

DOI: 10.20103/j.stxb.202208052230

于德水, 卢杰, 江村扎西, 王新靓, 杨琳, 田莹. 火干扰因素对藏南地区高山松径向生长及气候响应特征的影响. 生态学报, 2023, 43(20): 8578-8586.

Yu D S, Lu J, Jiang C Z X, Wang X L, Yang L, Tian Y. Effects of fire disturbance factors on *Pinus densata* growth and climate response characteristics in southern Xizang. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8578-8586.

火干扰因素对藏南地区高山松径向生长及气候响应特征的影响

于德水^{1,4}, 卢杰^{2,3,*}, 江村扎西⁵, 王新靓¹, 杨琳¹, 田莹¹

1 西藏农牧学院高原生态研究所, 林芝 860000

2 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 林芝 860000

3 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 林芝 860000

4 西藏高寒植被生态安全重点实验室, 林芝 860000

5 西藏农牧学院资源与环境学院, 林芝 860000

摘要: 森林火灾在二十一世纪内的发生频率逐步升高。大量研究发现森林火灾与树木生长之间存在有紧密的相关性。因此探究森林火灾对于树木生长的影响, 分析火灾的不同强度对于树木径向生长是否有着显著的差异, 将对于评估森林保护指标有着重要的实际意义。实验基于树木年轮学的研究方法, 探究西藏林芝市本日山及九五六两场森林火灾对高山松径向生长的影响, 分析在火灾前后高山松径向生长与气温及降水之间的响应关系。基于林芝市本日山及九五六两个火烧区域, 建立了受轻度火影响和受中度火影响的高山松样地。利用树木年代学的方法, 对年轮宽度指数与 1961—2020 年气温及降水分别进行相关分析, 同时结合火灾的发生时间, 将时间序列划分为: 1961—2006 年火灾前和 2007—2021 年火灾后。结果显示, 轻度火影响的高山松径向生长对气温和降水敏感, 特别是在 3—8 月最高气温上呈现出显著性的增加。中度火影响的高山松径向生长则显著降低。火灾干扰明显抑制了高山松的径向生长, 特别是火因子在平均气温和最高气温的干扰上对其径向生长具有明显抑制作用。受到轻度火影响的高山松径向生长在短期内有较为明显的增加趋势, 但长期并不显著; 而中度火影响的树木径向生长则在短期内不明显下降, 但长期显著。受到轻度火影响的高山松中, 其径向生长与最低气温之间呈显著的负相关, 且使得高山松对外界环境的响应更为敏感, 而中度火影响的高山松则并未表现出这种显著的响应状态。因此对于在高海拔地区而言, 森林火灾对于树木径向生长有着显著的干扰的同时也提升树木与外界环境的响应程度。

关键词: 高山松; 径向生长; 树木年轮学; 火因子

Effects of fire disturbance factors on *Pinus densata* growth and climate response characteristics in southern Xizang

YU Deshui^{1,4}, LU Jie^{2,3,*}, JIANG Cunzhaxi⁵, WANG Xinliang¹, YANG Lin¹, TIAN Ying¹

1 Res. Institute of Xizang Plateau Ecology, Xizang Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China

2 Key Laboratory of Forest Ecology in Xizang Plateau (Xizang Agriculture & Animal Husbandry University), Ministry of Education, Nyingchi, Nyingchi 860000, China

3 National Key Station of Field Scientific Observation & Experiment, Nyingchi 860000, China

4 Key Laboratory of Alpine Vegetation Ecological Security in Xizang, Nyingchi 860000, China

5 Resources & Environment College, Xizang Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China

基金项目: 科技部国家野外科学观测站(生态系统)运行补助项目(2021-2025); 西藏高寒植被生态安全重点实验室研究生开放基金项目(STAQ-2021Y-3)

收稿日期: 2022-08-05; **采用日期:** 2023-06-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tibetlj@163.com

Abstract: Forest fires have been increasingly frequent in the 21st century and have been shown to be closely related to tree growth. Therefore, studying the impact of forest fires on tree growth and the effects of different fire intensities on tree response is essential for forest protection. In this study, tree-ring analysis was used to investigate the effects of two forest fires in Nyingchi, Xizang, on the radial growth of *Pinus densata* and the relationship between its growth and temperature and precipitation before and after the fires. Sample plots of *Pinus densata* were established in areas affected by mild and moderate fires in Biri and 956, respectively. Using tree-ring analysis and statistical methods, the tree-ring width index was correlated with temperature and precipitation data from 1961 to 2020, and the time series were divided into the pre-fire period (1961—2006) and post-fire period (2007—2021). The results showed that the radial growth of *Pinus densata* affected by mild fires was sensitive to temperature and precipitation, especially the maximum temperature from March to August, which significantly increased. The radial growth of *Pinus densata* affected by moderate fires was significantly reduced. Forest fires clearly inhibited the radial growth of *Pinus densata*, particularly with an inhibitory effect on average and maximum temperatures. The radial growth of *Pinus densata* affected by mild fires showed a short-term increase but a long-term reduction, while that of trees affected by moderate fires showed a short-term decrease but a long-term increase. In *Pinus densata* affected by mild fires, there was a significant negative correlation between radial growth and the minimum temperature. *Pinus densata* affected by mild fires were more sensitive to changes in external environmental factors, while those affected by moderate fires gradually weakened their response. In summary, forest fires had a significant impact on the radial growth of *Pinus densata*, while also increasing its response to external environmental factors. These findings are crucial for forest protection in high altitude areas.

