

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.2026.09.015

论文标题： 不同竞争强度下福建杉木人工林径向生长对气候的差异化响应

作　　者： 母利利，孙玉军，梁瑞婷，等

收稿日期： 2025-10-14

引文格式： 母利利,孙玉军,梁瑞婷,等.不同竞争强度下福建杉木人工林径向生长对气候的差异化响应[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):164-176.

Mu L L, Sun Y J, Liang R T, et al. Differentiated responses of radial growth in Fujian *Cunninghamia lanceolata* plantations to climate under varying competition intensities[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):164-176.

相关论文推荐

Recommended articles

岷山中段不同坡向岷江冷杉径向生长对气候的响应差异

Differences in radial growth responses of *Abies fargesii* var. *faxoniana* to climate in different slopes of the mid-Min mountains

不同径级臭冷杉的径向生长动态及其对气候因子的响应

Radial growth dynamics of different diameter classes of *Abies nephrolepis* and its response to climate factors

峨眉山不同海拔冷杉径向生长对气候变化的响应

Radial growth of *Abies fabri* response to climate change along an altitudinal transect in the Mount Emei

云冷杉针叶混交林主要针叶树种早晚材径向生长对多因子的响应

Response of early and late wood growth of main coniferous species to multiple factors in spruce fir coniferous mixed forest

长白山沿海拔梯度臭冷杉径向生长对气候变化的响应

Response of radial growth of *Abies nephrolepis* to climate change along an elevational gradient in Changbai mountain

亚热带杉木人工林单木径向生长对气候变化的响应

Response of individual tree radial growth to climate change in subtropical *Cunninghamia lanceolata* plantation

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.015 http: //qks.csuft.edu.cn

不同竞争强度下福建杉木人工林径向生长对气候的差异化响应

母利利，孙玉军，梁瑞婷，杨俊琳

（北京林业大学 森林资源和环境管理国家林业和草原局重点实验室，北京 100083）

摘　要：【目的】揭示气候变化背景下不同竞争强度杉木人工林径向生长的气候响应规律，为更好地规划杉木在不同竞争强度下的生存策略提供参考依据。【方法】以福建将乐国有林场杉木人工林为研究对象，布设 23 块标准样地，采集 171 株杉木的树轮样芯，同步测量胸径、树高、冠幅并计算综合竞争指数（Comprehensive competition index，CCI）。将所有杉木按照阈值法分为低竞争指数组（CCI ＜ 1.76，*n*=45）、中竞争指数组（1.76 ≤ CCI ≤ 3.38，*n*=82）和高竞争指数组（CCI ＞ 3.38，*n*=44），按分组建立标准年表；采用 Pearson 相关性与偏相关性分析探究气象因子对不同竞争强度下杉木径向变化特征的作用机制，通过多元逐步回归剔除多重共线性严重的气候变量（方差膨胀因子大于 5），构建不同竞争梯度下杉木径向生长气候响应模型。【结果】1）相关性分析显示，高竞争指数组杉木径向生长对气候因子响应最敏感，与上年 10 月降水量、当年 3 月标准化降水蒸散指数呈极显著相关；中竞争指数组杉木径向生长主要与当年 1 月相对湿度、3—4 月温度相关；低竞争指数组杉木径向生长与非生长季及生长季前期温度关联显著。2）多元逐步回归模型中，高、中、低竞争指数组调整后决定系数分别为 0.772、0.518、0.363，均达显著水平；高竞争指数组杉木径向生长受非生长季降水量、生长季最低温度和最高温度等气候因子影响显著；中竞争指数组受生长季前期温度调控；低竞争指数组受非生长季降水以及生长季前期最低温度影响较大。【结论】温度、降水量、相对湿度等是调控杉木径向生长的核心气候因子，林分竞争强度可显著改变杉木对气候波动的响应程度；杉木人工林经营需依据林分竞争等级实施差异化抚育管理方案。

关键词：杉木；径向生长；竞争；气候响应

中图分类号：S791.27　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)09-0164-13

Differentiated responses of radial growth in Fujian *Cunninghamia lanceolata* plantations to climate under varying competition intensities

Mu Lili, Sun Yujun, Liang Ruiting, Yang Junlin

(Key Laboratory of Forest Resources and Environmental Management, National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:【Objective】To reveal the climate response patterns of radial growth of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. plantations under different competition intensities under the background of climate change, and to provide a reference for formulating targeted survival strategies for Chinese fir stands with varying competition levels.【Method】Taking Jiangle state-owned forest farm in Fujian Province as the research area, 23 standard sampling plots were set up, and tree-ring cores were collected from 171 *Cunninghamia lanceolata* individuals. Meanwhile, diameter at breast height, tree height and crown width of each tree were measured to calculate the comprehensive competition index (CCI). All sampled trees were classified into three groups by threshold values: low competition group (CCI ＜ 1.76, *n*=45), medium competition group (1.76 ≤ CCI ≤ 3.38, *n*=82) and high competition group (CCI ＞ 3.38, *n*=44), and standardized tree-ring chronologies were developed for each group. Pearson correlation and partial correlation analyses were adopted to explore the effects of meteorological factors on radial growth characteristics of Chinese fir under different competition intensities.

收稿日期（Received）：2025-10-14　　**修订日期**（Revised）：2025-12-04

基金项目：国家自然科学基金项目（31870620）；林业科学技术推广项目（〔2019〕06）。

第一作者：母利利（18837023986@163.com），硕士研究生。　　**通信作者：**孙玉军（sunyj@bjfu.edu.cn），教授，博士。

引文格式：母利利 , 孙玉军 , 梁瑞婷 , 等 . 不同竞争强度下福建杉木人工林径向生长对气候的差异化响应 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2026,46(9):164-176.

Mu L L, Sun Y J, Liang R T, et al. Differentiated responses of radial growth in Fujian *Cunninghamia lanceolata* plantations to climate under varying competition intensities[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):164-176.

Climate variables with severe multicollinearity (VIF ＞ 5) were eliminated via stepwise multiple regression, and climate response models for radial growth of Cunninghamia lanceolata under various competition gradients were finally established. 【Result】1) Correlation analysis indicated that the radial growth of Chinese fir in the high-competition group exhibited the strongest sensitivity to meteorological factors, showing highly significant correlations with precipitation of the previous October and the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in March of the current year. The radial growth of trees in the medium-competition group was mainly correlated with relative humidity in January and temperature from March to April of the current year, while radial growth in the low-competition group had significant associations with temperatures during the non-growing season and early growing season; 2) The adjusted coefficients of determination of the stepwise multiple regression models for the high-, medium- and low-competition groups were 0.772, 0.518 and 0.363, respectively, all reaching significant levels. The radial growth of Chinese fir under high competition was markedly affected by non-growing season precipitation as well as minimum and maximum temperatures during the growing season. Early growing season temperature dominated the growth variations of trees in the medium-competition group, whereas non-growing season precipitation and early growing season minimum temperature exerted dominant impacts on radial growth in the low-competition group. 【Conclusion】Meteorological factors including temperature, precipitation and relative humidity are core drivers regulating the radial growth of *Cunninghamia lanceolata*. Stand competition intensity can significantly alter the response magnitude of Chinese fir to climate fluctuations. Differentiated tending and management schemes should be implemented for *Cunninghamia lanceolata* plantations according to stand competition levels.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.; radial growth; competition; climate response

森林是陆地生态系统的核心组成部分，在维持全球生物多样性、调控物质能量循环中具有不可替代的重要作用，其碳汇、水源涵养及气候缓冲能力更是应对全球气候变化的关键支撑 [1-2]。近年来，全球升温趋势持续加剧，极端高温、季节性干旱等复合型极端事件频发，干旱区森林已普遍出现生长衰退现象，即使在湿润区也存在潜在胁迫风险，这些风险会扰乱树木光合作用、水分运输等生理过程，导致部分区域树木生长减缓、衰退甚至死亡，削弱森林生态系统的稳定性与服务供给能力 [3-5]。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是我国南方特有的速生用材树种，在福建省多个重点林区大面积栽植，其生物量分配与碳储量对水热环境高度敏感。杉木人工林生长状况不仅决定区域林业经济发展水平，更深刻影响当地森林生态系统碳汇潜力与气候适应能力。因此，探究不同竞争强度下杉木径向生长规律及其气候响应机制，对气候变化背景下杉木人工林碳管理策略具有重要的理论与实践价值。

