

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.005

论文标题： 黑龙江东部山区气候和邻体竞争对红松径向生长的影响

作　　者： 张豪霞，王露瑶，张文军，等

收稿日期： 2025-08-27

引文格式： 张豪霞,王露瑶,张文军,等.黑龙江东部山区气候和邻体竞争对红松径向生长的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):51-61.

Zhang H X, Wang L Y, Zhang W J, et al. Influence of climate and neighborhood competition on radial growth of *Pinus koraiensis* in eastern Heilongjiang mountainous areas[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):51-61.

相关论文推荐

Recommended articles

小兴安岭南部2种红松天然林优势树种的空间结构和生态位特征

Spatial structure and niche characteristics of dominant species in natural *Pinus koraiensis* forest in southern Xiaoxing'an mountains

云冷杉红松林内优势种群的空间格局及种间关联性

Spatial pattern and interspecific correlation of dominant population in Spruce-fir-Korean pine forest

基于多源LiDAR的阔叶红松林林分空间结构特征分析

Stand spatial structure characterization of broad-leaved *Pinus koraiensis* forest based on multi-source LiDAR data

红松人工林立地质量评价及生长收获效益

Site quality evaluation and growth harvest benefit of *Pinus koraiensis* plantation

基于因子分析法的红松人工林立地质量评价及其应用

Site quality evaluation of *Pinus koraiensis* plantations based on factor analysis and its application

小兴安岭白桦次生林内红松光合对林隙大小与林隙内位置的适应性研究

Study on the photosynthetic adaptability of *Pinus koraiensis* to the forest gaps in different sizes and at various positions of the *Betula platyphylla* secondary forest in the Xiaoxing'an mountains

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.005
http: //qks.csuft.edu.cn

黑龙江东部山区气候和邻体竞争对红松径向生长的影响

张豪霞[1]，王露瑶[1]，张文军[2]，琚存勇[1]

（1. 东北林业大学 a. 林学院；b. 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150040；
2. 黑龙江细鳞河国家级自然保护区管理局，黑龙江 鹤岗 154101）

摘　要：【目的】研究气候因子和种间竞争对红松 *Pinus koraiensis* 径向生长的影响，为未来气候变化背景下森林生产力与碳汇潜力的预测、地区森林资源保护和可持续经营提供科学依据。【方法】以黑龙江东部山区小北湖和细鳞河 2 个国家级自然保护区的红松为研究对象，利用树木年轮学方法获取径向生长数据，结合气象数据和邻体竞争指标，采用相关分析和线性混合效应模型（Linear mixed-effects model，LMM）方法量化气候与竞争对红松径向生长的影响，并通过方差分解解析各因子的相对贡献，探究气候因子与邻体竞争对红松径向生长的影响与区域差异。【结果】1）小北湖研究区红松径向生长与前一年冬季及当年春季气温呈显著正相关。线性混合效应模型结果显示，红松竞争树胸径与过去 20 a 的累积生长量之间的拟合效果最优。2）细鳞河研究区红松主要受当年 3 月气温的影响。线性混合效应模型结果显示，竞争树胸径与过去 10 a 的累积生长量之间的拟合效果最佳。3）两地竞争与气候的贡献度存在纬度差异，随着纬度的升高，气候贡献率由 39% 增至 88%，而竞争贡献率由 61% 降至 11%。【结论】黑龙江东部山区红松径向生长的影响因子由生物竞争转为气候限制，低纬度林区可通过疏伐缓解竞争，高纬度林区需警惕春季升温带来的生长胁迫。

关键词：红松；径向生长；邻体竞争；气候响应
中图分类号：S718.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)09-0051-11

Influence of climate and neighborhood competition on radial growth of *Pinus koraiensis* in eastern Heilongjiang mountainous areas

Zhang Haoxia[1], Wang Luyao[1], Zhang Wenjun[2], Ju Cunyong[1]

（1. a. College of Forestry; b. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. Administration of Xilinhe National Nature Reserve, Hegang 154101, Heilongjiang, China)

Abstract:【Objective】The study aims to investigate the effects of climatic factors and interspecific competition on the radial growth of *Pinus koraiensis*, and to provide scientific support for predicting forest productivity and carbon sink potential under future climate change, as well as the conservation and sustainable management of regional forest resources.【Method】*Pinus koraiensis* trees from two national nature reserves (Xiaobeihu and Xilinhe) in the mountainous eastern Heilongjiang Province were selected as research materials. Dendrochronological techniques were adopted to acquire radial growth data. Combined with meteorological datasets and neighborhood competition indices, correlation analysis and linear mixed-effects models (LMM) were applied to quantify the independent impacts of climate and competition on the radial growth of *Pinus koraiensis*. Variance decomposition was further performed to calculate their relative contributions, so as to explore the effects of climatic conditions and neighborhood competition on radial growth as well as corresponding regional disparities.【Result】1) The radial growth of *Pinus koraiensis* in the Xiaobeihu study area showed significantly positive correlations with temperatures of the previous winter and current spring. Linear mixed-effects model (LMM) outputs indicated that the diameter at breast height (DBH) of competing trees achieved the optimal fitting performance with cumulative radial growth over the past 20 years; 2) Radial growth of *Pinus koraiensis* in the Xilinhe study area was primarily controlled by March temperature of the current year. LMM results revealed that DBH of neighboring competitive trees had the best fitting effect with cumulative growth over the recent 10 years; 3) The contribution proportions of climatic factors and inter-tree competition differed along the latitudinal gradient.

收稿日期（Received）：2025-08-27　　**修订日期**（Revised）：2025-11-06
基金项目：国家自然科学基金项目（32371860）。
第一作者：张豪霞（zhanghx11@nefu.edu.cn），硕士研究生。　　**通信作者：**琚存勇（qucy09@nefu.edu.cn），副教授，博士。
引文格式：张豪霞 , 王露瑶 , 张文军 , 等 . 黑龙江东部山区气候和邻体竞争对红松径向生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(9):51-61.
Zhang H X, Wang L Y, Zhang W J, et al. Influence of climate and neighborhood competition on radial growth of *Pinus koraiensis* in eastern Heilongjiang mountainous areas[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):51-61.

With increasing latitude, the relative contribution rate of climate rose from 39% to 88%, while that of competition decreased from 61% to 11%.【Conclusion】This study indicates that the dominant factor regulating radial growth of *Pinus koraiensis* shifts from biotic competition to climatic limitation along mountainous eastern Heilongjiang. Thinning can alleviate competitive pressure in low-latitude forest stands, while high-latitude forests should be alert to growth stress induced by spring warming.

