

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7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.005

论文标题： 不同径级臭冷杉的径向生长动态及其对气候因子的响应

作　　者： 黄思瑶，王 琦，王子逍，等

收稿日期： 2025-06-30

引文格式： 黄思瑶,王琦,王子逍,等.不同径级臭冷杉的径向生长动态及其对气候因子的响应[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):47-57.

Huang S Y, Wang Q, Wang Z X, et al. Radial growth dynamics of different diameter class of *Abies nephrolepis* and its response to climate factors[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):47-57.

相关论文推荐

Recommended articles

长白山地区臭冷杉径向生长与环境因子的响应

Response of radial growth of *Abies nephrolepis* to environmental factors in Changbai mountain

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

北京西山栓皮栎人工林径向生长对干旱事件的响应

Response of radial growth of the Chinese cork oak plantation forest to drought events in Xishan mountain, Beijing

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.005
http: //qks.csuft.edu.cn

不同径级臭冷杉的径向生长动态及其对气候因子的响应

黄思瑶[1]，王　琦[1]，王子逍[2]，徐　玮[3]，向　玮[1]

（1. 北京林业大学 林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083；
2. 中国林场集团有限公司，北京 100083；3. 吉林省长白山森工集团汪清林业分公司，吉林 延吉 133200）

摘　要：【目的】阐明长白山地区不同径级臭冷杉 *Abies nephrolepis* 的径向生长动态，揭示各径级树木生长对气候因子的响应规律与差异，为气候变化背景下的森林管理提供科学依据。【方法】利用径向生长测量仪对 [15，25）cm、[25，35）cm 和 [35，45）cm 共 3 个不同径级臭冷杉的胸径进行连续监测，用零生长法确定生长季并提取径向生长序列，通过滑动相关分析探究不同径级臭冷杉日径向增量与气候因子的动态关系。【结果】1）2022 年生长季内 [25，35）cm 臭冷杉与 [15，25）cm、[35，45）cm 的臭冷杉日径向增量序列差异极显著（$P < 0.001$）。总径向生长量和平均生长速率随着径级的增大而增大，[25，35）cm 径级臭冷杉的最大生长速率最高。[25，35）cm 和 [35，45）cm 臭冷杉的最大生长速率位于生长季初期，而 [15，25）cm 臭冷杉的最大生长速率在生长季中期。2）在年内生长季中，不同径级臭冷杉的径向生长与气候因子的响应存在较强的动态一致性，但在不同阶段同气候因子关系的强弱存在差异，呈显著正负相关的气候因子不同。随着生长季的进行，各径级臭冷杉的日径向增量与平均气温和土壤温度的动态响应趋势相似。[15，25）cm 的臭冷杉径向生长受到平均气温和 10 cm 土壤温度的促进作用，而受土壤含水率和空气相对湿度的抑制作用更强；[25，35）cm 的臭冷杉径向生长与光合有效辐射的负相关性更强；[35，45）cm 的臭冷杉径向生长受到平均气温和 10 cm 土壤温度的抑制作用更强，且与饱和水汽压亏缺也呈现更强的负相关关系，表明该径级树木更易遭受温度及干旱胁迫，但其对光合有效辐射表现出更强的适应性与调节能力。【结论】臭冷杉的径向生长受多种气候因子的综合作用，且不同径级臭冷杉的生理过程和在林分中的竞争情况不同，使得它们的径向生长动态以及与气候因子的响应关系存在一定的差异。针对 [15，25）cm、[25，35）cm 和 [35，45）cm 的臭冷杉，应分别采取监测温湿度动态、病弱株健康管护及防控高温干旱胁迫等差异化保育措施，以此维持臭冷杉生长的稳定性与固碳功能。

关键词：臭冷杉；径向生长；零生长模型；气候响应；测量仪

中图分类号：S791.142　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)07-0047-11

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

Huang Siyao[1], Wang Qi[1], Wang Zixiao[2], Xu Wei[3], Xiang Wei[1]

(1.National Key Laboratory for Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.China Forest Farm Group Co., Ltd., Beijing 100083, China; 3.Wangqing Forestry Branch of Changbai Mountain Forest Industry Group, Yanji 133200, Jilin, China)

Abstract:【Objective】To clarify the radial growth dynamics of *Abies nephrolepis* across different diameter classes in the Changbai mountains, reveal the response patterns and differences in growth to climatic factors among trees of various diameter classes, and to provide a scientific basis for forest management under climate change.【Method】Three different diameter classes of [15, 25), [25, 35) and [35, 45) cm were continuously monitored by radial growth measuring instruments. The growth season was determined

收稿日期（Received）：2025-06-30　　**修订日期**（Revised）：2025-09-15
基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFD2200502-04）。
第一作者：黄思瑶（siyaoHuang@bjfu.edu.cn），硕士研究生。　　**通信作者：**向玮（wxiang@bjfu.edu.cn），教授，博士。
引文格式：黄思瑶 , 王琦 , 王子逍 , 等 . 不同径级臭冷杉的径向生长动态及其对气候因子的响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(7):47-57.
Huang S Y, Wang Q, Wang Z X, et al. Radial growth dynamics of different diameter class of *Abies nephrolepis* and its response to climate factors[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):47-57.

by the zero growth method, and the radial growth sequence was extracted. The dynamic relationship between the radial increment of different diameter classes and climate factors was explored by sliding correlation analysis.【Result】1) There was a significant difference in the daily radial increment sequence among [25, 35) cm, [15, 25) cm and [35, 45) cm in the growing season of 2022 ($P < 0.001$). The total radial growth and average growth rate increased with the increase of diameter class, and the maximum growth rate of the [25, 35) cm diameter class was the fastest. The maximum growth rates of [25, 35) cm and [35, 45) cm were at the beginning of the growing season, while the maximum growth rate of [15, 25) cm was at the middle of the growing season. 2) In the growing season of the year, there was a strong dynamic consistency between the radial growth of different diameter classes of *A. nephrolepis* and the response of climatic factors, but there were differences in the strength of the relationship with climatic factors at different stages, and the climatic factors with significant positive and negative correlations were different. As the growing season progresses, the daily radial increment of each diameter class of *A. nephrolepis* is similar to the dynamic response trend of average temperature and soil temperature. The radial growth of *A. nephrolepis* [15, 25) cm was promoted by mean air temperature and 10 cm soil temperature, and was more inhibited by soil water content and air relative humidity. The negative correlation between radial growth and photosynthetically active radiation at [25, 35) cm was stronger. The radial growth of *A. nephrolepis* [35, 45) cm was more strongly inhibited by average temperature and 10 cm soil temperature, and also showed a stronger negative correlation with saturated water vapor pressure deficit, indicating that this diameter class tree was more vulnerable to temperature and drought stress, but it showed stronger adaptability and regulation ability to photosynthetically active radiation.【Conclusion】The radial growth of *A. nephrolepis* is affected by a variety of climatic factors. The physiological processes and competition of different diameter *A. nephrolepis* are different, which makes their radial growth dynamics and the response relationship with climatic factors different. Through the study, the response dynamics of various climatic factors and the radial growth of different diameter classes of *A. nephrolepis* were obtained. Differentiated conservation measures such as monitoring temperature and humidity dynamics, paying attention to the health status of diseased and weak plants, and preventing and controlling high temperature and drought stress should be taken for [15, 25), [25, 35), and [35, 45) cm *Abies nephrolepis* to maintain growth stability and carbon sequestration.

