



雪岭云杉径向生长对饱和水汽压差响应的区域分异与个体异质性

杨志龙 吕杰 马雪莉 王文栋 马媛 杨曦 郭芳莉 李晟奇

Regional differentiation and individual heterogeneity in the response of radial growth to vapor pressure deficit in *Picea schrenkiana*

Yang Zhilong, L ü Jie, Ma Xueli, Wang Wendong, Ma Yuan, Yang Xi, Guo Fangli, Li Shengqi

引用本文:

杨志龙, 吕杰, 马雪莉, 王文栋, 马媛, 杨曦, 郭芳莉, 李晟奇. 雪岭云杉径向生长对饱和水汽压差响应的区域分异与个体异质性[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9):130–142. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260085

Yang Zhilong, L ü Jie, Ma Xueli, Wang Wendong, Ma Yuan, Yang Xi, Guo Fangli, Li Shengqi. Regional differentiation and individual heterogeneity in the response of radial growth to vapor pressure deficit in *Picea schrenkiana*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2026, 48(9):130–142. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260085

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260085>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气候因子对云冷杉针叶混交林主要针叶树种径向生长的贡献率分析

Contribution rate of climate factors to radial growth of main coniferous species in spurce–fir conifer mixed forest of northeastern China
北京林业大学学报, 2024, 46(5): 55–63. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220332>

基于树轮密度的早晚材划分方法比较

Comparison of earlywood–latewood demarcation methods based on tree–ring density
北京林业大学学报, 2026, 48(5): 169–179. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250269>

庐山日本柳杉径向生长对气候响应的边际效应

Marginal effect of radial growth of *Cryptomeria japonica* to climate in Lushan Mountain of southwestern China
北京林业大学学报, 2021, 43(7): 63–69. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200372>

小兴安岭长白落叶松径向生长的周向异质性及影响因素

Circumferential heterogeneity and influencing factors of radial growth of *Larix olgensis* in Lesser Khingan Mountains of northeastern China
北京林业大学学报, 2023, 45(10): 47–58. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230177>

北京园林树木秋色盛期的空间异质性及其对热环境差异的响应

Spatial heterogeneity in leaf coloring date and the phenological response to thermal environment variations of Beijing landscape trees
北京林业大学学报, 2024, 46(1): 119–130. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210546>

不同降水梯度下黄土高原油松人工林蒸腾特征及其生物物理响应

Transpiration characteristics and biophysical response of *Pinus tabulaeformis* plantations on the Loess Plateau of northern China under different precipitation gradients
北京林业大学学报, 2025, 47(10): 42–53. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250068>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20260085

雪岭云杉径向生长对饱和水汽压差响应的 区域分异与个体异质性

杨志龙^{1,2} 吕 杰³ 马雪莉^{4,5} 王文栋^{4,5} 马 媛^{1,2}
杨 曦^{1,2} 郭芳莉^{1,2} 李晟奇^{1,2}

(1. 新疆大学生态与环境学院, 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆精河温带荒漠生态系统教育部野外科学观测
研究站, 新疆 精河 833300; 3. 新疆大学生命科学与技术学院, 新疆生物资源基因工程重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017;
4. 新疆维吾尔自治区林科院森林生态与园林绿化研究所, 新疆 乌鲁木齐 830063; 5. 阿尔泰山森林生态系统野外站, 新疆 阿勒泰 836699)

摘要:【目的】探究天山雪岭云杉径向生长对饱和水汽压差(VPD)响应的空间分异与个体异质性规律, 解析 VPD 即时与滞后效应, 以期气候暖干化背景下山地森林动态预测提供理论依据。【方法】本研究基于天山雪岭云杉树轮宽度年表与气候数据, 在区域尺度对比不同研究区样地平均年表, 揭示 VPD 响应的空间分异; 在单株尺度利用广义加性混合模型(GAMM)量化径向生长对当年及上一年 VPD 的响应强度, 并运用随机森林模型评估树龄及环境因子的相对贡献。【结果】(1)1980—2023 年, 4 个研究区均显著增温($P < 0.01$), 夏季 VPD 均极显著上升($P < 0.001$), 区域水热条件差异明显, 其中哈密和板房沟相对暖干, 乌苏和吉木萨尔相对湿润。(2)雪岭云杉径向生长及其气候响应呈区域分异: 暖干区(哈密、板房沟)树轮宽度指数与夏季 VPD 显著负相关($P < 0.01$), 而相对湿润区(乌苏、吉木萨尔)响应较弱或不显著。(3)区域尺度上, 暖干区板房沟和哈密的当年 VPD 生长敏感度($\beta_{(VPD)}$)均值分别为-0.041 和-0.055, 表现为较强负向响应; 相对湿润区乌苏和吉木萨尔 $\beta_{(VPD)}$ 均值均接近 0。在上一年 VPD 响应方面, 负向响应在暖干区进一步增强, 负响应个体比例上升至 68%~69%, 表明暖干环境下 VPD 对径向生长的负向影响具有更强的滞后性。(4)单株尺度上, 个体响应策略呈明显异质性。暖干区哈密、板房沟以双负型为主导(51.7% 和 47.1%), 群体响应方向相对集中, 而相对冷湿区乌苏、吉木萨尔各类策略比例均衡、正负响应并存, 表明区域气候背景不仅影响总体响应强度, 也调节个体响应策略。(5)随机森林分析表明, 树龄的重要性最高(IncMSE = 0.005 79), 海拔与气候因子次之, 降水及坡向、坡度等地形因子贡献相对较小, 表明树龄是影响 VPD 生长敏感度个体差异的主要因素。【结论】本研究从区域与单株两个尺度揭示了雪岭云杉 VPD 生长响应由区域水热梯度和个体属性共同调控的规律。树龄是决定 VPD 生长敏感度的内在基础, 区域水热背景能够调节个体响应策略, VPD 即时效应与滞后效应的叠加进一步加剧了暖干区森林衰退风险。在气候暖干化背景下, 将树龄结构与区域生境类型纳入森林动态预测模型, 有助于提升山地森林生长响应与生态系统稳定性的评估能力。

关键词: 雪岭云杉; 饱和水汽压差; 树轮宽度; 个体异质性; 树龄效应; 空间分异

中图分类号: S791.18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2026)09-0130-13

引文格式: 杨志龙, 吕杰, 马雪莉, 等. 雪岭云杉径向生长对饱和水汽压差响应的区域分异与个体异质性 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9): 130-142. Yang Zhilong, Lü Jie, Ma Xueli, et al. Regional differentiation and individual heterogeneity in the response of radial growth to vapor pressure deficit in *Picea schrenkiana* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(9): 130-142.

Regional differentiation and individual heterogeneity in the response of radial growth to vapor pressure deficit in *Picea schrenkiana*

Yang Zhilong^{1,2} Lü Jie³ Ma Xueli^{4,5} Wang Wendong^{4,5} Ma Yuan^{1,2}
Yang Xi^{1,2} Guo Fangli^{1,2} Li Shengqi^{1,2}

收稿日期: 2026-07-22 修回日期: 2026-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860149), 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01C398)。

第一作者: 杨志龙。主要研究方向: 森林生态学。Email: 2095274476@qq.com 地址: 830017 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市水磨沟区华瑞街 777 号新疆大学博达校区。

责任作者: 马媛, 副教授。主要研究方向: 干旱区生态学。Email: xjmayuan@xju.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <https://j.bjfu.edu.cn>; <https://journal.bjfu.edu.cn>