树木径向生长是形成层周期性活动的结果，其宽窄变化不仅记录了树木自身的生理发育过程，而且能高分辨率地响应外部环境因子的波动 [6]。国内外针对树木径向生长与气象因子的耦合关系已开展了大量研究，为解析树木生长的环境驱动机制奠定了理论基础。林小乔等 [7] 基于亚热带 6 处杉木人工林差值年表，证实了亚热带地区杉木径向生长主要与生长季均温、降水量、前一年夏季最低温度呈正相关，与当年夏季最高温度呈负相关；针对希腊冷杉 *Abies cephalonica* 的研究进一步验证了年轮序列能精准捕捉长期温度、降水等气候因子的波动，为区域森林气候响应研究提供了典型范例 [8]。气候对树木径向生长的解释力约占 40%，其余部分主要是同种树木之间和不同树种之间的竞争 [9]。竞争本质是树木生长时对光照、水分、土壤养分等限制性资源的争夺过程 [10]。史月冬等 [11] 研究表明，行列密植区域的杉木因竞争激烈，径向生长速率显著低于对角线位置的杉木。现有研究证实，竞争强度可作为环境滤网放大或屏蔽特定气候因子对树木生长的影响。Coomes 等 [12] 对欧洲水青冈 *Fagus sylvatica* 的研究发现，种内竞争对树木生长的调控作用主要受温度影响，受降水量的影响较弱。康雨昌等 [13] 对红松 *Pinus koraiensis* 的研究发现，竞争会强化红松径向生长对 6 月降水量的敏感度。Kwon 等 [14] 进一步提出，高竞争环境下树木干旱敏感性增强，低竞争环境可以缓冲气候波动对树木生长的负面影响。因此，竞争强度是解析树木气候响应异质性的核心调控变量。

现阶段关于杉木人工林的相关研究多聚焦于林龄、立地质量或单一气候因子的影响，针对不同竞争梯度下杉木人工林径向生长对气候的响应研究较为匮乏。在全球变暖与极端气候频发的背景下，明确不同竞争环境下杉木的气候适应阈值与生长脆弱期，对于制定基于密度调控的近自然经营策略具有重要意义。

基于上述研究背景与现存问题，本研究以福建将乐国有林场杉木人工林为研究对象，基于 23 块样地 171 株杉木树芯样本数据，获取年轮数据并建立标准年表，结合气象数据开展分析，旨在实现两大研究目标：1）明确高、中、低竞争梯度下杉木

径向生长与气候因子的关系；2）量化各类气候因子对各竞争强度下杉木径向生长的影响强度，揭示竞争强度差异导致的响应敏感度分异规律。

1　材料和方法

1.1　研究区概况

研究区位于福建省三明市将乐国有林场，地理坐标为 117°05′ ～ 117°40′ E、26°26′ ～ 27°04′ N。该研究区属亚热带季风气候，夏季极端高温频次低，冬季持续低温时间短，雨热同期。将乐国有林场年均气温 19.6 ℃，年均降水量 1 770.4 mm。地形地貌以低山丘陵为主，同时分布有坡度较陡的低矮山地。林场内主要栽植杉木、马尾松 *Pinus massoniana* 及福建柏 *Fokienia hodginsii* 等树种。

1.2　气象数据

采用 ClimateAP 软件[15]提取研究区 1992—2022 年的气象数据，包括相对湿度（Relative humidity，RH）、平均温度（Average temperature，T_{ave}）、最低温度（Minimum temperature，T_{min}）、最高温度（Maximum temperature，T_{max}）以及降水量（Precipitation，P_{re}），年际与逐月气候动态如图 1 所示。

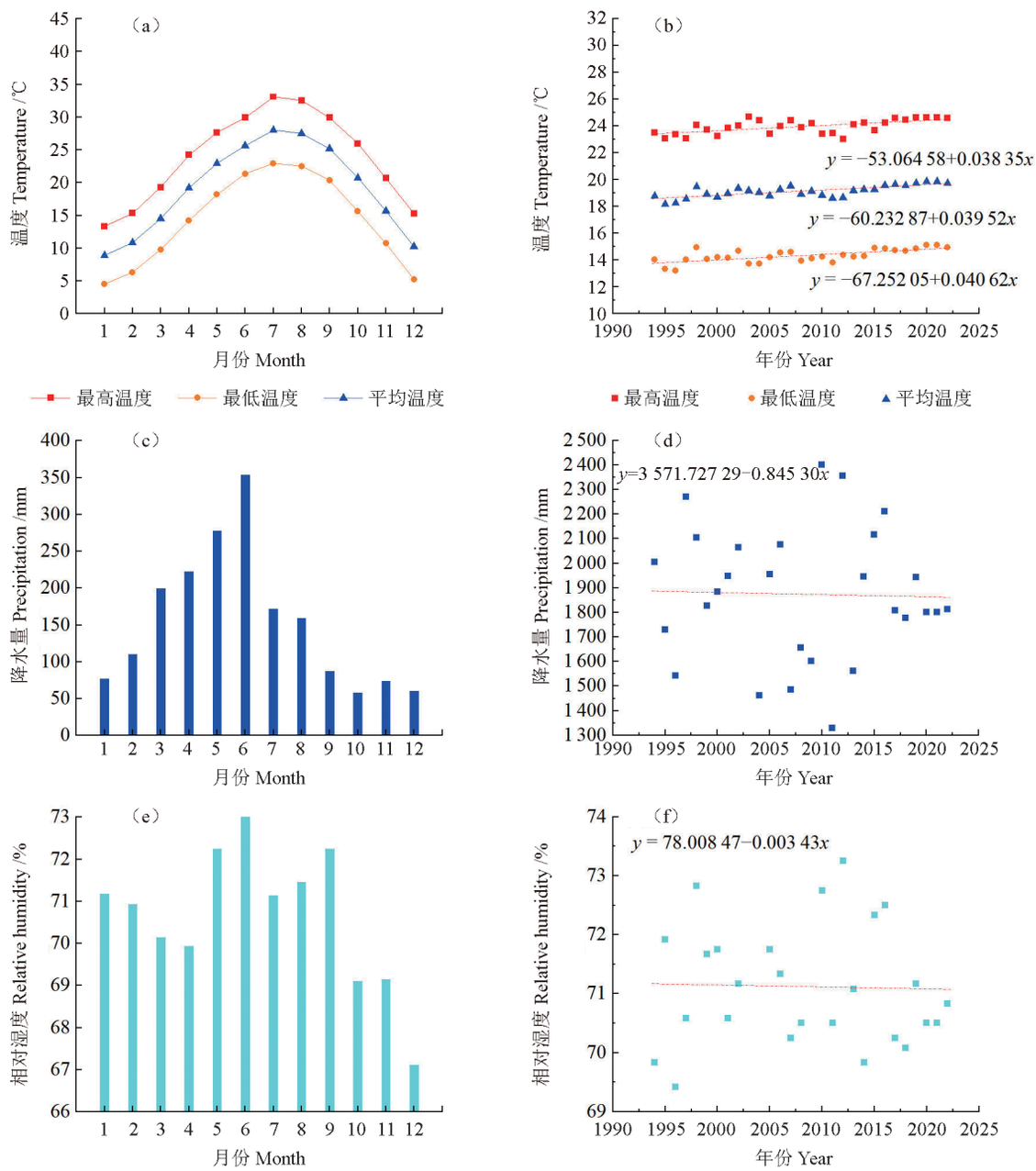


图 1　1992—2022 年福建将乐气候因子变化

Fig. 1　Variation of climatic factors in Jiangle, Fujian from 1992 to 2022

基于上述气候数据，采用如下方法计算标准化降水蒸散指数（Standardized precipitation evapotranspiration index，SPEI，I_{SPE}）[16]。

