DOI: 10.20103/j.stxb.202403080472

吴喆虹,王文志,罗玲卓,袁超峰,苏勇,朱万泽.贡嘎山健康与腐朽峨眉冷杉径向生长分异及其气候响应.生态学报,2024,44(23):10897-10905.

Wu Z H, Wang W Z, Luo L Z, Yuan C F, Su Y, Zhu W Z.Response of radical growth differentiation of healthy and decaying *Abies fabri* Craib to climate change in the Gongga Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23):10897-10905.

贡嘎山健康与腐朽峨眉冷杉径向生长分异及其气候 响应

吴喆虹^{1,2},王文志^{1,*},罗玲卓^{1,2},袁超峰^{1,2},苏 勇^{1,2},朱万泽¹

1 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041 2 中国科学院大学,北京 100049

摘要:立木腐朽造成森林资源损失,森林质量下降,影响森林生态系统固碳能力,损害森林资源的经济效益,已成为当前森林资源保护与利用的重要课题和挑战。目前对导致立木腐朽以及腐朽立木的气候响应机制的了解仍然有限。揭示健康与腐朽立木的径向生长过程及其气候响应特征,可为森林生态系统固碳、立木健康评价及森林资源经营管理等提供参考。以川西贡嘎山峨 眉冷杉(Abies fabri Craib)为对象,采用树木年轮生态学方法,分析了健康与腐朽峨眉冷杉立木的径向生长特征及其对气候要素的响应。结果表明:健康与腐朽冷杉立木的断面积增量(BAI)年表自1880年以来均呈显著增长趋势,不同时段(1880年至今以 及最近 10年)腐朽冷杉立木的径向生长速率均显著低于健康冷杉立木,说明生长速率较低的峨眉冷杉可能更易腐朽;健康和腐 朽立木的径向生长速率均与温度、水分因子显著相关,腐朽立木的径向生长与生长季(5—10月)蒸汽压差(VPD)显著正相关, 与 10月降水量(Pr)以及生长季相对湿度(RH)显著负相关,而健康峨眉冷杉的径向生长与 Pr、生长季 VPD 和 RH 均没有显著 相关关系,表明生长季充足的水分条件对腐朽冷杉的径向生长存在负面影响。研究结果显示随着未来气候持续变暖,生长较为 缓慢的峨眉冷杉可能更易发生腐朽,并且在水分条件的负面影响下腐朽立木的径向生长可能更加受到限制。研究揭示了贡嘎 山健康和腐朽峨眉冷杉的径向生长过程及其气候响应特征,将有助于理解立木腐朽生态响应机制,为气候变化下天然林的生态 保护和恢复及可持续经营提供科学依据。

关键词:峨眉冷杉; 立木腐朽; 径向生长; 气候变化

Response of radical growth differentiation of healthy and decaying *Abies fabri* Craib to climate change in the Gongga Mountain

WU Zhehong^{1,2}, WANG Wenzhi^{1,*}, LUO Lingzhuo^{1,2}, YUAN Chaofeng^{1,2}, SU Yong^{1,2}, ZHU Wanze¹

1 The Key Laboratory of Mountain Environment Evolution and Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The decay of trees causes loss of forest resources, degradation of forest quality, exerts negative impacts on carbon sequestration capacity of forest ecosystem and damages economic benefits of forest resources, and it has become an important research topic and challenge in forestry field. However, our understanding of the causes of tree decay and the response of growth of decaying trees to climate change are still limited. Therefore, revealing the radial growth differentiation and climate response characteristics of healthy and decaying trees can provide references for carbon sequestration of forest ecosystems, forest health evaluation and forest resource management. In this study, *Abies fabri* Craib in Gongga Mountain was selected as