- (1. College of Ecology and Environment, Key Laboratory of Oasis Ecology of Education Ministry, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;
2. Xinjiang Jinghe Observation and Research Station of Temperate Desert Ecosystem, Ministry of Education, Jinghe 833300, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;
3. College of Life Science and Technology, Xinjiang Key Laboratory of Biological Resources and Genetic Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;
4. Institute of Forest Ecology and Landscape Greening, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;
5. Altay Forest Ecosystem Field Station, Altay Prefecture 836699, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the spatial differentiation and individual heterogeneity in the radial growth response of *Picea schrenkiana* to vapor pressure deficit (VPD) in the Tianshan Mountains, and elucidate the immediate and lagged effects of VPD, thereby providing a theoretical basis for predicting mountain forest dynamics under climate warming and drying. [Method] Using tree-ring width chronologies and climate data from *P. schrenkiana* stands across the Tianshan Mountains, we compared site-level mean chronologies among different study areas to reveal spatial variation in VPD response. At the individual-tree scale, generalized additive mixed models (GAMMs) were employed to quantify the response intensity of radial growth to VPD in the current and previous years, and random forest models were used to evaluate the relative contributions of tree age and environmental factors. [Result] (1) From 1980 to 2023, all four study regions experienced significant warming ($P < 0.01$), while summer VPD increased highly significantly ($P < 0.001$). The regions showed marked differences in hydrothermal conditions, with Hami and Banfanggou being relatively warm and dry, whereas Wusu and Jimsar were relatively humid. (2) Radial growth of *P. schrenkiana* and its climatic responses showed clear regional differentiation. In the warm-dry zone (Hami and Banfanggou), the tree-ring width index (RWI) was significantly negatively correlated with summer VPD ($P < 0.01$), whereas responses in the relatively humid zone (Wusu and Jimsar) were weaker or non-significant. (3) At the regional scale, the mean current-year VPD growth sensitivity ($\beta_{(VPD_t)}$) in the warm-dry zone were -0.041 and -0.055 in Banfanggou and Hami, respectively, indicating relatively strong negative responses, whereas the $\beta_{(VPD_t)}$ in the relatively humid zone (Wusu and Jimsar) were both close to zero. For previous-year VPD responses, negative responses were further strengthened in the warm-dry zone, with the proportion of individuals showing negative responses increasing to 68%–69%, indicating a stronger lagged negative effect of VPD on radial growth under warm-dry conditions. (4) At the individual-tree scale, response strategies showed marked heterogeneity. The warm-dry zone (Hami and Banfanggou) was dominated by the double-negative type (51.7% and 47.1%, respectively), with relatively concentrated response directions, whereas the relatively cold-humid zone (Wusu and Jimsar) showed a more balanced distribution of response types, with both positive and negative responses, indicating that regional climatic background not only affects overall response intensity but also regulates individual response strategies. (5) Random forest analysis showed that tree age had the highest importance (IncMSE = 0.005 79), followed by elevation and climatic factors, whereas precipitation and topographic factors such as aspect and slope contributed relatively little, indicating that tree age is the primary factor underlying individual differences in VPD growth sensitivity. [Conclusion] At both regional and individual-tree scales, the VPD growth response of *P. schrenkiana* is jointly regulated by regional hydrothermal gradients and individual attributes. Tree age constitutes the intrinsic basis determining VPD growth sensitivity, while regional hydrothermal background modulates the expression of individual response strategies. The combined effect of immediate and lagged VPD responses further exacerbates the risk of forest decline in warm-dry zones. Incorporating tree age structure and regional habitat type into forest dynamic prediction models can improve the assessment of mountain forest growth response and ecosystem stability under climate warming and drying.

Key words: *Picea schrenkiana*; vapor pressure deficit; tree-ring width; individual heterogeneity; tree age effect; spatial differentiation

雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)是天山山地森林的优势建群种,不仅承担着区域水源涵养、土壤保持和生物多样性维持等重要生态功能,也是维系天山生态安全与区域气候调节的关键树种^[1]。传统研究多以降水或综合干旱指数表征水分限制,但这些指标反映的是土壤水分状况,无法表征大气蒸散需求对树木生理过程的即时胁迫^[2]。饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD)能够直接驱动植物气孔行为,较单一降水变量更能精准量化大气对蒸腾的实际驱动力^[3]。持续升高的 VPD 通过诱导气孔关闭限制光合碳同化,进而抑制树木径向生长^[4]。天山山地生态系统依赖季节性融雪补给,生长季土壤水分与大气蒸散需求之间的失衡尤为突出,使得雪岭云杉对 VPD 变化具有高度敏感性^[5]。因此,在气候持续暖干化背景下,明确 VPD 对天山雪岭云杉生长的影响,已成为认识区域森林响应气候变化的重要内容。

近年来,关于天山雪岭云杉气候响应的研究^[6]主要集中于水分限制效应。已有研究^[7-8]证实生长季水分亏缺是限制树木生长的重要因素。随着 VPD 作为大气干旱指标在森林生态学研究中的广泛应用,其对树木生长的影响逐渐受到关注。然而,现有研究多基于区域平均年表开展分析^[9-10],虽然能够揭示区域总体响应特征,却难以反映个体间响应差异。虽有研究^[11]初步揭示了区域气候背景和树龄对树木 VPD 响应的调控作用,但针对个体响应异质性及其微生境调控机制的系统认识仍然缺乏。与此同时,现有研究主要关注当年气候条件对树木生长的影响,而对 VPD 跨年度滞后效应的认识仍相对有限,时间维度的响应盲区尚未填补。

VPD 对生长的胁迫不仅体现在当年,还可能通过碳储备效应形成跨年度滞后。上一年高 VPD 会诱导气孔关闭,限制光合碳同化,导致碳水化合物储备减少,进而影响次年生长季启动时的形成层活动、细胞分裂与扩张能力,从而形成干旱记忆^[12]。大尺度树轮网络研究进一步证实,前一年夏季 VPD 对当年径向生长的负效应比当年 VPD 更为普遍,且主要表现为生长抑制^[2]。对于针叶树种,干旱后的生长滞后效应尤为突出,且低恢复力与未来死亡风险密切相关^[13]。在干旱针叶林中,滞后效应的强度和持续时间还与生长变异性显著相关^[14]。因此,同时分析 VPD 即时效应与滞后效应,有助于全面认识雪岭云杉对 VPD 的响应特征,为暖干化背景下山地森林动态预测提供科学依据。

针对天山雪岭云杉对 VPD 响应区域分异、个体响应异质性及其滞后效应缺乏系统认识等问题,本研究以天山沿线 4 个区域雪岭云杉为研究对象,从

区域尺度和单株尺度探究其径向生长对当年及上一年 VPD 的响应特征,比较不同区域 VPD 生长敏感性差异,揭示个体响应异质性及其影响因素,以期为暖干化背景下天山森林动态预测和森林经营管理提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况与样地布设

本研究选择天山北坡作为研究区来探究雪岭云杉径向生长对 VPD 响应的空间分异。天山地处中亚干旱半干旱区,属温带大陆性气候,受西风环流影响,冬冷夏热,干旱少雨。近 40 年来,天山山区气候显著升温,VPD 持续上升,为研究云杉径向生长对大气干旱的响应提供了现实背景^[15-16]。天山北坡是雪岭云杉的核心分布区,沿山体呈明显的东-西向水热梯度,是开展 VPD 生长响应空间分异研究的理想区域。

基于上述水热梯度,本研究沿天山北坡自西向东布设样带,依次设置乌苏、板房沟、吉木萨尔和哈密 4 个研究区,以揭示水热条件的空间分异(图 1)。2025 年 7 月,在上述 4 个研究区开展野外调查,共布设 36 个固定样地(乌苏 9 个、板房沟 8 个、吉木萨尔 6 个、哈密 13 个)(表 1)。每个样地面积为 20 m × 20 m,用于反映林分结构特征。样地采用分散布设方式,在各区域内力求覆盖不同的海拔梯度和坡向,以提高对环境异质性的代表性。样地选择避开人为干扰显著的区域(如采伐迹地或放牧干扰区),以保证样本能够代表自然生长状态。在各样地内选择长势良好、无明显病虫害或机械损伤的优势木,最终确定 172 株样木作为研究对象。

1.2 研究方法

1.2.1 气象数据与 VPD 计算

基于上述样地空间分布,为明确各研究区气候背景差异并量化大气水分胁迫强度,本研究获取了国家青藏高原科学数据中心(National Tibetan Plateau Data Center, <https://data.tpdc.ac.cn>)和国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<https://www.ncdc.ac.cn>)的温度、降水及相对湿度数据,空间分辨率均为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$,时间跨度为 1980—2023 年。其中,温度和相对湿度采用年平均值表示,年降水量由 12 个月降水量累加获得。在数据处理中,提取各研究样点对应栅格的气候时间序列,并对缺失值进行质量控制与线性插补,以确保数据准确性满足该研究需求。

VPD 指在一定温度下饱和水汽压与空气中实际水汽压之间的差值,是衡量大气干燥程度的有效指标。温度升高而湿度不变时,VPD 增大,促使植物气孔关闭以减少蒸腾,进而限制光合碳吸收^[17]。本研