采用 Thornthwaite 法计算潜在蒸散量（Potential evapotranspiration，PET，E_P），公式为：

$$E_{Pi}=16.0\times\left(\frac{10T_i}{H}\right)^A; \tag{1}$$

$$A=6.75\times10^{-7}H^3-7.71\times10^{-5}H^2+1.792\times10^{-2}H+0.49; \tag{2}$$

$$H=\sum_{i=1}^{12}H_i=\sum_{i=1}^{12}\left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}。 \tag{3}$$

式中：E_{Pi} 为月潜在蒸散量；H 为年热量指数；A 为与年热量指数 H 相关的计算系数；T_i 为月平均气温。

逐月降水量与潜在蒸散量的差值计算公式为：

$$D_i=P_i-E_{Pi}。 \tag{4}$$

式中：D_i 为降水量与蒸散量的差值；P_i 为月降水量；E_{Pi} 为月潜在蒸散量。

采用 log-logistic 概率分布对 D_i 进行拟合：

$$F(X)=[1+(\frac{\alpha}{X-r})^{\beta}]^{-1}。 \tag{5}$$

标准化：

$$P=1-F(X)。 \tag{6}$$

当累积概率 $P\leqslant0.5$ 时：

$$w=\sqrt{-2\ln(P)}; \tag{7}$$

$$I_{SPE}=w-\frac{c_0+c_1w+c_2w^2}{1+d_1w+d_2w^2+d_3w^3}。 \tag{8}$$

当累积概率 $P>0.5$ 时：

$$w=\sqrt{-2\ln(1-P)}; \tag{9}$$

$$I_{SPE}=-(w-\frac{c_0+c_1w+c_2w^2}{1+d_1w+d_2w^2+d_3w^3})。 \tag{10}$$

式中：$F(X)$ 为 log-logistic 概率分布累积函数；w 为概率加权；P 为标准化分布函数；α 为尺度参数；β 为形状参数；r 为位置参数；d_1=1.432 788；d_2=0.189 269；d_3=0.001 308；c_0=2.515 517；c_1=0.802 853；c_2=0.010 328。

参照李瑞蓉等 [17] 的方法将 SPEI 划分为不同的干旱等级，将 $I_{SPE}\leqslant-1.0$ 记为干旱事件。从图 2 可以看出，季节干旱事件发生在 1997 年的冬季（12—次年 2 月）、2004 年一整年（1—12 月）以及 2011 年春季、夏季及初秋（3—9 月），且 2011 年的干旱为重旱（$I_{SPE}\leqslant-2.0$）[18]。

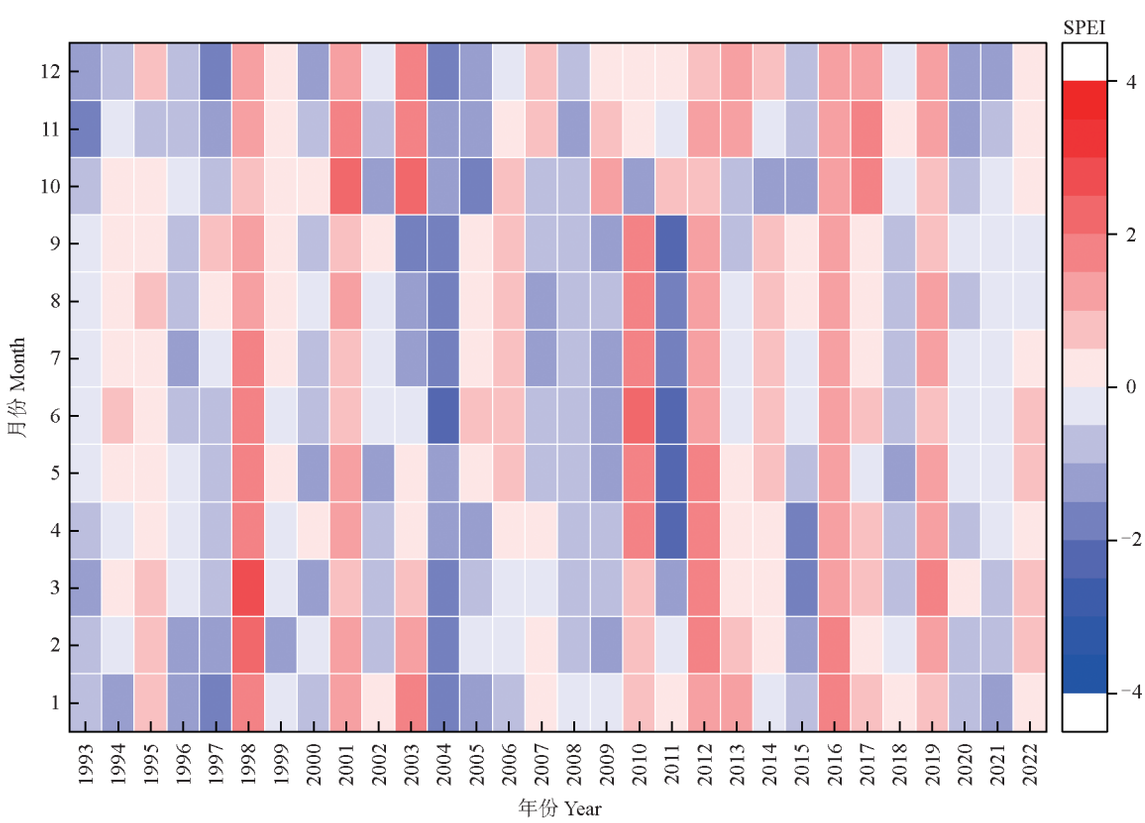


图 2　1993—2022 年福建将乐 SPEI 变化

Fig. 2　Variation of SPEI in Jiangle, Fujian from 1993 to 2022

1.3 野外采样及处理

2024 年 7 月在福建省将乐国有林场开展杉木树芯样本采集工作，样地基本情况如表 1 所示。严格遵循树木年轮学规范布设样地 [6]，共设置 23 块 20 m×30 m 的标准样地，每块样地选取优势木、平均木和被压木各 3 株作为对象树，合计初选 207 株杉木。选择距离对象木最近的 4 株杉木作为竞争木，测量二者之间的距离并分别记录对象木和竞争木的胸径、树高、冠幅。使用内径 5.15 mm 的生长锥在树干基部 1.3 m 高度处实施钻取操作。每株对象木采集 1 个树芯样本，共获取 207 个杉木树芯标本。严格按照常规树木年代学的方法对所有带回实验室的树芯样条开展预处理工作。经预处理后剔除断裂及破碎的不合格样本，最终保留 194 根年轮清晰且结构完整的有效树芯样本。

表 1 样地基本情况
Table 1 General situation of sampling sites

样地数 Number of sample plots	样芯数 Number of cores	海拔 Elevation /m	坡度 Slope /(°)	经度 Longitude	纬度 Latitude
23	207	240±30	25±5	117°26′51″ ～ 117°43′53″ E	26°39′27″ ～ 26°43′56″ N

1.4 研究方法

本研究采用 Python 3.12 软件对不同竞争指数下的杉木树轮宽度指数标准年表与 60 个气象指标进行 Pearson 相关性分析，分析气候因子对不同竞争强度下杉木径向生长的影响。运用多元逐步回归方法剔除多重共线性严重的气候因子（方差膨胀因子大于 5），进而建立不同竞争指数组的杉木生长模型。

1.5 数据处理

1.5.1 竞争指数

综合竞争指数（Comprehensive competition index，CCI）模型可以同时考虑多个因素，能更准确地衡量树木间的竞争程度 [19]。本研究利用综合竞争指数模型，选取与对象木距离最近的 4 棵树来计算竞争指数 [20]。其函数为：

$$I_{CCi}=\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{D_j H_j C_{Wj}}{D_i H_i C_{Wi}}\right)\left(\frac{1}{L_{ij}}\right)。\quad(11)$$

式中：I_{CCi} 表示对象木的综合竞争指数；D_j 表示竞争木的胸径；H_j 表示竞争木的树高；C_{Wj} 表示竞争木的冠幅；D_i 表示对象木的胸径；H_i 表示对象木的树高；C_{Wi} 表示对象木的冠幅；L_{ij} 表示对象木与竞争木之间的距离。