Keywords: *Pinus koraiensis*; radial growth; neighboring tree competition; climate response

森林生态系统是陆地生态系统最重要的碳汇，森林面积约占全球陆地总面积的三分之一，在调节全球碳循环、维持气候稳定和保护生物多样性方面具有不可替代的作用。但气候变化特别是全球变暖引发的极端干旱、物候期改变及资源竞争加剧等问题，正深刻重塑着森林生态系统的结构与功能 [1]。树木个体是森林群落的基本组成单元，其生长发育受气候条件 [2-3]、自身遗传因素 [4] 以及周边小环境如邻体竞争的共同制约 [5]。例如，干旱条件下邻体竞争会加剧水分胁迫，林木生长受到抑制 [6]；而在低温环境中，邻体竞争可通过光资源争夺进一步抑制树木生长 [7]。因此，解析树木个体对气候变化与生物互作的响应机制，对正确评估森林的生态服务功能并制定科学的森林保护策略有重要意义。

树木年轮准确记载了树木生长过程中有利或不利的环境信息，是解析树木长期生态响应的高分辨率数据源 [8]，目前在定量辨识树木生长的影响因素中应用广泛 [3,7,9]。同一区域内不同树种的气候响应特征存在显著差异 [10]，即便是同一树种，其气候响应模式也会随地理分布位点发生改变 [11]。这种气候响应的空间异质性，大幅提升了物种气候响应预测的不确定性，也进一步加大了气候变化背景下森林群落动态预估的难度。

红松 *Pinus koraiensis* 为我国东北温带森林的建群树种，在维持区域森林生态系统结构与功能中具有核心地位 [12]。但在全球气候变化的驱动下，我国红松天然林适宜生境持续缩减，种群分布范围呈明显北移趋势，这对其长期生存与生态功能稳定发挥构成潜在威胁 [13]。目前，关于红松径向生长对气候变化的响应已有较多研究，普遍认为春季气温回升可促进林木生长 [14]，而冬季低温与生长季高温则会抑制其生长进程 [3,15]。在邻体竞争方面，现有研究存在分歧，资源受限环境中竞争将加剧气候胁迫 [5,16]，而在气候严酷的高纬度或高海拔地区，气候主导作用会掩盖竞争的影响 [17-18]。但在不同纬度梯度下，气候与邻体竞争对红松生长的影响仍缺乏系统量化，且气候与竞争的相对贡献随纬度梯度的变化也缺乏系统比较。因此，在具有明显南北纬度差异的黑龙江东部山区，水热条件与林分竞争格局对红松的生长是否有不同的影响？不同纬度的气候与邻体竞争对树木生长的相对贡献是否也有差异？厘清上述两个核心问题，将为红松天然林适应性管理策略的精准制定提供科学依据。

本研究以黑龙江东部山区小北湖和细鳞河 2 个不同纬度的国家级自然保护区的红松天然林为研究对象，通过树木年轮学方法获取径向生长数据，结合气象数据与邻体竞争指标，揭示红松径向生长的限制因子与纬度分异规律，进而阐明其径向生长的驱动机制，为未来气候变化背景下森林生产力与固碳潜力的预测、地区森林资源保护和可持续经营提供科学依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

本研究采样地点设置在黑龙江南部的黑龙江小北湖国家级自然保护区（简称小北湖）和中部的黑龙江细鳞河国家级自然保护区（简称细鳞河）。该研究区属温带大陆性季风气候，夏季温湿多雨，春季风大干燥，秋季多雾凉爽，冬季漫长寒冷。研究区植物类型多样，红松阔叶混交林为地带性顶极群落 [12]。小北湖保护区处于张广才岭中段，属低山地貌，平均海拔 645 m，年平均气温 3.1 ℃，年降水量 370 ～ 710 mm，无霜期 90 ～ 100 d，年日照时数 2 600 ～ 2 700 h，暗棕壤是本区的地带性土壤，还有少量的白浆土、草甸土、河淤土、沼泽土和石质土。细鳞河保护区位于小兴安岭东麓，主要地貌类型为丘陵，平均海拔 339 m，年平均气温 2.3 ℃，年降水量 360 ～ 700 mm，无霜期 147 d，土壤类型有暗棕壤、白浆土、草甸土等。采样地基本信息见表 1。

1.2 样品采集与年表建立

在小北湖国家级自然保护区选取 2022 年建立的面积为 1 hm^2 的正方形固定监测样地，样地内立木密度为 1 215 株·hm^{-2}，红松占监测样地内乔木总株数的 18.60%；在细鳞河国家自然保护区选取同年建立的相同大小的正方形固定监测样地，

立木密度为 1 166 株·hm^{-2}，红松占乔木总株数的 24.61%。依据典型抽样原则，2024 年 5 月在这 2 块样地内选择树冠长势良好、无病虫害且远离样地边缘的红松个体各 20 株。依据国际树木年轮数据库（ITRDB）规范 [19]，使用内径 5.15 mm 的生长锥（型号 CO400，Sweden），在胸高位置钻取南北和东西方向 2 根树芯。采集后的树芯立即装入预先标记好的塑料管中，密封保存，以防止变形和变质。

为便于观察年轮，采用白乳胶将树芯垂直固定于木质凹槽内，待固化晾干后，使用 320 ～ 1 500 目的砂纸逐级打磨，直至在显微镜下年轮界限清晰可辨。随后进行目视交叉定年 [20]，并使用精度为 0.001 mm 的年轮分析仪（LINTAB ™ 6，Germany）测量年轮宽度。为确保数据的准确性，运用 COFECHA 程序 [21] 对所有树轮宽度序列进行交叉定年验证，最后通过 ARSTAN 程序 [22] 对验证通过的序列进行标准化处理，生成各样点标准年表（Standard chronology，STD）[23]。

由表 2 可知，两地的年表长度差异很大，小北湖保护区红松的年表序列长度为 1976—2024 年，而细鳞河保护区长达 109 a（1915—2024 年）；小北湖与细鳞河的平均敏感度分别为 0.171、0.257，两地的红松均对气候敏感；标准差分别为 0.164、0.293，说明年表气候信息量较多 [24]。此外，年表的信噪比较大，样本总体解释量均超过了 0.85，样本能够代表林分总体特征，且包含较多气候信息，适合进行年轮学分析 [25-26]。

表 1　采样地基本信息
Table 1　Basic information of sampling sites

样点 Site	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	平均海拔 Average elevation /m	平均气温 Mean temperature /℃	平均年降水量 Average precipitation /mm	平均胸径 Mean DBH /cm	平均树高 Mean tree height /m
小北湖 Xiaobeihu	44°10′	128°37′	645	3.1	561.82	14.73±11.08	10.93±5.29
细鳞河 Xilinhe	47°36′	129°57′	339	2.3	534.90	18.73±11.37	12.93±6.24

表 2　小北湖、细鳞河红松标准年表主要统计特征
Table 2　Main statistical characteristics of the standard chronology *Pinus koraiensis* in Xiaobeihu and Xilinhe research areas

采样点 Site	年表长度（年份） Chronology length (Year)	平均指数 Mean indices	平均敏感度 Mean sensitivity	标准差 Standard deviation	一阶自相关系数 First-order serial autocorrelation
小北湖 Xiaobeihu	1976—2024	0.970	0.171	0.164	0.259
细鳞河 Xilinhe	1915—2024	0.731	0.257	0.293	0.725

采样点 Site	样本相关系数 Correlation coefficient for all series	第一主分量方差 Variance in first eigenvector /%	信噪比 Signal-to-noise ratio	样本总体解释量 Expressed population signal
小北湖 Xiaobeihu	0.302	39.53	9.095	0.901
细鳞河 Xilinhe	0.197	31.78	5.297	0.855