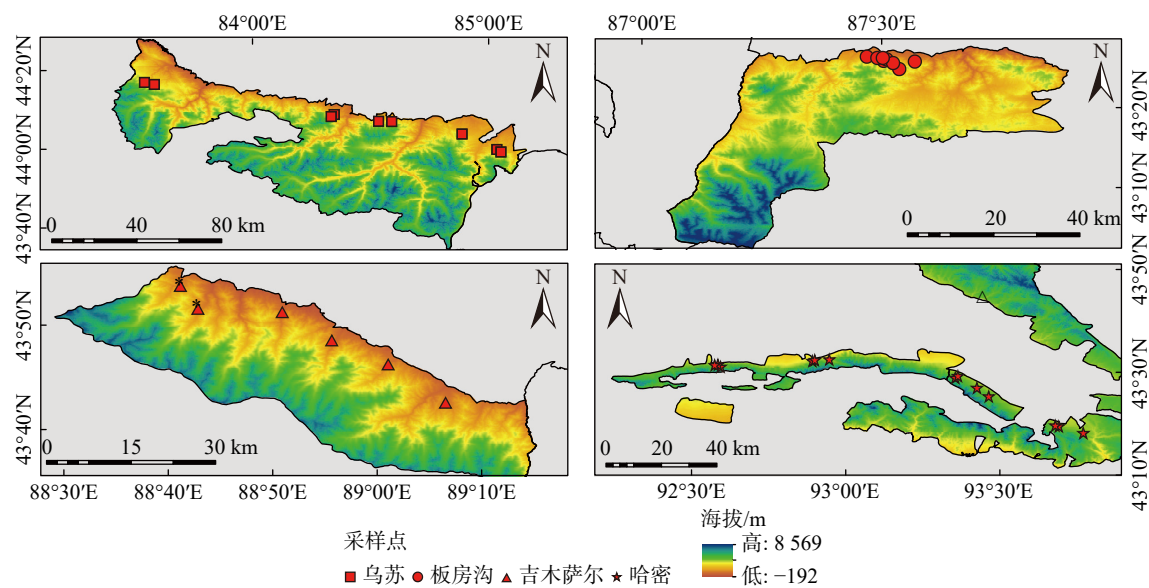


图 1 研究区及样地分布
Fig. 1 Distribution of the study area and sampling sites

表 1 研究区及样地信息
Tab. 1 Details of the study area and sampling sites

研究区域	样地数量	经纬度	海拔/m	采集株数/样芯数	最短时间间隔	最长时间间隔
乌苏	9	43°59'N ~ 44°17'N, 83°34'E ~ 85°04'E	1 766.13 ~ 2 165.78	45/90	2007—2025年	1892—2025年
板房沟	8	43°25'N ~ 43°26'N, 87°28'E ~ 87°34'E	1 714.19 ~ 1 869.69	34/68	1998—2025年	1916—2025年
吉木萨尔	6	43°43'N ~ 43°54'N, 88°41'E ~ 89°07'E	1 696.34 ~ 1 895.16	30/60	2000—2025年	1921—2025年
哈密	13	43°18'N ~ 43°32'N, 92°34'E ~ 93°46'E	2 118.37 ~ 2 460.42	63/126	2000—2025年	1895—2025年

究选择雪岭云杉主要生长期(6—8月)VPD作为核心气候胁迫因子,该时段 VPD 对气孔导度和光合作用的限制效应最为显著,能够有效反映气候暖干化背景下大气干旱对树木径向生长的制约程度。本研究基于夏季(6—8月)逐月平均气温(T_A , °C)和空气相对湿度(R_H , %)计算夏季 VPD,计算公式如下。

$$VPD = 0.611 \times \exp \frac{17.27 \times T_A}{T_A + 237.3} \times \left(1 - \frac{R_H}{100}\right) \quad (1)$$

1.2.2 树轮宽度年表建立

基于上述野外采样,为从树轮数据中提取可靠的气候生长信号,并分离年龄趋势与气候驱动的年际波动,对采集的树芯样品进行晾干、固定、打磨和目测定年^[18]。采用 LINTAB 5 年轮宽度测量系统(德国 RINNTech 公司)测定树轮宽度,测量精度为 0.01 mm。并使用 COFECHA 程序对年轮宽度测量质量进行检验。为减少树木年龄及长期生长趋势等非气候因素的影响,利用 ARSTAN 程序,采用负指数函数对交叉定年后的树轮序列进行去趋势处理^[19-20],经标准化处理后获得树轮宽度指数(ring-width index, RWI)序列,并建立 4 个区域 RWI 年表。区域年表统计参数均满足树轮气候分析要求(表 2)。与此同时,

保留各样芯的 RWI 序列,用于后续广义加性混合模型(generalized additive mixed model, GAMM)分析。

1.2.3 区域气候背景与生长响应格局分析

在获取气象数据的基础上,对天山沿线 4 个研究区 1980—2023 年的气候背景进行系统分析,以明确不同水热条件下雪岭云杉生长的气候背景差异。采用线性回归分析各研究区年均温、年降水量和夏季 VPD 的变化趋势,计算回归系数、决定系数(R^2)并进行显著性检验。各因子变化速率(Trend)以 10 a 为单位表示(年均温: °C/10 a, 年降水量: mm/10 a, 夏季 VPD: kPa/10 a),该单位为气候学研究的通行惯例(WMO/IPCC),便于表征年代际尺度上的长期变化趋势并保证研究结果的可比性。采用累积距平法识别气候因子的阶段性变化特征与突变节点,并计算各研究区气候因子的多年平均值及变异系数(CV)以表征空间差异,并采用单因素方差分析(one-way ANOVA)结合 Tukey 多重比较检验不同研究区之间的差异显著性,绘制箱线图。基于树轮宽度年表,对各研究区 RWI 序列进行线性回归分析,评估 1980—2023 年雪岭云杉径向生长趋势的变化方向及显著性,明确不同水热背景下生长的长期动态特征,为后

表 2 树轮宽度年表统计

Tab. 2 Statistical characteristics of tree ring width chronologies

研究区域	MS	SD	AC1	Rbar	SNR	EPS	PC1/VFE/%
乌苏	0.133	0.218	0.800	0.301	24.990	0.962	34.840
板房沟	0.119	0.086	0.777	0.494	58.580	0.983	59.100
吉木萨尔	0.123	0.070	0.654	0.438	60.000	0.984	43.600
哈密	0.079	0.055	0.808	0.330	50.300	0.981	38.400

注: MS. 平均敏感度; SD. 年轮宽度标准差; AC1. 一阶自相关系数; Rbar. 年表内序列平均相关系数; SNR. 信噪比; EPS. 种群信号强度; PC1/VFE. 第一主成分解释的方差比例。

续 VPD 响应分析奠定基础。

基于上述气候背景分析, 采用 Pearson 相关分析检验各研究区 RWI 序列与年尺度气候因子(夏季 VPD、年均温、年降水量)的相关关系, 识别不同水热梯度下限制雪岭云杉径向生长的主导气候因子, 揭示树木生长对 VPD 响应的方向与强度差异。

1.2.4 区域 VPD 生长敏感度评估

基于上述区域响应格局分析, 为进一步从单株尺度量化径向生长对 VPD 的响应强度, 并通过区域汇总比较不同水热背景下 VPD 生长敏感度的空间分异, 构建广义加性混合模型。

$$RWI_{i,t} = s(\text{Age}_{i,t}) + \beta_1 \text{VPD}_t + \beta_2 \text{VPD}_{t-1} + b_i + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

式中: $RWI_{i,t}$ 表示第 i 株树第 t 年的树轮宽度指数, $\text{Age}_{i,t}$ 作为平滑函数项, 用于剔除树龄相关的非线性生长趋势; β_1 和 β_2 分别表示当年(t 年)及上一年($t-1$) VPD 对树木生长的效应系数, 表征径向生长对 VPD 年际波动的响应强度, 在后续分析中分别记为 $\beta_{(\text{VPD}_t)}$ 和 $\beta_{(\text{VPD}_{t-1})}$, 统称为 VPD 生长敏感度(β 值)。 β 值的符号表示响应方向, $\beta > 0$ 表示正向响应, $\beta < 0$ 表示负向响应; $|\beta|$ 反映 VPD 变化对树木径向生长的响应强度, $|\beta|$ 越大表示响应越强; b_i 为个体随机效应, 控制个体间不可观测差异; $\varepsilon_{i,t}$ 为随机误差项。模型中同时考虑时间序列的自相关结构, 以避免对 VPD 效应的高估。对于同一区域内的所有个体, 气候变量 VPD 采用相同的区域尺度时间序列, 而个体间差异通过随机效应项及单株响应参数来体现。

根据 GAMM 拟合结果, 提取单株 β 值, 统计各研究区 $\beta_{(\text{VPD}_t)}$ 和 $\beta_{(\text{VPD}_{t-1})}$ 的分布特征、平均值及负响应个体比例, 比较区域尺度 VPD 生长敏感度的空间分异。

1.2.5 单株响应策略识别

区域尺度分析揭示天山沿线雪岭云杉 VPD 响应存在空间差异, 但区域均值难以反映同一气候背景下个体生长调控的异质性。为了识别个体尺度响应策略的多样性, 基于 GAMM 中提取的当年 VPD 生长敏感度 $\beta_{(\text{VPD}_t)}$ 和上一年 VPD 生长敏感度

$\beta_{(\text{VPD}_{t-1})}$, 按照响应方向的正负组合将个体划分为 4 类响应策略: 双正型($\beta_{(\text{VPD}_t)} > 0, \beta_{(\text{VPD}_{t-1})} > 0$)、双负型($\beta_{(\text{VPD}_t)} < 0, \beta_{(\text{VPD}_{t-1})} < 0$)、当前负-滞后正型($\beta_{(\text{VPD}_t)} < 0, \beta_{(\text{VPD}_{t-1})} > 0$)、当前正-滞后负型($\beta_{(\text{VPD}_t)} > 0, \beta_{(\text{VPD}_{t-1})} < 0$)。统计各区域不同响应类型的比例分布, 揭示区域环境对个体响应组合的调节作用。

1.2.6 影响因子解析

为了识别导致个体间 VPD 生长敏感度差异的关键影响因子及其相对贡献, 以上述 GAMM 计算得到的单株当年 VPD 生长敏感度 $\beta_{(\text{VPD}_t)}$ 为响应变量, 构建随机森林(random forest, RF)模型。预测变量包括树龄、海拔、年均温、年降水量、坡度及坡向。