将所有杉木按照四分位法分为低竞争指数组、中竞争指数组和高竞争指数组 [21]，结果如表 2 所示。

1.5.2 杉木年轮年表的建立

采用 LinTab5 型年轮分析器测量年轮宽度，测量精度 0.001 mm；利用 COFECHA 程序 [22] 校验交叉定年质量，剔除定年偏差显著、与主序列关联度低的样芯，最终筛选出 171 根主序列一致的杉木树芯。依托 R 语言中的“dplR”包 [23] 开展年表构建工作，为排除非气候因素引发的生长波动，处理过程中选用负指数函数完成去趋势操作。

2 结果与分析

2.1 不同竞争指数组的福建杉木标准年表特征分析

3 组竞争指数组的福建杉木标准年表主要特征指标如表 3 所示。其中，低竞争指数组的公共区间是 1993—2022，中竞争指数组的公共区间是 1995—2022，高竞争指数组的公共区间是 1996—2022。各组总体样本解释量均大于 0.85。其中，中竞争指数组总体样本解释量最高，为 0.965 5，低竞争指数组为 0.907 2，高竞争指数组为 0.937 5，说明这 3 个年表可代表杉木总体生长趋势。样芯间平均相关系数较低，说明该组杉木生长一致性较差，受环境异质性影响较大。此外，各年表的平均敏感

表 2 不同竞争指数组杉木的林分特征
Table 2 Stand characteristics of Chinese fir under different competition indices groups

竞争指数组 Competition index group	平均树龄 Average age /a	平均树高 Average tree height /m	平均胸径 Average DBH /cm	平均冠幅 Average crown width /m²	竞争指数 Competition index
低竞争指数组 Low competition index group	18.42±3.28	12.48±3.09	19.91±5.25	2.92±0.79	1.27±0.30
中竞争指数组 Medium competition index group	18.01±3.87	14.64±3.19	20.29±5.18	3.00±0.96	2.46±0.42
高竞争指数组 High competition index group	16.45±4.37	15.61±2.47	14.67±3.82	2.08±0.64	5.58±2.51

表 3　标准年表的主要特征指标
Table 3　The main indices of the standard chronology

竞争指数组 Competition index group	公共区间 Common period	样芯数 Number of cores	平均敏感度 Mean sensitivity	标准差 Standard deviation	样芯间平均相关系数 Mean inter-series correlation	信噪比 Signal-to-noise ratio	总体样本解释量 Expressed population signal
低竞争指数组 Low competition index group	1993—2022	45	0.243 1	0.114 7	0.225 6	6.385 9	0.907 2
中竞争指数组 Medium competition index group	1995—2022	82	0.212 2	0.184 3	0.223 9	6.727 9	0.965 5
高竞争指数组 High competition index group	1996—2022	44	0.238 5	0.196 7	0.191 7	6.160 4	0.937 5

度均超 0.2，信噪比均大于 5，说明所建 3 个年表质量较高，并且包含较丰富的气候信息 [24]。

对所测样本数据采用负指数函数进行去趋势处理后，最终得到各个不同竞争指数组的杉木树轮宽度指数标准年表（图 3）。3 组年表的时间跨度均在 30 a 左右，年表整体变化趋势基本一致，树轮宽度指数均在 1 左右。在 2001—2004 年、2006—2008 年树轮宽度指数有减小趋势，2002 年最低值为 0.958 6，2007 年最低值为 0.949 9；在 1997—2000 年、2008—2013 年树轮宽度指数有增大趋势，2000 年最高值为 1.162 1，2009 年最高值为 1.193 9。

2.2　不同竞争指数组的福建杉木径向生长与气候因子的相关性

基于不同竞争强度的福建杉木树轮宽度指数标准年表，对上年 10 月至当年 9 月（杉木生长季为 2—9 月）的平均温度、最低温度、最高温度、降水量、相对湿度及标准化降水蒸散指数开展 Pearson 相关性分析，结果见图 4。高竞争指数组杉木径向生长与上年 10 月降水量、当年 3 月标准化降水蒸散指数呈极显著正相关（$P < 0.01$），与上年 10 月最高温度、当年 8 月相对湿度呈极显著负相关（$P < 0.01$），与上年 10 月相对湿度和标准化降水蒸散指数、当年 1 月标准化降水蒸散指数、当年 2 月降水量和标准化降水蒸散指数、当年 4 月最高温度、当年 7 月最低温度和平均温度、当年 8 月最高温度和平均温度呈显著正相关（$P < 0.05$），与当年 8 月降水量呈显著负相关（$P < 0.05$）。中竞争指数组杉木径向生长与当年 1 月相对湿度呈极显著负相关（$P < 0.01$），与当年 3 月、4 月、9 月最低温度和平均温度呈显著正相关（$P < 0.05$）。低竞争指数组杉木径向生长与上年 10 月平均温度以及当年 1 月最高温度、最低温度、平均温度呈显著正相关（$P < 0.05$）。综上，高竞争指数组杉木径向生长对气候因子的响应程度高于中、低竞争指数组。

为排除其他气候因子的干扰，精准揭示气候因子同杉木径向生长的相互作用机理，进一步针对不同竞争指数组杉木径向生长与气候因子开展偏相关性分析（图 5）。高竞争指数组杉木径向生长与当年 3 月和 5 月的降水量、当年 5 月标准化降水蒸散指数、当年 6 月最高温度和平均温度呈