收稿日期:2024-03-08; 网络出版日期:2024-08-29

基金项目:国家自然科学基金项目(42330508,41977396);中国科学院引才计划青年项目

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wzwang@ imde.ac.cn

the research object, and the radial growth characteristics of healthy and decaying Abies fabri Craib were studied by using standard dendrochronological methods. The results showed that; the basal area increment (BAI) of both healthy and decaying Abies fabri Craib showed a significant growing trend since 1880, and the radial growth rate of decaying Abies fabri Craib in different periods (from 1880 to now and in the last 10 years) was significantly lower than that of healthy Abies fabri Craib, indicating that Abies fabri Craib with lower growth rate may be more susceptible to decay. It could be seen that the radial growth rates of both healthy and decayed Abies fabri Craib were significantly correlated with temperature and moisture factors. The radial growth of decayed Abies fabri Craib was positively correlated with the vapor pressure deficit (VPD) in the growing season (May-October), and negatively correlated with Pr in October and relative humidity (RH) in the growing season. But the radial growth of healthy Abies fabri Craib was not significantly correlated with Pr, VPD and RH in the growing season, indicating that sufficient moisture conditions in the growing season had a negative effect on radial growth of decaying Abies fabri Craib. The results showed that with the continuous warming of the climate in the future, the relatively slow growing Abies fabri Craib may be more susceptible to decay, and the radial growth of decaying Abies fabri Craib may be more restricted under the negative influence of moisture conditions. This study revealed the radial growth process and climate response characteristics of healthy and decaying Abies fabri Craib in Gongga Mountain, which will help to understand the ecological response mechanism of standing wood decay, and provide scientific basis for ecological protection, restoration, and sustainable management of natural forests under climate change.

Key Words: Abies fabri Craib; tree decay; radial growth; climatic change

森林固碳是实现碳中和的重要手段,立木作为森林的重要组成部分,影响森林生态系统的腐殖质形成、养 分循环、水循环、碳储存和火灾频率,同时也是自养和异养生物的栖息地,在森林生态系统中发挥至关重要的 作用。然而,随着一些地区发现立木腐朽,林木资源损失,森林质量降低,立木腐朽逐渐成为当前森林资源保 护与利用面临的难题^[1-2]。立木腐朽通常指活立木的木质部腐朽,是一种寄生性病害,多发于老龄树,是过熟 林特有的一类病害^[3-5]。立木腐朽导致树干力学性能下降,可能造成树木空洞,增加树木风折和立枯的风 险^[6-9]。立木腐朽成因复杂,受多种因素影响,直接因素如土壤含水率、致腐真菌、孔隙度和有机质含量等,间 接因素如树龄、细菌、气温、降水和光照等^[2-4,10-11]。目前普遍认为立木的腐朽与树龄有关,随着树龄增加, 立木发生腐朽的概率增大,质量损失越来越严重,甚至立木腐朽可能逐渐蔓延,最终影响整片森林健康^[2-3]。 木腐菌侵入^[12-14]、土壤湿度^[3]、pH 值^[15]、养分^[9]、地形^[16]、坡向和坡位^[9,17-18]等也与立木腐朽有关。已有的 研究多关注木腐菌、土壤和立地条件等对立木腐朽的影响,尚缺乏检测及比较腐朽与健康立木的径向生长速 率及其对气候因素的响应是否存在差异的研究。树木年轮能够记录树木径向生长过程,为研究腐朽与健康树 木的径向生长特征以及对气候变化的响应提供了突破口。因此,可以通过比较腐朽和健康立木的径向生长过 程探究其腐朽原因,查明影响立木腐朽的关键气候因素,为未来森林生态系统固碳、森林经营管理、立木健康 评价以及预测或防控立木腐朽等提供参考。

峨眉冷杉(Abies fabri Craib)是贡嘎山亚高山暗针叶林的优势种,在国家生态工程和自然保护区的努力下,峨眉冷杉天然林得以保存完整,林分普遍为过熟林,容易受真菌侵入导致立木腐朽。野外采集树芯时已经发现大量腐朽峨眉冷杉。因此,本研究选择贡嘎山峨眉冷杉为研究对象,利用树木年代学方法,对健康与腐朽峨眉冷杉的径向生长进行量测,建立断面积增量(BAI)序列,分析健康与腐朽峨眉冷杉的生长趋势,并与气候因素进行相关性分析,探究腐朽峨眉冷杉径向生长的气候响应机制,查明亚高山地区可能影响立木腐朽的气候因素,为亚高山暗针叶林固碳、资源可持续利用以及立木腐朽防治提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青藏高原东缘横断山脉中部的贡嘎山(101°29′—102°12′E, 29°01′—30°05′N)东坡雅家埂