随机森林基于 Bootstrap 抽样构建回归树集成, 采用置换重要性(IncMSE)、平均最小深度(mean minimal depth)和根节点出现次数(root frequency)3 类指标综合评估各预测变量的重要性, 评估其对 VPD 生长敏感度差异的相对贡献。

1.3 数据统计

本研究所有统计分析及绘图均在 R 4.3.2 软件中完成。GAMM 建模采用 mgcv 程序包, 随机森林分析采用 randomForest 程序包。显著性水平统一设定为 $P < 0.05$ (显著)、 $P < 0.01$ (极显著)、 $P < 0.001$ (极高度显著)。

2 结果与分析

2.1 气候特征

1980—2023 年间, 4 地年均温均存在明显年际波动, 但总体呈显著上升趋势(图 2a, $P < 0.01$), 升温速率为 $0.38 \sim 0.47 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。累积距平曲线(图 2b)显示, 4 地于 1996 年后均进入回升阶段。空间上(图 2c), 哈密($0.88 \text{ } ^\circ\text{C}$)与板房沟($0.54 \text{ } ^\circ\text{C}$)年均温显著高于乌苏($-1.85 \text{ } ^\circ\text{C}$)与吉木萨尔($-2.37 \text{ } ^\circ\text{C}$)。

1980—2023 年间, 4 地年降水量均存在明显年际波动, 总体变化趋势存在区域差异(图 3a)。哈密呈极显著下降趋势($P < 0.001$), 乌苏、吉木萨尔和板房沟亦呈下降趋势, 但未达显著水平。累积距平曲线(图 3b)显示, 乌苏、板房沟和吉木萨尔在 1995 年

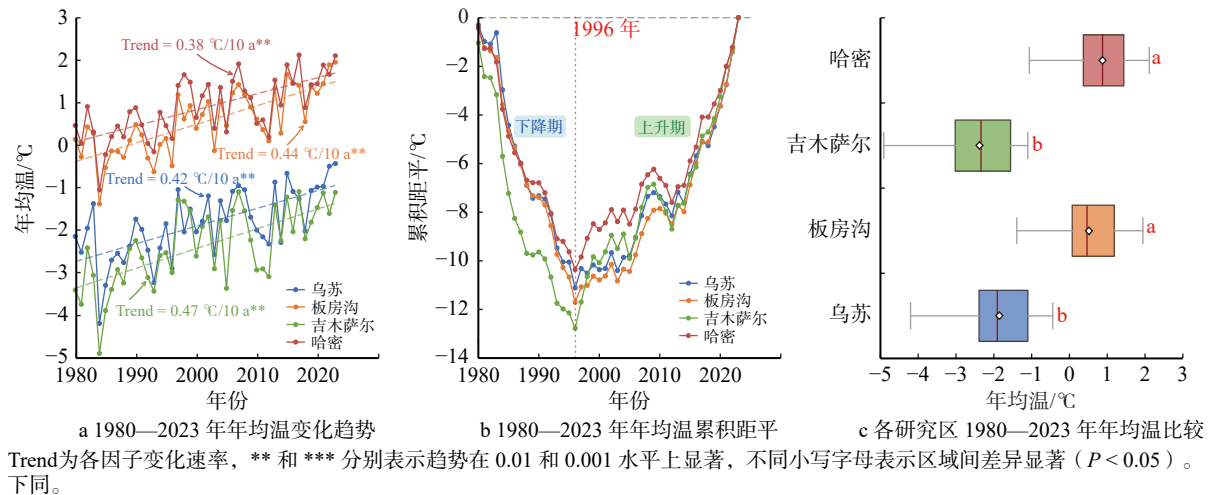


图2 1980—2023 年 4 个研究区年均温变化特征

Fig. 2 Variations in annual mean temperature across four study regions during 1980–2023

前后由持续偏少转为相对偏多; 哈密在 1995 年后进入持续偏丰阶段(累积距平由负转正)。空间格局上(图 3c), 年降水量呈显著梯度分异: 哈密多年平均降水量最小(160.13 mm), 年际变率亦最小; 板房沟(269.42 mm)与吉木萨尔(290.73 mm)居中, 二者差异不显著; 乌苏(362.64 mm)显著高于其他 3 地($P < 0.05$), 且年际变率最大。

1980—2023 年间, 4 地 VPD 均存在明显年际波动, 但线性趋势均呈极显著上升(图 4a, $P < 0.001$), 哈密增速最快(0.016 kPa/10 a)。累积距平曲线(图 4b)显示, VPD 于 2005 年后快速回升, 其转折滞后于温度约 10 年, 可能与 1995 年后降水阶段性偏丰对 VPD 的暂时抑制有关。空间上(图 4c), VPD 分异突出, 哈密(0.36 kPa)显著高于吉木萨尔(0.19 kPa)、乌苏(0.21 kPa)和板房沟(约 0.23 kPa)。

综合水热特征, 4 地沿天山北坡呈现明显的暖干至冷湿梯度: 哈密为暖干背景, 板房沟为温和偏干过渡, 吉木萨尔为冷而中等湿润背景, 乌苏则相对冷

湿, 反映了天山北坡水热条件的空间异质性。

2.2 径向生长响应 VPD 的区域格局

在明确区域气候背景差异的基础上, 进一步分析雪岭云杉径向生长对 VPD 的区域响应特征。在生长趋势方面(图 5a ~ d), 1980—2023 年间, 哈密 RWI 呈显著下降趋势($P < 0.001$), 乌苏、板房沟 RWI 总体呈下降趋势但未达到显著水平, 吉木萨尔 RWI 呈上升变化, 但也未达到显著水平。在气候响应方面(图 5e ~ h), 4 地 RWI 对气候的响应存在显著空间差异: 板房沟地区 RWI 仅与夏季 VPD 呈显著负相关($P < 0.01$); 哈密地区 RWI 与夏季 VPD 及温度均呈显著负相关($P < 0.01$), 与降水无显著关联; 乌苏各气候因子相关性整体较弱, VPD 仅呈边缘负相关($P = 0.053$); 吉木萨尔各气候因子与 RWI 均未达到显著水平。总体而言, 雪岭云杉径向生长对 VPD 的响应具有明显区域差异, 其中暖干程度较高的哈密和板房沟表现出较强的 VPD 负向响应, 而乌苏和吉木萨尔的响应相对较弱。

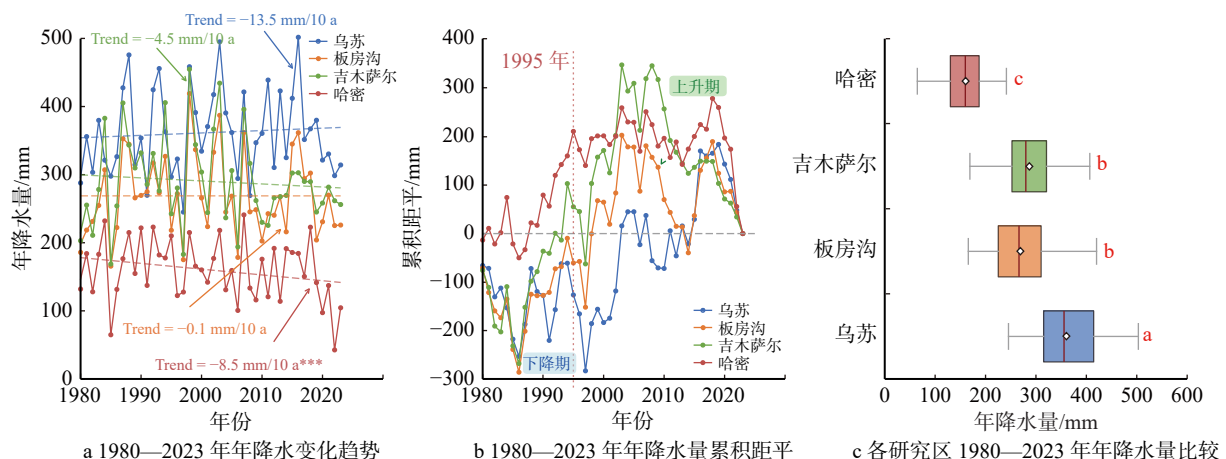


图3 1980—2023 年 4 个研究区年降水量变化特征

Fig. 3 Variations in annual precipitation across four study regions during 1980–2023