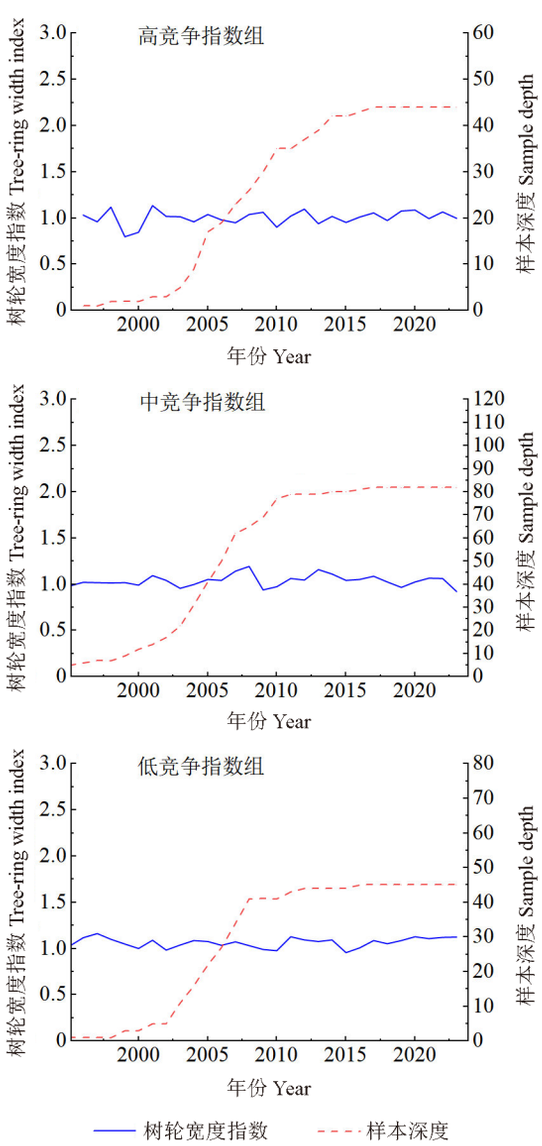
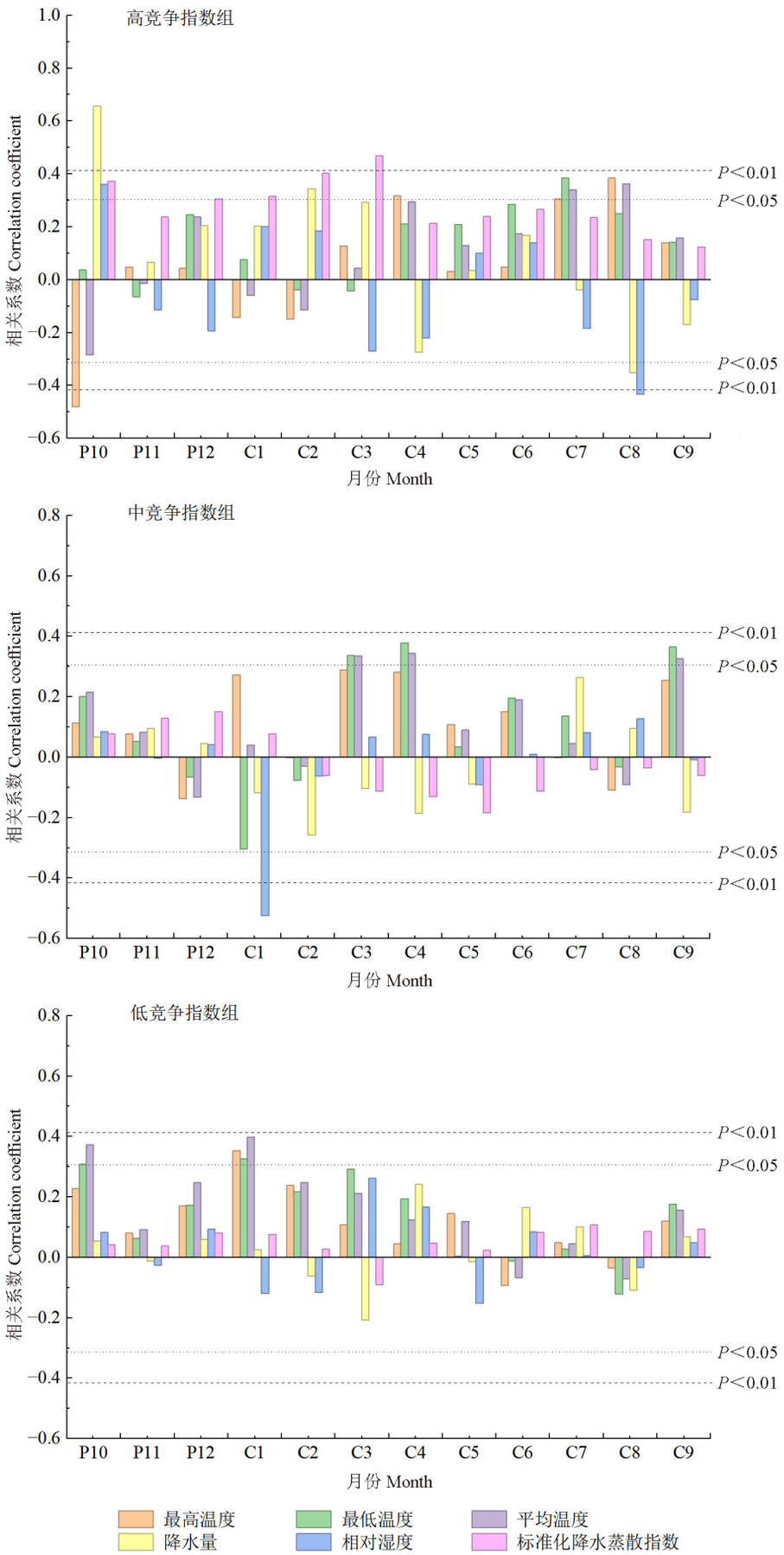


图 3　不同竞争指数组杉木标准年表及样本深度
Fig. 3　Standard chronology and sample depth of *Cunninghamia lanceolata* under different competition indices group



P 指上年；C 指当年。下同。P refers to the previous year; C refers to the current year. The same below.

图 4 不同竞争指数组杉木径向生长与气候因子的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between radial growth of *Cunninghamia lanceolata* and climatic factors under different competition indices

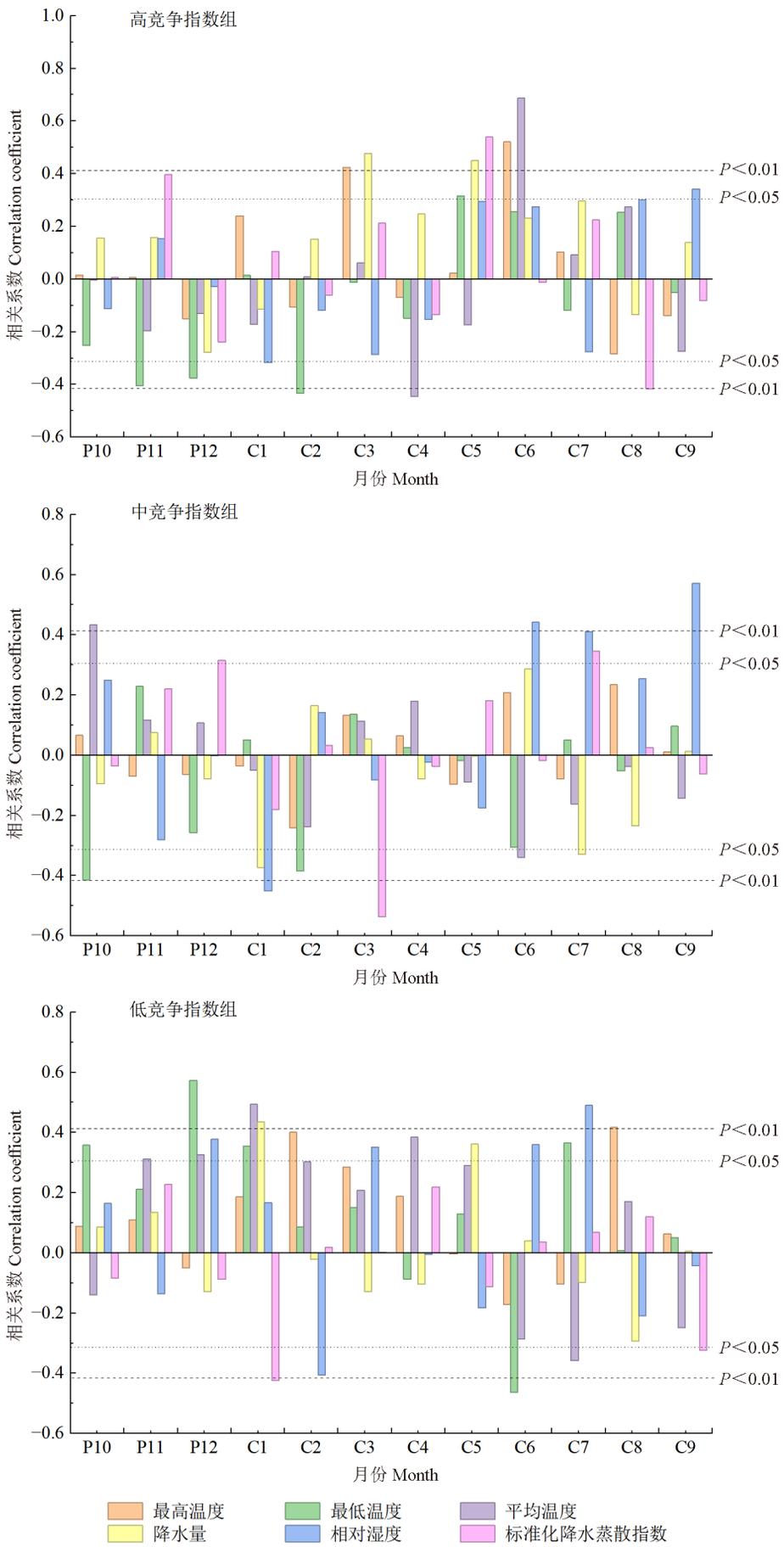


图 5　不同竞争指数下杉木径向生长与气候因子的偏相关性分析

Fig. 5　Partial correlation analysis between radial growth of *Cunninghamia lanceolata* and climatic factors under different competition indices