1.3　竞争指数

Huang 等 [27] 基于固定样地的树轮生态学研究，提出可通过胸径总和等参数量化邻体竞争强度。考虑到小北湖、细鳞河的林分密度较高，平均株距约为 2.9 m，本研究以目标树为中心，把半径 4 m 范围内的所有树木定义为竞争树 [28-29]。此范围足以包含多株直接相邻的竞争树，能够有效界定林木根系竞争和冠层竞争的主要空间范围，并已成功应用于同类竞争分析研究中 [16,29]。最后基于每木检尺数据（位置、树种、胸径），选择竞争树密度（N，株·hm^{-2}）、竞争树胸径和（S_{DBH}，m·hm^{-2}）以及竞争树胸高断面积和（S_{BA}，m^2·hm^{-2}），从数量、规模、空间 3 个竞争维度来综合表征目标树的竞争强度，更有效地反映竞争树对空间资源的占据特征（表 3）。本研究采用此方法计算红松的竞争指数，公式为：

$$I_C = \frac{m}{A}\sum_{j=1}^{n_j}(D_j)^k \text{ 。} \quad (1)$$

式中：I_C 表示竞争指数；A 表示竞争树所在的区域面积，0.005 hm^2；n 表示竞争树的个体数；j 表示竞争树的编号；D_j 表示第 j 株竞争树的胸径；m 为比例因子（k=0 或 1 时，m=1；k=2 时，m=π/4）。当 k=0 时，竞争指数仅统计竞争树密度（N）；当 k=1 时，竞争指数为竞争树胸径之和（S_{DBH}），反映竞争树的总体大小；当 k=2 时，I_C 为胸高断面积之和（S_{BA}），表征竞争树对空间资源的占用强度。

1.4　断面积生长量

断面积生长量（Basal area increment，BAI）具有敏感性高、精确性好等特点，不仅能消除年

龄相关生长趋势的干扰，还可较好地反映树木的整体生长状况。因此，除建立树轮宽度指数年表外，本研究运用 R 软件中的“dplR”包 [30]，结合树轮宽度数据，计算红松的断面积生长量。同时，为整合中长期竞争效应，避免年际波动干扰，计算林木近 5 年、近 10 年、近 15 年、近 20 年、近 25 年、近 30 年的累积生长量。

表 3 小北湖和细鳞河研究区红松竞争指数特征参数

Table 3 Characteristic parameters of competition indices for *Pinus koraiensis* in the Xiaobeihu and Xilinhe research areas

采样点 Site	竞争树密度 N/(株·hm^{-2})			竞争树胸径之和 S_{DBH}/(m·hm^{-2})			竞争树胸高断面积之和 S_{BA}/(m^2·hm^{-2})		
	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean
小北湖 Xiaobeihu	400	2 400	1 266.7	33.6	263.8	167.8	2.0	60.5	30.9
细鳞河 Xilinhe	800	1 800	1 278.2	101.0	478.8	281.6	9.3	135.1	66.9

1.5 气象数据

本研究气候数据来自国家青藏高原科学数据中心（https://data.tpdc.ac.cn）发布的 1 km 高分辨率格点数据集，提取月平均降水量、月平均温度、月最高气温和月最低气温。考虑到树木径向生长存在时间滞后性 [31]，研究选取上一年 10 月至当年 9 月的月气象数据。以样地中心点所在的格点数据代表样地数据，下载的所有数据均使用 R4.4.3 软件进行提取与处理。小北湖和细鳞河保护区月气候因子分布特征及年平均气温、年降水量动态见图 1、2。

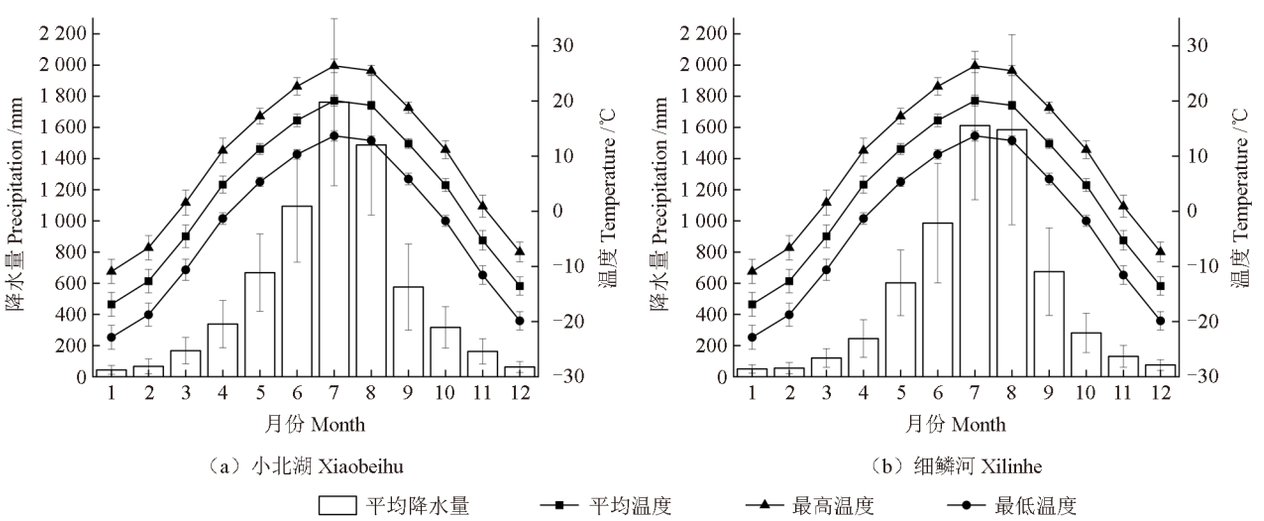


图 1 1980—2023 年小北湖与细鳞河保护区月平均温度、最低温度、最高温度和降水量的分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of monthly mean temperature, minimum temperature, mean maximum temperature and precipitation in Xiaobeihu and Xilinhe study areas from 1980 to 2023

1.6 数据分析

基于年际尺度计算竞争指数，可精准刻画目标树径向生长的竞争效应，然而受限于数据采集的高成本与复杂性，此类精细化研究难以实施。因此，通常假定目标树来自邻近树木的相对竞争压力，一定时期内不会因其生长而发生显著改变，可以根据当前竞争指数模拟前期不同时间间隔的径向生长 [16,27,29]。本研究采用线性混合效应模型（Linear mixed-effects model，LMM）分析竞争指数与断面积生长量的关系，模型形式为：

$$B_{AI} = a + bI_C + \varepsilon 。 \quad (2)$$

式中：B_{AI} 为不同时间间隔的断面积生长量；I_C 为竞争指数；a 和 b 是固定效应；ε 是随机效应。为避免因忽略个体生长基础差异导致的模型偏差，将目标树胸径设置为随机效应。采用 R 语言“nlme”程序包完成模型拟合，借助“MuMln”程序包计算边际 R^2（固定因素解释的方差）和条件 R^2（固定和随机因素共同解释的方差）[32-33]，以此评估模型的拟合效果。R^2 越大，说明模型的拟合效果越好。

为揭示红松径向生长与各气候因子的相关关系，采用 SPSS 26.0 软件开展 Pearson 相关分析，揭示红松树轮年表与气候因子之间的相关特征。借助 R 语言“relaimpo”程序包，进一步量化气候