Keywords: *Abies nephrolepis*; radial growth; zero growth model; climate response; dendrometer

随着全球气候变化加剧，极端天气事件频发，气温升高和降水模式改变等因素正在深刻影响着森林生态系统[1]。树木径向生长是树干形成层细胞活动的结果，其与气候环境变化有着密切的联系[2]。气候因素通过调节植物体内的激素水平和酶活性等内部机制，进而影响树木的生长物候（如生长起始与结束时间）、生长季长度以及生长速率，最终对树木的径向生长量产生影响[3]。然而，在树木的生长进程中，随着径级的增加，树木的生理过程会发生变化（如光合作用、水分传导等）[4]，这些变化控制着树木与气候因子之间的响应模式[5]，从而影响树木的生长表现和生态适应性。因此，在研究树木径向生长对气候变化的响应过程中，将径级差异纳入分析范畴，可更清晰地揭示气候变化对植被生长节律及相关生理生态过程的调控机制，对制定科学、具有气候适应性的森林经营管理政策具有重要的理论支撑与实践指导意义。

以往针对不同径级树木径向生长与气候因子响应关系的研究相对匮乏。现有多数研究表明，不同径级树木的径向生长存在显著差异，二者对气候的响应模式亦表现出明显区别。Weiner[6] 认为不同径级树木径向生长的差异主要归因于树木大小对其所获得的光照条件及竞争能力的影响；姜庆彪等[7] 研究认为幼树与成熟树之间存在的生理差异是导致小径级油松 *Pinus tabuliformis* 对气候条件的敏感度显著高于大径级油松的主要原因；Qiao 等[8] 研究表明，降水与温度分别是调控亚热带季风气候区小径级和大径级马尾松 *Pinus massoniana* 径向生长的关键环境因素；而对于红松 *Pinus koraiensis* 而言，小径级（10 ～ 20 cm）红松对当年平均最低气温及上一年气候更敏感，大径级（大于 40 cm）红松则对当年的平均最高气温和相对湿度变化反应更强[9]。但也有部分研究表明，不同径级树木的生长特征无显著差异，且其生长与气候因子的关联具有一致性[10-11]，这一现象主要与树种自身的生理适应性、生长策略的适配性以及对气候因子的持续响应特性等因素密切相关。因此，进一步探究气候与不同径级树木径向生长之间是否存在合理稳定的相关关系具有重要意义。

现有关于不同径级树木的径向生长与气候因子响应关系的探究，多基于树木年轮法构建标准年表开展分析[7-8,12]。该方法主要聚焦于树木年际气候敏感性分析，而缺乏短时间尺度下树木径向生长动态的相关研究。树木径向生长测量仪作为一种具备高时空分辨率的非破坏性测量系统，可在短时间尺度内实时监测树干径向变化，详细记录其与水分利用相关过程的生长特征。该设备可通过深入剖析树木短期生长过程中的生理与环境驱动因子，揭示其对年内环境变化的响应机制，弥补传统树轮生态学在短时间尺度研究上的不足，从而为解析树木与环境间的复杂关系提供更为精准的数据支撑[13-15]。

长白山位于中国北方中高纬度区域，属于温带大陆性季风气候的典型代表，对气候变化展现出高度的敏感性，是探究温带森林对全球气候变化正负反馈机制的一个理想研究区域[16]。臭冷杉 *Abies nephrolepis* 是长白山地区的主要树种，在维持森林生态系统稳定方面发挥着重要的作用。本研究以长白山样地内不同径级的臭冷杉为例，通过树木径向生长测量仪在短时间尺度上获取树木生长季内径向生长的动态规律和连续的树木径向生长时间序列，以揭示不同径级臭冷杉的径向生长差异及其与气候因子的响应关系，这有助于补充和完善现有树木生长与气候响应的相关理论，为气候变化背景下的森林管理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

金沟岭林场（43°17′～43°25′N，130°05′～130°20′E），海拔 300～1 200 m，坐落于吉林省延边州汪清县东北部。林场地形为低山丘陵，属温带大陆性季风气候，全年温差较大，年平均气温 3.9 ℃，1 月和 7 月分别为全年最低和最高月平均气温，极端气温分别可达 −32 ℃和 32 ℃。全年无霜期约 138 d，年降水量 600～700 mm 且主要集中在 7 月。林场森林类型是以臭冷杉 *Abies nephrolepis*、红松 *Pinus koraiensis*、红皮云杉 *Picea koraiensis*、鱼鳞云杉 *Picea jezoensis* var. *komarovii* 为主要树种的天然针阔混交林，还包括少量白桦 *Betula platyphylla*、枫桦 *Betula costata*、大青杨 *Populus ussuriensis* 等阔叶树种。臭冷杉径向生长测量仪监测点及气象站位于金沟岭林场西北部山坡（43°20′36″N，130°09′50″E），海拔 647 m。样地面积为 900 m^2，坡度 13°，坡向北偏东 15°，属于阴坡。

1.2　研究方法

1.2.1　数据获取

本研究根据臭冷杉的胸径将其分为 [15，25）cm、[25，35）cm 和 [35，45）cm 共 3 个径级，分别标记为 D15-25、D25-35、D35-45。选取生长状况良好、干形通直的样树，其中每个径级各 2 株，共 6 株。样地内各样树特征参数见表 1。在各样树的 1.3 m 处安装带式树木径向生长测量仪（德国 Ecomatik 公司，型号：DC3）。为了减少树皮水分变化对径向生长监测的影响，去除各样树安装部位的树皮。同时，为确保传感器的钢丝绳在与树干接触时不会产生摩擦，在钢丝绳上穿上塑料珠，以此实现稳定监测。数据采集时间为 2021 年 4 月—2022 年 12 月，传感器数据收集间隔时间为 10 min，每日每株样树记录 144 个数据。

