北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

哈萨克斯坦东部西伯利亚落叶松冠层与茎干干旱韧性的影响因素

何志浩 张同文 靳春寒 郭凯龙 郭冬 BagilaMaisupova AinurUtebekova AndreyKalachev TalgatAbzhanov SagynbekDaniyar Amangeldiuly

Factors influencing drought resilience in the canopy and stem of *Larix sibirica* in eastern Kazakhstan

He Zhihao, Zhang Tongwen, Jin Chunhan, Guo Kailong, Guo Dong, Bagila Maisupova, Ainur Utebekova, Andrey Kalachev, Talgat Abzhanov, Sagynbek Daniyar Amangeldiuly

引用本文:
何志浩, 张同文, 靳春寒, 郭凯龙, 郭冬, BagilaMaisupova, AinurUtebekova, AndreyKalachev, TalgatAbzhanov, SagynbekDaniyar Amangeldiuly. 哈萨克斯坦东部西伯利亚落叶松冠层与茎干干旱韧性的影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(7):36–47. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260037
He Zhihao, Zhang Tongwen, Jin Chunhan, Guo Kailong, Guo Dong, Bagila Maisupova, Ainur Utebekova, Andrey Kalachev, Talgat Abzhanov, Sagynbek Daniyar Amangeldiuly. Factors influencing drought resilience in the canopy and stem of *Larix sibirica* in eastern Kazakhstan[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7):36–47. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260037

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260037

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

竞争对红松树木的干旱适应性及生长衰退影响

Effects of competition on drought adaptability and growth decline of *Pinus koraiensis* trees

北京林业大学学报, 2022, 44(6): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210198

黑龙江省东部山区西伯利亚红松种源引种试验初步评价

Preliminary evaluation on the introduction test of *Pinus siberia* provenance in the eastern mountainous area of Heilongjiang Province of northeastern China

北京林业大学学报, 2023, 45(1): 70–77. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210282

不同病斑等级的西伯利亚红松针叶内生真菌多样性和菌群结构

Diversity and community structure of endophytic fungi in *Pinus sibirica* needles with different lesion grades

北京林业大学学报, 2024, 46(11): 24–33. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230299

中国、俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦跨境区典型物种栖息地变化

Habitat changes of typical species in the transboundary area between China, Russia, Mongolia and Kazakhstan

北京林业大学学报, 2023, 45(1): 109–120. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210306

管道模型和树木年轮水分输导模式的理论及在落叶松生产力估测中的应用

Application of pipe model and the theory of water transportation pattern through tree rings in larch productivity estimation

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 18–26. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200117

赛罕乌拉自然保护区西伯利亚狍的家域动态分析

Dynamic analysis of *Capreolus pygargus* home range in Saihanwula Nature Reserve, Inner Mongolia of northern China

北京林业大学学报, 2021, 43(12): 73–82. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200369

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260037

哈萨克斯坦东部西伯利亚落叶松冠层与茎干干旱韧性的影响因素

何志浩[1,2] 张同文[2] 靳春寒[1] 郭凯龙[2] 郭 冬[2] Bagila Maisupova[3]
Ainur Utebekova[4] Andrey Kalachev[5] Talgat Abzhanov[3]
Sagynbek Daniyar Amangeldiuly[4]

（1. 新疆大学地理与遥感科学学院，新疆 乌鲁木齐 830046；2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室/新疆树木年轮生态重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830002；3. 哈萨克斯坦赛福林农业技术大学，阿斯塔纳 010011；4. 哈萨克斯坦国立农业研究大学，阿拉木图 050010；5. 哈萨克斯坦林业与农林研究院阿尔泰分院，东哈萨克斯坦 里德尔 071302）

摘要:【目的】比较西伯利亚落叶松冠层与茎干的干旱适应能力，量化其韧性指标并分析主要影响因素。**【方法】**在哈萨克斯坦东部斋桑区 2 个不同海拔区域采集树轮宽度样本，建立年表并分析树木径向生长与气候的关系；结合生长和气候异常识别干旱事件，分别计算树轮宽度指数和归一化植被指数的 3 类韧性指标：抵抗力、恢复力和恢复弹力，并利用广义线性模型方法分析冠层韧性与地形、土壤及冠层结构的关系，探究环境因素如何塑造森林的干旱韧性。**【结果】**(1)高温和干旱是限制生长的主要因素，树轮宽度指数随干旱加剧而整体下降，生长同步性也有所增强。在湿润条件下树木径向生长整体高于平均水平，并且相较于干旱条件，个体间的生长差异明显增大。(2)干旱显著影响了树木的韧性，随着干旱强度增加，西伯利亚落叶松茎干表现出的抵抗力、恢复力和恢复弹力整体减弱。(3)海拔是影响茎干韧性的重要环境梯度，高海拔树木在较凉爽环境的缓冲下，干旱期间的抵抗力较高，并且干旱后恢复力和恢复弹力的表现都高于低海拔树木。土壤容重、冠层高度和海拔分别是冠层抵抗力、恢复力和恢复弹力的主要影响因素。更高的土壤容重削弱了冠层对干旱的抵抗力，但增强了部分区域的恢复力；高大的树木抵抗力较高，但恢复速度较慢；海拔可以解释 55.45% 的恢复弹力变化，随着海拔的升高，恢复弹力迅速提高，当海拔超过 2 044 m 时，冠层能够得到完全恢复；而热量的增加不利于干旱期间维持生长，但有利于干旱后恢复。树木茎干对干旱的敏感性高于冠层，两者韧性差异明显。**【结论】**树木对干旱的响应受环境条件显著影响，地形、土壤和林分结构在很大程度上塑造了森林韧性。长期冠层观测可有效监测植被生长状态。气候变化的背景下，未来干旱事件的发生频率和强度都可能有所增加，低海拔树木的韧性较低提示未来干旱可能导致森林衰退及物种组成变化的风险。

关键词：韧性；树木年轮；NDVI；干旱；西伯利亚落叶松

中图分类号：S718.51+2；S791.229 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)07−0036−12

引文格式：何志浩，张同文，靳春寒，等. 哈萨克斯坦东部西伯利亚落叶松冠层与茎干干旱韧性的影响因素［J］. 北京林业大学学报，2026，48(7)：36−47. He Zhihao, Zhang Tongwen, Jin Chunhan, et al. Factors influencing drought resilience in the canopy and stem of *Larix sibirica* in eastern Kazakhstan［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7): 36−47.

Factors influencing drought resilience in the canopy and stem of *Larix sibirica* in eastern Kazakhstan

He Zhihao[1,2] Zhang Tongwen[2] Jin Chunhan[1] Guo Kailong[2] Guo Dong[2] Bagila Maisupova[3]
Ainur Utebekova[4] Andrey Kalachev[5] Talgat Abzhanov[3] Sagynbek Daniyar Amangeldiuly[4]

收稿日期: 2026−01−21 **修回日期:** 2026−04−01

基金项目: 新疆维吾尔自治区青年拔尖人才项目（2023TSYCCX0076），重点实验室建设—新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题（2025D04018），中国气象科学研究院科技发展基金项目（2021KJ034），新疆维吾尔自治区天山创新团队项目（2025D14004）。

第一作者: 何志浩。主要研究方向：树木年轮气候学。Email: hezhihao@stu.xju.edu.cn 地址：830002 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市天山区东大梁西街 261 号中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室。

责任作者: 张同文，研究员，博士生导师。主要研究方向：树木年轮气候学和树木年轮水文学。Email: zhangtw@idm.cn 地址：同上。

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

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China;
2. Key Laboratory of Tree-Ring Physical and Chemical Research (CMA)/Xinjiang Key Laboratory of Tree-Ring Ecology, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China;
3. Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullin, Astana 010011, Kazakhstan;
4. Kazakh National Agrarian Research University, Almaty 050010, Kazakhstan;
5. Altai Branch of the Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry named after A. N. Bukeikhan, Ridder 071302, East Kazakhstan region, Kazakhstan)