Key Words: *Pinus densata*; tree ring; Dendrochronology; effects of fire

随着人类活动的日益频繁,森林火灾的发生几率正逐年增加^[1-2]。火因子通过损毁树干中的导管,使得树木的输送水分途径受阻,并破坏树木表皮的保卫细胞,造成树木形成层及木质部的机械损伤,从而抑制树木的生长,导致树木的死亡^[3-4]。当前研究结果表明,森林火灾对于树木的影响是存在多向性的^[5-6]。若火因子强度不足以损伤树木的运输组织,且对于树木表皮的影响较轻,则火因子将会改变树木对外界环境的响应^[7-8]。当前研究者观测到,火因子所产生的影响主要为:通过改变林下植被的结构组成^[9-10]、改变森林土壤的养份含量^[11-12],促进过火后森林植被的生长。另一种方式则是火因子通过对林下植被造成一定程度的损伤,而这种损伤将促进植被体内激素的形成,这种损伤不足以完全损伤植被表皮的保护组织,但又可以促进植被吸收外界营养物质^[13-14]。

而根据森林火灾中火势的大小,可将火灾程度划分为高强、中强和低强度火^[5]。严重的高强度火将导致树木的完全死亡,而中强度和低强度火,对于树木的干扰会受到各种因素的影响如:树种、损害部位、损伤时间等。当前研究学者普遍观点认为,森林火灾在中度至轻度的范围内对树木的影响有着促进作用,而高强度森林火灾将会对树木的径向生长存在明显的抑制作用^[15-16]。在国内外研究内容中,对于火因子的作用中多数的研究是以分析林下土壤养分含量为主,或是观测火因子对林分组成结构所造成的影响,而忽视了火因子对树木生长本身所产生的影响。在高海拔地区火因子是否会对树木的径向生长存在影响仍存在有不同的观点。部分研究学者认为,在高海拔地区经历过火灾的树木,其径向生长的速度明显降低,树木年轮的形成受到阻碍^[17]。也有部分学者发现在高海拔地区树木因受到火因子的干扰而形成机械损伤,从而对树木的径向生长产生影响^[18]。然而王叁等^[19]发现,火灾对部分林分的树木并不会出现明显的干扰情况。李宝等^[20]在西藏自治区朗县同样发现了火干扰可以促进树木的生长。

综上所述,在高海拔地区,林火次数虽然并不频繁,但火因子对树木的径向生长的干扰仍存在有争议。尤其是在高海拔地区,不同区域、不同的环境条件下火因子对树木径向生长的干扰,是否存在有显著的抑制现象、对树木的径向生长将产生何种影响结果,仍需要深入研究。基于此,本实验将利用树木年轮学的研究方

法,探究火因子对树木径向生长的影响,并通过分析树木对气候因子之间的响应关系,讨论火因子对树木径向生长所产生的抑制或促进影响。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于西藏东南地区,位于雅鲁藏布江下游的林芝市境内,地处念青唐古拉山脉的支脉,属高原温带半湿润季风气候区^[21–22]。研究区域位于林芝市巴宜区境内的本日山风景区内。研究区内平均海拔 3280 m,干湿季分明,昼夜温差大,雨水集中,无霜期长,日照充足,年日照时间为 1500—2500 h。年降水量在 500—1000 mm,集中在 5—9 月,多为夜雨。年平均气温 11.2 °C,最热月平均气温约 20 °C,极端最低气温在 -13 °C 左右^[23–24](图 1)。

采集样点位于本日山阳坡(94°22'E, 29°39'N),海拔高度 3280 m。通过官方报道了解到本日山于 2021 年 2 月 27 日发生中度山火,过火林损伤严重,研究样地的主要优势树种为高山松,林地内成熟林较多,林下植被较为丰富。该样点位于自然保护区内,有明显的人类活动,但受人为干扰较大。在九五六陆军医院后山阳坡(94°21'53" E, 29°41'15" N),海拔高度 3265 m 采集 2007 年 4 月 21 日发生森林火灾后的高山松林,对于在九五六医院后山的森林火灾,在结合影像资料及相关报道后,沿防火带分别采集轻度受火林,和轻度受火林,该区域相比于本日山受人为干扰的影响较小。(图 2)

1.2 研究方法

野外样品采集于 2022 年 6 月 18 日,在本日山、九五六后山两处研究点内分别建立中度火烧样地(树冠毁坏程度:31%—70%)、轻度火烧样地(树冠毁坏程度:0—30%)和对照样地(树冠无损坏),每个样地随机选取 20 棵标准木,分别沿东西、南北两个方向钻取一根树芯,装入减震箱后带回。在室内自然阴干,放入木槽中用 100 目、200 目、400 目、600 目砂纸打磨,直至肉眼可清晰观察到树芯上每层的年轮,利用 Lintab™ 6.0 树轮宽度测量仪(精度 0.01 mm)对采集的树芯宽度进行测量^[25–26]。采用 TASP-Win 程序辅助,进行目视显微镜下的交叉定年检验,对其中部分伪年轮或丢失年轮进行修正^[27–28],并在通过 TASP-Win 程序的检验后采用 COFECHA 程序进行二次验证对比检验结果,最后利用 ARSTAN 程序进行标准化处理,用步长为 0.6 的样条函数进行拟合,去除气候因子以外的外界环境因素,最后建立树轮宽度年表^[29]。采用 Pearson 分析树木标准年表与气温及降水之间的相关性,并结合自抽样(Bootstrap)进行 1000 次自动抽样检测,并在 $P < 0.05$ 的条件下进行筛选。研究区域内树木生长可分为林火发