表 1　样树特征信息
Table 1　Characteristic information of sample trees

径级 Diameter class /cm	样木编号 Sample tree No.	胸径 DBH /cm	树高 Tree height /m	冠幅 Canopy diameter /m			
				东 East	南 South	西 West	北 North
[15，25）	L1	16.6	14.7	1.8	2.4	2.6	1.4
	L2	23.9	18.2	2.1	2.1	1.3	2.2
[25，35）	L3	29.9	18.5	2.4	2.6	1.6	1.2
	L4	30.5	19.7	3.2	2.5	2.7	2.8
[35，45）	L5	36.2	21.8	3.2	3.3	3.0	2.6
	L6	37.3	22.9	2.6	4.3	3.9	2.4

在树木径向生长监测样地中心位置布设全自动环境监测传感器，同步观测各环境因子；环境传感器与树木径向生长测量仪共用数据采集器进行连续自动采集。全套监测设备均采购自北京天诺基业科技有限公司。采集到的数据包括平均气温、空气相对湿度、降水量、光合有效辐射、风速、土壤温度和土壤含水率，其中土壤温度与土壤含水率均在地下 10 cm 土层处采集。采集步长均为 10 min。饱和水汽压亏缺通过气温和空气相对湿度计算[17]。

1.2.2　数据处理

径向生长测量仪获取的信息包括树木不可逆的细胞分裂、增长以及因树干水分引起的可逆的茎干日际收缩、膨胀波动[18]。本研究运用零生长模型[19]进行生长季的判定和去水势处理。该模型假设树干径向生长仅发生在水分完全饱和状态下，将低于历史最大值的径向变化归因于水分亏缺，从而剔除水分波动干扰，获得不受水分变化影响的净径向生长量[14]。

利用零生长模型判断臭冷杉 2022 年的径向生

长季时间。春季树木胸径首次超越其上一年度所记录的胸径最大值的日期，标志着生长周期的起始点，当年树木胸径达到其峰值的日期为该生长周期的终止点。这 2 个关键时间点之间的天数，被量化为树木径向生长周期的持续时间。2 年胸径最大值之间的差值为生长季累积胸径增量。

利用零生长模型提取各径级臭冷杉的径向增量。为了更准确地反映不同径级臭冷杉生长情况，本研究将树木径向生长测量仪得到的胸径（D）均转换为胸高断面积（S）。

每日胸高断面积最大值（S_t）大于该日前断面积最大值（S_{max}）时，将 S_{max} 更新为当日的胸高断面积值，以此迭代。胸高断面积增量（S_Δ）为 S_t 与 S_{max} 之间的差值，负数时认为该日无生长，记为 0，具体公式参考文献 [18]。文研究的径向增量均为胸高断面积增量，总径向增量为生长季内每日胸高断面积增量之和（S_{sum}）。将各样树生长季内胸高断面积增量除以对应生长季天数，得到单日断面积生长速率；单株生长季内单日断面积生长速率的平均值为该树木平均生长速率，全部单日断面积生长速率的最大值即为最大生长速率。

为了探究树木对外界环境的敏感程度，并消除因不同绝对增长率产生的干扰，最终采用归一化处理方法对收集到的各树木 S_Δ 序列进行调整，剔除个体间生长趋势的差异性。用 R 语言（版本 4.4.2）中的 wilcox.test（）执行 Wilcoxon 符号秩检验，分析不同径级臭冷杉生长期内日径向增量间的差异 [20]。在 R 语言中，以 21 d 为滑动窗口计算滑动相关系数，分析不同径级臭冷杉生长季内归一化后的日径向增量序列与各气候因子随时间变化的关系，探究不同径级臭冷杉与气候因子响应之间的差异。

2 结果与分析

2.1 气候因子特征

根据零生长法，臭冷杉的生长季在 5—9 月份。通过气象站监测数据，绘制得到 2022 年臭冷杉生长季时间段内气候因子的变化趋势（图 1）。由图 1 可知，日平均气温最小值（2.2 ℃）出现在 5 月初，最大值（23.1 ℃）出现在 8 月初；最高土壤温度出现在 8 月份；光合有效辐射最大值出现在 5 月，9 月光合有效辐射降低；空气相对湿度多在 70% ～ 100%；降水多集中于 6 月份；土壤含水率维持在 19% ～ 33%；饱和水汽压亏缺值在 5、6 月变化较大，7 月之后多集中于 0.2 kPa 附近；风速在 0.24 ～ 0.68 m/s。

2.2 不同径级臭冷杉的径向生长动态

由表 2、图 2 可知，不同径级冷杉生长季的起止和持续时间差异不大，都在 5 月份开始，9 月份结束，但它们的总径向增量与生长速率不尽相同。总径向增量和平均生长速率均随着径级的增大而增大。最大生长速率方面，D25-35 最大，D35-45 次之，D15-25 最小。D25-35 和 D35-45 的最大生长速率日都在生长季的开始时期，分别为 5 月 25 日、5 月 24 日，而 D15-25 臭冷杉的最大生长速率在生长季中期（7 月 7 日）。Wilcoxon 符号秩检验发现（表 3），生长季内 D15-25 与 D25-35、D25-35 与 D35-45 的日径向增量序列差异极显著（$P < 0.001$）。

2.3 不同径级臭冷杉日尺度径向生长与环境因子的响应特性

由图 3 滑动相关结果可知，臭冷杉的日径向生长与各气候因子之间的相关性随生长季的进行有着一定的波动变化，且不同径级臭冷杉与气候因子的相关系数存在着一定的异同。5 月末及 6 月中旬，平均气温与 D15-25 的日径向增量呈显著正相关；7 月中下旬时，平均气温与 D35-45 的日径向增量的负相关系数出现极值，为 −0.70（$P < 0.05$）；8 月中上旬时，平均气温与 D15-25 的日径向增量正相关性系数出现极值，为 0.70（$P < 0.05$）。土壤温度与日径向增量的相关系数变化趋势和平均气温与日径向增量的相关系数变化趋势相似。6 月中上旬，土壤温度与 D15-25 的日径向增量为显著正相关；7 月中下旬，土壤温度与 D25-35、D35-45 的日径向增量皆为显著负相关，其中土壤温度与 D35-45 的负相关系数出现极值（r=−0.75，$P < 0.05$）；8 月，土壤温度与 D15-25 的日径向增量显著正相关天数最多，且出现最大相关系数 0.76（$P < 0.05$）。光合有效辐射在 7 月中下旬对各径级日径向增量均有显著的抑制作用，其中与 D25-35 的日径向增量的负相关系数出现极值（r=−0.78，$P < 0.05$）。D15-25 的日径向增量在 7 月初期与空气相对湿度为显著负相关，负相关系数最大值为 −0.47（$P < 0.05$）；在 7 月中旬到 8 月中旬，空气相对湿度与 D35-45 的日径向增量呈显著正相关，正相关系数最大值为 0.78（$P < 0.05$）；在 8 月末到 9 月 7 日，空气相对湿度与 D15-25、D25-35 的日径向增量达到显著正相