Abstract:［**Objective**］To compare the drought adaptive capacity of the canopy and stem of Larix sibirica, to quantify their resilience indices, and to analyze the main driving factors influencing their drought resilience.［**Method**］Tree-ring width samples were collected from two elevation zones in Zaysan District, East Kazakhstan Region, to develop chronologies and to analyze the relationships between radial growth and climate. Drought events were identified by combining growth anomalies with climatic anomalies. Three drought resilience components: resistance, recovery, and resilience, were calculated separately for the tree-ring width index and the Normalized Difference Vegetation Index. Generalized linear models were then used to examine the relationships of canopy resilience with topography, soil properties, and canopy structure, in order to explore how environmental factors shape forest drought resilience.［**Result**］(1) High temperature and drought were the main factors limiting growth. The tree-ring width index declined overall with increasing drought intensity, and growth synchrony also increased. Under wet conditions, radial growth remained above the mean level, and inter-individual variability in growth was markedly greater compared to drought conditions. (2) Drought significantly affected tree resilience. As drought intensity increased, the resistance, recovery, and resilience of the stems of *Larix sibirica* all declined overall. (3) Elevation was an important environmental gradient influencing stem resilience. Buffered by cooler conditions, high-elevation trees showed higher resistance during drought and greater recovery and resilience after drought than low-elevation trees. Soil bulk density, canopy height, and elevation were the major factors influencing canopy resistance, recovery, and resilience, respectively. Higher soil bulk density weakened canopy resistance to drought but enhanced recovery in some areas. Taller trees showed higher resistance but recovered more slowly after drought. Elevation explained 55.45% of the variation in canopy resilience; resilience increased rapidly with elevation, and when elevation exceeded 2 044 m, the canopy was able to recover fully. Greater heat accumulation was unfavorable for maintaining growth during drought but beneficial for post-drought recovery. Stems were more sensitive to drought than canopies, resulting in pronounced differences in resilience between the two.［**Conclusion**］Tree responses to drought were significantly influenced by environmental conditions, with forest resilience being largely shaped by topography, soil properties, and stand structure. Long-term canopy observations can effectively track vegetation growth status. Under climate change, both the frequency and intensity of future drought events are likely to increase, and the lower resilience of low-elevation trees suggests that future droughts may pose risks of forest decline and shifts in species composition.

Key words: resilience; tree ring; NDVI; drought; *Larix sibirica*

全球气候变化增加了干旱频率和强度[1]，高纬度区域对升温尤为敏感[2]，水分限制更加突出，这可能导致森林大面积衰退甚至死亡[3]。在干旱区山地森林中，干旱是树木生长的主要限制因素，发生在生长季节的干旱会导致生长显著下降[4]，且随干旱强度的增加，树木径向生长受到进一步抑制[5]。当累积的干旱影响超过一定的阈值时，树木将难以恢复到干旱前的生长水平，最终导致衰退甚至死亡[3,6]。然而，树木对干旱的生理响应存在多种模式。理解森林对干旱的反应，需要阐明树木大小、微环境和物种性状[7]如何影响个体层面的耐旱能力，这些因素共同决定了干旱对树木生长、死亡、森林群落和生态系统过程的影响[8]。

森林对干旱的响应十分复杂，同一次干旱事件

对不同生境中的树木影响各异。生态韧性通过比较干旱前后以及干旱期间的生长水平，量化树木抵抗干扰以及受干扰后恢复到正常状态的能力[6]。在山地生态系统中，海拔会改变温度与水分供给格局，局部地形和土壤条件会改变树木在干旱期间所承受的水分胁迫强度以及干旱后的恢复环境，从而调节生长季的长度与树木生长水平[9]，进一步影响树木对干旱的抵抗力(resistance，R_t)、恢复力(recovery，R_c)和恢复弹力(resilience，R_s)。已有研究表明，低海拔生态系统通常对干旱敏感[10]，其对干旱的抵抗力也相对较低。除海拔外，坡向引起的辐射差异会改变树木干旱期间的水分亏缺程度，进而影响其抵抗力表现[11]。坡度则通过影响土壤蓄水与径流过程，改变干旱后的恢复条件，从而影响树木的恢复力[12]。此外，树木对干旱的适应能力不仅受气候影响，林内竞争也会削弱个体在干旱期间的资源获取能力，降低树木的抵抗力并改变恢复过程[13]。在群落层面，干旱的作用可能更为复杂，物种间的相互作用可能减弱或加剧干旱的影响[14]。例如，密集的冠层结构可遮挡太阳辐射，减少水分蒸腾[15]。树木不同组织部位对干旱的响应存在差异：反映茎干径向生长的树轮宽度指数(ring width index，RWI)主要记录木质部生长过程，而归一化植被指数(normalized difference vegetation index，NDVI)则表征冠层绿度动态，两者对应的生态过程和时间尺度不同。有研究表明，树轮数据包含的气候信息较 NDVI 更为丰富[16]，能较敏感地捕捉干旱对径向生长的影响[17]。因此，树轮数据在反映生态韧性方面可能更为可靠。然而，树轮数据依赖野外取芯与实验处理，成本与时间投入较高[18]。相比之下，卫星遥感能够提供连续和长期的冠层信息，为区域尺度韧性监测提供重要支撑。因此，结合树木径向生长和冠层绿度数据，是评估森林衰退时间和严重程度的有效方法。

尽管森林对干旱的适应能力已经得到广泛关注[6]，但在对气候变化敏感的中亚哈萨克斯坦地区，针对山地森林树木不同部位的韧性评估的研究较少。已有研究选取干旱事件时往往仅依据气候异常，较少将树木生长异常与气候异常同时纳入考量。此外，生态韧性虽在树轮研究中应用较多，但利用韧性指数表征冠层生产力干旱响应的研究仍有限，尤其在中亚干旱区森林，冠层韧性如何随局地环境因子变化尚不明确。因此，有必要将冠层与茎干同时纳入到森林韧性研究，利用遥感与树木年轮气候学方法，回答环境与林分结构如何改变森林对干旱的韧性。研究结果有助于深入理解不同环境下森林的干旱应对策略，并为森林保护提供科学参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于哈萨克斯坦共和国东哈萨克斯坦州斋桑区的原始森林(47°20′20″N，85°31′22″E)，该区域多为山地地形，海拔在 1 200 ~ 2 400 m 之间。该区域为典型大陆性气候，年均降水量为 267 mm(1901—2023 年)，主要集中在夏季，月均降水量最多达到 50 mm，最热月(7 月)月均最高温 22 ℃，最冷月(1 月)月均最低温−22 ℃(图 1)。西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)为该区域优势树种，年轮界限清晰、寿命长，径向生长对温度与水分变化高度敏感，广泛用于树木年轮气候学研究。

1.2 树轮数据和遥感数据集

依据树木年代学基本原理，我们在东哈萨克斯坦州斋桑区的原始森林不同海拔地区采集了 2 个样点的树轮数据(ZSL，1 850 m；ZSD，1 456 m)。每个样点采集至少 20 棵树，每棵树至少 2 根样芯，以确保样本数量足够且具有较强的序列间相关性。样本经过风干、固定和打磨后，使用 LINTAB 6.0 年轮宽度分析仪测量年轮宽度，测量精度为 0.001 mm。利用 COFECHA 程序验证了交叉定年的准确性，使用 ARSTAN 程序对树轮宽度序列进行去趋势和标准化处理，以消除树龄增长和树干直径增加引起的非气

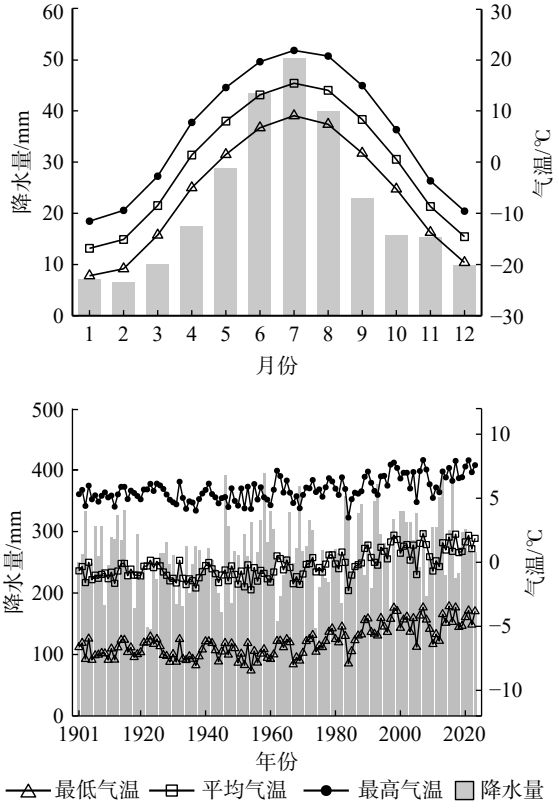


图 1 采样点气象资料和气象变化(1901—2023)