(图1)。该区域地处中国东部亚热带湿润季风区和青藏高原寒冷气候的过渡地带,气候和植被均呈现寒温带特征^[19]。距离采样点最近的康定国家气象站(30°03′N,101°58′E,海拔2595m)的观测数据显示,在1952—2019年期间年均温7.3℃,年均降水量为839mm,降水主要集中在5—10月。贡嘎山植被垂直带谱复杂多样,植被种类和植物群落丰富,东西坡差异显著,东坡的植被垂直带谱由低至高依次为:常绿阔叶林(1100—2200m)、山地针阔叶混交林(2200—2500m)、亚高山暗针叶林(2500—3600m)、高山灌丛草甸(3600—4600m)和高山流石滩稀疏植被带(4600—4900m)^[19—21]。峨眉冷杉(*Abies fabri* Craib)是贡嘎山东坡亚高山暗针叶林的优势树种和林线树种,在保持水土及维护区域生态系统的稳定性方面起着重要作用。雅家埂地区的峨眉冷杉通常分布于海拔2900m以上,低海拔的峨眉冷杉曾受到大规模人类砍伐,海拔3200m以上始为冷杉纯林,海拔3500m以上区域受人为扰动较少^[19]。





Fig.1 Location and topography of sampling sites and the meteorological stations

1.2 样品采集、处理及年表建立

本研究于 2022 年 7 月在贡嘎山雅家埂林线位置(郁闭度 20%)设置 100 m×50 m 样地,样地内大、小径级 的峨眉冷杉均匀分布,土壤类型为山地暗棕壤,土壤层较厚、含沙量高且渗透性强^[19]。传统的立木腐朽判断 方法是通过目测观察立木外部是否具有腐朽表征(腐朽节、树瘤、溃伤、朽枝、空洞和子实体等)^[17,22]。然而, 一些立木发生了腐朽但是并不产生外部腐朽表征,无法通过目测观察的方法判断是否腐朽,贡嘎山样地内的 冷杉立木均无明显外部(树干外部或根部)腐朽特征。通过取出的树芯形态及颜色可以观察到样地内冷杉立 木的腐朽主要发生在树干中下部的木质部,表现为心材部分颜色变深,呈褐色或红褐色。心材变色是腐朽初 期的特征,变色斑块不按年轮分布,一般情况下腐朽初期的木质仍保持坚固和强韧,可能会出现树脂渗透[23]。 因此,本研究通过钻取树芯、直接观察树芯颜色及形态的方式判断立木是否发生腐朽。由于立木腐朽率与树 龄正相关^[3],树龄越大径级越大,因此,在样地范围内随机选取生长位置相邻、胸径稍大(大于 30 cm)且大小 较为一致的冷杉立木进行树芯采集。在每一株冷杉立木胸高(约1.3 m)处使用直径 5.15 mm 的生长锥按照 十字交叉法钻取2根树芯,直至共取得40根腐朽和40根健康冷杉立木的树芯。采集的树芯按照树木年轮处 理方法进行处理,在实验室内自然晾干后,依次使用目数从180到800目的砂纸由粗到细进行打磨和抛光,直 至每个年轮的早晚材界限和细胞结构在树轮宽度量测仪 LINTAB 6.0(精度 0.001 mm)下清晰可见。将打磨 抛光的树芯在显微镜下进行初步定年,然后使用树轮宽度量测仪 LINTAB 6.0 对每一年的生长宽度进行测定。 为确保交叉定年的准确性,用 COFECHA 程序^[24] 对测量结果进行检验。在 R 语言中使用负指数函数去除树 木生长趋势的年轮序列进行双权重平均以及标准化进而建立标准年表(STD)。另外,使用断面积修正法去除 年龄对冷杉径向生长的影响,建立断面积增量(BAI)年表^[25-26]。断面积修正法是将年轮宽度转化为断面积 增量来去除年龄或大小的趋势,公式如下:

BAI =
$$\pi (R_n^2 - R_{n-1}^2)$$

式中,BAI为断面积增量(mm²/a),R表示树木的半径(mm),n为树木年轮形成年份(a)。

1.3 数据分析

本研究使用了距离采样点最近的康定气象站 1952—2019 年期间的气象数据,包括月平均气温(*T*_{mean})、最高气温(*T*_{max})、最低气温(*T*_{min})、总降水量(*Pr*)、蒸汽压差(VPD)和相对湿度(*RH*),数据来自中国气象科学数据共享网(http://data.cma.cn/)。采用 SPSS Statistics 26 统计软件对不同时段健康与腐朽冷杉的 BAI 进行配对样本 T 检验,比较在不同时段健康与腐朽冷杉的径向生长速率是否存在差异。由于气候因素对峨眉冷杉径向生长可能存在滞后效应,使用 Pearson 相关分析健康和腐朽冷杉立木的 BAI 年表与上一年及当年 12 个月以及生长季气候因子之间的关系。另外,由于 BAI 年表中的低值和高值分别表示冷杉径向生长速率的低值和高值,分别提取出健康与腐朽冷杉 BAI 年表中的低值和高值,使用 Pearson 相关分析生长速率的低值和高值与所有气候因子之间的相关性,比较生长速率低和高的时候,健康与腐朽冷杉的径向生长对气候因子的响应特征。最后,为了检验健康与腐朽冷杉生长—气候关系的时间稳定性,使用 31 年滑动窗口相关分析健康和腐朽冷杉的 BAI 与气候因子响应关系的时间变化^[27]。

2 结果

2.1 健康与腐朽峨眉冷杉立木的标准年表特征及径向生长趋势

健康与腐朽冷杉 STD 年表的标准差(SD)分别为 0.248 和 0.329,平均敏感度(MS)分别为 0.133 和 0.142 (表 1)。样芯间相关系数(RBAR)分别为 0.243 和 0.219,不同树木之间生长的年际变化具有较好一致性。一阶自相关系数(AC1)分别为 0.806 和 0.867,说明健康与腐朽冷杉当年生长受前一年影响较大。健康与腐朽峨眉冷杉年表的信噪比(SNR)均大于 3,样本群体表达信号(EPS)均大于 0.85,年表质量较高。健康与腐朽冷杉的标准年表主要统计特征较为一致,均包含丰富的环境信息,可代表贡嘎山健康与腐朽峨眉冷杉的生长特征。

Table 1 Major statistic characteristics of STD chronology of healthy and decaying Abies fabri Craib								
类型 Type	年表长度 Chronological length	平均年龄 Mean age	标准差 SD	平均敏感度 MS	样芯间相 关系数 RBAR	一阶自 相关系数 AC1	信噪比 SNR	样本群体 表达信号 EPS
健康冷杉 Healthy Abies fabri Craib	181	129	0.248	0.133	0.243	0.806	11.228	0.918
腐朽冷杉 Decaying <i>Abies fabri</i> Craib	199	122	0.329	0.142	0.219	0.867	8.119	0.890

表1 健康与腐朽峨眉冷杉的标准年表的主要统计特征

SD: 标准差 Standard deviation; MS: 平均敏感度 Mean sensitivity; RBAR: 样芯间相关系数 Mean intercorrelation between individual series; AC1: 一阶自相关系数 First order autocorrelation; SNR: 信噪比 Signal to noise ratio; EPS: 样本群体表达信号 Expressed population signal

健康与腐朽冷杉的 BAI 年表呈一致的波动趋势(图 2)。健康与腐朽冷杉的 BAI 在 1880 年左右发生变化,1880 年以前,腐朽冷杉的 BAI 显著高于健康冷杉(图 2, T 检验, P<0.01),而自 1880 年至今 100 多年,以及最近 10 年,健康冷杉的 BAI 显著高于腐朽冷杉(图 2, T 检验, P<0.001),由于腐朽通常发生在过熟林,因此生长速率更低的冷杉可能更易腐朽。线性拟合的结果显示,自 1880 年至今,健康与腐朽冷杉的 BAI 均呈显著增长趋势(图 2, P<0.05)。值得注意的是,BAI 年表中无论高值或低值,健康冷杉的 BAI 均显著高于腐朽 冷杉(图 2, T 检验, P<0.001)。

2.2 健康与腐朽峨眉冷杉径向生长的气候响应分析

健康和腐朽冷杉的 BAI 均与气候因素显著相关(图3)。其中,健康和腐朽冷杉的 BAI 均与 Tmean(p10 和





10月)、*T*_{max}(p9、p10、10月)、*T*_{min}(p10和7月)、生长季*T*_{max}以及 VPD(p10和10月)显著正相关(图3, *P*<0.05)。然而,健康冷杉的 BAI 与 *Pr* 无显著相关性,与 *RH*(p1、p10和10月)显著负相关(图3, *P*<0.05)。而腐 朽冷杉的 BAI 对 *Pr*响应敏感,与 p2和p6月 *Pr* 显著正相关,与 p10和10月 *Pr* 显著负相关,与生长季 *RH* 显 著负相关(图3, *P*<0.05)。腐朽冷杉的 BAI 低值与温度(*T*_{mean}、*T*_{max}和*T*_{min})和水分条件(*Pr*、VPD 和 *RH*)显著 正相关(图3, *P*<0.05),而健康冷杉的 BAI 低值仅与 *T*_{max}和 *Pr* 显著相关(图3, *P*<0.05)。健康冷杉的 BAI 高