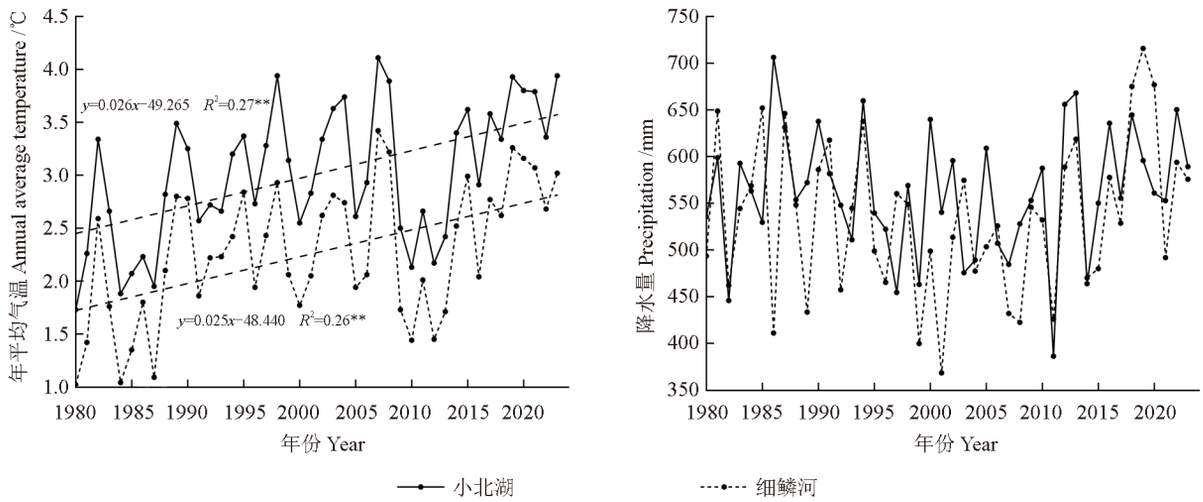


图 2　1980—2023 年小北湖与细鳞河保护区年平均气温、年降水量动态

Fig. 2　Dynamics of annual average temperature, annual precipitation in the research areas of Xiaobeihu and Xilinhe from 1980 to 2023

因子、竞争指数对红松径向生长的相对贡献率（气候、竞争的贡献率总和为 100%）[34]。

2　结果与分析

2.1　红松径向生长与气候因子的相关性

小北湖和细鳞河保护区红松径向生长对气候的响应存在区域差异（图 3）。在小北湖保护区，红松径向生长与前一年 12 月和当年 3 月的平均气温、最高气温、最低气温以及当年 4 月的平均气温和最高气温呈显著正相关，其中与前一年 12 月最高气温的相关性最强；在细鳞河保护区，红松径向生长仅与当年 3 月气温和 7 月平均气温呈显著正相关，与当年 6 月最低气温呈显著负相关，与当年 3 月最低气温相关性最强。同时也发现，两地红松径向生长与降水量均未表现出显著相关性，说明温度是影响两地红松径向生长的关键气候因子。

2.2　红松累积断面积生长量与竞争指数的关系

基于线性混合效应模型（LMM），分别对小北湖、细鳞河 2 个样地红松不同时间间隔的累积断面积生长量与 3 个竞争指数进行拟合，结果（表 4）表明，竞争树密度和竞争树胸高断面积和的拟合效果普遍较弱，竞争树胸径和是量化邻体竞争并解释红松生长影响的最佳指标，最优拟合时段均集中在近 10 ～ 20 a，且其负效应在小北湖保护区更为明显。在小北湖保护区，过去 20 年的累积断面积生长量与竞争树胸径之和的模型拟合效果最佳；在细鳞河保护区，竞争树胸径之和与过去 10 年累积断面积生长量的拟合效果最佳。

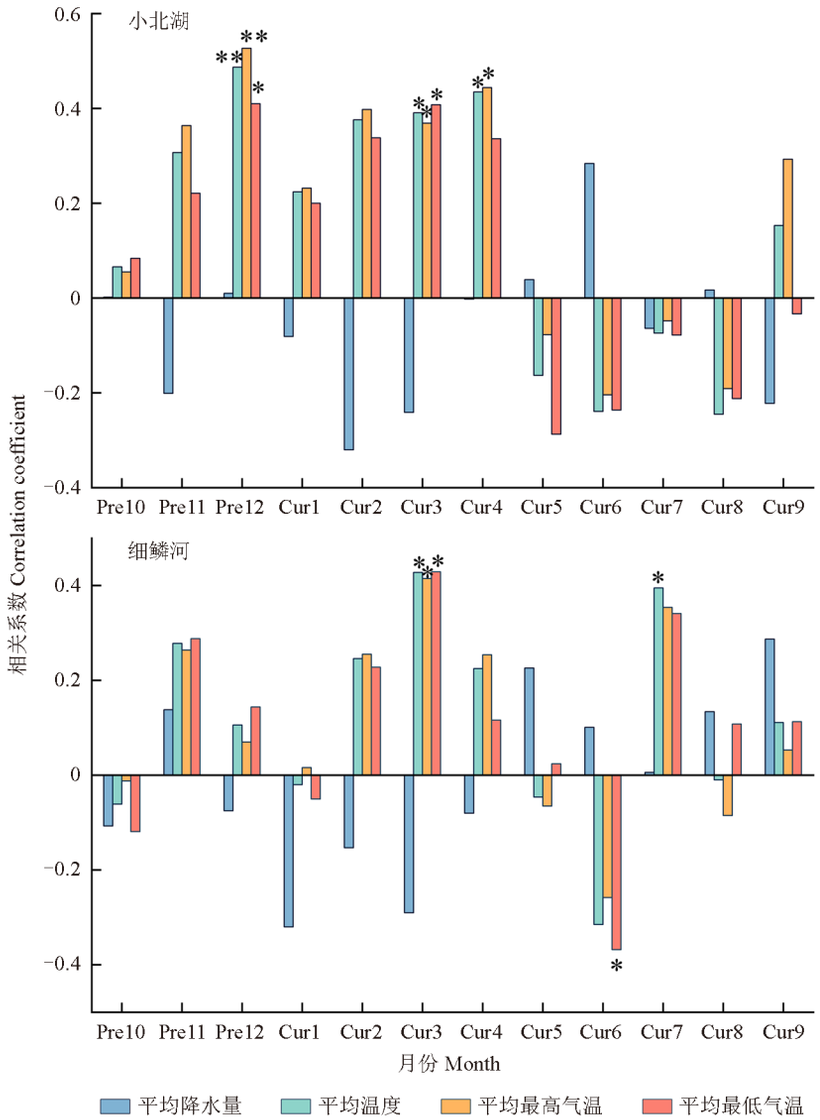
2.3　气候与竞争对红松径向生长的共同作用与相对贡献量

气候条件与竞争作用均会影响红松的径向生长。在小北湖保护区，以最近 20 年前一年 12 月最低气温和竞争树胸径之和作为自变量，拟合 20 a 累积断面积生长量；在细鳞河保护区，选择最近 10 年当年 3 月气温和竞争树胸径之和作为自变量，拟合 10 a 累积断面积生长量。趋势面模型结果（图 4）显示，气候条件与邻体竞争对红松生长的作用效果存在区域分异。在小北湖保护区内，随着前一年 12 月最低气温的升高和竞争指数的降低，断面积生长量也随之增加，且上升的幅度较为明显；在细鳞河保护区内，随着当年 3 月最低气温的升高，断面积生长量增大，增幅明显，但随着竞争指数的变化，断面积生长量的增幅不明显。在此基础上，继续分析气候与竞争因子对红松断面积生长量的贡献占比，结果（图 5）表明，由小北湖转向细鳞河研究区时，气候的相对贡献量从 0.39 提高至 0.88，而竞争的相对贡献量从 0.61 下降到 0.11。纬度梯度下红松生长主控因子存在分异：低纬度生长受竞争主导，高纬度受气候胁迫主导；纬度越高，气候的影响越强，竞争的限制作用越弱。