Fig. 1 Meteorological data and changes of sampling sites (1901−2023)

候趋势，采用的去趋势方法为负指数曲线，以实测树轮宽度值与拟合趋势值之比计算标准树轮宽度指数，随后采用双权重稳健均值法合成为标准化年表（standard chronology，std），作为分析数据。最后，使用平均敏感度（mean sensitivity，MS）、信噪比（signal-to-noise ratio，SNR）和群体信号（expressed population signal，EPS）等指标描述年表序列的统计特征（表 1）。

本研究中使用的气候数据来源于 CRU TS 4.08 格点气候数据集（http://climexp.knmi.nl），空间分辨率为 0.5°，从中提取了 1901—2023 年的月平均气温（T_{mean}）、月最高温度（T_{max}）、月最低温度（T_{min}）、月降水量（Pre）和自校准帕尔默干旱指数（self-calibrated palmer drought severity index，scPDSI）。数字高程模型（digital elevation model，DEM）数据使用了 2019 年的 Aster GDEM V3 数据集，数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn），分辨率为 30 m，通过 DEM 计算得到了热负荷指数用于后续的分析，该指数同时考虑了地形和日照时数的综合影响，取值范围为 0~1，数值越大表示潜在受热越强。NDVI 数据来自基于 Landsat 卫星影像计算的 32 d 合成 NDVI 数据产品，并在 Google Earth Engine 平台上完成处理。此外，根据 2020 年的 GLC_FCS30_2020 土地覆盖产品掩膜，剔除了裸地、城市、水体、冰雪等非森林土地利用类型。森林冠层高度数据采用 Lang 等[19]发布的 2020 年全球 10 m 分辨率冠层高度产品。土壤容重数据来自 SoilGrids250m v2.0，通过厚度加权平均值来获取 0 ~ 30 cm 的土壤特性。为保证数据源的空间一致性，所有数据被统一重采样至 30 m 分辨率。

表 1　标准年表特征

Tab. 1　Characteristics of standard chronology

项目	ZSL	ZSD
纬度	47°20′03.51″N	47°21′38.73″N
经度	85°31′35.84″E	85°31′08.22″E
海拔/m	1 850	1 456
坡度/(°)	25	35
坡向	西北	东北
样本量（树/样芯）	23/49	22/46
时间段	1778—2023	1762—2024
一阶自相关（AC1）	0.651	0.517
平均敏感度（MS）	0.245	0.310
标准差（SD）	0.346	0.368
信噪比（SNR）	36.335	45.886
总体代表性（EPS）	0.973	0.979

注：ZSL、ZSD为样点编号。

1.3　利用 NDVI 和树轮检测树木生长的异常

指示年是植被群体存在生长异常的年份，可通过 pointRes 包识别。此包主要用于树木年轮生态学研究，也可用于其他生态时间序列分析。为了研究树木冠层对干旱的响应，我们提取了 2000—2024 年 Landsat 30 m 分辨率的 5—8 月生长季 NDVI 均值。以每个像元为中心，提取其邻域 9 个像元作为一个局地植被群体，筛选出存在负向指示年的像素。通过将该方法应用于 NDVI 序列，获得空间上连续的植被生长异常数据。以上一年 10 月到当年 9 月的 scPDSI 平均值解释生长异常，这一时间范围代表了植物生长典型的水文年[20]。持续多年的干旱被视为一个干旱事件，干旱期间的 RWI 被平均。为分析不同干旱强度对树木生长异常的影响，参考《气象干旱等级》（GB/T 20481—2017）标准，将 scPDSI 值划分为不同干旱强度等级（表 2）。最终筛选出两个采样点同时出现生长异常与干旱事件的年份进行后续分析。

表 2　帕默尔干旱指数干旱等级划分

Tab. 2　Classification of drought intensity based on scPDSI values

scPDSI范围	干旱强度
−1 < scPDSI	无旱
−2 < scPDSI ≤ −1	轻旱
−3 < scPDSI ≤ −2	中旱
−4 < scPDSI ≤ −3	重旱

1.4　量化树木生长对干旱事件的响应

为评估树木生长对干旱事件的响应，使用 Lloret 等[6]提出的树木韧性的 3 个组成部分量化树木生长面对干旱的韧性，这些指数基于干旱事件前、中、后的生长差异，将对干旱的韧性分解为 3 个组成部分：抵抗力、恢复力和恢复弹力。其中，抵抗力表示树木在干旱期间维持生长的能力；恢复力表示树木在干旱结束后恢复生长的速度；恢复弹力表示树木在干旱后生长恢复至干旱前水平的程度。当 R_s < 1 时，表明树木在干旱后的一段时间内无法恢复到干旱前的生长水平。对于 NDVI 数据，以两个树轮采样点为中心，提取其附近 3 km 范围内的像元进行分析，并对每个像元分别计算 R_t、R_c 和 R_s 3 个韧性指标。

$$R_t = \frac{G_d}{G_{pre}} \tag{1}$$

$$R_c = \frac{G_{post}}{G_d} \tag{2}$$

$$R_s = \frac{G_{post}}{G_{pre}} \tag{3}$$

式中：R_t 为抵抗力，反映树木在干旱期间维持生长的能力，$R_t = 1$ 表示干旱期间的生长与干旱前相当，$R_t < 1$ 表示受到干旱影响，生长低于干旱前水平，$R_t > 1$ 表示生长高于干旱前水平；R_c 为恢复力，反映干旱后生长相对于干旱期间的回升程度，$R_c = 1$ 表示干旱后生长与干旱期间相当，$R_c > 1$ 和 $R_c < 1$ 分别表示干旱后生长有所恢复和进一步下降；R_s 为恢复弹力，反映树木干旱后生长恢复至干旱前水平的程度，$R_s = 1$ 表示干旱后生长完全恢复至干旱前水平，$R_s > 1$ 和 $R_s < 1$ 分别表示干旱后生长超过和未恢复至干旱前水平；G_d 表示干旱事件发生时的平均树轮宽度；G_{pre} 和 G_{post} 分别表示干旱事件发生前 4 年和后 4 年的平均 RWI。

1.5 影响树木韧性的因素

为分析树木径向生长对干旱强度的响应，以每个 scPDSI 等级的平均 RWI 为因变量，以相应等级的 scPDSI 值为自变量，使用 R 包 mgcv 拟合广义加性模型（generalized additive model，GAM）。为检验不同海拔和不同干旱强度之间树木茎干抵抗力、恢复力和恢复弹力的差异，在两组比较时使用 t 检验，在多组比较时使用最小显著差异检验进行多重比较。针对 NDVI 数据，为探究植被冠层对干旱的响应策略，采用广义线性模型（generalized linear model，GLM），以海拔、土壤容重、热负荷指数和冠层高度作为预测变量，分析冠层韧性指标沿环境梯度的变化特征，并识别对冠层干旱响应解释能力较强的关键因子。在变量筛选过程中，对解释变量之间的潜在多重共线性进行了检验，并剔除了共线性超过 0.9 的变量。所有分析均在 R 软件版本 4.4.3 中完成。