极显著正相关（$P < 0.01$），与当年 2 月最低温度、当年 4 月平均温度呈极显著负相关（$P < 0.01$），与上年 11 月标准化降水蒸散指数、当年 3 月最高温度呈显著正相关（$P < 0.05$），与上年 11 月和 12 月最低温度、当年 8 月标准化降水蒸散指数呈显著负相关（$P < 0.05$）。中竞争指数组杉木径向生长与上年 10 月平均温度以及当年 6 月、7 月、9 月相对湿度呈极显著正相关（$P < 0.01$），与上年 10 月最低温度、当年 1 月相对湿度、当年 3 月标准化降水蒸散指数呈极显著负相关（$P < 0.01$），与上年 12 月、当年 7 月标准化降水蒸散指数呈显著正相关（$P < 0.05$），与当年 1 月和 7 月降水量、当年 2 月最低温度、当年 6 月最低温度和平均温度呈显著负相关（$P < 0.05$）。低竞争指数组杉木径向生长与上年 12 月最低温度、当年 1 月平均温度和降水量、当年 7 月相对湿度、当年 8 月最高温度呈极显著正相关（$P < 0.01$），与当年 1 月标准化降水蒸散指数、6 月最低温度呈极显著负相关（$P < 0.01$），与上年 10 月最低温度、当年 1 月最低温度、7 月最低温度、上年 12 月平均温度、当年 4 月平均温度、当年 3 月相对湿度、6 月相对湿度呈显著正相关（$P < 0.05$），与当年 2 月相对湿度、7 月平均温度、9 月标准化降水蒸散指数呈显著负相关（$P < 0.05$）。

2.3 不同竞争指数组福建杉木对气候因子的响应

为了进一步分析福建杉木径向生长与气候因子的相关性，从上年 10 月至当年 9 月的逐月最高温度、最低温度、平均温度、降水量、相对湿度等 60 个气候因子中挑选出与杉木树轮宽度指数显著相关的因子，结果见表 4。

表 4 与杉木径向生长显著相关的气候因子

Table 4 Climatic factors significantly correlated with the radial growth of *Cunninghamia lanceolata*

竞争指数组 Competition index group	显著相关的气候因子 Significantly correlated climatic factors
高竞争指数组 High competition index group	上年 10 月最高温度、当年 4 月最高温度、当年 7 月最高温度、当年 8 月最高温度、当年 7 月最低温度、当年 7 月平均温度、当年 8 月平均温度、上年 10 月降水量、当年 2 月降水量、当年 3 月降水量、当年 8 月降水量、上年 10 月相对湿度、当年 8 月相对湿度
中竞争指数组 Medium competition index group	当年 1 月最高温度、当年 3 月最高温度、当年 4 月最高温度、上年 10 月最低温度、当年 1 月最低温度、当年 3 月最低温度、当年 4 月最低温度、当年 9 月最低温度、当年 3 月平均温度、当年 4 月平均温度、当年 9 月平均温度、当年 2 月降水量、当年 1 月相对湿度
低竞争指数组 Low competition index group	当年 1 月最高温度、上年 10 月最低温度、当年 1 月最低温度、当年 3 月最低温度、上年 10 月平均温度、上年 12 月平均温度、当年 1 月平均温度、当年 2 月平均温度、当年 3 月降水量、当年 3 月相对湿度、当年 5 月相对湿度

以此为基础，采用逐步筛选法进行变量筛选，构建线性回归模型（表 5）。各组别标准年表对气候的响应存在差异，其中高竞争指数组与上年 10 月降水量、当年 2 月降水量、当年 4 月最高温度呈极显著相关（$P < 0.01$）；中竞争指数组与当年 3 月最高温度、当年 3 月最低温度、当年 9 月平均温度、当年 9 月最低温度和当年 4 月最低温度呈极显著相关（$P < 0.01$）；低竞争指数组与上年 10 月平均温度、上年 12 月平均温度呈极显著相关（$P < 0.01$）。

所建立模型的 VIF < 5 表示无多重共线性问题，5 ≤ VIF < 10 表示存在中等程度共线性，VIF ≥ 10 表示存在严重共线性。从表 5 可以看出，高、低竞争指数组构建的模型变量不存在严重的多重共线性，中竞争指数组内当年 9 月平均温度和当年 9 月最低温度存在中等程度共线性，因此在最终回归方程中将其删除。回归方程统计信息见表 6，Y_1、Y_2、Y_3 分别指高、中、低竞争指数组的年轮宽度指数；a_1、b_1、c_1、d_1、e_1、f_1 分别指上年 10 月降水量、当年 2 月降水量、当年 7 月最低温度、上年 10 月相对湿度、当年 4 月最高温度、当年 3 月降水量；a_2、b_2、c_2 分别指当年 3 月最高温度、当年 3 月最低温度、当年 4 月最低温度；a_3、b_3、c_3 分别指上年 10 月平均温度、上年 12 月平均温度、当年 3 月最低温度。由表 6 可知，高、中、低 3 组竞争指数组的模型 R^2_{adj} 分别为 0.772、0.518、0.363，并且各组模型及其参数均达到显著水平（$P < 0.05$）。

3 讨 论

3 组杉木标准年表的整体变化趋势基本一致，树轮宽度指数稳定在 1.0 左右，说明研究区杉木生长连续、受极端干扰少，具备提取可靠年轮气候信号的基础条件。3 组年表平均敏感度均大于 0.2，结合亚热带区域气候温和、季节波动缓和的气候背景，可判定杉木年轮能有效捕捉气候因子变化，进一步印证样本适用于树木气候学分析 [25]。年表中信噪比、总体样本解释量均达到树轮研究通用

表 5　不同竞争指数组标准年表的逐步回归模型相关统计量
Table 5　Stepwise regression model correlation statistics for standard chronology of different competition index groups

竞争指数 Competition index	变量 Variable	估计值 Estimated value	标准化系数 Standardized coefficient	标准误 Standard error	*T*	*P*	VIF	显著性 Significance
高竞争指数组 High competition index group	截距	1.130 1		0.419 5	2.694 0	＜ 0.01		**
	上年 10 月降水量	0.000 6	0.145 9	0.000 2	2.595 8	＜ 0.01	2.32	**
	当年 2 月降水量	0.000 6	0.161 0	0.000 2	3.261 1	＜ 0.01	1.79	**
	当年 7 月最低温度	−0.043 1	−0.115 5	0.017 6	−2.448 1	＜ 0.05	1.64	*
	上年 10 月相对湿度	0.004 7	0.111 9	0.002 3	2.060 1	＜ 0.05	2.17	*
	当年 4 月最高温度	0.016 8	0.118 9	0.005 8	2.904 9	＜ 0.01	1.23	**
	当年 3 月降水量	0.000 3	0.092 8	0.000 1	2.056 9	＜ 0.05	1.50	*
中竞争指数组 Medium competition index group	截距	0.828 5		0.130 1	6.366 2	＜ 0.01		**
	当年 3 月最高温度	0.036 2	0.339 7	0.004 3	8.519 3	＜ 0.01	2.45	**
	当年 3 月最低温度	−0.024 6	−0.196 7	0.004 6	−5.333 0	＜ 0.01	2.10	**
	当年 9 月平均温度	−0.066 8	−0.397 6	0.011 2	−5.976 1	＜ 0.01	6.83	**
	当年 9 月最低温度	0.061 0	0.297 0	0.013 0	4.708 3	＜ 0.01	6.14	**
	当年 4 月最低温度	0.013 8	0.097 5	0.004 2	3.2949	＜ 0.01	1.35	**
低竞争指数组 Low competition index group	截距	1.571 0		0.158 5	9.914 4	＜ 0.01		**
	上年 10 月平均温度	−0.042 3	−0.199 6	0.008 3	−5.098 5	＜ 0.01	1.25	**
	上年 12 月平均温度	0.023 1	0.128 1	0.006 5	3.577 9	＜ 0.01	1.05	**
	当年 3 月最低温度	0.014 1	0.095 5	0.005 6	2.493 8	＜ 0.05	1.20	*

表 6　回归方程统计信息
Table 6　Statistical information of regression equation

竞争指数 Competition index	回归模型 Regression model	R_{adj}^2
高竞争指数组 High competition index group	Y_1=1.130 1+0.000 6a_1+0.000 6b_1−0.043 1c_1+0.004 7d_1+0.016 8e_1+0.000 3f_1	0.772
中竞争指数组 Medium competition index group	Y_2=0.828 5+0.036 2a_2−0.024 6b_2+0.013 8c_2	0.518
低竞争指数组 Low competition index group	Y_3=1.571 0−0.042 3a_3+0.023 1b_3+0.014 1c_3	0.363