3　讨　论

3.1　气候对红松径向生长的影响

温度是两地红松径向生长的主导气候因子，但响应模式存在纬度分异，这与刘敏等 [15] 在东北



Pre10 ～ Pre12：上一年 10—12 月；Cur1 ～ Cur9：当年 1—9 月；*，$P < 0.05$；**，$P < 0.01$。
Pre10-Pre12: From october to December of the previous year; Cur1-Cur9: Current year from January to September; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

图 3 小北湖和细鳞河保护区红松树轮宽度年表与月气候因子的相关关系

Fig. 3 Correlation between tree-ring chronologies of *Pinus koraiensis* and monthly climatic factors in the Xiaobeihu and Xilinhe research areas

阔叶红松林中的发现一致。在小北湖研究区（较低纬度），径向生长与前一年 12 月及当年 3、4 月平均气温呈显著正相关，这与王辉等 [14] 在长白山红松中的研究结果相符。冬季气温升高能够维持植株正常代谢活动，促进非结构性碳水化合物的储存，进而为春季生长储备养分 [35]；春季气温回升后，适宜的温度和充足的光照有利于保持树木正常代谢活动，促进树木光合作用，积累光合产物，提前结束休眠期，显著延长树木生长期，为整个生长季提供必要的营养物质 [36]；而较低的温度容易导致积温不足和生长季缩短，从而抑制红松形成层的活动 [37]。在细鳞河保护区（较高纬度），当年 3 月平均气温和 7 月平均气温对径向生长具有促进作用，但 6 月最低气温的升高却产生负效应，可能是由于生长季的高温会使树体失水过多，进而影响其生理代谢，导致生长受限 [3]。此外，水热条件也会影响树木径向生长，且不同地区的红松对水分的响应存在一定的差异 [15]。梁鹏鸿等 [38] 在黑龙江胜山保护区发现红松与当年 6 月降水量呈显著正相关；但尹红等 [39] 发现由于形成层在 4 月下旬开始生长，这时降水充足，水分不再作为限制因子，因此小兴安岭南坡的红松不受降水的控制。在小北湖、细鳞河研究区，降水对红松径向生长同样无显著影响。这可能是由于小北湖与细鳞河保护区比胜山地区纬度低，而降水量又高于胜山地区，红松径向生长对降水敏感性低，温度成为主要限制性气候因子。

3.2 竞争对红松径向生长的影响

邻树竞争对红松径向生长的影响具有显著的

表 4　小北湖和细鳞河样地竞争指数与累积断面积生长量的线性混合效应模型结果 †

Table 4　Results of linear mixed-effects models for competition index and cumulative basal area growth in Xiaobeihu and Xilinhe plots

时间间隔 Time interval /a	竞争指数 Competition indices	小北湖 Xiaobeihu				细鳞河 Xilinhe			
		a	*b*	R_m^2	R_c^2	*a*	*b*	R_m^2	R_c^2
5	*N*	3.521 5***	−0.000 59	0.042	0.591	3.065 55	0.000 752	0.006	0.679
	S_{DBH}	3.704 2***	−0.000 06	0.073	0.686	4.236 19 **	−0.000 052	0.025	0.728
	S_{BA}	3.264 2***	0	0.053	0.639	4.396 77 **	0	0.015	0.689
10	*N*	7.227 5***	−0.001 17	0.059	0.578	7.654 45	0.000 431	0	0.541
	S_{DBH}	**7.920 3*** **	**-0.000 13***	**0.136**	**0.650**	**8.945 98 *** **	**-0.000 159**	**0.055**	**0.665**
	S_{BA}	7.021 0***	−0.000 01*	0.127	0.616	9.533 11 **	0	0.038	0.590
15	*N*	10.278 3***	−0.001 35	0.048	0.523	11.597 43	0.000 475	0	0.604
	S_{DBH}	**11.167 8*** **	**-0.000 16***	**0.121**	**0.691**	**13.039 25 ** **	**-0.000 188**	**0.032**	**0.652**
	S_{BA}	10.173 6***	0*	0.126	0.673	14.103 78 **	−0.000 001	0.032	0.640
20	*N*	14.265 1***	−0.001 47	0.028	0.405	14.377 14	0.000 788	0	0.646
	S_{DBH}	16.431 9***	−0.000 25**	0.149	0.670	16.165 44 **	−0.000 181	0.030	0.613
	S_{BA}	14.905 6***	0*	0.163	0.632	17.710 98 **	−0.000 001	0.032	0.693
25	*N*	16.788 7***	−0.000 88	0.006	0.365	17.836 85	0.001 001	0	0.640
	S_{DBH}	**19.960 3*** **	**-0.000 27***	**0.104**	**0.574**	**19.935 14 ** **	**-0.000 187**	**0.015**	**0.683**
	S_{BA}	18.353 8***	−0.000 01*	0.115	0.555	22.204 15 **	−0.000 001	0.029	0.693
30	*N*	19.530 4***	−0.000 94	0.005	0.385	22.869 61	−0.000 025	0	0.626
	S_{DBH}	23.067 9***	−0.000 30	0.091	0.569	23.814 20 **	−0.000 213	0.016	0.673
	S_{BA}	21.213 3***	−0.000 01	0.095	0.543	26.679 20 **	−0.000 001	0.029	0.692

† *a*、*b* 为混合效应中的固定效应参数；R_m^2 为边际 R^2；R_c^2 为条件 R^2。加粗部分为拟合效果相对较好的混合效应模型。*，$P < 0.05$；**，$P < 0.01$；***，$P < 0.001$。下同。

a, *b*: fixed effect parameters in the mixed effect model; R_m^2: Marginal R^2; R_c^2: ConditionalR^2. The bolded sections are well-fitted mixed-effects models; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.The same below.

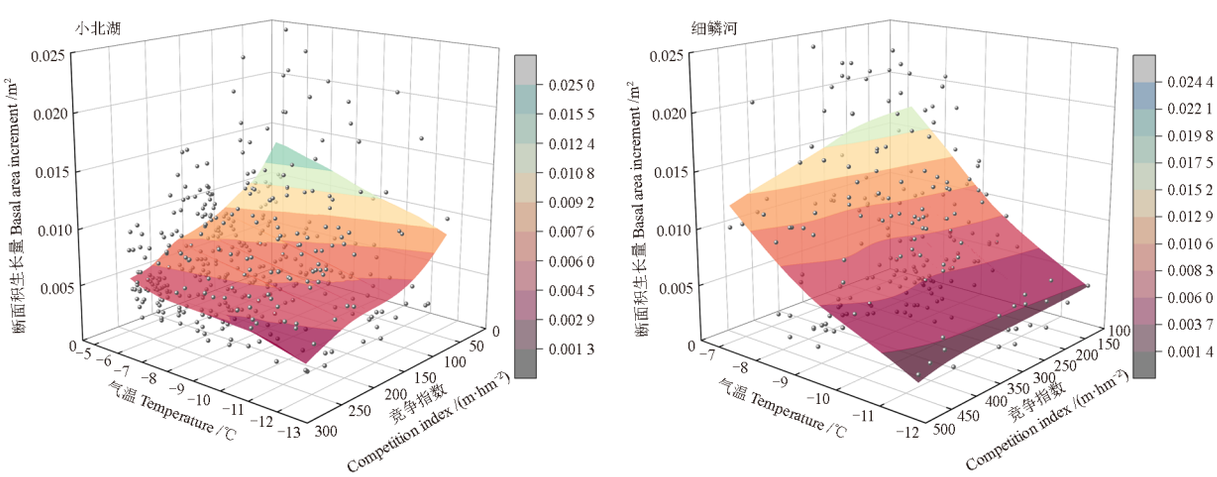


图 4　小北湖、细鳞河研究区红松断面积生长量与气候因子、竞争指数关系

Fig. 4　Relationships between basal area increment (BAI) of *Pinus koraiensis* and climate factors and competition index in the Xiaobeihu and Xilinhe research areas