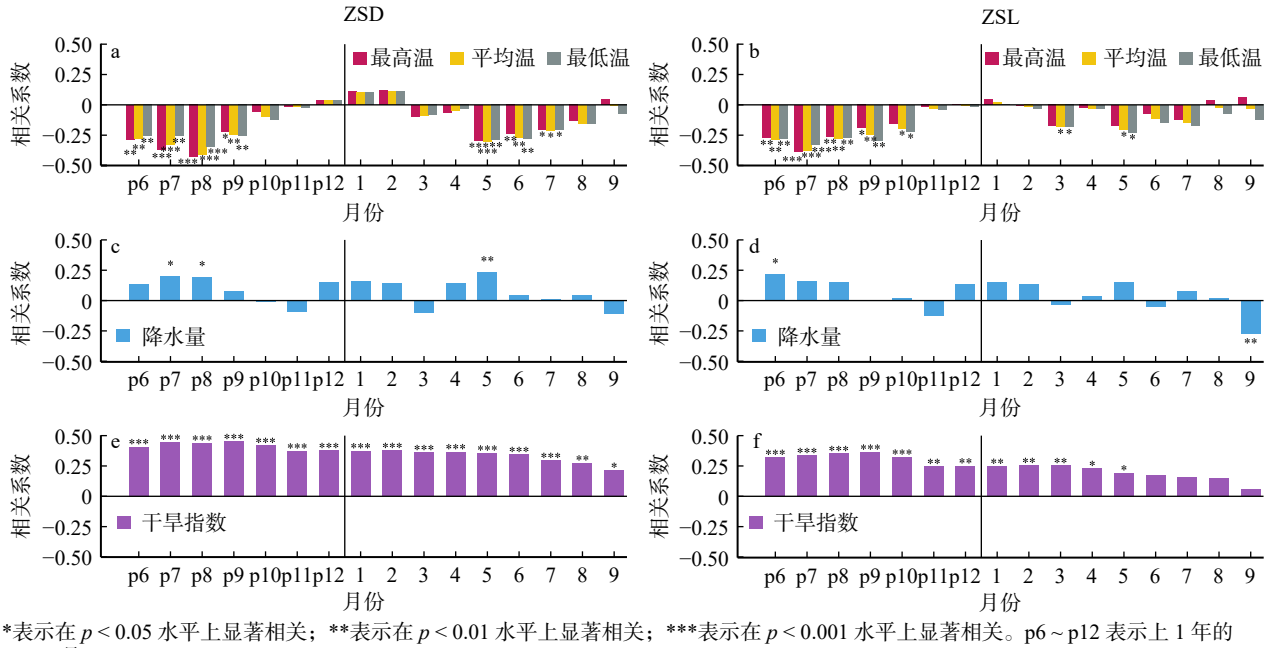
2 结果与分析

2.1 树木径向生长对气候因子的响应

两个样点的 RWI 与温度整体呈负相关，而与自校准帕默尔干旱指数呈显著正相关（图 2）。上一年和当年生长季前期温度升高对当年径向生长具有抑制作用，其中最高温度的负向影响尤为明显。上一年干旱状况对当年年轮形成具有显著影响，其影响从前一年夏季到当年生长季前期，并随时间推移逐渐减弱。相比之下，降水对径向生长的影响相对较弱，但总体上对树木生长具有促进作用。与降水和温度相比，scPDSI 与 RWI 的相关性普遍更强。

不同海拔样点的气候响应强度存在差异。在低海拔样点，径向生长受到温暖和干燥条件的强烈胁迫，对温度的负响应在前一年夏秋季和当前生长季初期尤为明显，而树木径向生长与 scPDSI 的正相关出现在更宽的时间范围内（图 2a ~ c）。高海拔样点表现出相似的响应模式，但相关强度和持续时间均有所减弱，表明较高海拔条件可能在一定程度上缓解干旱胁迫对径向生长的限制作用（图 2d ~ f）。

滞后检验进一步表明，干旱对树木径向生长存在明显的延迟影响。高海拔样点的 RWI 与 scPDSI 在滞后 0 ~ 1 年时呈显著正相关，并以滞后 1 年时相关性最强（$r = 0.32$，$p < 0.001$）。相比之下，低海拔样点的相关性更强且持续时间更长，在滞后 0 ~ 2 年均



*表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关；**表示在 $p < 0.01$ 水平上显著相关；***表示在 $p < 0.001$ 水平上显著相关。p6 ~ p12 表示上 1 年的 6—12 月。

图 2 树轮宽度年表与气候因子的相关性

Fig. 2 Correlations between the tree-ring width chronology and climatic factors

表现为显著正相关，并同样在滞后 1 年达到峰值（r = 0.44，p < 0.001）。整体上，干旱影响主要集中在干旱后的 1～2 年，其中低海拔样点的滞后效应更为明显。

根据干旱的强度和负指示年检验结果，共识别出 7 个与干旱事件相对应的生长异常年份（图 3），这些年份的径向生长下降可能主要受到干旱影响。其中，1917 年和 1927 年由于干旱持续时间较长，被归为同一个干旱事件。NDVI 负指示年检验结果显示，2003 年、2008 年、2012 年和 2014 年冠层 NDVI 出现明显下降。为与树轮研究结果相对应，本研究选取 2008 年 NDVI 作为冠层韧性分析对象，进一步比较冠层与茎干对干旱响应方向的一致性。

2.2　树木径向生长对干旱的响应

干旱等级和 RWI 的关系显示，在研究区内，湿润气候条件有利于西伯利亚落叶松径向生长。在水分充足的情况下（scPDSI > 0.5），树木生长整体高于平均水平（图 4），平均的 RWI 约为 1.13。相比之下，在干旱年份（scPDSI < −0.5），RWI 随干旱程度加剧而持续下降，且这一趋势在多数树木个体中均可观察到。

不同海拔样点在不同水分条件下表现出差异。当干旱程度较强时（scPDSI ≤ −2），低海拔样点的 RWI 平均值和中位数明显低于高海拔样点，说明低海拔树木在较强干旱胁迫下生长受抑制程度更高。而在湿润条件下（scPDSI > 0.5），这一格局发生反转，低海拔样点的 RWI 整体高于高海拔样点，表明低海拔地区在水分充足年份可能具有更高的生长潜力。从离散程度看，两个样点在干旱等级下的 RWI 分布相对集中，而在湿润等级下离散度明显增大。尤其当 scPDSI > 2 时，两个海拔样点的 RWI 波动范围均明显增大，说明湿润条件下个体生长差异更加显著。

2.3　不同环境树木对干旱事件的响应差异

两个海拔高度的西伯利亚落叶松茎干部分对干旱的适应能力存在显著差异（图 5）。总体来看，高海拔树木表现出更强的抗旱能力，并且在干旱后的恢复过程中表现较好。随着干旱强度增加，抵抗力、恢复力和恢复弹力整体呈下降趋势。尤其当干旱强度较大时，恢复弹力普遍小于 1，说明树木径向生长难以恢复到干旱前水平。具体来看，在轻旱和中旱条件下，高海拔树木的抵抗力显著高于低海拔树木；但在较强干旱条件下，不同海拔样点之间的抵抗力差异不显著。低海拔树木在中旱条件下抵抗力最低，表明其在中等强度干旱下已表现出较强的生长受限特征。无论在高海拔还是低海拔，恢复力均随着干旱强度增加显著下降。中旱和重旱条件下，高海拔树木的恢复力略高于低海拔树木，说明高海拔环境可能有助于树木在干旱后维持较好的恢复能力。恢复弹力同样表现出明显的海拔差异。高海拔树木的

