

DOI: 10.20103/j.stxb.202311272584

郑永宏, 叶子阳, 陈城, 曾琦, 胡正生, 农舒涵. 神农架地区树轮蓝光强度对气候要素的响应. 生态学报, 2024, 44(14): 6165-6173.

Zheng Y H, Ye Z Y, Chen C, Zeng Q, Hu Z S, Nong S H. Response of tree-ring blue intensity to climatic factors in Shennongjia region. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 6165-6173.

神农架地区树轮蓝光强度对气候要素的响应

郑永宏^{1,*}, 叶子阳¹, 陈城², 曾琦², 胡正生¹, 农舒涵¹

¹ 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079

² 湖北省气象局, 武汉 430074

摘要: 树轮在过去气候变化研究中发挥着难以替代的作用, 在树木生长条件较为适宜地区传统的树轮宽度指标存在短板。树轮蓝光强度作为树轮密度的替代性指标, 成为树轮-气候研究的重要载体。然而, 树轮蓝光强度这一新兴的指标在亚热带地区的研究仍十分不足。为进一步挖掘树轮蓝光强度在我国亚热带地区树轮气候学研究中的应用潜力, 利用神农架地区树轮宽度、树轮早材蓝光强度、树轮晚材蓝光强度、树轮早晚材蓝光强度差以及巴东气象站资料, 基于树轮气候学方法, 分析了上述树轮指标与月降水量、月平均最低气温、月平均气温和月平均最高气温之间的相关关系, 对比了不同树轮指标蕴含气候信号的能力。研究表明, 与树轮宽度相比, 神农架地区树轮蓝光强度蕴含更为丰富的气候信号, 其中树轮晚材蓝光强度、树轮早晚材蓝光强度差能够很好反映 8 月平均气温变化。其中, 在原序列上树轮早晚材蓝光强度差与 8 月气温的关系最为紧密, 而在高频上树轮晚材蓝光强度与 8 月平均气温的关系则更为紧密。树轮蓝光强度与气温之间高频信号一致性的发现, 有助于丰富树木生长条件较为适宜地区树轮气候学的研究, 为进一步的过去气温重建工作提供参考和依据。

关键词: 树轮蓝光强度; 响应; 8 月气温; 高频信号

Response of tree-ring blue intensity to climatic factors in Shennongjia region

ZHENG Yonghong^{1,*}, YE Ziyang¹, CHEN Cheng², ZENG Qi², HU Zhengsheng¹, NONG Shuhan¹

¹ School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Hubei Meteorological Service, Wuhan 430074, China

Abstract: Tree rings serve as invaluable archives of past climate conditions, offering insights into long-term climate patterns and variations. However, traditional tree-ring width indicators may not always provide a complete picture, especially in regions where trees experience optimal growth conditions. In such areas, alternative indicators like tree-ring blue intensity have gained prominence in dendroclimatology research. However, research on tree-ring blue intensity in subtropical regions remains significantly lacking. This study delves into the application potential of tree-ring blue intensity in subtropical regions of China, focusing on the Shennongjia region. By utilizing a comprehensive dataset including tree-ring width, earlywood blue intensity, latewood blue intensity, delta blue intensity, and meteorological data from the Badong weather station, the research aims to enhance our understanding of climate signals embedded within tree rings. Employing dendroclimatological methods, the study scrutinizes the correlations between various tree-ring indicators and key climate variables such as monthly precipitation, monthly mean minimum temperature, monthly mean temperature, and monthly mean maximum temperature. By comparing the effectiveness of different indicators in capturing climate signals, the research sheds light on the suitability of tree-ring blue intensity as a proxy for past climate conditions in subtropical regions. The findings reveal that tree-ring blue intensity in the Shennongjia region encompasses a more diverse array of climate signals compared to traditional

基金项目: 国家自然科学基金地区联合基金重点项目 (U23A2021); 国家自然科学基金项目 (41771227); 国家留学基金项目 (202006275018)