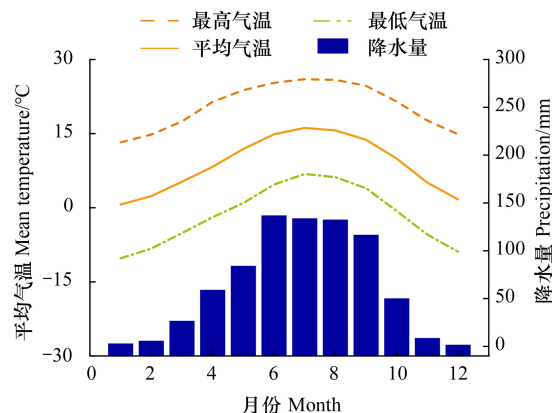


图 1 西藏林芝市 1961—2021 年月均气温 (T_{mean})、月均最高气温 (T_{max})、月均最低气温 (T_{min})、月降水 (P)

Fig.1 Monthly mean temperature (T_{mean}), monthly maximum temperature (T_{max}), monthly minimum temperature (T_{min}) and monthly precipitation (P) in Nyingchi, Xizang, 1961—2021)

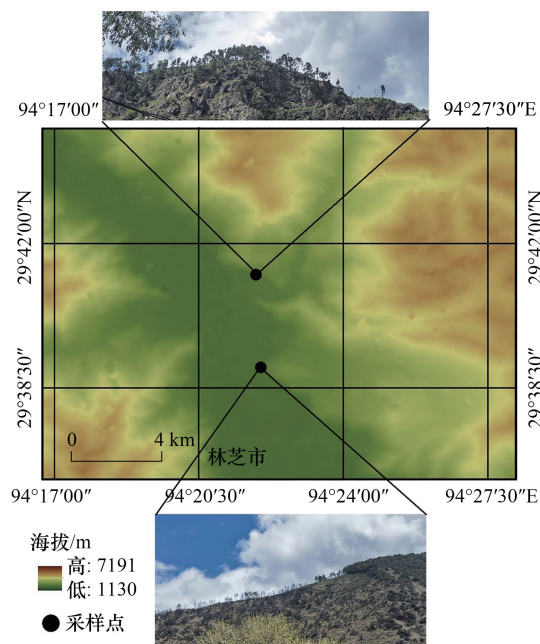


图 2 研究区域示意图

Fig.2 Study area diagram

生前和发生后两个阶段,因此本实验将结合森林火灾的发生时间及林芝站气象数据,将高山松标准年表划分为 1961—2006 年和 2007—2021 年。并对“九五六”研究区的样地调查,推测分析在比日山火因子干扰后树木径向生长的情况(表 1)。

表 1 高山松标准年表统计特征
Table 1 Statistical Characteristics of *Pinus densata* Standard Year Table

火干扰强度 Fire disturbance	样本量/总量 Sample size (tree/cores)	标准偏差 Standard deviation	平均敏感度 Mean sensitivity	树间相关系数 Mean-intra-tree correlation	信噪比 Signal-noise ratio	样品相 关系数 correlation coefficient	第一主成分 方差量/% The first principal component	样品总体 代表性 Expressed population signal
比日山对照样地 Biri mountain sample plot	14/20	0.154	0.107	0.29	9.85	0.523	51.4	0.94
比日山轻度火干扰 Biri mountain mild fire disturbance	19/20	0.36	0.32	0.273	13.84	0.248	48.4	0.86
比日山中度火干扰 Biri mountain moderate fire disturbance	12/20	0.174	0.133	0.279	11.81	0.63	76.2	0.95
九五六轻度火干扰 956 sample plots mild fire disturbance	13/16	0.405	0.258	0.445	10.76	0.634	62.5	0.96
九五六中度火干扰 956 sample plots moderate fire disturbance	12/16	0.284	0.176	0.276	11.23	0.343	27.2	0.86

为了使标准统计年表包含有更多的气象信息,同时希望年表中可以保留更多的小波段信号。基于以上两点需求选择标准年表(STD)进行气候-树木径向生长的相关性分析,运用 ARSTAN 程序计算了树木宽度年表的统计参数,包括有平均敏感度(MS)、第一主成分(PC1)、标准偏差(SD)、一阶自相关系数(AC1)、信噪比(SNR)、样品总体代表性(EPS)和样品相关系数(R1)。其中标准年表的 MS、SD、R1 数值越大,表明树木对气候的变化越敏感;SNR 越大年表中包含的气象信号越多;EPS 和 PC1 可以表示采样树木对研究区域树木的整体代表性,尤其是 EPS(>0.85)表明树木对气候之间的响应程度较好;AC1 越大表明气候对树木的“滞后性”越强(图 3、图 4)。