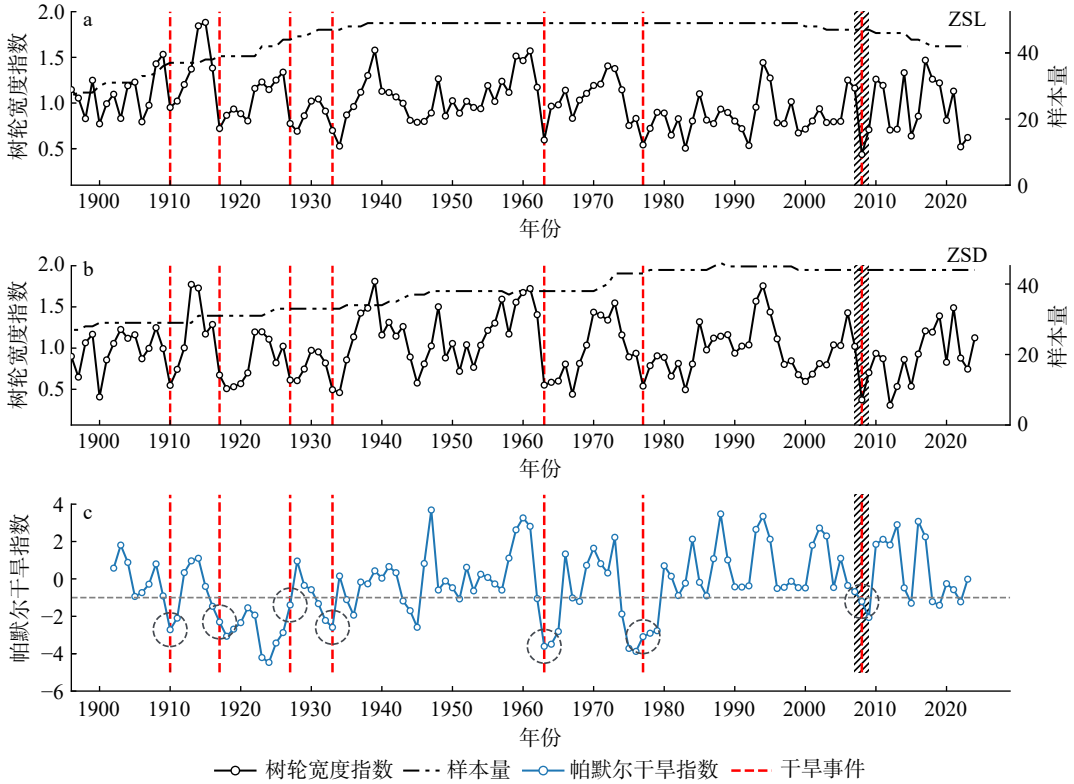
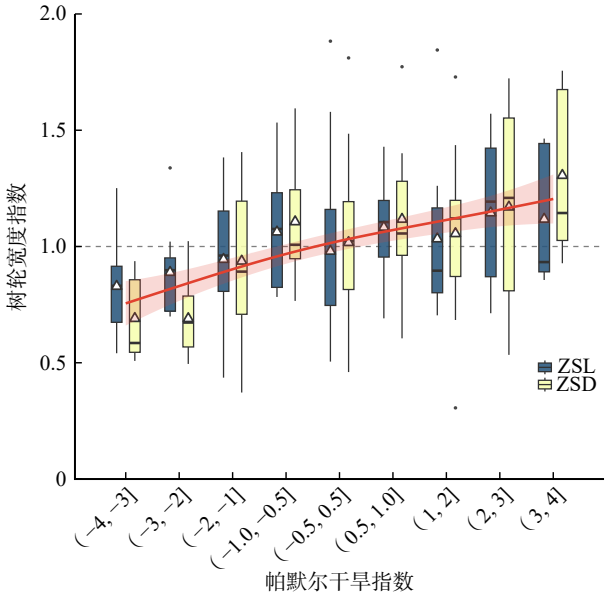


图 3　标准化树轮宽度年表和 scPDSI（1901—2023 年）

Fig. 3　Standardized tree-ring width chronology and scPDSI (1901–2023)



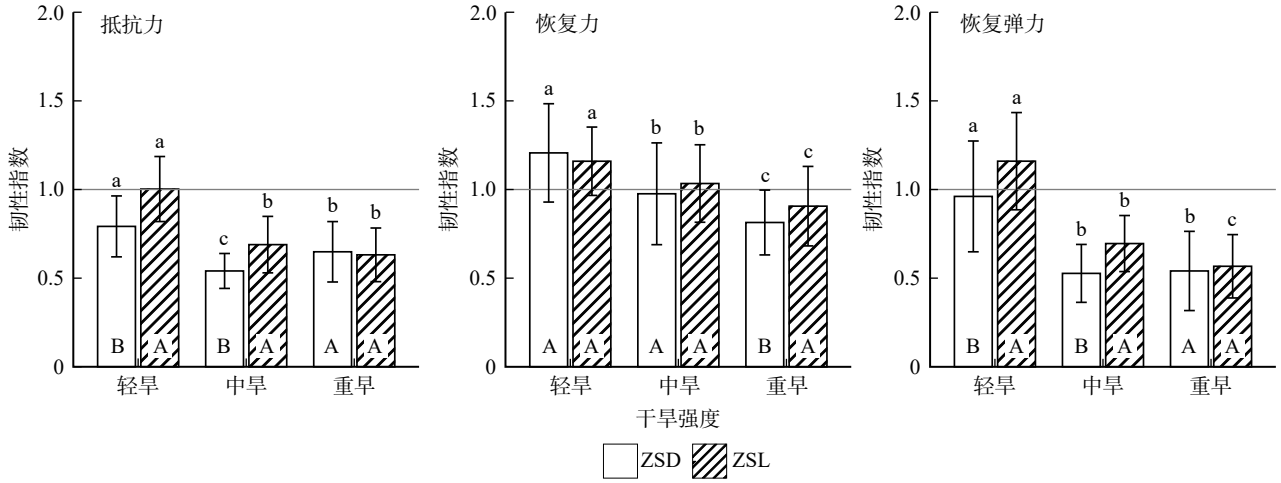
三角形符号表示 RWI 的平均值；红色曲线及其阴影区域分别表示 GAM 模型得到的 RWI 与 scPDSI 关系的最佳拟合结果及其 95% 置信区间。

图 4 不同海拔树木径向生长与干旱强度变化

Fig. 4 Tree radial growth variation with drought intensity across different elevations

恢复弹力随干旱严重程度增加而显著降低，而低海拔树木在中旱和重旱条件下的恢复弹力差异不显著。除轻旱条件下的高海拔树木外，其余情况下两个海拔样点的树木的恢复弹力均小于 1，表明大多数干旱事件后树木径向生长完全恢复到干旱前水平。总体而言，高海拔树木在各类干旱强度下的恢复弹力均高于低海拔树木。

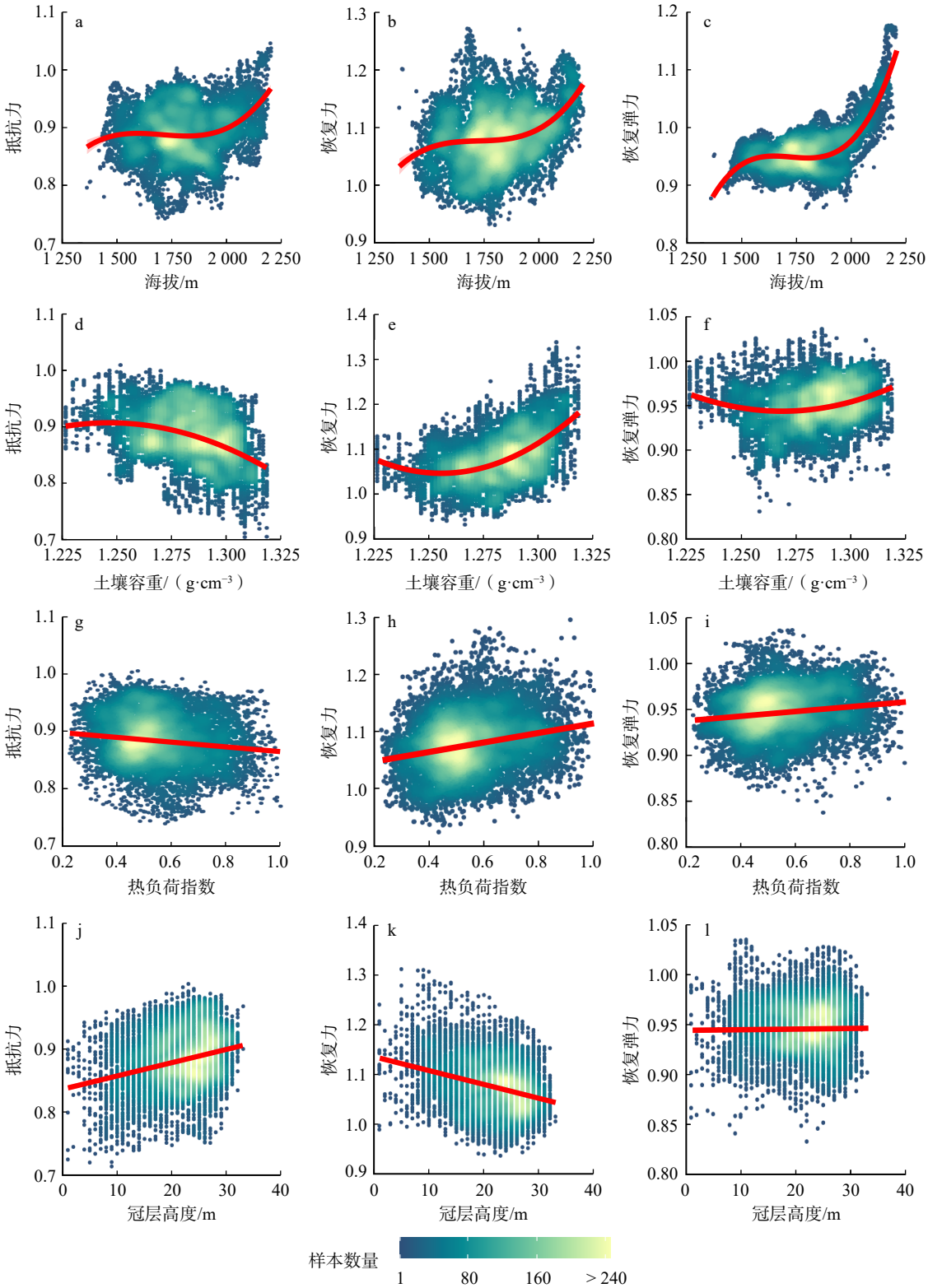
GLM 的整体拟合效果较好，表明模型能够解释一定程度的韧性变化，抵抗力、恢复力和恢复弹力参数模型的 R^2 分别为 35.16%（RMSE ≈ 0.045、MAE ≈ 0.037、$p < 0.001$）、41.9%（RMSE ≈ 0.051、MAE ≈ 0.041、$p < 0.001$）和 57.84%（RMSE ≈ 0.026、MAE ≈ 0.021、$p < 0.001$）。在冠层抵抗力方面，土壤容重的解释能力最强，可解释 26.04% 的变化（图 6d）。在其他因子固定的情况下，随着土壤容重增大，冠层抵抗力逐渐下降，从 0.9 下降到 0.8 左右。海拔可解释 15.61% 的抵抗力变化。在 1 900 m 以下，海拔升高对抵抗力的影响较弱；当海拔持续升高时，抵抗力呈逐渐增加趋势（图 6a）。热负荷指数与抵抗力呈弱负相关，随着热负荷指数增加，抵抗力呈线性下降趋势，热负荷指数每增加 0.1，抵抗力下降约 0.004。冠层高度与抵抗力呈正相关，冠层高度每增加 10 m，抵抗力增加约 0.02。在冠层恢复力方面，冠层高度的解释能力最高，可解释 25.91% 的恢复力变化。冠层高度与恢复呈负相关，冠层高度每增加 10 m，恢复力下降约 0.03。海拔和土壤容重分别解释了 8.15% 和 22.86% 的恢复力变化。其中，恢复力随海拔升高表现出与抵抗力相似的变化模式；而随土壤容重增加，恢复力呈先下降后上升的变化趋势。热负荷指数与恢复力呈弱正相关，说明较高热量条件可能有助于干旱后冠层绿度恢复，但其影响强度相对较小。在冠层恢复弹力方面，海拔的解释能力最强，可解释 55.45% 的变化。相比之下，其他变量对恢复弹力的解释度相对较低，其中冠层高度对恢复弹力的影响不显著（图 6i）。海拔对恢复弹力的影响同样呈非线性特征。恢复弹力在约 1 500 ~ 1 900 m 范围内相对稳定，维持在约 0.95；当海拔进一步升高后，恢复弹力快速增加。模型预测结果显示，当海拔超过约 2 044 m 时，恢复弹力可大于 1，表明干旱后 NDVI 能够完全恢复，甚至可能出现超补偿现象。总体而言，高海拔森林在干旱发生当年更能维持冠层生长