值与前一年温度(T_{mean} 、 T_{max} 和 T_{min})和水分条件(Pr和 VPD)显著正相关(图 3, P < 0.05);而腐朽冷杉 BAI 高 值与当年温度(T_{mean} 、 T_{max} 和 T_{min})和水分条件(Pr和 VPD)显著正相关(图 3, P < 0.05)。

图 3 健康与腐朽峨眉冷杉 BAI 年表、BAI 年表低值以及 BAI 年表高值与气候因子的相关关系

Fig.3 Correlation analysis of BAI chronology, the low values in BAI chronology, and the high values in BAI chronology of healthy and decaying *Abies fabri* Craib in relation to climatic factors

RH:相对湿度;VPD:蒸汽压差;Pr:降水;T_{min}:最低气温;T_{max}:最高气温;T_{mean}:平均气温;p1—p12和p生长季分别表示上一年1—12月以及 上一年生长季,1—12和 c 生长季分别表示当年1—12月以及当年生长季;"*"表示相关性显著

健康和腐朽冷杉的 BAI 与生长季气候因素的 31 年滑动相关关系呈波动变化(图4)。健康和腐朽冷杉的 BAI 与生长季 T_{mean}、T_{min}和 VPD 随时间变化正相关系数逐渐增大(P<0.05),生长与温度和 VPD 之间的关 系逐渐增强。腐朽冷杉的 BAI 与生长季 T_{mean}、T_{max}和 T_{min}随时间变化正相关系数逐渐增大(P<0.05),生长与 温度之间的关系逐渐增强。随时间推移,健康与腐朽冷杉的生长对温度的响应更加敏感。

3 讨论

3.1 健康与腐朽峨眉冷杉的径向生长

健康与腐朽峨眉冷杉的径向生长速率自 1880 年以来均呈显著增长趋势,并且腐朽冷杉的径向生长速率低于健康冷杉。黑龙江白水林业局的调查得到了一致结果,腐朽立木比健康立木的生长速率低,并且腐朽云杉及冷杉立木的出材率比健康立木低 30—45%^[5]。本研究区域贡嘎山峨眉冷杉发生腐朽的原因尚不清楚, 贡嘎山峨眉冷杉林平均树龄超过 100 年,属于过熟林,过熟林抵抗木腐朽菌侵蚀的能力弱,容易受木腐朽菌侵 入导致立木腐朽^[3,5]。一项综合多个地区腐朽冷杉立木的调查已经发现,250 年树龄以上的云杉、冷杉林木腐朽率达 80%^[5]。

立木腐朽的直接成因是树干受木腐菌侵蚀,木腐菌分解树干细胞的细胞壁^[9],木腐菌的分解作用主要受 立木内外部温度、水分和酸碱度等因素调控^[9,28-29]。活立木具有一定的抗腐朽能力,能够分隔腐朽区域,抵 御腐朽蔓延^[30]。然而,这种立木的抗腐朽能力被认为与立木的生长能力具有紧密关联^[9,30-31]。本研究结果 证实了这种观点,健康与腐朽冷杉的生长是从距今100多年前出现转折(腐朽冷杉的径向生长速率显著低于 健康冷杉(图2),而立木腐朽通常发生在过熟林中,即贡嘎山峨眉冷杉的腐朽可能是近几十年才发生,因此生 长速率低的冷杉抗腐朽能力可能更弱,因此更易发生腐朽。另外,本研究中冷杉立木的腐朽均发生在木质部, 腐朽部分可能会影响木质部水分运输效率^[32],近而影响腐朽冷杉立木的生长过程。值得注意的是,由于冷杉 立木受腐朽的影响导致取样时可能无法取到树心,因此本研究中腐朽冷杉的测量树龄可能比实际树龄略小,



图 4 健康与腐朽峨眉冷杉的 BAI 与生长季(5-10月)气候因素的 31 年窗口移动相关性

Fig.4 Correlation analysis of BAI chronology of health and decaying *Abies fabri* Craib in relation to climatic factors during the growing season (May-October) in a 31-year window