收稿日期: 2023-11-27; **网络出版日期:** 2024-05-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhengyh@whu.edu.cn

tree-ring width. Notably, latewood blue intensity and delta blue intensity emerge as robust indicators of variations in August temperature. The study elucidates the close relationship between these indicators and August temperature, with delta blue intensity showing a particularly strong correlation. Furthermore, the discovery of consistent high-frequency signals between tree-ring blue intensity and temperature enhances dendroclimatology research in regions characterized by favorable tree growth conditions. This advancement provides a solid foundation for reconstructing historical temperature variations. In conclusion, this study underscores the significance of tree-ring blue intensity as a valuable tool in dendroclimatology research, particularly in subtropical regions. By elucidating the intricate relationship between tree rings and climate variables, the research contributes to broader efforts aimed at understanding the impacts of climate change. The insights gained from this study can inform not only scientific research but also policy-making and adaptive management strategies in subtropical regions facing climate challenges. Moreover, the utilization of tree-ring blue intensity as a proxy for past climate conditions holds promise for enhancing our understanding of ecosystem responses to climate change in subtropical regions. By deciphering the complex interactions between tree growth dynamics and climatic variables, researchers can elucidate the mechanisms underlying ecosystem resilience or vulnerability to changing environmental conditions. This deeper understanding is essential for devising effective strategies for conserving biodiversity and mitigating the impacts of climate change on both natural and human systems.

Key Words: tree ring blue intensity; response; August temperature; high-frequency signals

树轮是重要的环境信息记录载体之一,在过去数百年至千年气候变化研究中发挥着重要作用。树轮宽度是最早得以应用的树轮指标,在夏季气温重建中^[1-3]发挥了重要作用,但生长条件较为适宜地区因气候要素满足了树木生长需求而导致树轮宽度对气候要素响应不够敏感。树轮晚材密度与夏季气温之间具有密切的关联,成为重建晚全新世夏季气温最为适宜的气候代用资料^[4],在地中海地区^[5]、东哈萨克斯坦^[6]、横断山^[7]、天山^[8]、青藏高原^[9-10]等地夏季气温变化重建中取得了一系列成果。但因树轮密度研究需要高昂的运行成本,树轮密度实验室尚不具有普遍性。为解决这一问题,树轮学者进行了不断探索,努力寻找一种经济、流程简单的可替代树轮密度的指标。Sheppard 等^[11]首次证实了树轮反射光图像替代树轮密度的可行性,McCarroll 等^[12]针对树轮图像红、绿、蓝波段进行分析并发现蓝光波段最适合替代树轮密度,Wilson 等^[13]对树轮蓝光强度年表建立流程简单化、标准化方面起到了重要促进作用。树轮蓝光强度以其经济、可靠、处理流程简单等优势^[14-15]成为近年颇受关注的树轮指标,成为树轮-气候研究的重要载体。在我国,树轮学者基于树轮蓝光强度方法进行了有益的探索,苑丹阳等^[16]发现吉林老白山树轮蓝光强度与当年夏季最高气温显著正相关,与夏季标准化降水蒸散指数显著负相关;Cao 等^[17]发现我国东南地区树轮早材蓝光强度对 3—5 月气温具有很好的重建能力;Yue 等^[18]基于树轮晚材蓝光强度揭示了过去 400 年天山冰川质量平衡变化;Li 等^[19]基于树轮晚材蓝光强度重建了青藏高原东南部 8 月气温的变化;Chen 等^[20]基于树轮晚材蓝光强度重建了我国北方地区 5—8 月气温变化;Zheng 等^[21]基于我国多个样点树轮蓝光强度资料探讨了其在树轮气候学研究中的价值。上述研究表明,树轮蓝光强度研究在我国树轮气候学研究中展现出良好的发展势头,树轮蓝光强度的应用将有助于弥补树木生长条件较为适宜的地区树轮宽度指标所存在的不足。然而,树轮蓝光强度信号是否可以作为亚热带地区气候代用指标,以及哪种蓝光强度信号具有最强的气候指示意义,仍需要进一步探索。神农架地区原始林广布,百年以上树龄林木资源丰富,可为树轮气候研究提供理想材料。其中,巴山冷杉(*Abies fargesii*)树龄能达到 200 年以上,具有重建较长时间尺度过去气候变化的潜力。本文以神农架地区巴山冷杉为例,通过探讨树轮蓝光强度对气候要素的响应挖掘其在树轮气候学研究中的价值。