合格标准，气候信号强度显著高于非气候干扰信号，蕴含清晰可分离的气候信号 [26]。综上，该林场杉木样本适宜作为亚热带地区未来气候重建研究的理想材料。

高竞争指数组杉木径向生长与上年非生长季 10 月的降水量和最高温度分别呈极显著正相关和极显著负相关，说明杉木径向生长对降水和高温胁迫存在滞后效应，可能是上年 10 月的过高温度加速了树木呼吸消耗，降低了养分积累效率，进而抑制了后续生长季的径向生长；而上年 10 月的降水可通过改善土壤水分储备，促进养分吸收，为后续生长季的径向生长提供有利条件，这与孔露露等 [27] 对亚热带杉木人工林的研究结果相同。该研究指出，杉木径向生长普遍受气候因子的“滞后效应”影响，降水对径向生长的促进作用在气温突变后更为显著。高竞争指数组杉木径向生长与当年生长季 2—9 月的标准化降水蒸散指数呈正相关，说明杉木径向生长对生长季水分条件高度敏感，适宜的水分供给是促进其径向生长的关键因素。孟盛旺等 [28] 在杉木生长季动态研究中也明确指出，生长季关键期的高湿度会通过影响林分微环境，加剧杉木生长的环境胁迫，与本研究中 8 月高竞争指数组杉木相对湿度对径向生长的抑制效应高度契合。

中竞争指数组杉木径向生长与当年 1 月的相对湿度呈极显著负相关，可能是因为杉木在冬季非生长季对高湿度环境敏感，过高的相对湿度会降低土壤透气性，抑制根系代谢，进而制约后续生长季的径向生长潜力，这与中部亚热带杉木林相关研究 [29] 高度一致，冬季过高的相对湿度可通过改变树木生理状态，间接削弱后续生长季的生长活力。中竞争指数组杉木径向生长与生长季的标准化降水蒸散指数呈负相关，与非生长季的标准化降水蒸散指数呈正相关，说明杉木对水分条件的响应具有显著的季节分化效应，这可能是生长季水分盈余过多，易导致林分通风透光变差、土壤供氧不足，进而抑制树木径向生长；非生长季充足的水分可改善土壤水分储备，有效缓解后

续生长季的水分竞争压力，为径向生长提供有利条件，这与曾林辉等 [30] 关于亚热带马尾松与杉木的对比研究得出的结论一致。

低竞争指数组杉木径向生长与非生长季的温度以及生长季前期的温度呈正相关，这可能是因为低竞争环境能大幅降低林分中杉木个体间的资源争夺强度，为单株杉木预留更充足的光照、土壤养分和生长空间，减少邻体带来的生长抑制。非生长季适度增温可有效减轻低温冻害对杉木芽体萌发能力和根系活力的损伤，提升杉木在春季萌动前的养分储备水平，为后续生长积蓄能量 [31]；生长季前期的适宜温度能显著提升杉木光合关键酶的活性，促进叶绿素合成，进而加快光合作用进程，增加光合产物积累 [32]。杉木在低竞争环境下温度对其生长的促进效应占主导地位：适宜温度可加速树木光合代谢，促进形成层分裂与木质部积累，因低竞争环境下无密集邻体遮挡，能让杉木获得更充足的光合有效辐射，既为光合代谢提供基础，又削弱了因温度升高可能加剧的资源争夺压力，进一步强化生长促进机制，使温度对生长的正向作用得以充分体现 [33]。且低竞争环境中杉木根系分布空间更广阔，养分与水分获取效率更高，可保障温度升高时形成层分裂和木质部发育的养分供给 [34]，让温度对杉木径向生长的正向驱动效应得以充分释放，强化径向生长与温度的正相关关系。

模型拟合结果表明，不同竞争强度下杉木对气候变化的响应存在显著差异，其中高竞争指数组在逐步回归分析中筛选出的显著影响因子数量最多，模型解释力最强，气候敏感性模拟效果更优。相比之下，中、低竞争指数组经过相同统计方法筛选后，进入最终回归模型的环境与生理因子数量较少，模型拟合优度低于高竞争指数组。这一结果表明，处于高强度竞争环境中的树木往往表现出更强的气候敏感性 [35]，其生长动态更容易受到气温、降水、干旱指数等气候因子的影响。在资源匮乏或环境压力较大的条件下，种间竞争的作用增强，生物对环境变化的响应也更加敏感。在竞争强度大的林分中，树木不仅面临外部气候压力，还需应对内部资源竞争，双重压力使其生理状态更易受气候变异影响 [36]。在地中海地区的一项长期观测研究中发现，密植林分中的松树在干旱年份生长衰退幅度显著高于稀疏林分，且其年轮与气象数据的相关性更强，进一步验证了竞争会放大树木对气候的敏感性 [37]。

4 结 论

本研究通过分析福建省将乐国有林场杉木人工林在不同竞争强度下的径向生长动态及其对气候因子的响应机制，揭示竞争压力在调节树木气候敏感性中的关键作用。研究发现，在高竞争环境下，杉木个体虽面临更大的资源争夺压力，但其生长过程对气候波动表现出更强的响应敏感性，相关气候因子在统计模型中具有更高的解释力和显著性。这一现象表明，高强度竞争环境中的杉木往往具备更活跃的生理代谢能力，其生长节律更紧密地耦合于外部气候条件的变化，因而也更容易受到极端气候事件的影响。

针对不同竞争强度的杉木林分，应实施差异化的营林管理策略。在竞争强度大的林分中，树木对气候因子响应敏感，建议通过适度间伐降低密度，改善通风透光条件，缓解资源竞争，提升林木抗逆性；中竞争指数组的林分对水分和温度变化响应明显，应重点调控关键时期的水分供应，如 10 月降水敏感期应加强水分管理，并结合冠层调控以提高水分利用效率；竞争强度较小的林分，径向生长受温度的促进作用显著，宜采取保育措施维持适宜温湿环境，以促进径向生长。总体上，应根据竞争强度分级施策，优化林分结构，增强杉木对气候变化的适应能力，实现可持续经营。

本研究仍存在一定局限性：1）每组样本在年龄结构、立地条件等方面的分布尚不够均衡，尤其高竞争指数组样本相对集中于中龄林阶段，可能影响跨林龄比较的代表性。2）研究区域局限于将乐国有林场单一地理单元，气候背景与土壤类型较为均质。3）当前模型主要依赖气象站宏观数据，缺乏微气候的精细化监测，限制了对树木实际生存环境的精准刻画。

未来研究可在以下方面进一步深化：1）扩大样地范围与样本量，开展跨区域、多林型对比研究；2）引入生理生态指标，从机制层面解析竞争如何调控气候响应；3）结合长期定位观测与模拟试验，探究在未来气候变化情景下，不同竞争格局下的人工林可持续生产力阈值与适应性管理路径。

参考文献：

[1] Ameray A, Bergeron Y, Valeria O, et al. Forest carbon management: a review of silvicultural practices and management strategies across boreal, temperate and tropical forests[J]. Current Forestry Reports,2021,7:245-266.

[2] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large and persistent

carbon sink in the world's forests[J]. Science,2011,333:988-993.

[3] Yang H J, Tao W J, Ma Q M, et al. Compound hot extremes exacerbate forest growth decline in dry areas but not in humid areas in the northern hemisphere[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2023,341:109663.

[4] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests[J]. Forest Ecology and Management,2010,259(4):660-684.

[5] Lü Z Q, Duan A G, Zhang J G. Influence of forest age, tree size, and climate factors on biomass and carbon storage allocation in Chinese fir forests[J]. Ecological Indicators,2024,163:112096.

[6] 王章勇 , 杨保 , 秦春 , 等 . 树木径向生长机制监测和模拟研究进展 [J]. 中国沙漠 ,2011,31(3):780-787.
Wang Z Y, Yang B, Qin C, et al. Research progress of the monitor and model of stem radius growth mechanism[J]. Journal of Desert Research,2011,31(3):780-787.