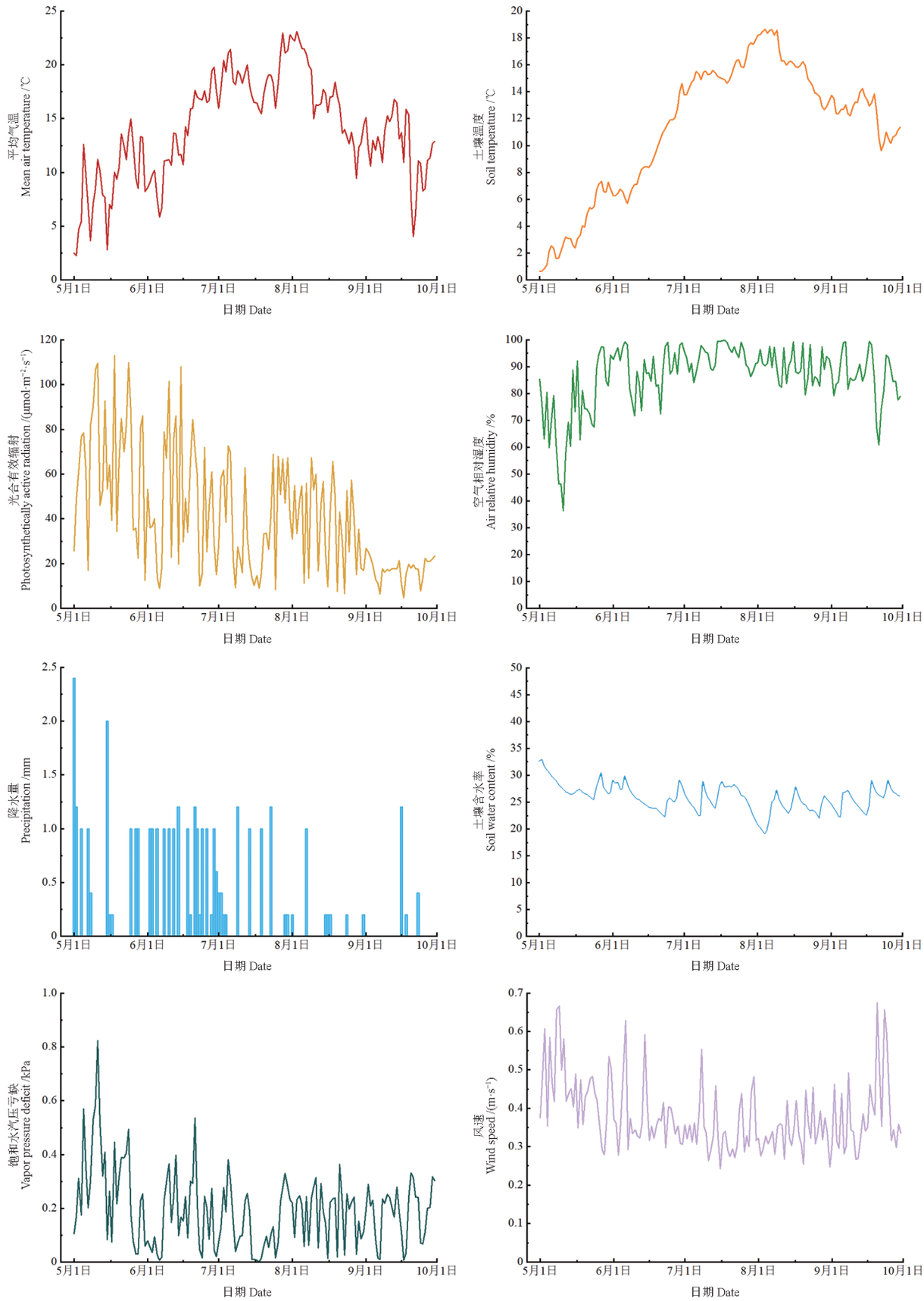


图 1　2022 年臭冷杉生长季内气候因子的变化趋势

Fig. 1　Variation trends of climatic factors during the growing season of *A. nephrolepis* in 2022

关。降水量在 7 月末与 D35-45 的日径向增量呈显著负相关，负相关系数最大值为 −0.46（$P < 0.05$）；8 月份降水量与 D25-35 的日径向增量多呈显著正相关，正相关系数最大值为 0.75（$P < 0.05$）。

6 月末到 7 月中旬及 8 月中上旬，土壤含水率与 D15-25 的日径向增量多呈显著负相关，负相关系数最大值为 −0.70（$P < 0.05$），在 7 月末时土壤含水率与 D25-35 和 D35-45 的日径向增量为显著正相关，正相关系数最大值分别为 0.71（$P < 0.05$）、0.54（$P < 0.05$）。饱和水汽压亏缺与 D15-25 的日径向增量在 7 月中旬之前多呈正相关关系；7 月中下旬时，饱和水汽压亏缺与 D35-45 的日径向增量呈显著负相关，出现负相关系数极值（r=−0.78，$P < 0.05$）；在 8 月末到 9 月 7 日，饱和水汽压亏缺与 D15-25 和 D25-35 的日径向增量呈显著负相关。风速在 7 月初与 D25-35 的日径向增量的正相关系数出现极值（r=0.54，$P < 0.05$）；在 8 月初，风速与 D35-45 的日径向增量呈显著负相关，负相关系数最大值为 −0.46（$P < 0.05$）。

3 讨 论

3.1 不同径级臭冷杉径向生长动态

不同径级臭冷杉生长季的起止和持续时间差异不大，生长季为 5—9 月，年内径向生长高峰期均在 6 月，与寒温带地区的多数针叶树种径向生

表 2 2022 年臭冷杉径向生长季及生长参数

Table 2 Radial growing season and growth parameters of *A. nephrolepis* in 2022

径级 Diameter class /cm	样木编号 Sample tree No.	生长起始日 Growth onset	生长结束日 Growth cessation	生长季持续天数 Growth days /d	S_{sum} /mm^2	平均生长速率 Average growth rate /(mm^2·d^{-1})	最大生长速率 Maximum growth rate /(mm^2·d^{-1})	最大生长速率日 Maximum growth rate day
[15，25）	L1	5 月 12 日	9 月 17 日	128	3 141.94	25.16	111.61	7 月 7 日
	L2	5 月 20 日	9 月 17 日	120				
[25，35）	L3	5 月 24 日	9 月 7 日	106	3 745.14	31.38	309.21	5 月 25 日
	L4	5 月 20 日	9 月 18 日	121				
[35，45）	L5	5 月 20 日	9 月 17 日	120	3 896.55	31.42	138.48	5 月 24 日
	L6	5 月 12 日	9 月 7 日	118				