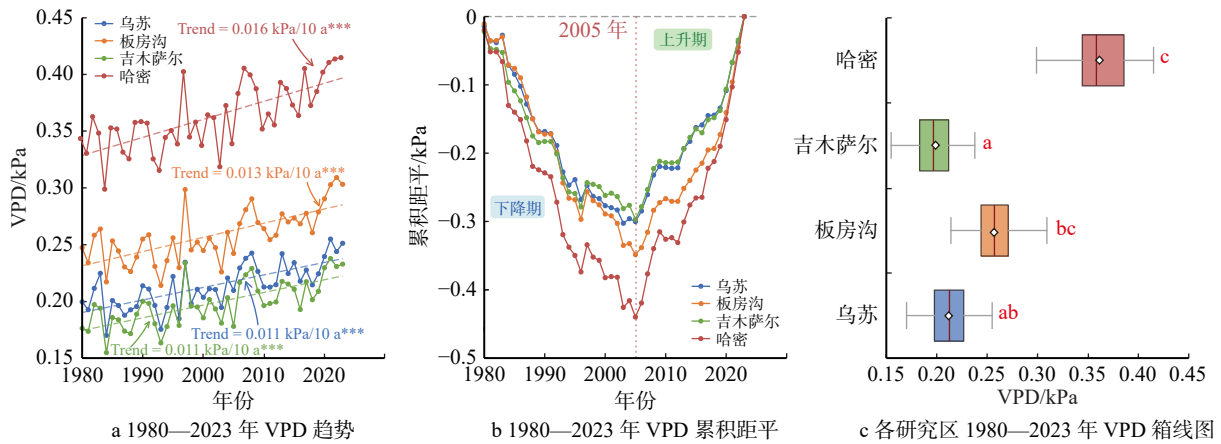


图4 1980—2023年4个研究区VPD变化特征

Fig. 4 Variations in VPD across four study regions during 1980–2023

2.3 区域尺度 VPD 生长敏感度

进一步比较不同区域 VPD 生长敏感度及其分布特征(图 6a)发现:乌苏和吉木萨尔 $\beta_{(VPD_t)}$ 平均值接近 0(−0.017 和 −0.023), 表明生长对当年 VPD 变化响应较弱;板房沟和哈密 $\beta_{(VPD_t)}$ 平均值均为负且绝对值较大(分别为 −0.041 和 −0.055), 表明两地径向生长对当年 VPD 表现出较强的负向响应。上一年 VPD 对径向生长的影响表现出更明显的区域差异:板房沟 $\beta_{(VPD_{t-1})}$ 绝对值最大(−0.112), 负向滞后响应最强;哈密次之(−0.066), 吉木萨尔(−0.029)和乌苏(−0.022)相对较弱。总体来看, 滞后抑制效应在温度和 VPD 水平较高的板房沟、哈密更为突出, 而在温度较低、VPD 相对较低的吉木萨尔与乌苏则相对较弱。

从个体响应特征看, $\beta_{(VPD_t)}$ 的分布呈现区域差异(图 6b):乌苏与吉木萨尔中位数接近 0, 负响应比例约为 53%;板房沟与哈密中位数分别为 −0.045 和 −0.057, 负响应个体比例约 58%。对于 $\beta_{(VPD_{t-1})}$, 乌苏负响应比例增至 59%, 吉木萨尔则仍维持在 53% 左右;板房沟与哈密的负向偏移进一步增强, 中位数分别为 −0.097 和 −0.100, 负响应比例上升至 68% ~ 69%。与当年 VPD 响应相比, 板房沟和哈密的 $\beta_{(VPD_{t-1})}$ 整体进一步向负值方向偏移, 且负向响应个体占比明显增加, 表明上一年 VPD 的负向滞后响应进一步增强。

2.4 单株尺度响应策略的多样性

区域尺度分析揭示, 天山沿线雪岭云杉 VPD 响应存在空间差异, 但区域均值难以反映同一气候背景下个体生长调控的异质性。因此, 进一步基于 GAMM 获得的当年和上一年 VPD 生长敏感度, 对个体响应策略进行分析。4 种响应策略在不同区域的组成比例存在明显差异(图 7a)。

乌苏与吉木萨尔各类响应比例相对均衡, 未呈

现单一主导类型(图 7b):乌苏双负型占 41.0%, 双正型达 28.3%;吉木萨尔双负型比例降至 33.3%, 双正型占 26.7%, 当前负-滞后正与当前正-滞后负型比例相当(各 20.0%), 表明在较低 VPD 条件下, 径向生长未呈现普遍的抑制效应, 部分个体仍可维持甚至促进生长。板房沟与哈密均以双负型为主导, 分别占 47.1% 和 51.7%。这表明在较高 VPD 背景下, 个体响应更多集中于 $\beta_{(VPD_t)}$ 和 $\beta_{(VPD_{t-1})}$ 均为负向的双负型, 响应策略趋于负向一致。总体来看, 随着区域 VPD 水平升高, 雪岭云杉个体 VPD 响应由相对分散的多种策略共存, 逐渐转为负向响应策略集中, 表现出暖干区(板房沟、哈密)响应趋同、相对湿润区(乌苏、吉木萨尔)响应分散的空间格局。

2.5 VPD 生长敏感度的影响因素

随机森林模型结果(图 8)显示, 树龄在 3 类指标中均居首位, 是 VPD 生长敏感度个体差异的主导因子(IncMSE = 0.005 79, 平均最小深度 1.37, 根节点频次 163 次)。环境因子中, 海拔重要性仅次于树龄(IncMSE = 0.005 34, 平均最小深度 2.59, 根节点 92 次), 通过调控温度、水分及蒸散条件, 对 VPD 生长敏感度产生关键环境影响。气候变量中, 温度(IncMSE = 0.003 26)重要性高于降水(IncMSE = 0.001 21), 对个体尺度 VPD 生长敏感度具有独立贡献;降水根节点频次(120 次)与温度相当, 但 IncMSE 较低, 表明其虽非首要影响因子, 但可能通过调节土壤水分条件对生长过程产生间接影响。坡向与坡度等地形因子重要性次于上述变量, 但仍具稳定贡献。坡向南北分量(IncMSE = 0.001 06)与东西分量(IncMSE = 0.000 75)及坡度(IncMSE = 0.000 81)共同调节林分微气候;其中东西分量根节点频次最高(145 次), 但 IncMSE 最低, 对 VPD 敏感度整体解释力有限, 可能主要通过微地形光照与蒸散调节间接影响个体响应。

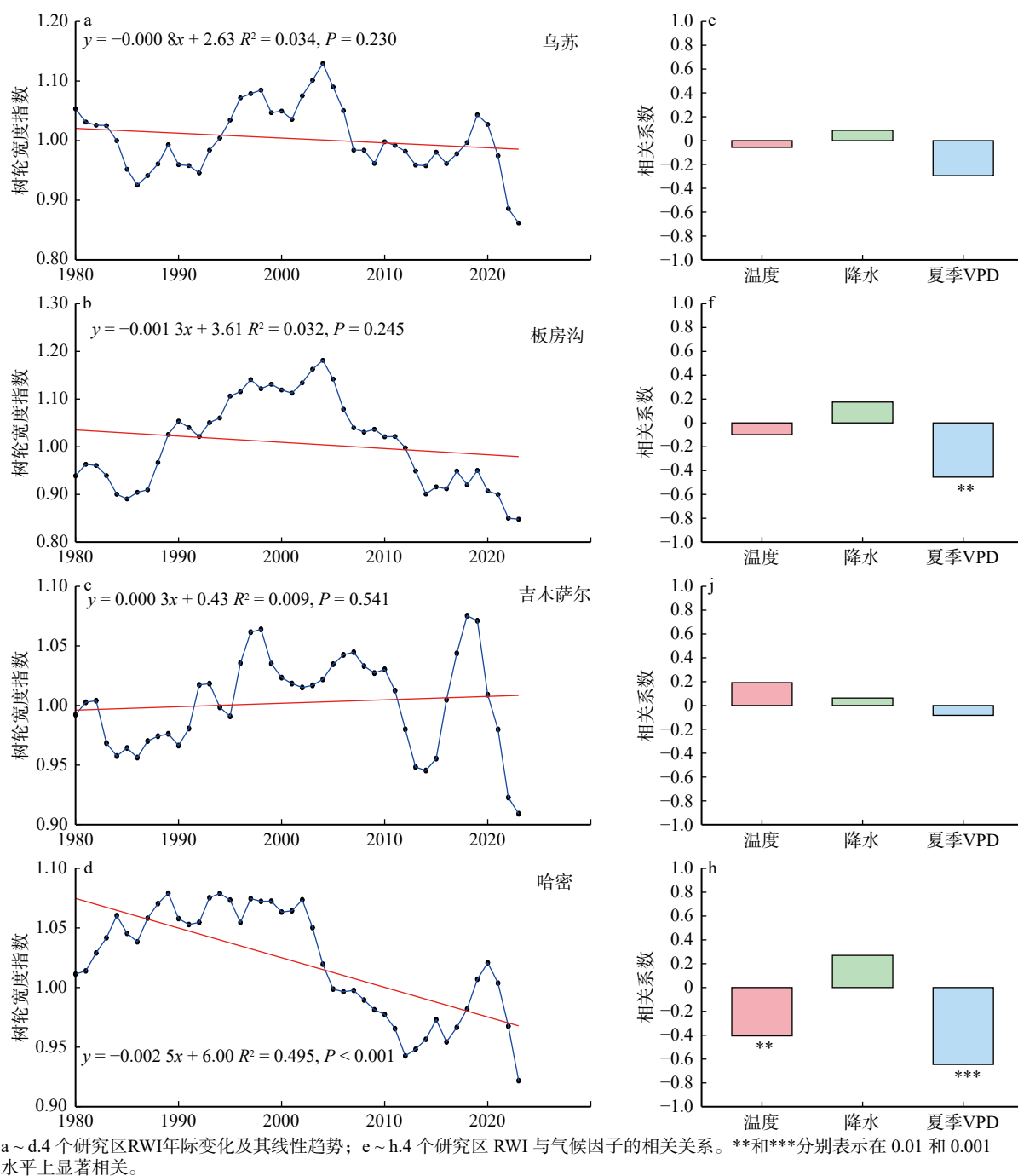


图5 径向生长及其对气候变化的响应

Fig. 5 Radial growth and its responses to climate change

3 讨论

近年来,全球暖干化背景下,大气干燥程度持续增强,VPD已成为影响森林生长的重要气候因子。天山地区暖干化趋势显著,但雪岭云杉对VPD响应的区域分异、个体异质性及其驱动机制仍缺乏系统认识。本研究基于区域尺度和单株尺度分析雪岭云杉对VPD的响应特征,并进一步探讨其形成机制,以期认识暖干化背景下天山森林适应过程提供科学依据。