[7] 林小乔 , 许玲玲 , 刘沛荣 , 等 . 亚热带杉木径向生长对气候因子的响应 [J]. 生态学报 ,2024,44(4):1633-1646.
Lin X Q, Xu L L, Liu P R, et al. Response of stem radial growth of *Cunninghamia lanceolata* to climatic variables in the subtropic region[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(4):1633-1646.

[8] Koulelis P P, Solomou A, Fassouli V, et al. Radial growth and climatic influences on Greek fir: tree ring analysis from Kirphi mountain, central Greece[J]. Folia Oecologica,2025,52(2):113-123.

[9] Jiang X Y, Huang J G, Stadt K J, et al. Spatial climate-dependent growth response of boreal mixedwood forest in western Canada[J]. Global and Planetary Change,2016,139:141-150.

[10] 宋天阳 . 杉木径向生长随林龄变化及其对气候和竞争的响应 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2022:1-51.
Song T Y. Effects of competition and climate on monthly radial growth of *Cunninghamia lanceolata* trees at different stand ages[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022:1-51.

[11] 史月冬 , 郑宏 , 叶代全 , 等 . 杉木生长性状的空间与竞争效应及其对遗传参数估计的影响 [J]. 林业科学 ,2022,58(5):75-84.
Shi Y D, Zheng H, Ye D Q, et al. Spatial and competition effects for growth traits of Chinese fir and their impacts on estimations of genetic parameters[J]. Scientia Silvae Sinicae,2022,58(5):75-84.

[12] Coomes D A, Allen R B. Effects of size, competition and altitude on tree growth[J]. Journal of Ecology,2007,95:1084-1097.

[13] 康雨昌 , 刘滨辉 , 任柬宇 , 等 . 竞争对红松树轮生长与气候因子关系的影响 [J]. 东北林业大学学报 ,2019,47(11):6-10,22.
Kang Y C, Liu B H, Ren J Y, et al. Effect of competition on tree ring growth and climate factors of *Pinus koraiensis*[J]. Journal of Northeast Forestry University,2019,47(11):6-10,22.

[14] SeMyung Kwon, 潘磊磊 , 时忠杰 , 等 . 不同竞争强度下的沙地樟子松天然林树木径向生长及其气候响应 [J]. 生态学杂志 , 2019,38(7):1962-1972.
Kwon S, Pan L L, Shi Z J, et al. Radial growth of Mongolian pine and its response to climate at different competition intensities[J]. Chinese Journal of Ecology,2019,38(7):1962-1972.

[15] Wang T L, Wang G Y, Innes J L, et al. ClimateAP: an application for dynamic local downscaling of historical and future climate data in Asia Pacific[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering,2017,4(4):448-458.

[16] 易科帆 , 吝海霞 , 秦国鹏 , 等 . 基于像元化 SPEI 的新疆气象干旱时空变化特征 [J]. 中国农业气象 ,2025,46(7):1026-1038.
Yi K F, Lin H X, Qin G P, et al. Spatiotemporal variation characteristics of meteorological drought in Xinjiang based on pixel-scale SPEI[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2025,46(7): 1026-1038.

[17] 李瑞蓉 , 董灵波 . 不同竞争强度下长白落叶松人工林单木径向生长对干旱适应性及生态弹性的差异 [J]. 生态学报 ,2025, 45(23):11753-11762.
Li R R, Dong L B. Differences in drought adaptability and ecological resilience of radial growth of individual-tree in *Larix olgensis* plantation under different competition intensities[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(23):11753-11762.

[18] 李伟光 , 易雪 , 侯美亭 , 等 . 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究 [J]. 中国生态农业学报 ,2012,20(5):643-649.
Li W G, Yi X, Hou M T, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2012,20(5):643-649.

[19] 马佳欣 , 孙玉军 , 朱兆廷 . 两种竞争指数对杉木生长和生物量评估的影响 [J]. 北京林业大学学报 ,2025,47(5):72-82.
Ma J X, Sun Y J, Zhu Z T. Effects of two types of competition indices on growth and biomass assessment of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Journal of Beijing Forestry University,2025,47(5): 72-82.

[20] 惠刚盈 , 胡艳波 , 赵中华 , 等 . 基于交角的林木竞争指数 [J]. 林业科学 ,2013,49(6):68-73.
Hui G Y, Hu Y B, Zhao Z H, et al. A forest competition index based on intersection angle[J]. Scientia Silvae Sinicae,2013,49(6): 68-73.

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

[22] 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.

[23] 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.

[24] 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.

[25] Liu X S, Nie Y Q, Wen F. Seasonal dynamics of stem radial increment of *Pinus taiwanensis* Hayata and its response to environmental factors in the Lushan mountains, southeastern China[J]. Forests,2018,9:387.

[26] 蔡礼蓉 , 匡旭 , 房帅 , 等 . 长白山阔叶红松林 3 个常见树种径向生长的影响因素 [J]. 应用生态学报 ,2017,28(5):1407-1413.
Cai L R, Kuang X, Fang S, et al. Factors influencing tree radial growth of three common species in broad-leaved Korean pine mixed forests in Changbai mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(5):1407-1413.

[27] 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.

[28] 孟盛旺 , 杨风亭 , 戴晓琴 , 等 . 杉木径向生长动态及其对季节性干旱的响应 [J]. 应用生态学报 ,2021,32(10):3521-3530.
Meng S W, Yang F T, Dai X Q, et al. Radial growth dynamics of Chinese fir and its response to seasonal drought[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(10):3521-3530.

[29] 黄雅奇 . 中亚热带杉木人工林径向生长及其与气象因子的关系 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2020:1-65.
Huang Y Q. Radial growth of *Cunninghamia lanceolata* plantation in the middle subtropical zone and its relationship with meteorological factors[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2020:1-65.

[30] 曾林辉 , 周蕾 , 寇亮 , 等 . 基于生长测量仪监测的亚热带地区马尾松多时间尺度径向变化及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报 ,2023,43(16):6637-6648.
Zeng L H, Zhou L, Kou L, et al. Dendrometer-derived radial variations of *Pinus massoniana* at multiple time scales and its response to environmental factors in subtropical region[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(16):6637-6648.

[31] 叶旺敏 , 熊德成 , 杨智杰 , 等 . 大气增温对杉木幼树叶片及细根生理特征的影响 [J]. 生态学报 ,2020,40(21):7681-7689.
Ye W M, Xiong D C, Yang Z J, et al. Effects of atmospheric warming on physiological characteristics of leaves and fine roots of *Cunninghamia lanceolata* saplings[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(21):7681-7689.

[32] 付豪 , 朱宁华 , 段润梅 , 等 . 温度与光照强度对红心杉幼苗光合特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2020,40(7):73-78.
Fu H, Zhu N H, Duan R M, et al. Effects of temperature and light on photosynthetic characteristics of *Cunninghamia lanceolata* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(7):73-78.

[33] Wang Z, Zhang X Q, Zhang J G, et al. Effects of stand factors on tree growth of Chinese fir in the subtropics of China depends on climate conditions from predictions of a deep learning algorithm: a long-term spacing trial[J]. Forest Ecology and Management, 2022,520:120363.

[34] 林芳馨 , 胥清利 , 曲晓宇 , 等 . 光环境差异对杉木幼林林下植被多样性及根系种间竞争的影响 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学),2024,44(5):35-43.
Lin F X, Xu Q L, Qu X Y, et al. Effects of light environment differences on understory vegetation diversity and root interspecific competition of young *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science),2024,44(5):35-43.

[35] Rozas V, Olano J M. Environmental heterogeneity and neighbourhood interference modulate the individual response of *Juniperus thurifera* tree-ring growth to climate[J]. Dendrochronologia, 2013,31:105-113.

[36] Wang K Y, Meng J, Jiang T, et al. How do climate sensitivity and physiological responses of *Populus simonii* plantations change under different competition levels?[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2026,376:110921.

[37] Bottero A, D'Amato A W, Palik B J, et al. Density-dependent vulnerability of forest ecosystems to drought[J]. Journal of Applied Ecology,2017,54:1605-1614.

[本文编校：谢荣秀]