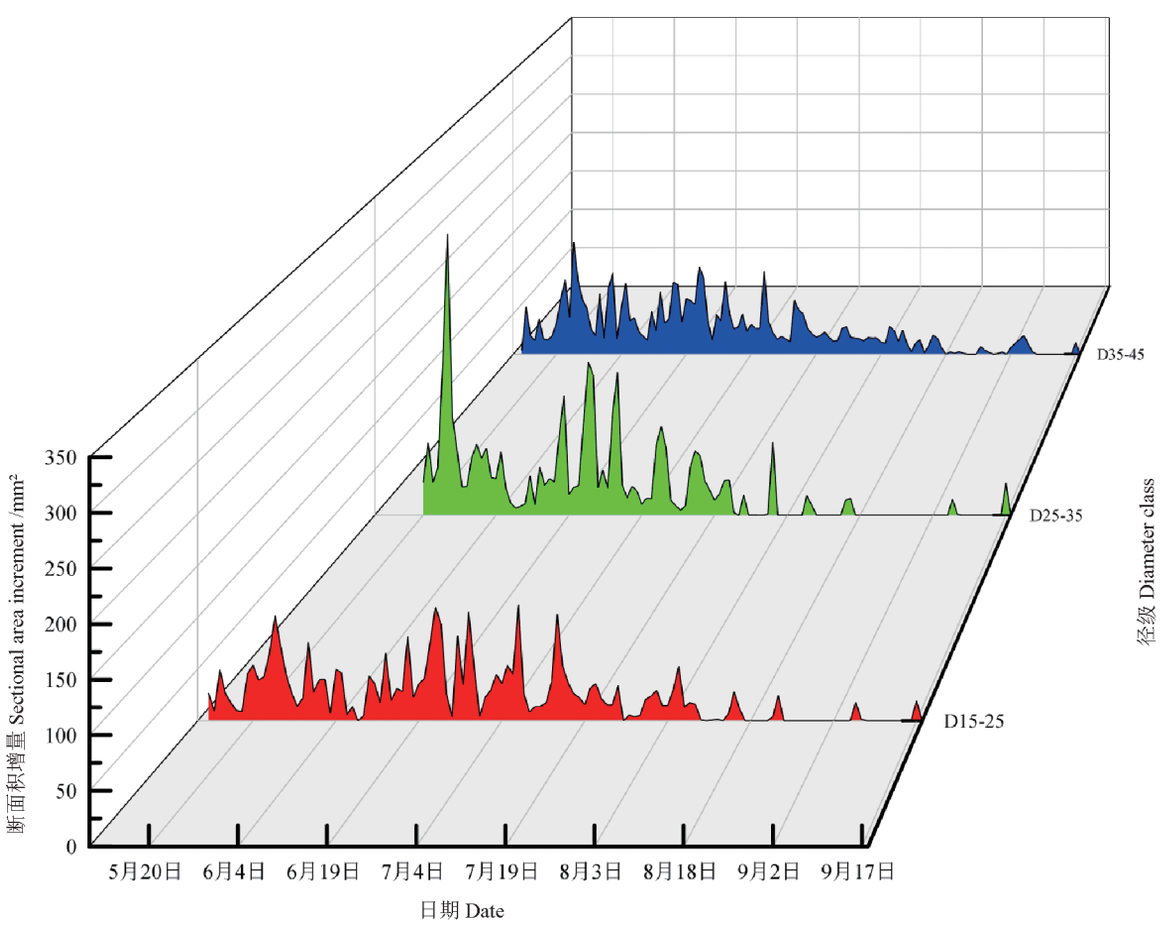


图 2 2022 生长季内不同径级臭冷杉日断面积增量序列

Fig. 2 The daily basal area increment sequence of different diameter classes of *A. nephrolepis* in the 2022 growing season

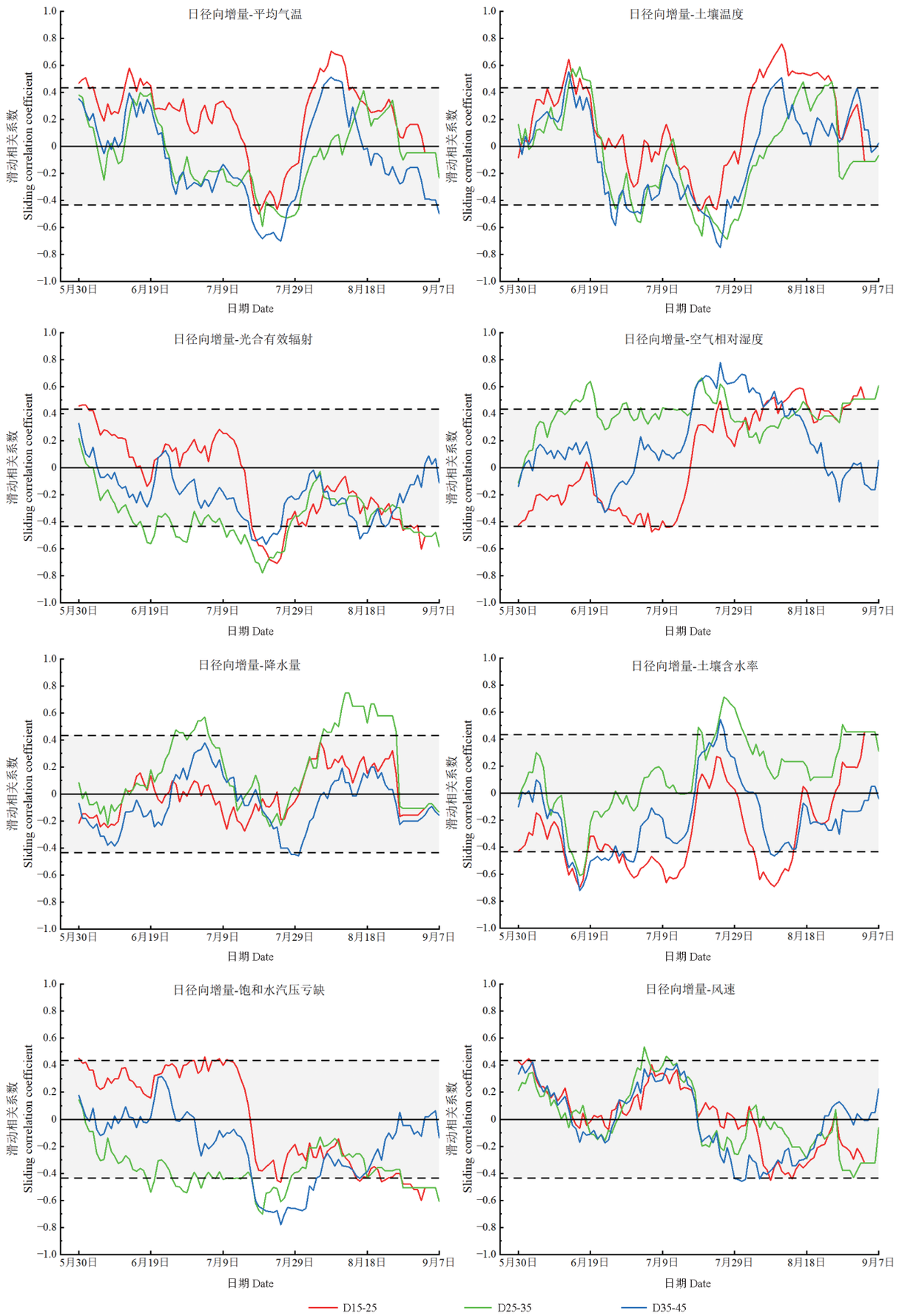
表 3　2022 年生长季内不同径级臭冷杉日径向增量序列差异
Table 3　Differences in daily radial increment sequences of *A. nephrolepis* trees of different diameter classes during the 2022 growing season