2 结果与分析

通过对采集点的树木年轮年表统计特征分析,年表的平均敏感度(MS)均值为 0.2,样品总体代表性(EPS)均值为 0.92,表明树木年轮年表对气象因子的响应较为敏感;年表的信噪比(SNR)均超过 9.5,信噪比较高,说明在年表中所包含的气候因子较强,气象信息较为完整,年表质量较好;一阶自相关系数(AC1)均超过 0.24,表明树木的径向生长受到前一年气象因子的影响较强,对于分析气温的“滞后性”较好;第一主成分(PC1)和样品总体代表性(EPS)均值分别为 53.1%和 0.91(EPS>0.85),表明采集的树芯样本对研究区总体的表达性较好,年表的整体所包含的信息较为完整,可以开展下一步的响应分析,图 2 和图 3 为高山松树木年轮

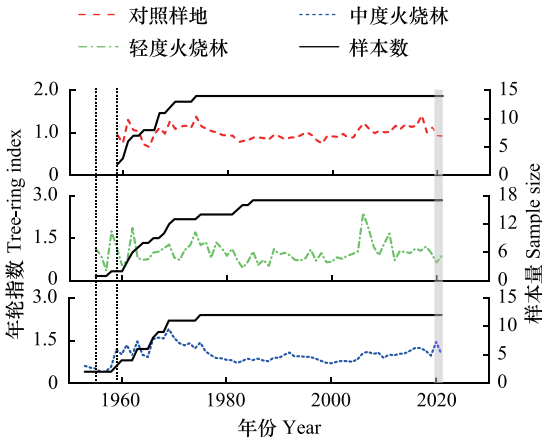


图 3 比日山高山松标准年表
Fig.3 Biri mountain *Pinus densata* Standard Year Table

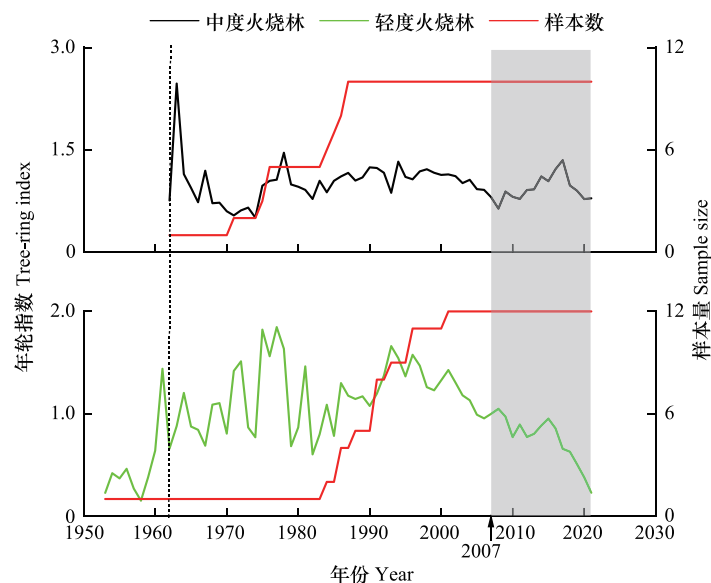


图4 九五六高山松标准年表

Fig.4 Standard *Pinus densata* Year Table of 1995

宽度指数的年际变化(表1)。

通过对对照(CK)区域的高山松径向生长与林芝站气象站的气温及降水的数据进行相关分析,高山松径向生长与平均气温及最低气温之间并未表现出明显的相关性,但与最高气温及降水之间表现出明显的相关性;与最高气温在6—8月及11月表现出明显的负相关($P < 0.05$),且表现出明显的“滞后性”;与平均降水在前一年9月表现出明显的负相关($P < 0.05$)。这与李宗山、吴祥定等^[30—31]在藏东南对高山松的观测结论相似,但同时也存在有不同之处。如在“九五六”区域中,受中度火干扰(965-31-40)的高山松径向生长与当年5月的最低气温表现出显著的负相关性($P < 0.05$)(图5)。

在九五六发生火灾后,通过对比与气温及降水的相关性,高山松径向生长与气温及降水之间发生了显著的转变。对于受到轻度火干扰影响的高山松,与平均气温在当年4月、7月呈正相关(均为 $P < 0.05$),与10—11月呈负相关(均为 $P < 0.05$),且与7月及10月的表现出显著的“滞后性”;与最低气温在当年并未表达出明显的相关性,但与前一年8月及11月的最低气温呈明显的正相关(均为 $P < 0.05$);与最高气温之间的相关性极为显著,除与前一年7—8月呈显著负相关(均为 $P < 0.01$)和滞后性外,与当年3—8月,10—11月的最高气温呈显著的负相关(均为 $P < 0.01$),且与10—11月的最高气温之间也表现出明显的滞后性;与降水之间的相关性则较小,仅与前一年11月呈负相关($P < 0.01$)。而对于受中度火影响的高山松,其径向生长在过火后与平均及最低气温及降水均未表达出相关性,与最高气温也只在在前一年12月呈显著正相关($P < 0.05$)(图6)。