响应复杂性。在竞争指数拟合中，竞争树胸径和对红松断面积生长量的负向效应强于竞争树密度，说明竞争树个体大小对资源占用的影响更为关键。从资源争夺机制看，当邻近树的胸径超过红松自身胸径时，会形成显著的资源压制效应，尤其是在 4 m 邻域半径范围内，胸径更大的竞争树不仅能通过更发达的冠层结构占据优势光照资源，还能通过更发达的根系网络争夺土壤养分与水分，导致其生长受限。因此，邻近树的胸径优势与空间邻近是限制红松生长的主要竞争形式。但由于地区和树种的差异，不同地区的树种竞争指数与累积断面积生长量的拟合效果存在差异，例如，在加拿大北方混交林中，云杉和白杨的累积径向生长量与竞争指数在过去 10 ～ 25 a 的拟合效果最

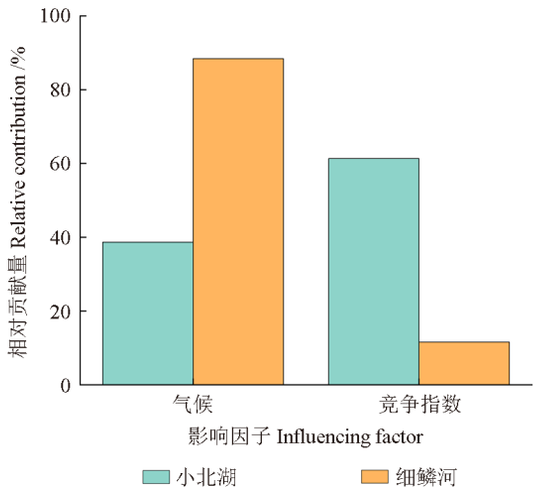


图 5 气候和竞争对红松径向生长的相对贡献量
Fig. 5 The relative contributions of climate and competition to the radial growth of *Pinus koraiensis*

佳 [27]；在中国亚热带地区则发现马尾松的累积断面积生长量在 15 ～ 25 a 尺度上与竞争指数的拟合效果最优 [16]。在本研究中，小北湖、细鳞河保护区在近 10 ～ 20 a 的累积断面积生长量与竞争指数的拟合效果最好。小北湖研究区的拟合结果整体优于细鳞河研究区，从林分特征看，细鳞河的红松平均胸径与树高高于小北湖，细鳞河的林分更趋成熟，红松多处于林冠层优势地位或亚优势地位，竞争格局相对稳定，这与急尖长苞冷杉等针叶树种的竞争规律一致，当胸径达到一定阈值后，竞争的敏感性会显著下降 [40]。同样，Lebourgeois 等 [17] 也认为竞争对树木生长影响存在地域差异，且胸径更大、树龄更高的树木受到的竞争强度更小。

3.3 气候和竞争对红松径向生长的共同影响

气候和竞争对树木生长的影响并非单一抑制与促进，而是通过资源分配格局的重塑与气候因子的交互作用形成动态平衡 [5]。温度和竞争树胸径和是共同影响红松径向生长的关键因子，但在小北湖和细鳞河地区二者的影响有所差异。

在纬度较低的小北湖地区，竞争对红松径向生长的相对贡献量更高。树木间的竞争主要表现在对光资源的争夺，当严冬与高强度竞争同时出现时，红松断面积生长量将降至最低水平。这种下降揭示出气候与竞争“双重胁迫”的协同抑制现象：低温会限制代谢活性和资源可利用性 [2]，而竞争在资源本已匮乏的环境中，进一步加剧对剩余资源的争夺，导致用于形成层活动和木质部生长的碳分配比例和总量被极度压缩 [41]。相反，当温度适宜时，光合产物积累充足且竞争压力小，树木生长量明显增加。Frank 等 [42] 在阿尔卑斯山高海拔森林中也证实，气候胁迫会显著放大竞争对树木生长的抑制作用，而有利气候条件可部分缓冲竞争压力。在纬度较高的细鳞河地区，竞争效应明显削弱，气候因子对红松径向生长的相对贡献更大，严寒成为限制红松径向生长的主要因素。这种气候胁迫优先于生物互作的生态现象，在中亚阿尔泰山的研究中也得到了证实：针叶林的生长主要由区域气候差异驱动，低温胁迫会掩盖竞争的影响效应 [18]。树木生长首先取决于能否克服低温胁迫并顺利完成生长季 [10]。冬季极端低温与生长季短加剧了气候胁迫强度，红松的生理策略更倾向于应对环境胁迫而非竞争适应。此外，细鳞河林分优势木已形成稳定层级结构，深根系可获取稳定资源，通过长期竞争适应提高了耐受性 [43]。

本研究不仅量化了气候与竞争在不同纬度的相对贡献，更揭示了二者对红松生长的交互模式存在环境依赖性。低纬度水热条件相对较好的小北湖地区，气候与竞争表现出明显的协同抑制效应，如冬季低温与高强度竞争同时出现时，树木生长降至最低，这表现出不利气候条件会放大竞争的负面作用 [7]；在高纬度且气候胁迫占主导的细鳞河地区，严酷的环境让树木生长首先需要克服温度限制，竞争的影响因而被掩盖或减弱，二者主要表现为主导因子的更替而非协同。这种从协同抑制到主导更替的交互模式转变，不仅是红松的生长响应特征，更是温带针叶林的普遍规律，如 Liang 等 [16] 在亚热带马尾松的相关研究中也同样认为高纬度马尾松比低纬度马尾松对气候因素更敏感。这进一步证实，“纬度梯度上树木生长主导因子从生物竞争向气候胁迫转变”是理解不同纬度森林动态的关键。

4 结 论

1）温度是小北湖和细鳞河保护区红松径向生长的主要气候影响因子，但响应模式存在明显区域差异：纬度低的小北湖地区红松生长受前一年冬季及当年早春气温影响显著，而纬度高的细鳞河地区主要受当年 3 月气温影响。邻体竞争方面，竞争树胸径和是表征竞争压力的最优指标，其对红松生长的负效应在小北湖地区更为显著。

2）气候与竞争对红松径向生长的相对贡献存在纬度梯度变化，纬度升高，气候因子的贡献率上升，而竞争因子的贡献率则下降。表明在低纬度地区，竞争是主导红松径向生长的主要因素；而在高纬度地区，春季气温的回升成为关键限制