灰色阴影区域之外的值代表了在95%置信水平下的显著性

即便如此,这并不影响后续健康与腐朽冷杉径向生长及其气候响应特征的分析。

3.2 健康与腐朽峨眉冷杉径向生长对气候因素的响应

贡嘎山健康与腐朽冷杉的径向生长均受温度和水分条件制约,尤其腐朽冷杉对降水响应敏感。健康和腐朽冷杉的径向生长均与7月、10月和生长季(5—10月)温度显著正相关。温度对树木生长的限制作用,在许多研究中已经得到了证实^[33—35]。尤其是在高海拔地区,较高的温度通过促进根系生长和光合作用,最终促进树木的径向生长^[35—36]。健康和腐朽冷杉轮宽均与前一年10月和生长季温度显著正相关,前一年温度对健康与腐朽冷杉的径向生长存在滞后效应,这种温度对树木生长的滞后效应在其他地区的研究中同样被发现^[20, 37—38]。温度对腐朽的影响在一些研究中已被提及, Chambers 等在热带森林发现了腐朽率和年平均温度之间的高度相关性^[39]。González 等表示,腐朽速率随年平均温度的升高呈指数增长^[40]。接近冰点的温度会阻止真菌生长和细菌活动,随着温度每升高 10 ℃,真菌的活性就会增加约 2—3 倍^[40—41],增加腐朽发生的可能性。

腐朽冷杉径向生长与生长季低温和 VPD 显著正相关,与 10 月和生长季 RH 显著负相关,水分条件越充足,空气中水汽含量越大,反而越不利于腐朽冷杉的生长。这种水分条件对腐朽立木的负面影响在一些研究中已被证实,鞠国柱等发现潮湿林分的红松发生根朽病的概率更高^[42]。González 等关于不同气候条件下山杨(*Populus tremuloides* Michx.)腐朽的研究表明,大气和土壤湿度是影响树木腐朽的重要因素,森林、空气以及土壤中过于充足的水分条件会加速温带森林树木的腐朽,并且白杨的腐朽率在潮湿温暖的气候条件下高于寒冷干燥的环境^[40,43]。水分条件过于充足导致的潮湿环境促进木腐菌繁殖,加速立木腐朽^[43]。特别是在高山地区,由于低温影响,冷杉立木的树干容易发生不同程度的冻裂、断枯梢现象,水分在冻裂、伤口处聚积,助长腐朽蔓延^[16]。贡嘎山属寒温带气候,年均温低,充足的降水集中在 5—10 月,为木腐朽菌的发育提供了条件。

此外,由于冷杉木材松软、树皮薄,作为浅根性树种根部容易外露产生伤口,这些特征均利于木腐菌活动^[16]。 另外,宏观尺度(北方、温带、热带)和中尺度(气候区域内的干燥和潮湿森林)的气候条件显著影响山杨的腐 朽率,在北方和温带地区,山杨的腐朽速率在潮湿森林比干燥森林高,而在热带地区,山杨的腐朽速率在干燥 森林比潮湿森林高,不同气候条件下立木腐朽速率产生差异的原因可能受年降水量和土壤动物功能群差异的 影响^[40],水分条件与立木腐朽之间存在紧密的联系,然而它们之间的关系可能并不是简单线性的。因此,腐 朽立木的生长与气候因素之间的响应机制可能是复杂的,未来的研究若能综合考虑土壤、养分、微生物及微立 地条件等多种因素,将有助于更全面地了解立木腐朽机制。