通过与照样地的对比,结果显著表明:对于受到轻度火影响的高山松,其径向生长与气温及降水之间表现出显著的变化,当年4月、7月的平均气温由不相关转变为正相关(均为 $P < 0.05$),与当年10—11月生长末期有不相关转变为负相关(均为 $P < 0.05$),而受中度火影响的高山松,其径向生长在过火后,与前一年11月的平均气温由正相关($P < 0.05$)转变为不相关。对于在轻度火的影响下,高山松径向生长对最低气温的响应,由不相关,转变为与前一年8月、11月呈正相关(均为 $P < 0.05$)。而中度火则由与当年5月的负相关($P < 0.05$)转变为不相关。在轻度火的影响下,与前一年7—8月最高气温呈负相关(均为 $P < 0.01$),转变为与当年3—8月及10—11月的最高气温呈负相关(均为 $P < 0.05$)。而在中度火的影响下,高山松的径向生长与前一年9月及当年4月的最高气温由负相关(均为 $P < 0.05$)转变为不相关,而与前一年12月的最高气温由不相关转变为正相关($P < 0.05$)。而平均降水在发生火灾前后对高山松径向生长的影响并无明显的相关性变化,仍与

前一年 11 月呈负相关($P < 0.01$)。

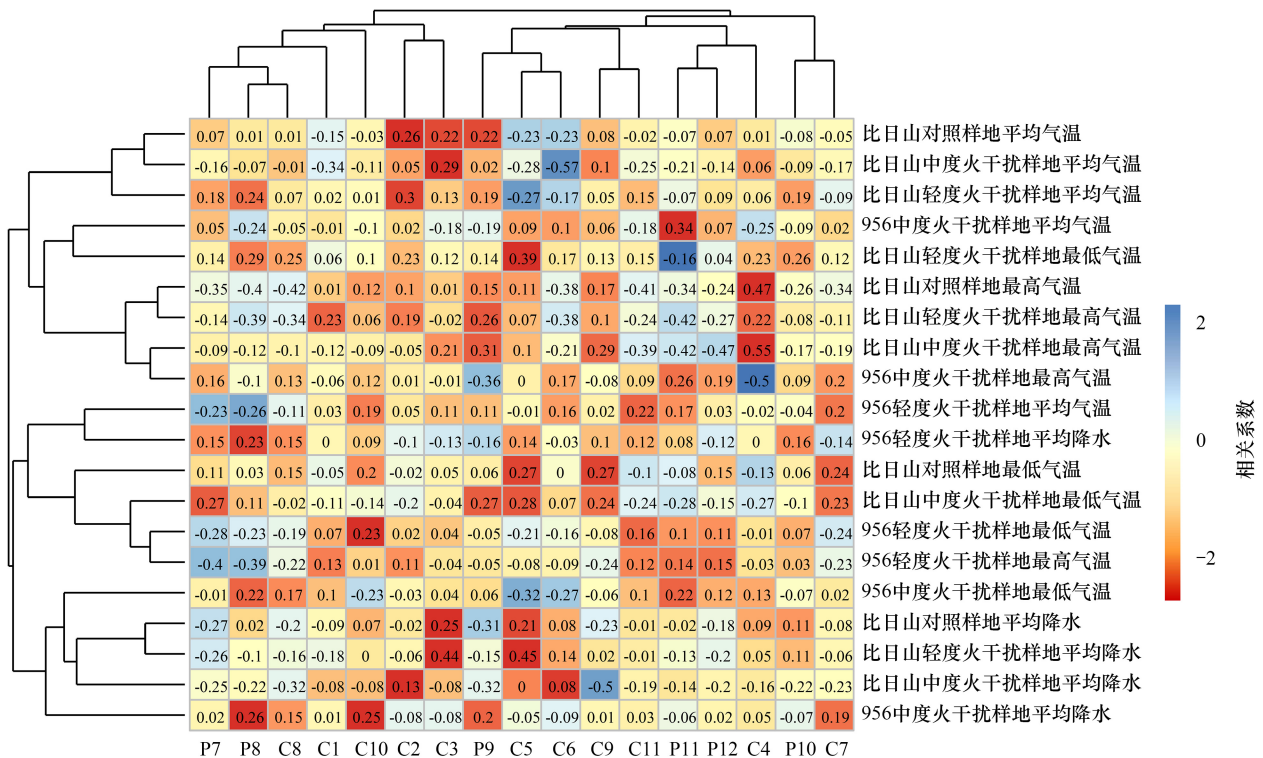


图 5 火灾发生前高山松树木年表与月气候因子相关性

Fig.5 Correlation between *Pinus densata* tree chronology with monthly climatic factors before fire