3.1 区域尺度 VPD 响应格局与滞后效应机制

1980—2023年间,研究区持续升温且VPD显著升高,年降水量总体呈下降趋势(图2,图3),表明区域大气干燥程度持续增强。尤其是2005年后VPD累积距平明显上升(图4b)。在此背景下,雪岭云杉径向生长对VPD的响应呈现明显的区域分异:暖干程度较高的板房沟和哈密表现出较强的负向响应,而乌苏和吉木萨尔的响应相对较弱(图5)。该结果与已有研究中干旱、半干旱地区VPD对树木生长限制作用随水分有效性降低而增强的认识一致^[21]。

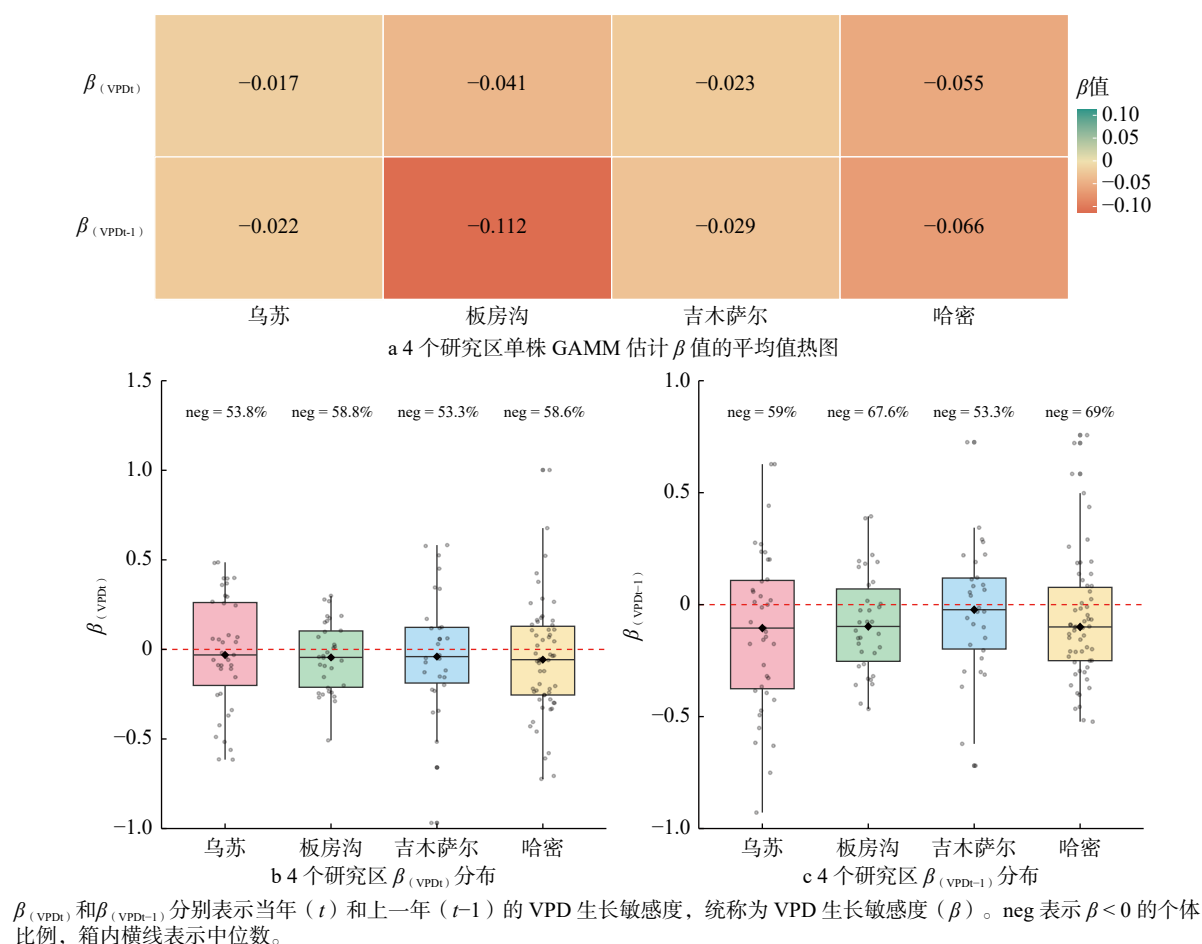


图6 雪岭云杉 VPD 生长敏感度的区域差异

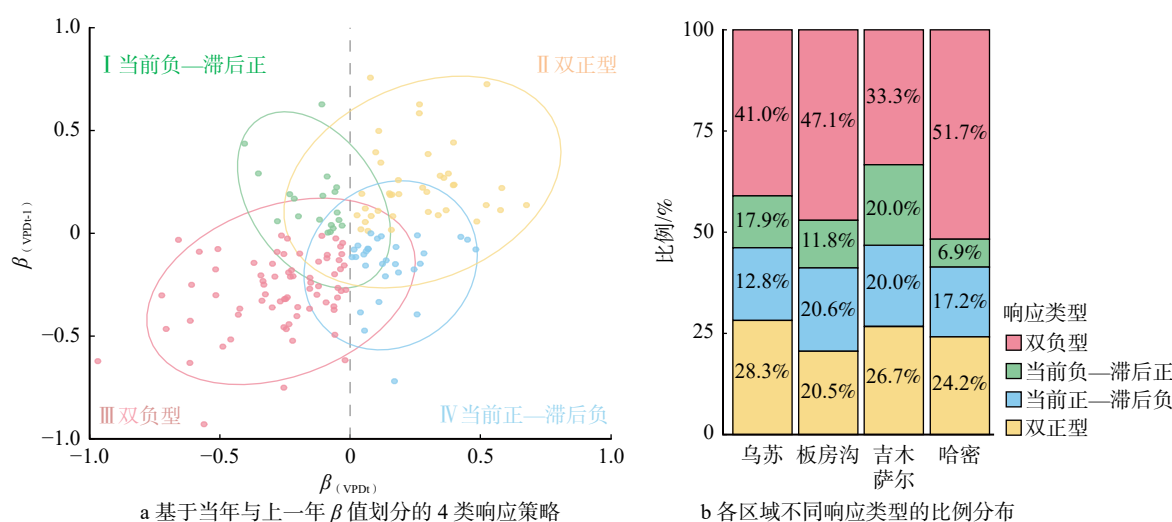
Fig. 6 Regional variation in VPD growth sensitivity of *Picea schrenkiana*

图7 单株尺度雪岭云杉对 VPD 的响应策略分化

Fig. 7 Divergent strategies of individual *Picea schrenkiana* trees in response to vapor pressure deficit

区域间响应差异进一步表明, VPD 对雪岭云杉生长的影响受到水分供给条件的调节。已有研究^[22-23]表明, 升高的 VPD 可通过增强大气蒸散需求, 加剧树体水分亏缺并诱导气孔关闭, 进而抑制径向生长。本研究中, 哈密与板房沟的年均温和 VPD 水平相近,

但哈密年降水量显著较低, 水分供给更为受限, 其 RWI 与夏季 VPD 的负相关也更为明显。在相近的 VPD 和温度条件下, 较低的水分供给可能进一步增强树木对大气干燥的敏感性, 使 VPD 升高所引起的蒸散需求更容易转化为树体水分胁迫, 从而加剧对