比较组 Comparison groups	*Z* 值 *Z* value	*P* 值 *P* value
D15-25 vs D25-35	−5.682	＜ 0.001
D15-25 vs D35-45	0.679	0.497
D25-35 vs D35-45	5.572	＜ 0.001

长高峰期相同 [13]。虽然径向生长的趋势基本相同，但在日径向增量序列上还是存在一些显著差异，例如 D25-35 臭冷杉与 D15-25、D35-45 臭冷杉日径向增量序列差异极显著（$P < 0.001$）。本研究中 D35-45 比 D15-25、D25-35 的总径向增量要大，平均生长速率要快，而 D25-35 最大生长速率大于 D15-25、D35-45。李晓青等 [21] 对祁连山青海云杉 *Picea crassifolia* Kom 直径结构与径向生长的研究中也发现，大树在生长季的平均生长速率和平均径向积累量均高于中、小树。这一结论与本研究结果相似。从最大生长速率所处时间来看，D25-35 和 D35-45 臭冷杉的最大生长速率位于生长季初，而 D15-25 臭冷杉的最大生长速率在生长季中期。大径级树木通常具有更为发达的根系，其木质部导管与管胞直径更大、分布密度更高，可有效提升水分及养分的运输效率 [22]。在生长季初期，温度上升使得土壤上层积雪和地下冰层融化，大径级树木能够优先利用生长季初期的水热条件和其自身储备的碳水化合物 [23]，率先启动并完成快速生长。同时，大径级臭冷杉多处于主林层，可获取更为充足的光热资源，相较林下小径级个体具有更强的竞争优势 [24]，进而更有利于径向生长。小径级树木因自身资源储备有限，且受上层林木影响 [3]，其生长更依赖当季光合产物和林下光照、水分等环境因子，最终使其生长节律与大树存在明显差异。在林分自然稀疏过程中，存活下来的树木会经历一个生长释放时期，其径向生长速率会达到最大值，这个时期通常对应着中等径级阶段 [25]。也有研究发现随着树木胸高断面积的增大，其胸高断面积生长量也逐渐增加，并在增加至一定程度后开始稳定生长 [26]。当树木生长至一定规格后，树体水力限制作用加剧，同时用于维持生命活动的呼吸消耗增加，可能致使树木生理机能有所下降 [27]，进而使其胸高断面积生长量变化趋于平缓。D25-35 与 D35-45 径级臭冷杉的总径向增量分别为 3 745.14、3 896.55 mm^2，二者差值较小，生长表现较为接近，呈现出稳定生长的特征，与已有研究结论相似。在未来的研究中，可以将树木径向生长测量仪与微树芯法相结合，可提高数据的精确性和完整性，更好地理解树木的生长动态。

3.2　气候因子对不同径级臭冷杉径向生长的影响

不同径级的臭冷杉径向生长与各气候因子的关系存在一定的共性和差异。从温度角度上看，平均气温、土壤温度与各径级臭冷杉日径向增量的滑动相关曲线变化趋势基本相同，且都随着径级的增大对日径向增量的促进作用减弱。在 6 月中上旬和 8 月份，各径级臭冷杉的日径向增量多与平均气温和土壤温度呈正相关关系，而在 7 月份多呈负相关关系，该结果与曾林辉等 [28] 关于亚热带地区马尾松的微尺度研究结果相似。生长季初期，随着气温升高，参与细胞分裂的酶活性增强，生长激素的作用效果也随之提升，进而促进早材的形成与发育 [29]。气温升高的同时，10 cm 土层温度亦随之上升，可促进臭冷杉根系生理活动，增强其对土壤水分与养分的吸收能力；但当气温过高时，会影响叶片气孔开度与光合酶活性，同时加速树木呼吸作用、加剧能量消耗 [30]；若呼吸消耗超出光合产物积累，则会抑制树木净生长。本研究发现，生长季内的平均气温对小径级臭冷杉（D15-25）的生长具有促进作用，对较大径级臭冷杉（D35-45）的抑制作用较强。该结果与李文超 [31] 关于兴安落叶松 *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen. 的年际气候敏感性研究结果一致。齐妍等 [32] 也发现大径级红松径向生长与当年 6 月平均温、最高温和 7 月最高温呈显著负相关，温度对大径级树木的制约作用更强。相对小径级臭冷杉正处于生长旺盛阶段，随着温度升高，其光合作用等生理活动显著增强 [33]，进而加快细胞分裂与伸长，促进径向生长；而较大径级臭冷杉对温度胁迫的敏感性更强，高温易导致其光合作用受抑、呼吸作用增强，造成营养物质消耗加快 [30]，最终可能减少用于径向生长的物质积累。同时，树木胸径大小与根系质量之间存在紧密的正向关联 [34]。从树木生长特性来看，大径级树木通常拥有更为庞大且发达的根系系统，这也导致其对水分的需求量相对更高。然而，温度升高易加速土壤水分蒸发，同时增强树木叶片蒸腾作用，进而导致大径级树木出现水分缺失现象 [35]，这也是其日径向增量与 7 月中下旬平均气温及土壤温度呈显著负相关的主要原因。相比之下，小径级树木的根系质量小且个体多位于林冠下层，生长季前期的土壤水分通常即可满足其需求 [32]。



灰色区域为日径向增量与气候因子相关性不显著区间（$P > 0.05$），两侧白色区域为二者相关性显著区间（$P < 0.05$）。

Grey areas indicate intervals with non-significant correlations between daily radial increment and climatic factors ($P > 0.05$), while the white areas on both sides represent intervals with significant correlations ($P < 0.05$).