P, 前一年; C, 当年, 数字为月份, 如: P1 代表为前一年 1 月, C1 代表为当年 1 月

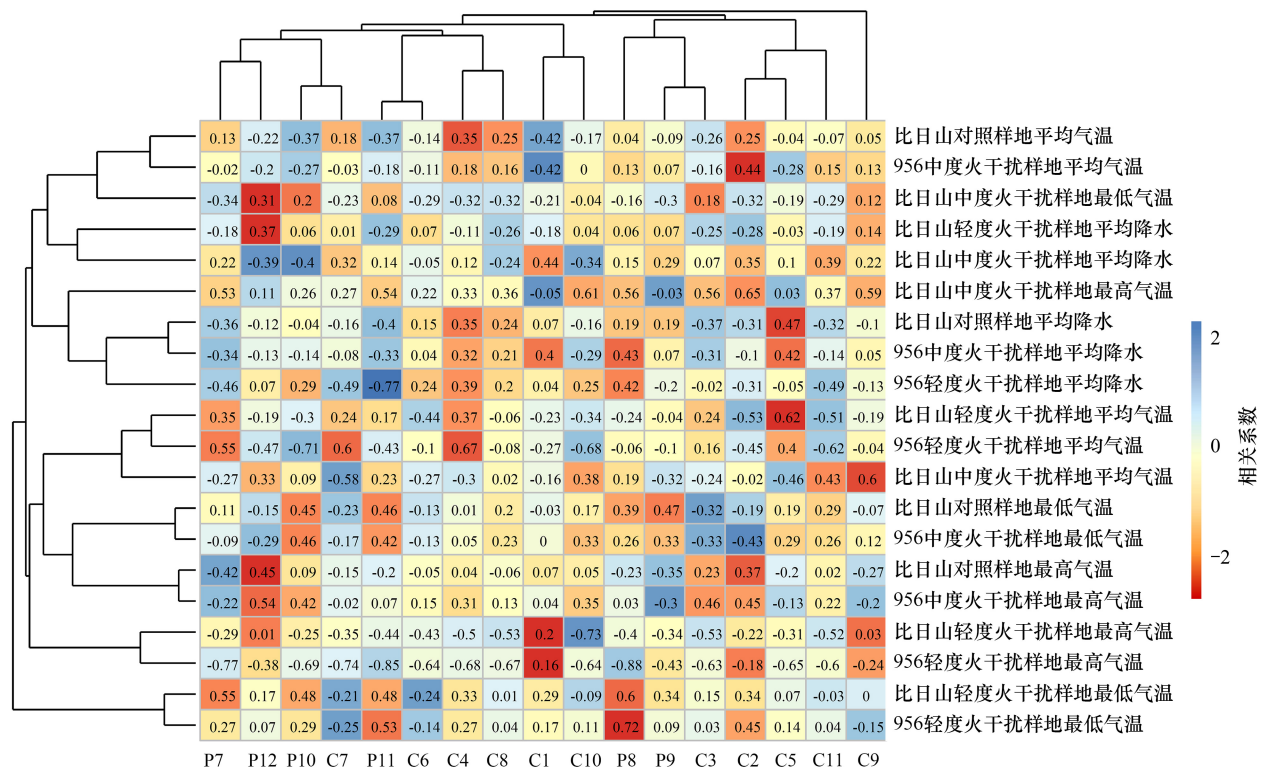


图 6 火灾发生后高山松树木年表与月气候因子相关性

Fig.6 Correlation between *Pinus densata* tree chronology with monthly climatic factors after fire

3 讨论

3.1 过火后高山松径向生长与气温及降水的响应关系

高山松作为藏东南地区的主要建群树种,其生长范围极为广泛,同时也是探究藏东南植被类型与气候变化的极佳实验树种^[32-33]。通过对火灾前后的对比可明显发现,对于高山松而言,火灾对于其生长的干扰多数呈抑制作用,这与 Thomas Seifert 和 Adam F. A. Pellegrini 等所观测的结果较为一致^[34-35],而针对这一问题,推测主要是与树木所处的生长环境有关,在当前所观测的火灾对树木的影响中,多数为低海拔区域,而在高海拔区域中所观测的火灾也多为抑制性。其次,相关地区的检测数据表明,火灾对于树木的生长呈抑制作用^[36-37]。部分研究学者认为,高山松在受到环境条件和树木自身生理的影响,其生长状态和营养状况将会影响其对外界因素的响应程度^[38]。而当受到火灾干扰时,植物体内的有机质形成可能会受到阻碍,从而直接或间接地影响其生长和发育^[39]。此外,根据在不同地区的观测,高山松在不同海拔区域受到火灾的影响存在显著的差异变化^[40]。在低海拔区域,火灾可能会帮助树木清除其生长周围的竞争植物,促进树木萌发更新,从而促进高山松的生长;而在高海拔区域,火灾则多数呈抑制作用。而这可能与高海拔区域的气候、土壤等条件不利于高山松的生长和发育有关。

3.2 不同火干扰下高山松径向生长与气温及降水之间的响应

对于不同程度的火干扰对树木径向生长与气温的响应,在实验中发现,轻度火对于树木径向生长的有着显著的干扰,火因子程度的不同对于树木径向生长的影响有着明显的差异性。在轻度火的干扰下,将会促进高山松径向生长与生长季(4月、7月)平均气温的相关性,并促进高山松在生长季末期(10—11月)进入休眠时期^[41]。而中度火对树木径向生长的干扰则多数是抑制性的,与前一年11月的平均气温由正相关($P < 0.05$)转变为不相关。这与 Andreassen 等人所观测的,在轻度火的干扰下火因子与高山松径向生长与最高气温之间的相关性较为一致^[42]。同时轻度火干扰同样可以促进8月及11月最低气温与径向生长之间的相关性,且这种促进作用表现出显著的“滞后性”。而受到中度火干扰的影响下,促进了高山松的径向生长与前一年12月最高气温之间的相关关系。相关研究同样发现,在受到中度火干扰的影响下,促进了高山松的径向生长与前一年12月最高气温之间的相关关系^[43]。在轻度火干扰的影响下,抑制了高山松在11月生长末期径向生长与降水之间的相关性,且这种影响同样表现出明显的“滞后性”。

