报*, 2010, 65(1): 113–121. [Zhao Chuanyan, Bie Qiang, Peng Huanhua. Analysis of the niche space of *Picea crassifolia* on the northern slope of Qilian Mountains[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 113–121.]
- [12] 丁程锋, 张绘芳, 李霞, 等. 天山中部云杉天然林水源涵养功能定量评估——以乌鲁木齐河流域为例[J]. *生态学报*, 2017, 37(11): 3733–3743. [Ding Chengfeng, Zhang Huifang, Li Xia, et al. Quantitative assessment of water conservation function of the natural spruce forest in the central Tianshan Mountains: A case study of the Urumqi River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3733–3743.]
- [13] Wang T, Liang Y, Ren H B, et al. Age structure of *Picea schrenkiana* forest along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(2–3): 267–274.
- [14] Zhou H, Chen Y, Zhu C, et al. Warming increases the carbon sequestration capacity of *Picea schrenkiana* in the Tianshan Mountains, China[J]. *Forests*, 2021, 12(8): 1066.
- [15] Zhang Y, Kong Z C, Yan S, et al. Fluctuation of *Picea timberline* and paleo-environment on the northern slope of Tianshan Mountains during the late Holocene[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(14): 1747–1756.
- [16] 席本野, 邸楠, 曹治国, 等. 树木吸收利用深层土壤水的特征与机制: 对人工林培育的启示[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(9): 885–905. [Xi Benye, Di Nan, Cao Zhiguo, et al. Characteristics and underlying mechanisms of plant deep soil water uptake and utilization: Implication for the cultivation of plantation trees[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(9): 885–905.]
- [17] 张慧文, 马剑英, 孙伟, 等. 不同海拔天山云杉叶功能性状及其与土壤因子的关系[J]. *生态学报*, 2010, 30(21): 5747–5758. [Zhang Huiwen, Ma Jianying, Sun Wei, et al. Altitudinal variation in functional traits of *Picea schrenkiana* var. *tianshanica* and their relationship to soil factors in Tianshan Mountains, Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5747–5758.]
- [18] 周霞. 天山北坡中段气候垂直分异研究[J]. *干旱区地理*, 1995, 18(2): 52–60. [Zhou Xia. Vertical climatic difference in the middle part of northern slope of Tianshan Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 1995, 18(2): 52–60.]
- [19] 吴雪. 古尔班通古特沙漠南部两种梭梭属植物分布及其与地下水埋深关系[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. [Wu Xue. Distribution of Two *Haloxylon* Plants and Their Relationship with Groundwater Depth in the Southern Part of the Gurbantunggut Desert[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.]
- [20] Tyler B Coplen. New guidelines for reporting stable hydrogen, carbon, and oxygen isotope-ratio data[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(17): 3359–3360.
- [21] Wu Y, Zhou H, Zheng X J, et al. Seasonal changes in the water use strategies of three co-occurring desert shrubs[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(26): 6265–6275.
- [22] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261–269.
- [23] Liu Y, Zhu G, Zhang Z, et al. Isotopic differences in soil-plant-at-