图 3　不同径级臭冷杉日径向增量与气候因子的滑动相关关系

Fig. 3　The sliding correlation between daily radial increment and climatic factors in different diameter classes of *A. nephrolepis*

水分与臭冷杉的径向生长也密切相关。较大径级臭冷杉受水分的促进作用更强，但也对干旱更加敏感；小径级臭冷杉在生长前期容易受到水分的抑制作用。臭冷杉为浅根性树种，喜冷湿环境 [36]。在空气相对湿度较高的条件下，树木蒸腾作用减弱，可减少茎干内部贮存水分的散失，使形成层细胞维持充足水分供应，更高效地进行分裂与伸长，进而有利于径向生长 [19]。随着生长季推进并逐步进入生长旺盛期，臭冷杉细胞活动与代谢速率加快，水分条件的改善可有效满足其旺盛生理需求，进一步促进细胞分裂与扩张。与 D25-35 及 D35-45 臭冷杉相比，D15-25 个体受土壤含水量与空气相对湿度的抑制作用更为显著。其中，土壤含水量与 D15-25 的日径向增量在 6 月末到 7 月中旬及 8 月中上旬均呈显著负相关。究其原因，D15-25 臭冷杉多处于幼龄阶段，根系结构与生理机制尚未发育完善，细胞活动及代谢速率均低于其他径级个体；当土壤含水量升高时，其根系扩展受限且呼吸作用受到抑制，进而导致径向生长更易受阻 [37]。结合不同径级臭冷杉与饱和水汽压亏缺的滑动相关结果可见，D35-45 的日径向增量在 7 月中下旬与饱和水汽压亏缺呈显著负相关，该径级主要依赖较高的大气相对湿度以维持蒸腾 - 光合平衡，表现出典型的水分胁迫响应特征，对干旱更为敏感，这与李文超 [31] 的研究结果一致。

光合有效辐射在 7 月中下旬对不同径级臭冷杉的日径向增量有显著的抑制作用，其中与 D25-35 的日径向增量的负相关系数出现极值（r=−0.78，$P < 0.05$）。当光照强度过高时，会导致光合速率饱和或下降，容易对光合酶活性造成影响从而出现光抑制现象，进而减少光合产物积累并延缓径向生长 [38]。D25-35 臭冷杉的最大生长速率最高，该径级个体正处于对光照需求较高的生长旺盛期，快速生长需依托较高的光合速率；但光照过强时易产生大量有害活性氧 [39]，因此其径向生长更易受到光合有效辐射的显著抑制。相比之下，D35-45 臭冷杉受光合有效辐射的抑制作用最弱。大径级个体通常具备更强的生理适应性与冠层结构调节能力，可更好地应对强光影响 [33]。

4　结　论

1）不同径级臭冷杉的生长季起止时间和生长持续时间差异较小，但在日径向生长序列上存在一些显著差异（$P < 0.001$）。[25，35）cm 和 [35，45）cm 的较大径级臭冷杉相较于 [15，25）cm 的小径级臭冷杉具有更大的总径向增量和更快的生长速率。[25，35）cm 和 [35，45）cm 径级臭冷杉的最大生长速率出现在生长季初期，而 [15，25）cm 径级臭冷杉的最大生长速率集中在生长季中期。

2）不同径级臭冷杉的径向生长对各气候因子的响应存在较强的动态一致性，但在生长的不同阶段，同一气候因子对其径向生长的影响强度存在差异，且不同径级个体生长分别受到不同气候因子的调控。平均气温和 10 cm 土壤温度对各径级臭冷杉的日径向增量的响应动态相似。[15，25）cm 径级臭冷杉的径向生长更容易受平均气温和土壤温度的促进作用，土壤含水率和空气相对湿度对其生长负相关性更为突出；光合有效辐射对 [25，35）cm 径级臭冷杉的径向生长的抑制作用更为突出；[35，45）cm 径级臭冷杉对温度和干旱胁迫更为敏感，径向生长受到平均气温和土壤温度的抑制作用更强，与水汽压亏缺也呈更显著的负相关关系，但对光合有效辐射有更强的适应性和自我调节能力。

综上所述，臭冷杉径向生长受温度、水分、光照等多种气候因子的综合驱动，且主导不同径级个体径向生长的关键气候因子存在差异，据此可采取针对性保育措施。对于 [15，25）cm 径级臭冷杉应重点监测林内温度与土壤含水率动态，及时防范极端干旱与低温对根系生长的抑制作用；[25，35）cm 径级臭冷杉需加强健康状况监测，关注病弱株变化，维持其生长优势；在气候持续变暖背景下，[35，45）cm 径级臭冷杉应重点防控高温干旱胁迫，同步强化病虫害监测与防治，保障其生长稳定性及固碳功能的持续发挥。

参考文献：

[1] IPCC. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press,2022:13.

[2] De Micco V, Carrer M, Rathgeber C B K, et al. From xylogenesis to tree rings: wood traits to investigate tree response to environmental changes[J]. IAWA Journal,2019,40(2):155-182.

[3] 王玲玲 , 勾晓华 , 夏敬清 , 等 . 树木形成层活动及其影响因素研究进展 [J]. 应用生态学报 ,2021,32(10):3761-3770.
Wang L L, Gou X H, Xia J Q, et al. Research progress on cambial activity of trees and the influencing factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(10):3761-3770.

[4] Vieira J, Campelo F, Nabais C. Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate[J]. Trees,2009,23(2):257-265.

[5] He M H, Shishov V, Kaparova N, et al. Process-based modeling of tree-ring formation and its relationships with climate on the Tibetan Plateau[J]. Dendrochronologia,2017,42:31-41.

[6] Weiner J. Asymmetric competition in plant populations[J]. Trends in Ecology & Evolution,1990,5(11):360-364.

[7] 姜庆彪 , 赵秀海 , 高露双 , 等 . 不同径级油松径向生长对气候的响应 [J]. 生态学报 ,2012,32(12):3859-3865.
Jiang Q B, Zhao X H, Gao L S, et al. Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(12):3859-3865.

[8] Qiao J J, Sun Y J, Pan L, et al. Variability in the climate-radial growth correlation of *Pinus massoniana* of different diameter classes[J]. Journal of Forestry Research,2022,33:1781-1792.

[9] 刘敏 , 毛子军 , 厉悦 , 等 . 不同径级红松径向生长对气候变化的响应 [J]. 应用生态学报 ,2018,29(11):3530-3540.
Liu M, Mao Z J, Li Y, et al. Response of radial growth to climate change in *Pinus koraiensis* with different diameter classes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(11):3530-3540.

[10] Carrer M, Urbinati C. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*[J]. Ecology, 2004,85(3):730-740.

[11] Wilson R, Elling W. Temporal instability in tree-growth/climate response in the lower Bavarian forest region: implications for dendroclimatic reconstruction[J]. Trees-Structure and Function, 2004,18:19-28.

[12] 孙昊慷 , 韩佳轩 , 贾建恒 , 等 . 不同林龄及径级樟子松径向生长对干旱事件的响应 [J]. 应用生态学报 ,2024,35(11):2942-2950.
Sun H K, Han J X, Jia J H, et al. Radial growth responses of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* with different stand ages and diameter classes to drought events[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(11):2942-2950.