综合实验结果,可以得出在高海拔地区,高山松的径向生长与气温因素之间的响应关系较为显著。在受到不同程度火干扰的影响下,高山松的径向生长与气温之间的相关性表现出明显的差异性。轻度火干扰将会促进树木径向生长与生长季的平均气温的相关性,同时将促进树木进入休眠态,而中度火干扰则可能抑制高山松的径向生长。火因子干扰程度的不同也会影响到高山松径向生长与气温之间的相关性的表现形式,或促进或抑制相关性的出现时间点和程度等。在低海拔区域,火灾会促进树木萌发更新,从而促进高山松的生长;而在高海拔区域,火灾则多数呈抑制作用。这可能与高海拔区域的气候、土壤等条件不利于高山松的生长和发育有关。同时,在轻度火的干扰下,火灾将会促进高山松径向生长与生长季平均气温的相关性,并促进高山松在生长季末期进入休眠时期;而中度火对树木径向生长的干扰则存在抑制作用,且与前一年11月的平均气温由正相关转变为不相关。

因此,在未来探究高海拔地区树木生长的特点和限制因子时,需要综合考虑气温和火因子等多种因素的影响,并对其复杂的关系进行深入研究,以更好地了解高海拔地区森林生态系统的生态特征和生态过程。

4 结论

西藏地区的主要优势树种高山松径向生长与气温之间存在有显著的相关性,且对于外界变化的响应十分敏感。本研究表明,对比高山松受不同程度的火灾影响,受中度火影响的高山松在短期内径向生长会受到限制,但对于树木长期的径向生长则有着显著的促进作用;轻度火对高山松径向生长的影响有着显著的影响,径

向生长与最高气温在生长季(3—8月)表现出显著的相关性;与平均气温在4月和7月呈显著正相关;在青藏高原地区森林火灾对树木的径向生长将有着极为显著的影响,受到火因子的干扰将显著抑制树木的径向生长,并改变树木与外界环境因子之间的相关性。

参考文献(References):

- [1] 白夜,王博,武英达,刘晓东. 2021 年全球森林火灾综述. 消防科学与技术, 2022, 41(5): 705-709.
- [2] 杜建华,宫殷婷,蒋丽伟. 中国森林火灾发生特征及其与主要气候因子的关系研究. 林业资源管理, 2019(2): 7-14.
- [3] Garren K N. Effects of fire on vegetation of the southeastern United States. Botanical Review, 1943, 9(9): 617-654.
- [4] Hoffmann W A. Direct and indirect effects of fire on radial growth of cerrado savanna trees. Journal of Tropical Ecology, 2002, 18(1): 137-142.
- [5] 李顺,吴志伟,梁宇,贺红土. 大兴安岭人为火发生影响因素及气候变化下的趋势. 应用生态学报, 2017, 28(1): 210-218.
- [6] Catry F X, Moreira F, Duarte I, Acácio V. Factors affecting post-fire crown regeneration in cork oak (*Quercus suber* L.) trees. European Journal of Forest Research, 2009, 128(3): 231-240.
- [7] Grimm E C. Fire and other factors controlling the big woods vegetation of Minnesota in the mid-nineteenth century. Ecological Monographs, 1984, 54(3): 291-311.
- [8] 李秀珍,王绪高,胡远满,孔繁花,解伏菊. 林火因子对大兴安岭森林植被演替的影响. 福建林学院学报, 2004, 24(2): 182-187.
- [9] Kane V R, Lutz J A, Alina Cansler C, Povak N A, Churchill D J, Smith D F, Kane J T, North M P. Water balance and topography predict fire and forest structure patterns. Forest Ecology and Management, 2015, 338: 1-13.
- [10] 李晓波,周道玮,姜世成. 火因子对松嫩羊草草原植物多样性的影响. 草业科学, 1997, 14(4): 56-59, 64.
- [11] Pivello V R, Oliveras I, Miranda H S, Haridasan M, Sato M N, Meirelles S T. Effect of fires on soil nutrient availability in an open savanna in Central Brazil. Plant and Soil, 2010, 337(1): 111-123.
- [12] Reinhart K O, Dangi S R, Vermeire L T. The effect of fire intensity, nutrients, soil microbes, and spatial distance on grassland productivity. Plant and Soil, 2016, 409(1): 203-216.
- [13] Hart S A, Chen H Y H. Fire, logging, and overstory affect understory abundance, diversity, and composition in boreal forest. Ecological Monographs, 2008, 78(1): 123-140.
- [14] Hart-Fredeluces G, Ticktin T. Fire, leaf harvest, and abiotic factors drive demography of an ecologically and culturally important understory plant. Ecosphere, 2019, 10(7): e02813.
- [15] 顾泽,王博,陈思帆,王忆文,索奥丽,刘晓东,陈锋. 不同火烈度火烧迹地内油松叶功能性状的变化. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1497-1504.
- [16] Ryan C M, Williams M. How does fire intensity and frequency affect miombo woodland tree populations and biomass? Ecological Applications, 2011, 21(1): 48-60.
- [17] Bigler C, Gavin D G, Gunning C, Veblen T T. Drought induces lagged tree mortality in a subalpine forest in the Rocky Mountains. Oikos, 2007, 116(12): 1983-1994.
- [18] Stephens S L, Moghaddas J J. Experimental fuel treatment impacts on forest structure, potential fire behavior, and predicted tree mortality in a California mixed conifer forest. Forest Ecology and Management, 2005, 215(1/2/3): 21-36.
- [19] 王叁,牛树奎,李德,王景华,陈锋,孙武. 云南松林可燃物的垂直分布及影响因子. 应用生态学报, 2013, 24(2): 331-337.
- [20] 李宝,程雪寒,吕利新. 西藏朗县地区不同龄级高山松林木径向生长对火干扰的响应. 植物生态学报, 2016, 40(5): 436-446.
- [21] 陈宝雄,王景升,冉琮千,张俊龙,左小龙. 1954—2009 年藏东南林区的气候变化特征. 气候变化研究进展, 2012, 8(1): 43-47.
- [22] 高辉,刘丽娟,方江平. 西藏色季拉山森林群落沿海海拔梯度变化格局. 广西师范大学学报:自然科学版, 2020, 38(6): 122-130.
- [23] 罗伦,国家青藏高原科学数据中心. 藏东南高山环境综合观测研究站气象观测数据(2007-2017): 国家青藏高原科学数据中心, 2018.
- [24] 罗伦,旦增,朱立平,张宏波. 藏东南色季拉山气温和降水垂直梯度变化. 高原气象, 2021, 40(1): 37-46.
- [25] Schweingruber F H. Tree rings and environment, dendroecology. Berne: Paul Haupt, 1996.
- [26] Harold Fritts. Tree rings and climate; Elsevier, 2012.
- [27] Douglass A E. Crossdating in dendrochronology. Journal of Forestry, 1941, 39(10): 825-831.
- [28] Wang B, Chen T, Wu G J, Xu G B, Zhang Y F, Gao H N, Zhang Y, Feng Q. Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) growth-climate response between lower and upper elevation gradient limits: a case study along a consistent slope in the mid-Qilian Mountains region. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 236.
- [29] Edward R Cook. Users manual for program ARSTAN. Tree-ring Chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin, 1986.