因子。研究结果可为黑龙江东部山区的森林管理和红松保护提供科学依据，在低纬度地区可通过疏伐调控竞争压力，高纬度地区需重点关注早春温度突变对红松的生理胁迫。这一发现为解析森林动态中生物互作与环境胁迫的协同机制提供了新视角。

本研究仍存在若干局限性。其一，样地的选择未能排除地形的差异，可能会导致气候与竞争的相对贡献存在偏差；其二，现有数据虽经过严格质量控制以确保数据的科学性，但用于分析的样本量偏少，可能会在一定程度上削弱结论的区域代表性。后续可结合稳定同位素、林木生理测量等方法在更多的样地上开展研究，从机理层面深化对气候、竞争交互作用的理解。

参考文献：

[1] 李睿 , 侯彦杰 . 信息学视域下提升中国生态文明国际话语权的路径探索 [J]. 黑龙江生态工程职业学院学报 ,2024,37(2):63-68.
Li R, Hou Y J. Exploration of paths to enhance China’s international discourse power on ecological civilization in the perspective of informatics[J]. Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering,2024,37(2):63-68.

[2] Zhirnova D F, Belokopytova L V, Upadhyay K K, et al. Climatic reactions in the radial growth of *Pinus sibirica* Du Tour from the lower to the upper limit along the western Sayan mountains, Siberia[J]. Forest Ecology and Management,2024,563:121995.

[3] 孔露露 , 朱光玉 , 吕勇 . 亚热带杉木人工林单木径向生长对气候变化的响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(2):71-81.
Kong L L, Zhu G Y, Lü Y. Response of individual tree radial growth to climate change in subtropical *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(2):71-81.

[4] 马晓雨 , 尚福强 , 潘丕克 , 等 . 不同种源红松生长、结实及光合生理特征 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(1):57-65.
Ma X Y, Shang F Q, Pan P K, et al. The growth, fruiting and photosynthetic physiology characteristics of *Pinus koraiensis* from different provenances[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(1):57-65.

[5] Clark J S, Bell D M, Kwit M C, et al. Competition-interaction landscapes for the joint response of forests to climate change[J]. Global Change Biology,2014,20:1979-1991.

[6] 刘士玲 , 杨保国 , 郑路 , 等 . 红锥树干径向水分亏缺对饱和水汽压差的时滞响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(9):94-104.
Liu S L, Yang B G, Zheng L, et al. Time lag of stem water deficit in response to vapor pressure deficit of *Castanopsis hystrix*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024,44(9):94-104.

[7] 韩新宇 , 高露双 , 秦莉 , 等 . 林分密度对兴安落叶松径向生长 - 气候关系的影响 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版),2024,48(2):182-190.
Han X Y, Gao L S, Qin L, et al. Effect of stand density on radial growth-climate relationship of *Larix gmelinii*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2024,48(2):182-190.

[8] 吴祥定 . 树木年轮分析在环境变化研究中的应用 [J]. 第四纪研究 ,1990(2):188-196.
Wu X D. Application of tree ring analysis to the study on environment variation[J]. Quaternary Sciences,1990(2):188-196.

[9] 刘禹 , 吴祥定 , 邵雪梅 , 等 . 树轮密度、稳定 C 同位素对过去近 100 a 陕西黄陵季节气温与降水的恢复 [J]. 中国科学 (D 辑 : 地球科学),1997,27(3):271-276.
Liu Y, Wu X D, Shao X M, et al. Reconstruction of seasonal temperature and precipitation in Huangling, Shaanxi over past 100 years using tree-ring density and stable carbon isotope[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences),1997,27(3):271-276.

[10] 邱杨 , 王兆鹏 , 张冬有 , 等 . 大兴安岭北部不同树种径向生长对气温突变的响应 [J]. 应用生态学报 ,2024,35(11):2933-2941.
Qiu Y, Wang Z P, Zhang D Y, et al. Responses of radial growth of different tree species to abrupt temperature change in the northern Greater Khingan mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(11):2933-2941.

[11] Hou D L, Qin Y H, Zhang Z Q, et al. Site-specific growth-climate relationships of a widespread coniferous species across mountain areas[J]. Forest Ecology and Management,2025,587:122731.

[12] 沈海龙 , 林存学 , 杨玲 , 等 . 东北林区经济林树种资源状况、存在问题与发展对策 [J]. 经济林研究 ,2013,31(2):160-166.
Shen H L, Lin C X, Yang L, et al. Current situation, existing problems and development countermeasures for nonwood tree species resources at northeast China forest region[J]. Nonwood Forest Research,2013,31(2):160-166.

[13] 程肖侠 , 延晓冬 . 气候变化对中国东北主要森林类型的影响 [J]. 生态学报 ,2008,28(2):534-543.
Cheng X X, Yan X D. Effects of climate change on typical forest in the northeast of China[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(2):534-543.

[14] 王辉 , 邵雪梅 , 方修琦 , 等 . 长白山红松年轮细胞尺度参数对气候要素的响应 [J]. 应用生态学报 ,2011,22(10):2643-2652.
Wang H, Shao X M, Fang X Q, et al. Responses of *Pinus koraiensis* tree ring cell scale parameters to climate elements in Changbai mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(10):2643-2652.

[15] 刘敏 , 毛子军 , 厉悦 , 等 . 不同纬度阔叶红松林红松径向生长对气候因子的响应 [J]. 应用生态学报 ,2016,27(5):1341-1352.

Liu M, Mao Z J, Li Y, et al. Response of radial growth of *Pinus koraiensis* in broad-leaved Korean pine forests with different latitudes to climatical factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(5):1341-1352.

[16] Liang H X, Huang J G, Ma Q Q, et al. Contributions of competition and climate on radial growth of *Pinus massoniana* in subtropics of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019,274:7-17.

[17] Lebourgeois F, Eberlé P, Mérian P, et al. Social status-mediated tree-ring responses to climate of *Abies alba* and *Fagus sylvatica* shift in importance with increasing stand basal area[J]. Forest Ecology and Management,2014,328:209-218.

[18] Shi S L, Liu G H, Li Z S, et al. Elevation-dependent growth trends of forests as affected by climate warming in the southeastern Tibetan Plateau[J]. Forest Ecology and Management,2021,498: 119551.

[19] Wettstein J J, Littell J S, Wallace J M, et al. Coherent region-, species-, and frequency-dependent local climate signals in northern hemisphere tree-ring widths[J]. Journal of Climate,2011,24: 5998-6012.

[20] Fritts H C, Lofgren G R, Gordon G A. Variations in climate since 1602 as reconstructed from tree rings[J]. Quaternary Research, 1979,12:18-46.

[21] Grissino-Mayer H D. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA[J]. Tree-Ring Research,2001,57(2):205-221.

[22] 赵守栋 , 江源 , 焦亮 , 等 . ARSTAN 程序和 R 语言 dplR 扩展包进行树轮年表分析的比较研究 [J]. 生态学报 ,2015,35(22): 7494-7502.

Zhao S D, Jiang Y, Jiao L, et al. A comparative analysis of ARSTAN and the dplr package of R language in analyses of tree-ring chronologies[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(22):7494-7502.