- mosphere continuum composition and control factors of different vegetation zones on the northern slope of the Qilian Mountains[J]. Biogeosciences, 2022, 19(3): 877–889.
- [24] Tian L, Yao T, Macclune K, et al. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2007, 112(D10): D007718.
- [25] 戴岳, 郑新军, 唐立松, 等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态[J]. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1214–1225. [Dai Yue, Zheng Xinjun, Tang Lisong, et al. Dynamics of water usage in *Haloxylon ammodendron* in the southern edge of the Gurbantinggüt Desert[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(11): 1214–1225.]
- [26] 林光辉. 稳定同位素生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013. [Lin Guanghui. Stable Isotope Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.]
- [27] Gazis C, Feng X H. A stable isotope study of soil water: Evidence for mixing and preferential flow paths[J]. Geoderma, 2004, 119(1–2): 97–111.
- [28] 谢聪, 赵良菊, 孟飞, 等. 黑河上游森林生态系统植物水分来源[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(4): 502–508. [Xie Cong, Zhao Liangju, Meng Fei, et al. Water sources of plants in the forest ecosystem in the upper reaches of the Heihe River Basin [J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2020, 56(4): 502–508.]
- [29] Zhu G F, Wang L, Liu Y W, et al. Snow-melt water: An important water source for *Picea crassifolia* in Qilian Mountains[J]. Journal of Hydrology, 2022, 613: 128441.
- [30] 刘小康, 饶志国, 张肖剑, 等. 天山地区大气降水氧同位素的影响因素及其对西风环流变化的指示意义[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 97–109. [Liu Xiaokang, Rao Zhiguo, Zhang Xiaojian, et al. Variations in the oxygen isotopic composition of precipitation in the Tianshan Mountains region and their significance for the West-erly circulation[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 97–109.]
- [31] Zhang Q, Zhang J, Sun G, et al. Research on water-vapor distribution in the air over Qilian Mountains[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 22(1): 107–118.
- [32] 马洪亮, 马燕, 薛福民. 天山天池近49年气候变化特征[J]. 气象科技, 2010, 38(2): 209–213. [Ma Hongliang, Ma Yan, Xue Fumin. Variation characteristics of climate change at Tianchi in Tianshan Mountains in recent 49 years[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(2): 209–213.]
- [33] 李艳忠, 罗格平, 许文强, 等. 天山北坡三工河流域中山带森林发育与气候土壤的关系[J]. 山地学报, 2011, 29(1): 33–42. [Li Yanzhong, Luo Geping, Xu Wenqiang, et al. Forest development and their relationships with climatic and soil in the mid-mountain area of Sangong River watershed, northern slope of Tianshan Mountains[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(1): 33–42.]
- [34] 李宝, 常顺利, 孙雪娇, 等. 天山北坡雪岭云杉森林的蒸腾耗水规律[J]. 西部林业科学, 2022, 51(5): 106–112. [Li Bao, Chang Shunli, Sun Xuejiao, et al. Transpiration and water consumption patterns of *Picea schrenkiana* forests in the northern Tianshan[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(5): 106–112.]
- [35] Huo Y X, Gou X H, Liu W H, et al. Climate-growth relationships of *Schrenk spruce (Picea schrenkiana)* along an altitudinal gradient in the western Tianshan mountains, Northwest China[J]. Trees-Structure and Function, 2017, 31(2): 429–439.
- [36] Schenk H J. The shallowest possible water extraction profile: A null model for global root distributions[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(3): 1119–1124.
- [37] Pierret A, Maeght J L, Clement C, et al. Understanding deep roots and their functions in ecosystems: An advocacy for more unconventional research[J]. Annals of Botany, 2016, 118(4): 621–635.
- [38] 阿米娜木·艾力, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1626–1634. [Aminem Eli, Chang Shunli, Zhang Yutao, et al. Altitudinal distribution rule of *Picea schrenkiana* forest's soil organic carbon and its influencing factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7): 1626–1634.]
- [39] 宋昕妮, 李路, 常亚鹏, 等. 天山北坡雪岭云杉林叶片-土壤氮磷化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 97–104. [Song Xinni, Li Lu, Chang Yapeng, et al. Stoichiometric characteristics of nitrogen and phosphorus in leaves and soils of *Picea schrenk's* spruce forest on the northern slope of the Tianshan Mountains[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2020, 48(9): 97–104.]
- [40] 郑翔, 刘琦, 曹敏敏, 等. 森林土壤氧化亚氮排放对氮输入的影响研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1190–1203. [Zheng Xiang, Liu Qi, Cao Minmin, et al. A Review of responses of soil nitrous oxide emissions to nitrogen input in forest ecosystems[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(5): 1190–1203.]
- [41] 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 林木根系固土的理论基础[J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 180–186. [Song Weifeng, Chen Lihua, Liu Xiuping. Review of theories of soil reinforcement by root system in forest[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(6): 180–186.]



## Water source of spruce (*Picea schrenkiana*) at different altitudes in the Tianshan Mountains during the growing season

TIAN Shengchuan<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Shanchao<sup>4</sup>, ZHENG Xinjun<sup>1,2,3</sup>, WANG Yugang<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>1,2</sup>  
(1. State Key laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Fukang Station of Desert Ecology, Chinese Academy of Sciences, Fukang 831505, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Natural Forest Protection Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830001, Xinjiang, China)

**Abstract:** *Picea schrenkiana* is a typical constructive species in the Chinese Tianshan forest ecosystem with important ecological values. In this study, *P. schrenkiana* at three altitude gradients were selected to study its water sources during the growing season (June to September) in the natural forest conservation area of the northern slope of Tianshan Mountains. The hydrogen-oxygen stable isotope technique was used to determine the  $\delta^{18}\text{O}$  values of xylem water and soil water levels. In addition, the relationships between xylem water or soil water  $\delta^{18}\text{O}$  values and altitude were analyzed, and the IsoSource model was used to quantify the water sources of *P. schrenkiana* at different altitudes. The results showed that: (1) the  $\delta^{18}\text{O}$  of soil water at the three elevations were depleted in April and enriched from May to September. The  $\delta^{18}\text{O}$  values of stem water at 1450 m elevation showed the greatest variation between months, while the  $\delta^{18}\text{O}$  of stem water was gradually enriched at the three elevations from June to September; (2) the 0–0.2 m soil water contributed more than half of the *P. schrenkiana* water requirement at the three elevations during the growing season, with the surface soil water average contribution rates of 61.37%, 51.35%, and 58.42% in the high, middle, and low elevations, respectively. In May and June, *P. schrenkiana* tended to use soil water in all layers equally, and no significant shift in the plant water uptake was observed during the growing season. In addition, the water absorption of *P. schrenkiana* mainly occurred at 0–0.2 m soil water level, suggesting that it could rapidly absorb rainfall water, which can improve soil hydrology and reduce the damage caused by extreme rainfall. Therefore, strengthening the protection management of *P. schrenkiana* forests can effectively improve the water conservation capacity of forests and enhance their ecological benefits.

**Keywords:** *Picea schrenkiana*; stable isotopes; IsoSource model; water source