不同的小写字母表示不同干旱强度之间的韧性在统计学上存在显著差异，不同的大写字母表示两个海拔之间的韧性在统计学上存在显著差异（$p < 0.05$）。

图 5 干旱强度对不同海拔高度的树木韧性的影响

Fig. 5 Effects of drought intensity on tree resilience at different elevations



红线是每个变量的拟合响应，部分残差以点的形式显示，点的颜色代表样本数量。

图 6　2008 年干旱事件的 NDVI 韧性统计模型

Fig. 6　Statistical model of NDVI resilience for the 2008 drought event

水平，并在干旱扰动后更易恢复至干扰前状态。

3　讨　　论

3.1　不同海拔树木径向生长对干旱的响应差异

研究结果表明，scPDSI 能够较好地表征研究区西伯利亚落叶松径向生长对水热条件变化的响应。随着干旱加剧，两个海拔样点的 RWI 均呈下降趋势，说明干旱是限制西伯利亚落叶松径向生长的重要环境因素。生长季高温会加剧干旱对树木生长的抑制作用[21]。本研究中，两个海拔样点树木径向生长均

与前一年生长季的温度呈负相关关系(图 2a ~ b),这可能是因为高温导致的高蒸散发率消耗碳水化合物储备[11],从而减少当年或后期的树轮宽度。相比降水,scPDSI 与径向生长之间更强的相关性表明,干旱对西伯利亚落叶松的树木径向生长具有强烈影响。从木质部形成过程看,决定径向生长的细胞增大阶段需要持续水分供应以维持膨压,因此对水分限制更为敏感;而细胞壁加厚阶段更多依赖近期光合产物供给,对水分变化的直接响应相对较弱[22−23]。由于径向生长主要受前者控制,干旱会优先抑制与径向生长直接相关的细胞扩张过程,从而导致树轮宽度下降。

低海拔干燥生境中树木生长对干旱更为敏感,这一现象已有较多研究报道[24]。本研究中,RWI 和干旱等级的关系表明,在较强干旱条件下,低海拔样点的 RWI 明显低于高海拔样点,表明低海拔树木承受了更强的水热胁迫(图 4)。而高海拔样点这种干旱信号明显减弱,相比于高海拔样点,树木对干旱指数的响应在低海拔样点表现出了更长的显著相关窗口以及更高的相关性(图 2e ~ f)。这可能是由于高海拔通常具有较低的温度与蒸散需求,在相同土壤供水背景下更有利于维持形成层活动[25]。值得注意的是,在较湿润条件下,两个海拔样点 RWI 的表现发生反转,低海拔样点整体水平高于高海拔样点。从木质部细胞的分裂和扩张过程看,温度可以控制细胞生产的开始时间,而水势是决定生长结束和细胞总量的必要条件[26],温度和水分共同约束形成层活动。当水分限制减弱,低海拔样点较高温度和较长生长季有利于形成层活动与木质部生产,相比之下,高海拔样点仍然受到更低温度的限制,形成层活动启动较晚,生长较为缓慢。

当树木径向生长主要受到气候的限制时,种群内部往往表现出更强的同步生长[27]。强烈的干旱会使树木生长更强地受同一个主导限制因子约束,压缩树木之间的生长差异,并增强个体之间的共同响应,因此 RWI 都较小且更为集中。而当气候条件较有利时,水分限制减弱时,局地环境特征对生长更重要[27],树木生长更容易受到温度、辐射、虫害、土壤储水能力、微地形以及竞争环境等因素的共同调节。在这种情况下,不同个体的生长同步性降低,RWI 的变化幅度增大,反映出样点内部仍存在较强的微环境差异。

3.2 不同海拔树木茎干的韧性差异

海拔是影响茎干韧性的重要环境梯度,海拔通过重新分配热量和水分条件,改变树木在干旱期间的径向生长下降幅度,以及干旱后的恢复程度,从而塑造不同海拔间的树木茎干韧性差异。相较于低海拔,高海拔地区较凉爽的气候条件能够在一定程度上缓冲干旱胁迫,使树木能够保持稳定的生长速度[28],在干旱发生当年能够维持更高的生产力水平,其抵抗力显著地高于低海拔树木,且在干旱结束后的回升阶段,较适宜的环境也使树木可以更快地恢复生长,表现出更强的恢复力和恢复弹力,这种优势在轻旱与中旱条件下尤为明显。随着干旱强度增加,抵抗力、恢复力和恢复弹力均表现出减少的趋势,表明更强的水分亏缺不仅加剧了当年的生长抑制,也削弱了干旱后的恢复能力。更严重的水分亏缺对树木生长的抑制更强,使树木在干旱期间维持生长的能力下降,从而表现出较低的抵抗力。同时,较强干旱造成的生理损伤更加严重,树木在干旱后需要更长时间恢复到正常状态,因此恢复力和恢复弹力也相应降低。在强干旱情景下,两个海拔树木的恢复弹力均小于 1,树木往往难以恢复至干旱前的生长水平。值得注意的是,海拔差异在轻旱与中旱下较显著,而在重旱下两个海拔的抵抗力和恢复弹力差异不再显著。这表明,当水分胁迫达到一定阈值时,土壤水分供给不足将成为所有区域的主导限制因素,高海拔原有的气候缓冲优势被强烈的水分亏缺所削弱,树木的径向生长更易出现非线性甚至转折式下降,这与已有研究关于树木径向生长对水分胁迫存在一定阈值效应的观点一致[29]。这种严重的水分胁迫使树体水力系统受损,增加木质部水力失效和栓塞风险,使树木在干旱后的恢复阶段需要更长时间重建输水功能与生长过程,进而导致恢复力和恢复弹力进一步降低。最终,不同海拔树木的茎干韧性指标呈现同步下降的趋势。