4 结论

本研究对贡嘎山峨眉冷杉进行了树木生态学研究,比较了健康与腐朽峨眉冷杉的径向生长趋势和气候响 应特征。健康与腐朽冷杉的 STD 年表均包含较为丰富的环境信息,不同树木之间生长的年际变化具有较好 一致性,并且健康与腐朽冷杉的当年生长均受前一年影响较大。自 1880 年以来,健康与腐朽冷杉的 BAI 年表 均存在显著的增长趋势,并且腐朽冷杉的径向生长速率显著低于健康冷杉,径向生长速率低的冷杉可能更易 发生腐朽。健康与腐朽冷杉的径向生长均受温度和水分条件的显著影响,均与 *T*_{mean}(p10 和 10 月)、*T*_{min}(p10 和 7 月)、生长季 *T*_{max}以及 VPD(p10 和 10 月)显著正相关。不同的是,腐朽冷杉的 BAI 对 *Pr*、生长季 VPD 和 *RH* 响应敏感,而健康冷杉的 BAI 与 *Pr*、生长季 VPD 和 RH 均无显著相关性。随着 未来气候持续变暖,由于健康和腐朽峨眉冷杉的径向生长对气候因子的敏感性存在差异,腐朽冷杉的径向生 长受生长季水分条件负面影响,因此未来腐朽冷杉的生长可能更加受制。我们的研究提供了贡嘎山健康与腐 朽峨眉冷杉生长特征及其响应气候变化的比较结果,为未来亚高山腐朽立木的深入研究提供了数据支撑。未 来若能结合更多区域立木腐朽的研究,深入探索立木腐朽的生理生态机制,将有助于为我国实现碳中和目标 下森林资源固碳的政策提供支持和保障。

参考文献(References):

- [1] 韩海荣.森林资源与环境导论.北京:中国林业出版社,2002.
- [2] 曹延珺,徐华东,王立海,周涵婷,刘华.土壤理化性质对腐朽红松根部土壤微生物数量的影响.森林工程,2018,34(2):45-49.
- [3] 戴永忠. 立木和木材腐朽与防治措施. 安徽林业科技, 2015, 41(2): 52-53.
- [4] 郝泉龄,徐国祺,王立海,时小龙,许明贤,纪文文,张广晖.基于 Logistic 回归模型的红松立木腐朽分级预测.南京林业大学学报:自然 科学版,2020,44(2):150-158.
- [5] 卢克良. 滇西北云、冷杉立木腐朽调查. 云南林业调查规划, 1983, 8(3): 33-35.
- [6] Winandy J, Morrell J. Relationship between incipient decay, strength, and chemical composition of douglas-fir heartwood. Wood and Fiber Science, 1993, 25: 278-288.
- [7] 杨忠, 江泽慧, 费本华. 木材初期腐朽研究综述. 林业科学, 2006, 42(3): 99-103.
- [8] 葛晓雯,王立海,侯捷建,荣宾宾,岳小泉,张盛明. 褐腐杨木微观结构、力学性能与化学成分的关系研究. 北京林业大学学报, 2016, 38 (10):112-122.
- [9] 常旭东,金光泽.地形和土壤因子对红松活立木腐朽的影响.林业科学,2022,58(11):71-82.
- [10] van der Wal A, de Boer W, Smant W, van Veen J A. Initial decay of woody fragments in soil is influenced by size, vertical position, nitrogen availability and soil origin. Plant and Soil, 2007, 301(1): 189-201.
- [11] 岳小泉,王立海,王兴龙,荣宾宾,葛晓雯,刘泽旭,陈清耀.电阻断层成像、应力波及阻抗仪 3 种无损检测方法对活立木腐朽程度的定量检测. 林业科学, 2017, 53(3): 138-146.
- [12] 毕湘虹,魏霞,邓勋.黑龙江省天然红松林大型真菌的生态分布与资源评价.林业科技,2006,31(5):26-30.
- [13] 杨忠,任海青,江泽慧.生物腐朽对湿地松木材力学性质影响的研究.北京林业大学学报,2010,32(3):146-149.
- [14] 饶俊, 李玉. 3 种林型内大型真菌群落多样性取样强度. 东北林业大学学报, 2012, 40(5): 80-82, 127.
- [15] Hietala A M, Nagy N E, Burchardt E C, Solheim H. Interactions between soil pH, wood heavy metal content and fungal decay at Norway spruce stands. Applied Soil Ecology, 2016, 107: 237-243.
- [16] 陈守常.西南林区冷杉隐蔽性腐朽病蔓延的初步研究.林业科学,1959(1):55-67.