[13] 刘新圣 , 聂玉琴 , 邱秀文 , 等 . 基于树木径向生长仪监测高寒地区树木生长和水分利用的研究进展 [J]. 世界林业研究 ,2015, 28(3):19-25.
Liu X S, Nie Y Q, Qiu X W, et al. A review on tree growth and its water use in cold environments based on dendrometer[J]. World Forestry Research,2015,28(3):19-25.

[14] 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.

[15] 杨保国 , 刘士玲 , 庞圣江 , 等 . 大青山米老排树干径向生长变化及其对环境因子的响应 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2020,40(2):29-35,53.
Yang B G, Liu S L, Pang S J, et al. The stem radial growth of *Mytilaria laosensis* and its response to environmental factors in Daqing mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2020,40(2):29-35,53.

[16] 于健 , 陈佳佳 , 孟盛旺 , 等 . 长白山群落交错带长白松和鱼鳞云杉径向生长对气候变暖的响应 [J]. 应用生态学报 ,2021, 32(1):46-56.
Yu J, Chen J J, Meng S W, et al. Response of radial growth of *Pinus sylvestriformis* and *Picea jezoensis* to climate warming in the ecotone of Changbai mountain, northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(1):46-56.

[17] Irvine J, Grace J. Continuous measurements of water tensions in the xylem of trees based on the elastic properties of wood[J]. Planta,1997,202(4):455-461.

[18] Murray F W. On the computation of saturation vapor pressure[J]. Journal of Applied Meteorology,1967,6(1):203-204.

[19] Zweifel R, Haeni M, Buchmann N, et al. Are trees able to grow in periods of stem shrinkage?[J]. New Phytologist,2016, 211:839-849.

[20] 王子逍 . 云冷杉林主要树种径向生长动态及其对气候变化的响应 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2023:13.
Wang Z X. Radial growth dynamics of major species in Spruce-fir forests and their response to climate change[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2023:13.

[21] 李晓青 , 刘贤德 , 王立 , 等 . 祁连山青海云杉直径结构及其对径向生长的影响 [J]. 干旱区研究 ,2017,34(5):1117-1123.
Li X Q, Liu X D, Wang L, et al. Diameter structure and its effect on radial growth of *Picea crassifolia* forest in the Qilian mountains[J]. Arid Zone Research,2017,34(5):1117-1123.

[22] 敬文茂 , 赵维俊 , 马剑 , 等 . 祁连山排露沟流域青海云杉径向生长对气象因子的响应 [J]. 甘肃农业大学学报 ,2022,57(2): 111-117.
Jing W M, Zhao W J, Ma J, et al. The growth in stem diameter of *Picea crassifolia* and its response to meteorological factors in Pailugou basin, Qilian mountain[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2022,57(2):111-117.

[23] Xu G B, Wu G J, Liu X H, et al. Age-related climate response of tree-ring $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ from spruce in northwestern China, with implications for relative humidity reconstructions[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences,2020,124: e2019JG005513.

[24] Lin S, Li Y, Li Y H, et al. Influence of tree size, local forest structure, topography, and soil resource availability on plantation growth in Qinghai Province, China[J]. Ecological Indicators, 2021,120:106957.

[25] Oliver C D, Larson B C. 森林动态发育学 [M]. 韩雪梅 , 马焕成 ,

译 . 北京 : 中国环境科学出版社 ,2014:200-250.
Oliver C D, Larson B C. Forest stand dynamics[M]. Translated by Han X M, Ma H C. Beijing: China Environmental Science Press, 2014:200-250.

[26] 张岚棋 . 长白山云冷杉天然混交林优势树种单木生长与竞争、多样性关系的研究 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2023:42.
Zhang L Q. The study of the relationship between individual tree growth and competition or diversity of dominant tree species in natural spruce-fir mixed forests of Changbai mountain[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2023:42.

[27] Ryan M G, Yoder B J. Hydraulic limits to tree height and tree growth[J]. BioScience,1997,47(4):235-242.

[28] 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.

[29] Rossi S, Morin H, Deslauriers A. Causes and correlations in cambium phenology: towards an integrated framework of xylogenesis[J]. Journal of Experimental Botany,2012,63(5): 2117-2126.

[30] Carey E V, Callaway R M, Delucia E H. Stem respiration of ponderosa pines grown in contrasting climates: implications for global climate change[J]. Oecologia,1997,111:19-25.

[31] 李文超 . 大兴安岭纬度梯度下不同径级兴安落叶松径向生长对气候的响应研究 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2023: 25-26.
Li W C. Spatial pattern of diameter class *Larix gmelinii* radial growth to climate factors under latitude gradient in Daxing'an mountains, northeast China[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2023:25-26.

[32] 齐妍 , 刘滨辉 , 苏远航 , 等 . 不同径级红松生长对气候变化响应稳定性和极端干旱适应性分析 [J]. 森林工程 ,2025,41(4): 691-703.
Qi Y, Liu B H, Su Y H, et al. Stability and extreme drought adaptability of different diameter grades of *Pinus koraiensis* growth in response to climate change[J]. Forest Engineering, 2025,41(4):691-703.

[33] Way D A, Oren R. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data[J]. Tree Physiology, 2010,30:669-688.

[34] Jacquart E M, Armentano T V, Spingarn A L. Spatial and temporal tree responses to water stress in an old-growth deciduous forest[J]. American Midland Naturalist,1992,127(1):158.

[35] 陈振举 , 孙雨 , 何兴元 , 等 . 千山油松年轮宽度年表的建立及其与气候的关系 [J]. 应用生态学报 ,2007,18(10):2191-2201.
Chen Z J, Sun Y, He X Y, et al. Chinese pine tree ring width chronology and its relations to climatic conditions in Qianshan mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(10): 2191-2201.

[36] 白海 , 许倩 , 石松林 , 等 . 峨眉山不同海拔冷杉径向生长对气候变化的响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2020,40(5):128-138,161.
Bai H, Xu Q, Shi S L, et al. Radial growth of *Abies fabri* response to climate change along an altitudinal transect in the Mount Emei[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020,40(5):128-138,161.

[37] Andreu L, Gutiérrez E, Macias M, et al. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests[J]. Global Change Biology,2007,13:804-815.

[38] 易磊 . 长白山臭冷杉幼树生物量及光合特性对海拔梯度的响应 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2017:24-25.
Yi L. Response of biomass and physiological characteristics for *Abies nephrolepies* sapling along the altitudinal gradient of Changbai mountain, northeastern China[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2017:24-25.

[39] Niinemets Ü. Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation[J]. Forest Ecology and Management,2010,260(10):1623-1639.

[本文编校：张雨朦]