1 数据与方法

1.1 数据

树轮样本于 2011 至 2021 年间采集自湖北省神农架金猴岭(31.47°N, 110.31°E, 海拔约 2500m)。在胸高

位置(1.3m)用生长锥进行取样,一般每株树采集1—2个样本,本文共计使用98个树轮样本。研究树种巴山冷杉是我国特有树种,也是我国亚热带暗针叶林主要类型之一,在神农架地区主要分布于海拔2000m以上,是神农架自然保护区中低山常绿针叶林的主要建群种和针阔叶混交林的共优种。

采样点周边有房县(32°01'49"N,110°45'46"E,426.9m a.s.l.)、巴东(31°02'N,110°22'E,334m a.s.l.)、神农架(31°45'N,110°40'E,935.2m a.s.l.)三个气象站,气象记录开始时间分别为1958、1953和1975年,距离采样点距离分别约为84km、45km和55km。选择了距离采样点最近的巴东气象站建站以来的资料,包括逐月平均最低气温(TMN)、月平均气温(TMP)、月平均最高气温(TMX)和月降水量(PRE)。气象数据来源于湖北省气象局。

1.2 方法

1.2.1 树轮年表研制

为获得高质量树轮宽度数据和树轮蓝光强度数据,基于常规流程在实验室进行干燥、粘贴、打磨(240—800目)等前期处理工作。树轮样本未见心材-边材颜色差异,因此未进行去脂处理^[22]。为保障扫描图像在不同实验室之间的可对比性,基于SilverFast软件用IT8 7.2校正卡对扫描仪进行校正^[13]。去除残留在树轮样本表面的浮尘后,用Epson pro850扫描树轮样本获取图像(分辨率为3200ppi),扫描时用内侧为黑色的箱子(或黑色不透明布)覆盖扫描仪以确保无外界光源干扰。利用CooRecorder软件对扫描获取的图像进行半自动化定年(图1),生成树轮宽度(RW)、树轮早材蓝光强度(EWB_{inv} , 2.56-color/100)、树轮晚材蓝光强度(LWB_{inv} , 2.56-color/100)和树轮早晚材蓝光强度差(DB)^[13]。基于ARSTAN程序,采用基于年龄的样条函数进行生长趋势的拟合并建立年表。



图1 树轮定年及蓝光强度数据生成

Fig.1 Tree ring dating and blue intensity data producing

1.2.2 树轮气候信号识别

利用相关函数分析RW、 EWB_{inv} 、 LWB_{inv} 、DB与TMN、TMP、TMX、PRE之间的关联。为充分识别各树轮指标中蕴含的气候信号,特别是季节性气候信号,分析了生长季上年9月至当年10月所有单月及所有连续月份气候信号对树轮指标的影响。

2 结果与讨论

2.1 树轮年表特征

四种年表共同区间统计结果显示(表1),所有序列相关、树内相关、树间相关以及信噪比,RW年表均呈现出最高值,之后依次为DB年表、 LWB_{inv} 年表和 EWB_{inv} 年表;与之相反,样本总体代表性开始大于0.85时的样本量及其对应的开始年份则呈现出RW、DB、 LWB_{inv} 、 EWB_{inv} 依次增大的现象;平均敏感度呈现出RW、DB、 EWB_{inv} 、 LWB_{inv} 依次降低的现象,特别是三种蓝光强度年表平均敏感度远远小于RW^[23];一阶自相关系数按