[23] Cook E R. A time-series analysis approach to tree ring standardization[D]. Tucson: University of Arizona,1985:71.

[24] 李宗善 , 刘国华 , 傅伯杰 , 等 . 不同去趋势方法对树轮年表气候信号的影响 : 以卧龙地区为例 [J]. 植物生态学报 ,2011,35(7): 707-721.

Li Z S, Liu G H, Fu B J, et al. Influence of different detrending methods on climate signal in tree-ring chronologies in Wolong national natural reserve, western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2011,35(7):707-721.

[25] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. Tree-Ring Bulletin,1983,43:69-78.

[26] 彭小梅 , 肖生春 , 肖洪浪 . 树木年轮轮宽年表建立方法研究进展 [J]. 中国沙漠 ,2013,33(3):857-865.

Peng X M, Xiao S C, Xiao H L. Advances in methods of building tree-ring width chronology[J]. Journal of Desert Research,2013,33(3): 857-865.

[27] Huang J G, Stadt K J, Dawson A, et al. Modelling growth-competition relationships in trembling aspen and white spruce mixed boreal forests of western Canada[J]. PLoS One,2013,8(10):e77607.

[28] Zou W T, Zeng W S, Zhang L J, et al. Modeling crown biomass for four pine species in China[J]. Forests,2015,6:433-449.

[29] 康剑 , 梁寒雪 , 蒋少伟 , 等 . 竞争和气候对新疆阿尔泰山西伯利亚五针松树木径向生长的影响 [J]. 植物生态学报 ,2020,44(12): 1195-1202.

Kang J, Liang H X, Jiang S W, et al. Effects of competition and climate on tree radial growth of *Pinus sibirica* in Altai mountains, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2020,44(12): 1195-1202.

[30] Bunn A G. A dendrochronology program library in R (dplR)[J]. Dendrochronologia,2008,26:115-124.

[31] 吴祥定 . 树木年轮与气候变化 [M]. 北京 : 气象出版社 ,1990: 54-55.

Wu X D. Tree rings and climate change[M]. Beijing: Meteorological Press,1990:54-55.

[32] Nakagawa S, Schielzeth H. A general and simple method for obtaining R^2 from generalized linear mixed-effects models[J]. Methods in Ecology and Evolution,2013,4:133-142.

[33] Johnson P C D. Extension of Nakagawa & Schielzeth's R^2_{GLMM} to random slopes models[J]. Methods in Ecology and Evolution,2014,5:944-946.

[34] Grömping U. Relative importance for linear regression in R: the package relaimpo[J]. Journal of Statistical Software,2006,17: 1-27.

[35] Li B, Ma X, Saha S, et al. Korean pines demonstrate cold resilience through non-structural carbohydrate concentrations despite light deprivation during the growing season[J]. Forests,2023,14:2296.

[36] Dang H S, Jiang M X, Zhang Q F, et al. Growth responses of subalpine fir (*Abies fargesii*) to climate variability in the Qinling mountain, China[J]. Forest Ecology and Management,2007,240: 143-150.

[37] Zhang Y, Cao R J, Yin J, et al. Radial growth response of major conifers to climate change on Haba snow mountain, southwestern China[J]. Dendrochronologia,2020,60:125682.

[38] 梁鹏鸿 , 王襄平 , 吴玉莲 , 等 . 黑龙江胜山保护区阔叶红松林不同演替阶段径向生长与气候变化的关系 [J]. 植物生态学报 , 2016,40(5):425-435.

Liang P H, Wang X P, Wu Y L, et al. Growth responses of broad-leaf and Korean pine mixed forests at different successional stages to climate change in the Shengshan nature reserve of Heilongjiang Province, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2016,40(5): 425-435.

[39] 尹红 , 刘洪滨 , 郭品文 , 等 . 小兴安岭低山区红松生长的气候响应机制 [J]. 生态学报 ,2009,29(12):6333-6341.
Yin H, Liu H B, Guo P W, et al. An analysis on the climatic response mechanism of the growth of *Pinus koraiensis* in the lower mountains of Xiaoxing'anling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(12):6333-6341.

[40] 朱文婷 , 刘海坤 , 何睿 , 等 . 藏东南急尖长苞冷杉群落空间点格局分析及其时空动态 [J]. 生态学报 ,2022,42(22):8977-8984.
Zhu W T, Liu H K, He R, et al. Spatial point pattern analysis and spatio-temporal dynamics of *Abies georgei* var. *smithii* forests in southeast Xizang[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(22): 8977-8984.

[41] 邹贵武 . 竞争影响马尾松 (*Pinus massoniana*) 生长的生态学机制研究 [D]. 杭州 : 浙江大学 ,2022:104-109.
Zou G W. Ecological mechanisms of competition affecting the growth of Masson pine(*Pinus massoniana*)[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2022:104-109.

[42] Frank D, Esper J. Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps[J]. Dendrochronologia,2005,22:107-121.

[43] 巢林 , 洪滔 , 李键 , 等 . 不同林龄、径级杉木人工林种内竞争规律 [J]. 浙江农林大学学报 ,2015,32(3):353-360.
Chao L, Hong T, Li J, et al. Intraspecific competition in a *Cunninghamia lanceolata* plantation with different age and diameter classes[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2015, 32(3):353-360.

[本文编校：谢荣秀]

（上接第 18 页）

[21] Li R Q, He Y, Chen J Y, et al. Research progress in improving photosynthetic efficiency[J]. International Journal of Molecular Sciences,2023,24:9286.

[22] Ma J Y, Chen T T, Lin J, et al. Functions of nitrogen, phosphorus and potassium in energy status and their influences on rice growth and development[J]. Rice Science,2022,29(2):166-178.

[23] Akhtar M N, Ul-Haq T, Ahmad F, et al. Application of potassium along with nitrogen under varied moisture regimes improves performance and nitrogen-use efficiency of high-and low-potassium efficiency cotton cultivars[J]. Agronomy,2022,12:502.

[24] 王天斌 , 汪智军 , 靳开颜 , 等 . 新疆奇台地区不同水肥条件下文冠果种实性状的差异 [J]. 经济林研究 ,2024,42(4):109-116.
Wang T B, Wang Z J, Jin K Y, et al. Differences of fruit traits of yellow horn under different water and fertilizer conditions in Qitai region of Xinjiang[J]. Non-wood Forest Research,2024,42(4): 109-116.

[25] 王冰瑾 . 不同肥料配合施用对文冠果生长发育的影响 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2023:32-39.
Wang B J. Effects of different fertilizers on growth of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2023:32-39.

[26] 马勇 , 潘越 , 韩政伟 , 等 . 干旱区不同施肥处理对 " 北冰红 " 产量的影响 [J]. 安徽农业科学 ,2024,52(5):181-184.
Ma Y, Pan Y, Han Z W, et al. Effect of different fertilization treatments on the yield of 'Beibinghong' in arid area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2024,52(5):181-184.

[27] 彭少兵 , 成艳霞 , 董文浩 , 等 . 核桃 "3414" 肥料效应试验及推荐施肥量的回归分析 [J]. 经济林研究 ,2018,36(4):27-32.
Peng S B, Cheng Y X, Dong W H, et al. "3414" fertilization tests and regression analysis of recommended fertilizer amount of walnut[J]. Non-wood Forest Research,2018,36(4):27-32.

[本文编校：谢荣秀]