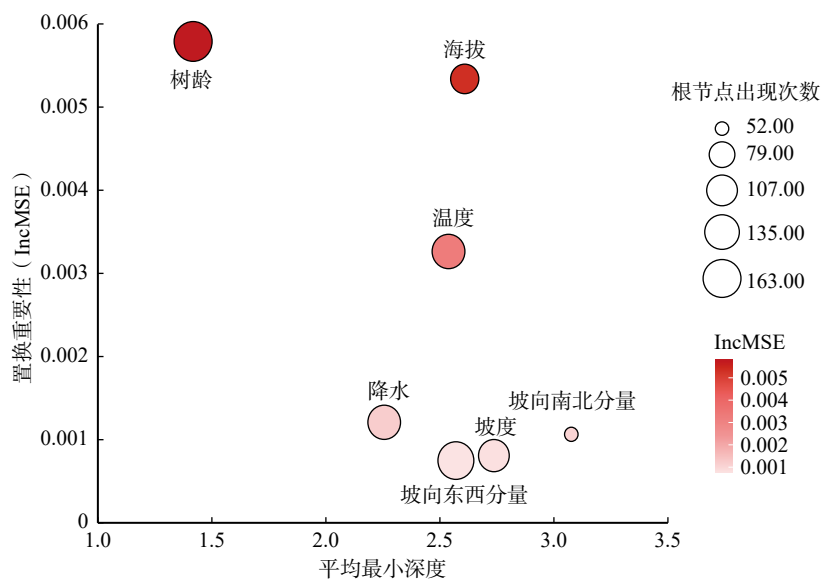


图8 雪岭云杉当年 VPD 生长敏感度的影响因子

Fig. 8 Drivers of current-year VPD sensitivity in *Picea schrenkiana*

径向生长的限制^[24-25]。相比之下,乌苏和吉木萨尔温度较低且水分条件相对较好,VPD对径向生长的限制较弱,说明区域水热背景是调节雪岭云杉VPD响应的重要环境条件^[26]。

除当年VPD外,上一年VPD的响应也表现出明显的区域差异(图6)。板房沟和哈密 $\beta_{(VPD_{t-1})}$ 绝对值较大,且个体 $\beta_{(VPD_{t-1})}$ 值整体进一步向负值方向偏移,说明暖干区雪岭云杉存在更明显的负向滞后响应。前期较高的VPD可能通过持续水分胁迫、碳储备消耗或形成层活动受限,对后续径向生长产生影响^[27-28]。这一结果与树轮研究^[28]中报道的干旱滞后效应一致,VPD的不利影响可能跨越生长年度延续至后续生长。对于以雪岭云杉为优势种的天山森林而言,连续高VPD年份可能使前期胁迫持续传递至后续生长阶段,从而增加长期生长受限和森林衰退的潜在风险^[29]。

3.2 个体尺度 VPD 响应异质性及影响因素

单株尺度分析(图7)表明,雪岭云杉VPD生长响应具有明显个体差异:即便处于相同气候条件,不同个体在响应方向、强度及当年与滞后效应组合上亦呈现显著差别,反映生长调节策略的多样性。树轮学研究^[30]表明,云杉径向生长在个体层面承载复杂气候信号。这种差异除遗传因素外,还受土壤条件、个体竞争等微生境因素调控,使得同一区域内VPD响应分布呈现明显空间梯度,乌苏与吉木萨尔整体接近中性且个体差异较大,板房沟与哈密则表现为负向偏移(图6b~c)。

随机森林模型表明,树龄是VPD生长敏感度个体差异的首要影响因子(IncMSE = 0.005 79)(图8),

反映了个体发育阶段可能对树木与大气环境的相互作用产生重要影响。随着树龄增加,树木结构特征(如水力传导路径长度等)可能发生变化,并伴随生理调节能力的差异^[31-32],老龄树在高VPD下更易遭受水分胁迫,而幼树则具更强的调节弹性与恢复能力^[33]。然而,老龄树耐旱性较强,但恢复周期延长可能导致长期生长受限;幼树或可凭借较高内在水分利用效率在短期内展现更强适应力,这对预测暖干化背景下森林结构与动态具有指示意义^[34]。在树龄这一内在因素的基础上,海拔与温度作为关键环境梯度,进一步影响个体VPD生长敏感度。海拔通过长期调控温度、水分可利用性及蒸散需求,系统性塑造树木生境,使个体VPD响应呈现清晰的区域水热梯度特征而非随机分布^[35]。进一步沿海拔梯度的分析^[36]揭示,树木VPD响应随高程变化:低海拔区,高温下干旱限制突出,表现为内在水分利用效率升高伴随径向生长下降;高海拔区,生长对VPD敏感性相对较弱,CO₂浓度响应可能趋于饱和,加剧个体响应异质性。

相比之下,坡向、坡度等微地形因子虽不具主导作用,但仍通过影响局地光照和水分分布,对树木生长产生持续影响^[37]。如南北坡向或东西坡向辐射差异,可改变蒸腾暴露程度,影响树木VPD实际响应强度。总体来看,雪岭云杉VPD生长敏感度的个体差异具有明显层次:树龄决定个体基础差异,海拔和温度塑造区域背景,坡向和坡度在局地尺度上进一步调节。这种多层次作用关系可能影响林分在气候变暖背景下的稳定性,高敏感个体在极端干旱事件中更易衰退,从而影响群落结构^[38]。这种多层次作

用关系意味着,森林在气候变暖背景下的稳定性不仅取决于区域水热条件,还受到林分年龄结构的深刻影响。

3.3 生态意义与全球变化交互效应

气候变暖背景下,VPD 升高与 CO_2 浓度增加往往同步发生。理论上, CO_2 浓度升高可通过提高内在水分利用效率缓解水分胁迫^[39]。然而,本研究结果表明,在 VPD 持续升高的暖干区,VPD 已成为暖干区限制雪岭云杉径向生长的重要气候因子,表明高 VPD 条件下 CO_2 施肥效应受到明显限制。这与其他区域森林研究^[40]一致:当大气蒸散需求超过土壤水分供给能力时,气孔关闭成为主导响应, CO_2 供应增加难以转化为光合增益。对于天山雪岭云杉而言,这意味着未来气候暖干化趋势可能进一步加剧生长衰退风险,并削弱林分碳汇功能。个体响应策略差异还表明,在长期干燥条件下林分内部可能发生选择性淘汰,双负型个体占比过半且滞后抑制强烈,意味着高敏感个体更易生长受抑或死亡,从而改变林分结构与更新动态。此现象并非天山独有,即便在北方泥炭地等土壤水分充裕区,VPD 升高亦显著抑制植被生长与碳吸收,反映高温与大气干燥协同胁迫下生态系统的高度脆弱性^[41]。

4 结 论

本研究以天山沿线 4 个区域雪岭云杉为研究对象,基于 172 株树木年轮数据和 1980—2023 年气候数据,采用树轮气候响应分析、GAMM 和随机森林模型,从区域尺度和单株尺度分析了雪岭云杉径向生长对饱和水汽压差(VPD)的响应特征,并评估了不同环境因子和个体属性对 VPD 生长敏感度的相对影响。主要结论如下。

(1) 雪岭云杉径向生长对 VPD 的响应具有显著的区域分异特征,区域水热梯度影响了 VPD 生长敏感度的整体格局。沿天山东西向水热梯度,暖干区(板房沟、哈密)径向生长对当年及上一年 VPD 均表现出较强负向响应,而相对湿润地区(乌苏、吉木萨尔)整体敏感性较弱,且滞后效应相对不明显,表明区域水热背景是影响雪岭云杉 VPD 响应的重要环境基础。

(2) 区域平均响应掩盖了雪岭云杉 VPD 生长响应显著的个体异质性。同一区域内,不同个体对当年及上一年 VPD 的响应方向和强度均存在明显差异;暖干区(板房沟、哈密)个体响应趋于一致,以负响应为主,而冷湿区(乌苏、吉木萨尔)个体响应更加分散,说明区域气候背景不仅影响总体响应强度,也调节个体响应策略的表达。

(3) 树龄是影响雪岭云杉 VPD 生长敏感度个体差异的主要因素,海拔、温度等环境因子进一步调节其响应强度。随机森林分析表明,树龄的重要性最高,海拔和温度次之,降水及坡向、坡度等因子贡献相对较小,说明 VPD 生长敏感度是个体属性与区域环境共同作用的结果。

本研究为暖干化背景下天山森林动态预测与适应性经营提供了科学依据,但仍存在一定局限性。随机森林模型识别的变量重要性仅反映统计相关性,其因果机制仍需进一步验证;对 VPD 滞后效应的解释主要基于碳储备假说,缺乏树轮稳定同位素和木质部解剖结构等直接证据。未来可结合长期生态监测、多源生理指标及分龄级控制实验,进一步阐明 VPD 影响雪岭云杉生长的生理机制及不同发育阶段个体的响应阈值与恢复动态。

参 考 文 献

- [1] Qin L, Liu K, Shang H, et al. Minimum temperature during the growing season limits the radial growth of timberline Schrenk spruce (*P. schrenkiana*) [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 322: 109004.
- [2] Novick K A, Ficklin D L, Grossiord C, et al. The impacts of rising vapour pressure deficit in natural and managed ecosystems [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2024, 47(9): 3561–3589.
- [3] Mirabel A, Girardin M P, Metsaranta J, et al. Increasing atmospheric dryness reduces boreal forest tree growth [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 6901.
- [4] Zhang R, Yuan Y, Gou X, et al. Intra-annual radial growth of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) and its response to climate on the northern slopes of the Tianshan Mountains [J]. *Dendrochronologia*, 2016, 40: 36–42.
- [5] Jiahan S, Zhang T W, Yu S, et al. Responses of *Picea schrenkiana* tree-ring density to climate extremes at different elevations in the Kashi River Basin of the western Tianshan Mountains [J]. *Forests*, 2025, 16(11): 1679.
- [6] Zhang Z H, Malhi Y, Ziemińska K, et al. A test of ecophysiological theories on tropical forest functional traits along a VPD gradient [J]. *Communications Biology*, 2025, 8(1): 1031.
- [7] Malone F, Hoylman Z H, Hu J, et al. Landscape influences on microclimate and tree growth cessation in a semi-arid montane forest [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2025, 130(1): e2024JG008483.
- [8] Peng Z, Zhang Y D, Zhu L J, et al. Divergent tree growth and the response to climate warming and humidification in the Tianshan Mountains, China [J]. *Forests*, 2022, 13(6): 886.
- [9] 梁振满, 李奇, 李金豹, 等. 川西高原青杨径向生长对气候变化的响应 [J]. *应用生态学报*, 2025, 36(10): 3033–3042.
- Liang Z M, Li Q, Li J B, et al. Responses of radial growth of *Populus cathayana* to climate change in the western Sichuan Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025,