3.3 树木冠层韧性变化的影响因素

冠层韧性在不同环境梯度上表现出明显差异(图 6)。环境因子通过影响干旱期间冠层功能下降的幅度以及干旱后恢复的程度,塑造了抵抗力、恢复力和恢复弹力的差异。结果表明,不同韧性指标受不同的环境变量主导,土壤容重、冠层高度和海拔分别是抵抗力、恢复力和恢复弹力的重要影响因素。

在海拔梯度上,冠层韧性的变化方向与茎干韧性总体一致。随着海拔升高,森林冠层的抗旱能力与干旱后的恢复能力整体呈增强趋势,其中,恢复弹力对海拔最为敏感,随海拔升高而快速增加,并表现出明显的非线性响应。在本研究区,中低海拔地区(约 1 500 ~ 1 900 m)可能处于能量与水分双重约束的过渡带,温度的缓冲作用较小,但大气干燥度与土壤水分供给仍易形成复合胁迫,使冠层出现更大幅度的功能下降,并限制事件后的恢复。而更高海拔地区

在较低蒸散需求与潜在更稳定的水分补给的共同作用下,更容易在事件后回到干旱前水平,这使高海拔地区树木的恢复弹力表现得更高。根据模型进一步预测,当海拔在 2 044 m 以上时森林可以实现完全恢复($R_s > 1$),这一阈值特征与一项加拿大研究的发现相似[28]。与饱和水汽压差在变暖背景下对森林生长限制日益增强的认识一致[4],年平均温度高和土壤湿度低的区域对干旱表现出更高的敏感性,冠层功能在干旱年份更容易出现较大幅度下降,因此其抵抗力通常较低。同时,热负荷指数与抵抗力呈线性负相关,而与恢复力呈现正相关。更高的热负荷指数代表具有更强的辐射与更高能量可利用度,通常对应南坡和受光照更充足的区域。抵抗力的下降可以理解为更高的辐射和热量条件提高了蒸散需求,这会加剧干旱期间的水分亏缺,从而降低在干旱期间维持生长的能力[30]。而在干旱结束之后,若土壤水分得到补充恢复,较好的能量条件可能提供更长或更有效的生长窗口[21],有利于冠层恢复和叶面积重建[9],表现为恢复力和恢复弹力的轻微提升。

土壤容重对抵抗力与恢复力的贡献突出,尤其是抵抗力的变化。图 6d 显示,随着土壤容重增加,抵抗力的下边界明显下移,说明高土壤容重条件下更容易出现抵抗力较弱的像元。该结果与已有研究一致,即较高土壤容重或土壤压实过程会降低土壤孔隙度和入渗能力,限制根系尤其细根发育[31],削弱植物取水与光合能力,提高植被对干旱的敏感性和脆弱性[32],从而加大冠层功能的下降幅度,压低了抵抗力的下限。相对地,较高土壤容重条件下,虽然恢复力未必会线性升高,但部分像元能够表现出更强的恢复力。干旱后植被冠层的生产力能否回升,很大程度上取决于土壤是否能够迅速补给可利用水支持叶面积重建与光合恢复。土壤压实会改变水分保持曲线与导水曲线,中小孔隙比例上升会提高土壤的保水性[33],从而在干旱解除后提供更稳定的水分背景,在长期恢复中更有利于树木的生长,进一步决定恢复力和恢复弹力的变化。

树木冠层的韧性同样受到林分动态的影响[12]。模型结果显示,冠层高度在模型中与抵抗力呈现正相关,但与恢复力呈负相关,在林分结构上显示出抵抗和恢复的权衡状态[17],这与另一项对河岸林的韧性研究的结果一致[34]。这表明,韧性与群落结构有关,如树木的大小和年龄,较高的树木通常被认为在干旱条件下更易受到影响[35]。然而,本研究的结果中冠层高度对抵抗力的正效应反映了林分结构的积极作用,高大的树木对干旱的抵抗力较强。更高的冠层高度往往对应更成熟的林分结构、更发达的根系,以及较强的竞争优势或微气候缓冲[36],这些特征有助于减轻干旱当年植被绿度的下降幅度,大树在干旱发生时仍能在一定程度上维持冠层功能与生产力,具有更高的抵抗力。同时,高大树木更强的蓄水能力也可以增强对短暂性干旱的抵抗力[37]。但另一方面,高大个体具有更长的水力路径与更高的维持成本[13],对栓塞更加敏感,干旱造成的水力系统损伤修复较慢,因而表现为较低的恢复力。

树轮宽度和 NDVI 的韧性表现差异进一步表明,森林对干旱的结构响应与功能响应并不完全同步,即冠层绿度变化与木质部径向生长变化在响应幅度和恢复过程上可能存在不一致[38]。二者反映的生理过程不一致,具体而言,RWI 反映的是木质部细胞形成和扩张,NDVI 反映的是冠层绿度。木质部形成层的细胞扩大过程更容易受到水分胁迫的抑制[22,39],导致径向生长在干旱期间通常出现更强、更持久的生长下降,恢复过程也需要更长的时间[17],而冠层绿度未必同步呈现同等幅度的衰退[18]。此外,有研究表明,在干旱期间或干旱后,初生生长在碳储备使用上优先于次生生长[17]。树体会优先维持叶、芽等更直接关系存活和功能的部分,而木质部生长和年轮形成更容易被压缩。因此,基于茎干生长表征的抵抗力通常低于基于冠层信号表征的抵抗力。干旱解除后,树木往往能够在较短时间内通过萌发新叶使冠层光谱信号迅速改善[40],但木质部的生长涉及形成层细胞分裂、扩张及细胞壁加厚等过程,受水力系统损伤修复时间与生长季窗口的限制,往往表现出更明显的恢复滞后[41]。结合 NDVI 与 RWI 的韧性指标有助于理解森林的功能恢复与结构恢复,避免高估或低估森林对干旱的长期韧性。

4　结　　论

本文建立了 2 个不同海拔的西伯利亚落叶松树轮宽度年表,研究了干旱对树木不同组织部位韧性的影响,分别以 RWI 和 NDVI 代表树木茎干和冠层生长状况,研究得到以下结论。

(1)干旱是影响该区域西伯利亚落叶松径向生长的主要气候因子。干旱年份 RWI 分布较集中,反映出强干旱作为共同限制因子压缩个体间生长差异,使种群内部表现出更高的生长同步性。湿润年份 RWI 离散度增大,说明水分限制减弱后,径向生长更多受到局地环境因素的调节。

(2)干旱强度是影响树木茎干韧性的主要因素。抵抗力、恢复力和恢复弹力都随着干旱强度的增大而下降。海拔对干旱有调节作用,使高海拔样点树木的抵抗力、恢复力和恢复弹力均显著高于低海拔

样点。

（3）树木冠层韧性受到各种环境因素调节。海拔、土壤容重、热负荷指数和冠层高度均与冠层韧性相关，但不同因子对冠层韧性的影响方向和解释程度存在差异。高海拔地区相对较低的热负荷和水分胁迫有助于冠层功能的恢复，显示出较高的恢复弹力。土壤容重影响树木通过根系获取水分的能力和保水能力，高土壤容重区域冠层抵抗力较低，恢复力较高。较高热量条件加剧干旱期间的水分亏缺，从而降低树木在干旱期间维持生长的能力，但在干旱后提供了更有利的恢复条件。高大树木的冠层对干旱的抵抗力较高，但其较高的生存成本导致恢复力较低。

这些研究结果为未来的森林管理提供了新的思路。但本研究的树木年轮采样点较少，位置相对集中，在后续的研究可以对更广范围海拔和不同立地条件的森林进行研究。

参 考 文 献

[1] Tramblay Y, Koutroulis A, Samaniego L, et al. Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 210: 103348.