- [30] Li Z S, Zhang Q B, Ma K P. Tree-ring reconstruction of summer temperature for A.D. 1475-2003 in the central Hengduan Mountains, Northwestern Yunnan, China. *Climatic Change*, 2012, 110(1): 455-467.
- [31] 吴祥定, 孙力, 湛绪志. 利用树木车轮资料重建西藏中部过去气候的初步尝试. *地理学报*, 1989, 44(3): 334-342.
- [32] 张贇, 尹定财, 孙梅, 李丽萍, 田昆, 张卫国. 滇西北石卡雪山 2 个针叶树种森林上限径向生长对温度和降水的响应. *生态学报*, 2018, 38(7): 2442-2449.
- [33] 高郅, 李照青, 卢杰, 李江荣, 郑维列. 西藏工布自然保护区高山松林土壤种子库空间分布动态特征. *林业科学研究*, 2021, 34(2): 158-165.
- [34] Pellegrini A F A, Refsland T, Averill C, Terrer C, Staver A C, Brockway D G, Caprio A, Clatterbuck W, Coetsee C, Haywood J D, Hobbie S E, Hoffmann W A, Kush J, Lewis T, Moser W K, Overby S T, Patterson W A 3rd, Peay K G, Reich P B, Ryan C, Sayer M A S, Scharenbroch B C, Schoennagel T, Smith G R, Stephan K, Swanston C, Turner M G, Varner J M, Jackson R B. Decadal changes in fire frequencies shift tree communities and functional traits. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5(4): 504-512.
- [35] Seifert T, Meincken M, Odhiambo B O. The effect of surface fire on tree ring growth of *Pinus radiata* trees. *Annals of Forest Science*, 2017, 74(2): 34.
- [36] Zhu J, Dai L. Forest fire detection and suppression using remote sensing and GIS technologies: a review. *International Journal of Wildland Fire*, 2019, 28(6): 441-452.
- [37] White D A, Balocchi-Contreras F, Silberstein R P, de Arellano, P. R. The effect of wildfire on the structure and water balance of a high conservation value Hualo (*Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser.) forest in central Chile. *Forest ecology and management*, 2020, 472: 118219.
- [38] Grossnickle S C. Why seedlings survive: influence of plant growth and ontogeny on the tolerance of woody plants to abiotic stress. *New Forests*, 2012, 43(5-6): 711-738.
- [39] Schwilk D W, Ackerly D D. Flammability and serotiny as strategies: correlated evolution in pines. *Oikos*, 2001, 94(2): 326-336.
- [40] Seifert T, Pellegrini A F A. Historical context of forest fire management in the United States and the latest science findings. *Current Forestry Reports*, 2019, 5(4): 293-304.
- [41] Battipaglia G, Saurer M, Cherubini P, Siegwolf R T W, Cotrufo M F. Tree rings indicate different drought resistance of a native (*Abies alba* Mill.) and a nonnative (*Picea abies* (L.) Karst.) species co-occurring at a dry site in Southern Italy. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(3): 820-828.
- [42] Andreassen K, Solberg S, Tveito O E. Dendroecological studies of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Norway: implications for forest management under a changing climate. *Forest Ecology and Management*, 2005, 211: 263-279.
- [43] Esper J, Frank D C, Wilson R J S, Büntgen U, Treydte K. Uniform growth trends among central Asian low- and high-elevation juniper tree sites. *Trees*, 2007, 21(2): 141-150.