- [17] 王玉婷, 徐华东, 王立海, 李凤日, 孙虎. 小兴安岭天然林红松活立木腐朽率的调查研究. 北京林业大学学报, 2015, 37(8): 97-104.
- [18] 孙天用,王立海,侯捷建,葛晓雯.木材含水率和地形条件对红松活立木腐朽程度的影响.应用生态学报,2015,26(2):349-355.
- [19] 冉飞,梁一鸣,杨燕,杨阳,王根绪. 贡嘎山雅家埂峨眉冷杉林线种群的时空动态. 生态学报, 2014, 34(23): 6872-6878.
- [20] 贾敏,朱万泽,王文志.贡嘎山峨嵋冷杉上下限径向生长与气候因子的关系.山地学报,2017,35(6):816-825.
- [21] 钟祥浩, 罗辑, 吴宁. 贡嘎山森林生态系统研究. 成都:成都科技大学出版社, 1997.
- [22] Mohanan C. Decay of standing trees in natural forests. Thrissur: Kerala Forest Research Institute, 1994.
- [23] 刘庆明. 针叶树心材白色腐朽的防治措施. 现代化农业, 2018(8): 39-40.
- [24] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-78.
- [25] Peters R L, Groenendijk P, Vlam M, Zuidema P A. Detecting long-term growth trends using tree rings: a critical evaluation of methods. Global Change Biology, 2015, 21(5): 2040-2054.
- [26] Bunn A G. A dendrochronology program library in R (dplR). Dendrochronologia, 2008, 26(2): 115-124.
- [27] Kuznets S. On moving correlation of time sequences. Journal of the American Statistical Association, 2012, 23(162): 121-136.
- [28] Brischke C, Rapp A O. Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field: observations in different microclimates. Wood Science and Technology, 2008, 42(8): 663-677.
- [29] Liu W J, Schaefer D, Qiao L, Liu X B. What controls the variability of wood-decay rates. Forest Ecology and Management, 2013, 310: 623-631.
- [30] Shortle W C, Dudzik K R. Wood decay in living and dead trees: a pictorial overview. Newtown Square, PA, USA: US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 2012.
- [31] Shigo A L. Compartmentalization of decay in trees. Scientific American, 1985, 252(4): 96-103.
- [32] Tyree M T, Zimmermann M H. Xylem Structure and the Ascent of Sap. Berlin, Heidelberg; Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [33] Fritts H C. Tree-ring evidence for climatic changes in western North America. Monthly Weather Review, 1965, 93(7): 421-443.
- [34] Shi C M, Masson-Delmotte V, Daux V, Li Z S, Carré M, Moore J. Unprecedented recent warming rate and temperature variability over the East Tibetan Plateau inferred from Alpine treeline dendrochronology. Climate Dynamics, 2015, 45: 1367-1380.
- [35] Wang W, Jia M, Wang G, Zhu W, McDowell N G. Rapid warming forces contrasting growth trends of subalpine fir (*Abies fabri*) at higher-and lower-elevations in the eastern Tibetan Plateau. Forest ecology and management, 2017, 402: 135-144.
- [36] Kroner Y, Way D A. Carbon fluxes acclimate more strongly to elevated growth temperatures than to elevated CO₂ concentrations in a northern conifer. Global Change Biology, 2016, 22(8): 2913-2928.
- [37] Dulamsuren C, Khishigjargal M, Leuschner C, Hauck M. Response of tree-ring width to climate warming and selective logging in larch forests of the Mongolian Altai. Journal of Plant Ecology, 2014, 7(1): 24-38.
- [38] Ma Y Y, Liu Y, Song H M, Sun J Y, Lei Y, Wang Y C. A standardized precipitation evapotranspiration index reconstruction in the Taihe Mountains using tree-ring widths for the last 283 years. PLoS One, 2015, 10(7): e0133605.
- [39] Chambers J Q, Higuchi N, Schimel J P, Ferreira L V, Melack J M. Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon. Oecologia, 2000, 122(3): 380-388.
- [40] González G, Gould W A, Hudak A T, Hollingsworth T N. Decay of aspen (*Populus tremuloides* Michx.) wood in moist and dry boreal, temperate, and tropical forest fragments. Ambio, 2008, 37(7/8): 588-597.
- [41] Chen H, Harmon M E, Griffiths R P, Hicks W. Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots. Forest ecology and management, 2000, 138(1-3); 51-64.
- [42] 鞠国柱,项存梯,季良杞,张炳华,李玉莲,郑春芳,张勇君. 红松根朽病的研究. 东北林学院学报, 1979, 7(2): 49-56, 147-148.
- [43] Sun T Y, Wang L H, Xu H D, Bao Z Y. Effect of soil physical-chemical properties on the decay of standing *Pinus koraiensis* in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China. Journal of Forestry Research, 2015, 26(4): 859-865.