- 36(10): 3033–3042.
- [10] 侯帅, 徐国保, 王波, 等. 祁连山东部青海云杉死亡和存活个体径向生长对气候变化的响应差异 [J]. *生态学报*, 2024, 44(11): 4708–4718.
- Hou S, Xu G B, Wang B, et al. Radial growth of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) for dead and living trees and their responses to climate change in the eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4708–4718.
- [11] 钱江瑜, 王强, 奚之敏, 等. 天山中部天山云杉年轮宽度特征及其与气候因子的相关性 [J]. *林业与环境科学*, 2025, 41(6): 56–64.
- Qian J Y, Wang Q, Xi Z M, et al. Characteristics of tree-ring width of *Picea schrenkiana* in the middle of the Tianshan Mountains and its correlation with climatic factors [J]. *Forestry and Environmental Science*, 2025, 41(6): 56–64.
- [12] Kannenberg S A, Schwalm C R, Anderegg W R L. Ghosts of the past: how drought legacy effects shape forest functioning and carbon cycling [J]. *Ecology Letters*, 2020, 23(5): 891–901.
- [13] DeSoto L, Cailleret M, Sterck F, et al. Low growth resilience to drought is related to future mortality risk in trees [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 545.
- [14] Gazol A, Camarero J J, Sánchez-Salguero R, et al. Drought legacies are short, prevail in dry conifer forests and depend on growth variability [J]. *Journal of Ecology*, 2020, 108(6): 2473–2484.
- [15] 黄静, 张运, 汪明秀, 等. 近 17 年新疆干旱时空分布特征及影响因素 [J]. *生态学报*, 2020, 40(3): 1077–1088.
- Huang J, Zhang Y, Wang M X, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought and its relationship with meteorological factors in Xinjiang in last 17 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 1077–1088.
- [16] 丁之勇, 董义阳, 鲁瑞洁. 1960~2015 年中国天山南、北坡与山区极端气温时空变化特征 [J]. *地理科学*, 2018, 38(8): 1379–1390.
- Ding Z Y, Dong Y Y, Lu R J. Spatio-temporal variability of temperature extremes in Tianshan Mountains area, Northwest China, during 1960–2015 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(8): 1379–1390.
- [17] 姜萍, 胡列群, 许婷婷. 近 60a 新疆大气水分亏缺的时空变化特征 [J]. *干旱区地理*, 2023, 46(1): 1–10.
- Jiang P, Hu L Q, Xu T T. Spatiotemporal variations of vapor pressure deficit in Xinjiang in recent 60 years [J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(1): 1–10.
- [18] 闫伯前, 林万众, 刘琪璟, 等. 秦岭不同年龄太白红杉径向生长对气候因子的响应 [J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(9): 58–65.
- Yan B Q, Lin W Z, Liu Q J, et al. Age-dependent radial growth responses of *Larix chinensis* to climatic factors in Qinling Mountains, northwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(9): 58–65.
- [19] 张昕宇, 高露双, 刘可祥, 等. 新疆天山西部伊犁河流域不同海拔雪岭云杉生长衰退特征 [J]. *应用生态学报*, 2024, 35(5): 1196–1204.
- Zhang X Y, Gao L S, Liu K X, et al. Growth decline characteristics of *Picea schrenkiana* at different altitudes in Yili River Basin, western Tianshan Mountains, Xinjiang, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(5): 1196–1204.
- [20] 杜英军, 李士杰, 王丽, 等. 东北地区帽儿山种源实验林区不同种源水曲柳径向生长对气候的响应 [J]. *应用生态学报*, 2024, 35(5): 1159–1168.
- Du Y J, Li S J, Wang L, et al. Response of radial growth of *Fraxinus mandshurica* from different provenances to climate at the Maoershan in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(5): 1159–1168.
- [21] Li T, Liu Y, Cai Q, et al. Water stress-induced divergence growth of *Picea schrenkiana* in the Western Tianshan and its forcing mechanisms [J]. *Forests*, 2023, 14(2): 354.
- [22] Huo Y, Gou X, Liu W, et al. Climate-growth relationships of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) along an altitudinal gradient in the western Tianshan mountains, northwest China [J]. *Trees*, 2017, 31(2): 429–439.
- [23] Gou X, Zhang T, Yu S, et al. Climate response of *Picea schrenkiana* based on tree-ring width and maximum density [J]. *Dendrochronologia*, 2023, 78: 126067.
- [24] Grossiord C, Buckley T N, Cernusak L A, et al. Plant responses to rising vapor pressure deficit [J]. *New Phytologist*, 2020, 226(6): 1550–1566.
- [25] Jalakas P, Takahashi Y, Waadt R, et al. Molecular mechanisms of stomatal closure in response to rising vapour pressure deficit [J]. *New Phytologist*, 2021, 232(2): 468–475.
- [26] Anderegg W R L, Konings A G, Trugman A T, et al. Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought [J]. *Nature*, 2018, 561: 538–541.
- [27] López J, Way D A, Sadok W. Systemic effects of rising atmospheric vapor pressure deficit on plant physiology and productivity [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(9): 1704–1720.
- [28] Anderegg W R L, Schwalm C, Biondi F, et al. Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models [J]. *Science*, 2015, 349: 528–532.
- [29] 陈亚宁, 李稚, 方功焕. 中亚天山地区关键水文要素变化与水循环研究进展 [J]. *干旱区地理*, 2022, 45(1): 1–8.
- Chen Y N, Li Z, Fang G H. Changes in key hydrological elements and research progress on water cycle in the Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(1): 1–8.
- [30] Primicia I, Camarero J J, Janda P, et al. Age, competition, disturbance and elevation effects on tree and stand growth response of primary *Picea abies* forest to climate [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 354: 77–86.
- [31] Prendin A L, Mayr S, Beikircher B, et al. Xylem anatomical adjustments prioritize hydraulic efficiency over safety as Norway spruce trees grow taller [J]. *Tree Physiology*, 2018, 38(8): 1088–1097.
- [32] Li S, Wang J, Lu S, et al. Trade-off between hydraulic safety and efficiency in plant xylem and its influencing factors [J]. *Forests*,

- 2023, 14(9): 1817.
- [33] Wu G, Xu G, Chen T, et al. Age-dependent tree-ring growth responses of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) to climate: a case study in the Tianshan Mountain, China [J]. *Dendrochronologia*, 2013, 31(4): 318–326.
- [34] Ye Y, Liu Y, Ren M, et al. Responses of tree growth and intrinsic water use efficiency to climate factors and human activities in Xinjiang, China [J]. *Forests*, 2023, 14(9): 1873.
- [35] Wu G, Liu X, Chen T, et al. Elevation-dependent variations of tree growth and intrinsic water-use efficiency in Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) in the western Tianshan Mountains, China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 309.
- [36] Pernicová N, Urban O, Čáslavský J, et al. Impacts of elevated CO₂ levels and temperature on photosynthesis and stomatal closure along an altitudinal gradient [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 921: 171173.
- [37] 杨世纪, 白雨诗, 王冬梅, 等. 六盘山不同坡向华北落叶松林分蒸腾对环境因子的响应 [J]. *林业科学*, 2025, 61(3): 108–120.
Yang S J, Bai Y S, Wang D M, et al. Transpiration of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations on different slope aspects in Liupan Mountains in response of environmental factors [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2025, 61(3): 108–120.
- [38] 高青青, 于小萌, 许竹锐, 等. 坡向对冀北山地蒙古栎幼树生长及生物量分配的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(12): 49–58.
Gao Q Q, Yu X M, Xu Z R, et al. Effects of slope aspect on growth and biomass allocation of *Quercus mongolica* saplings in the mountains area of northern Hebei Province, northern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(12): 49–58.
- [39] Wang M, Wang Y, Liu X, et al. Vapor pressure deficit dominates vegetation productivity during compound drought and heatwave events in China's arid and semi-arid regions: evidence from multiple vegetation parameters [J]. *Ecological Informatics*, 2025, 88: 103144.
- [40] Huang C, Huang J, Xiao J, et al. Global convergence in terrestrial gross primary production response to atmospheric vapor pressure deficit [J]. *Science China Life Sciences*, 2024, 67(9): 2016–2025.
- [41] Novick K A, Ficklin D L, Stoy P C, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1023–1027.

(责任编辑 赵田芸
责任编委 臧润国)