[2] 卢爱刚, 庞德谦, 何元庆, 等. 全球升温对中国区域温度纬向梯度的影响 [J]. 地理科学, 2006, 26(3): 345−350.
Lu A G, Pang D Q, He Y Q, et al. Impact of global warming on latitudinal temperature gradients in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(3): 345−350.

[3] Hammond W M, Williams A P, Abatzoglou J T, et al. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests [J]. Nature Communications, 2022, 13: 1761.

[4] Mirabel A, Girardin M P, Metsaranta J, et al. Increasing atmospheric dryness reduces boreal forest tree growth [J]. Nature Communications, 2023, 14: 6901.

[5] Fang O, Zhang Q B. Tree resilience to drought increases in the Tibetan Plateau [J]. Global Change Biology, 2019, 25(1): 245−253.

[6] Lloret F, Keeling E G, Sala A. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests [J]. Oikos, 2011, 120(12): 1909−1920.

[7] 袁超峰, 王文志, 吴喆虹, 等. 健康与衰退樟子松和杨树径向生长响应气候及其生态弹性差异 [J]. 应用生态学报, 2025, 36(2): 411−417.
Yuan C F, Wang W Z, Wu Z H, et al. Differences in radial growth responses to climate and ecological resilience between healthy and declining *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Populus* L [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(2): 411−417.

[8] Brodribb T J, Powers J, Cochard H, et al. Hanging by a thread? Forests and drought [J]. Science, 2020, 368: 261−266.

[9] Barnard D M, Barnard H R, Molotch N P. Topoclimate effects on growing season length and montane conifer growth in complex terrain [J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(6): 064003.

[10] Zhou P, Huang J G, Liang H, et al. Radial growth of *Larix sibirica* was more sensitive to climate at low than high altitudes in the Altai Mountains, China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 304−305: 108392.

[11] van der Maaten E. Climate sensitivity of radial growth in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at different aspects in southwestern Germany [J]. Trees, 2012, 26(3): 777−788.

[12] Urrutia-Jalabert R, Barichivich J, Rozas V, et al. Climate response and drought resilience of *Nothofagus obliqua* secondary forests across a latitudinal gradient in south-central Chile [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 485: 118962.

[13] 阎弘, 孙滢洁, 刘滨辉. 竞争对红松树木的干旱适应性及生长衰退影响 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(6): 1−9.
Yan H, Sun Y J, Liu B H. Effects of competition on drought adaptability and growth decline of *Pinus koraiensis* trees [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(6): 1−9.

[14] Serrano-León H, Blondeel H, Glenz P, et al. Multiyear drought strengthens positive and negative functional diversity effects on tree growth response [J]. Global Change Biology, 2025, 31(9): e70394.

[15] Koelemeijer I A, Severholt I, Ehrlén J, et al. Canopy cover and soil moisture influence forest understory plant responses to experimental summer drought [J]. Global Change Biology, 2024, 30(7): e17424.

[16] Mašek J, Tumajer J, Lange J, et al. Variability in tree-ring width and NDVI responses to climate at a landscape level [J]. Ecosystems, 2023, 26(5): 1144−1157.

[17] Gazol A, Camarero J J, Vicente-Serrano S M, et al. Forest resilience to drought varies across biomes [J]. Global Change Biology, 2018, 24(5): 2143−2158.

[18] Leduc F, Coops N C, Morin-Bernard A, et al. A review of dendrochronology and remote sensing integration for forest growth and disturbance monitoring [J]. Current Forestry Reports, 2025, 11(1): 25.

[19] Lang N, Jetz W, Schindler K, et al. A high-resolution canopy height model of the Earth [J]. Nature Ecology & Evolution, 2023, 7(11): 1778−1789.

[20] Zhang P, Jiao L, Xue R, et al. Differential responses of Pinaceae and Cupressaceae tree radial growth to drought in Central Asia [J]. Dendrochronologia, 2025, 92: 126350.

[21] 孙振静, 赵慧颖, 朱良军, 等. 大兴安岭北部不同降水梯度下兴安落叶松生长对升温的响应差异 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(6): 1−14.
Sun Z J, Zhao H Y, Zhu L J, et al. Differences in response of *Larix gmelinii* growth to rising temperature under different precipitation gradients in northern Daxing'an Mountains of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(6): 1−14.

[22] Zhang Y, Huang J G, Wang M, et al. Soil nitrogen drives inverse acclimation of xylem growth cessation to rising temperature in Northern Hemisphere conifers [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2025,

122(30): e2421834122.

[23] Zhang Y, Huang J G, Wang M, et al. High preseason temperature variability drives convergence of xylem phenology in the Northern Hemisphere conifers [J]. Current Biology, 2024, 34(6): 1161−1167. e3.

[24] Zhang X, Li X, Manzanedo R D, et al. High risk of growth cessation of planted larch under extreme drought [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(1): 014040.

[25] Obojes N, Meurer A, Newesely C, et al. Water stress limits transpiration and growth of European larch up to the lower subalpine belt in an inner-Alpine dry valley [J]. New Phytologist, 2018, 220(2): 460−475.

[26] Cabon A, Peters R L, Fonti P, et al. Temperature and water potential co-limit stem cambial activity along a steep elevational gradient [J]. New Phytologist, 2020, 226(5): 1325−1340.

[27] Tejedor E, Serrano-Notivoli R, de Luis M, et al. A global perspective on the climate-driven growth synchrony of neighbouring trees [J]. Global Ecology and Biogeography, 2020, 29(7): 1114−1125.

[28] Marchand W, Depardieu C, Campbell E M, et al. Long-term temporal divergence in post-drought resilience decline between deciduous and evergreen tree species [J]. Global Change Biology, 2025, 31(7): e70330.

[29] Zhang Y, Wang M, Peñuelas J, et al. Coastal groundwater salinization impairs tree carbon-water balance [J]. Communications Earth & Environment, 2025, 6: 1049.

[30] Kašpar J, Krůček M, Král K. The effects of solar radiation on daily and seasonal stem increment of canopy trees in European temperate old-growth forests [J]. New Phytologist, 2024, 243(2): 662−673.

[31] Strock C F, Lynch J P. Root secondary growth: an unexplored component of soil resource acquisition [J]. Annals of Botany, 2020, 126(2): 205−218.

[32] Cartwright J M, Littlefield C E, Michalak J L, et al. Topographic, soil, and climate drivers of drought sensitivity in forests and shrublands of the Pacific Northwest, USA [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 18486.

[33] Page-Dumroese D S, Jurgensen M F, Tiarks A E, et al. Soil physical property changes at the North American Long-Term Soil Productivity study sites: 1 and 5 years after compaction [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2006, 36(3): 551−564.

[34] Portela A P, Gonçalves J F, Durance I, et al. Riparian forest response to extreme drought is influenced by climatic context and canopy structure [J]. Science of the Total Environment, 2023, 881: 163128.

[35] McGregor I R, Helcoski R, Kunert N, et al. Tree height and leaf drought tolerance traits shape growth responses across droughts in a temperate broadleaf forest [J]. New Phytologist, 2021, 231(2): 601−616.

[36] Greiser C, Hederová L, Vico G, et al. Higher soil moisture increases microclimate temperature buffering in temperate broadleaf forests [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 345: 109828.

[37] Phillips N G, Ryan M G, Bond B J, et al. Reliance on stored water increases with tree size in three species in the Pacific Northwest [J]. Tree Physiology, 2003, 23(4): 237−245.

[38] Dow C, Kim A Y, D'Orangeville L, et al. Warm springs alter timing but not total growth of temperate deciduous trees [J]. Nature, 2022, 608: 552−557.

[39] Wang W, Qin L, Zhang T, et al. Seasonal climate variations drive decoupling between the duration and amount of xylem growth along a hydrothermal gradient in the southern Altai Mountains [J]. Journal of Ecology, 2025, 113(7): 1793−1806.

[40] Dou Y, Tian F, Wigneron J P, et al. Satellite observations indicate slower recovery of woody components compared to upper-canopy and leaves in tropical rainforests after drought [J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5: 725.

[41] Buttò V, Peltier D M P, Rademacher T. From division to 'divergence': to understand wood growth across timescales, we need to (learn to) manipulate it [J]. New Phytologist, 2025, 245(6): 2393−2401.

（责任编辑　范　娟
责任编委　臧润国）