RW、EWB_{inv}、LWB_{inv}、DB 依次降低。多项研究结果^[24–25]表明,较树轮宽度,树轮蓝光强度序列间的相关性较弱。但树轮蓝光强度所表现出来的序列间较低的相关性并未减弱其蕴含气候信号能力,在树轮气候研究中^[24, 26]展现出很强的气候重建能力。达到广泛使用的样本总体代表性(EPS)大于 0.85 这一阈值^[27],树轮蓝光强度年表较树轮宽度年表需要更多的样本量,相对应的年表可靠时段开始年份就更晚。实际上,当 RW 的 EPS 达到 0.85 阈值的 1865 年之后,EWB_{inv}、LWB_{inv} 和 DB 也展现了较为稳定的方差波动(图 2),这表明本文基于 RW 确定的年表可靠时段也能满足蓝光强度年表的可靠性。此外,树轮蓝光强度是一种较为新兴树轮指标,鉴于其强大的气候信号蕴含能力和较弱的年表统计量^[24, 26],树轮蓝光强度年表 EPS 是否需要达到 0.85 这一阈值才能进行有效气候重建尚需进一步探讨。

表 1 共同区间年表统计特征(1911—2010 年)

Table 1 Summary of common period tree-ring series statistics (1911—2010)

年表统计量 Chronologies statistics	树轮宽度 Tree ring width	早材蓝光强度 Earlywood blue intensity	晚材蓝光强度 Latewood blue intensity	早晚材蓝光强度差 Delta blue intensity
所有序列相关 Average correlation between all series	0.365	0.105	0.169	0.194
树内相关 Average correlation within-trees	0.649	0.226	0.3	0.316
树间相关 Average correlation between-trees	0.361	0.104	0.168	0.193
信噪比 Signal-to-noise ratio	49.906	10.26	17.72	20.985
平均敏感度 Mean sensitivity	0.184	0.033	0.03	0.078
一阶自相关系数 First autocorrelation	0.669	0.564	0.394	0.223
样本量 Sample size	10	48	28	24
年 Year	1865	1889	1880	1880

针对 4 种年表 EPS 均超过 0.85 阈值的 1880—2020 年进行了两两相关分析(表 2),结果表明 LWB_{inv} 和 DB 相关最强,LWB_{inv} 和 EWB_{inv} 相关次之,而其他年表组合之间相关性较弱或不显著。这说明除 LWB_{inv} 与 DB、EWB_{inv} 之间具有较高的一致性外,其他年表之间存在明显差异(表 2),这种差异为树轮多指标的建立和应用以及树轮气候信号挖掘提供了机遇。

表 2 不同类型树轮年表间两两相关

Table 2 Pairwise correlation between different types of tree-ring chronologies

年表 Chronologies	树轮宽度 Tree ring width	早材蓝光强度 Earlywood blue intensity	晚材蓝光强度 Latewood blue intensity	早晚材蓝光强度差 Delta blue intensity
树轮宽度 Tree ring width	1	0.169 *	-0.081	-0.139
早材蓝光强度 Earlywood blue intensity	0.021	1	0.373 **	-0.202
晚材蓝光强度 Latewood blue intensity	-0.006	0.368 *	1	0.816 **
早晚材蓝光强度差 Delta blue intensity	-0.017	-0.104	0.880 **	1

右上角为原序列相关系数,左下角为一阶差分序列相关系数; * 代表 $P<0.05$, ** 代表 $P<0.001$

2.2 树轮气候信号

树轮-气候要素相关分析结果(图 3)表明,RW、EWB_{inv}、LWB_{inv}、DB 与 PRE 的相关性整体上较弱,其中 RW 与 9 月降水具有显著负相关($r=-0.30$, $P<0.05$),说明 9 月较多的降水不利于巴山冷杉径向生长;EWB_{inv} 与 10 月降水具有显著负相关($r=-0.36$, $P<0.05$),考虑到 10 月早已经完成了早材的生长,这种相关不具备生理意义。RW 与 TMN、TMP、TMX 相关关系(图 3)表明,生长季之前及早期 TMN、TMP、TMX 增加有助于树木径向生长,且这种促进效应更主要体现在多个月组成的季节而不是单个月份上;生长季后期的 TMX 增加促进树木径向生长,这种促进作用更主要体现为多个月份构成的组合,如上年 11 月至当年 10 月 TMX 增加促进树

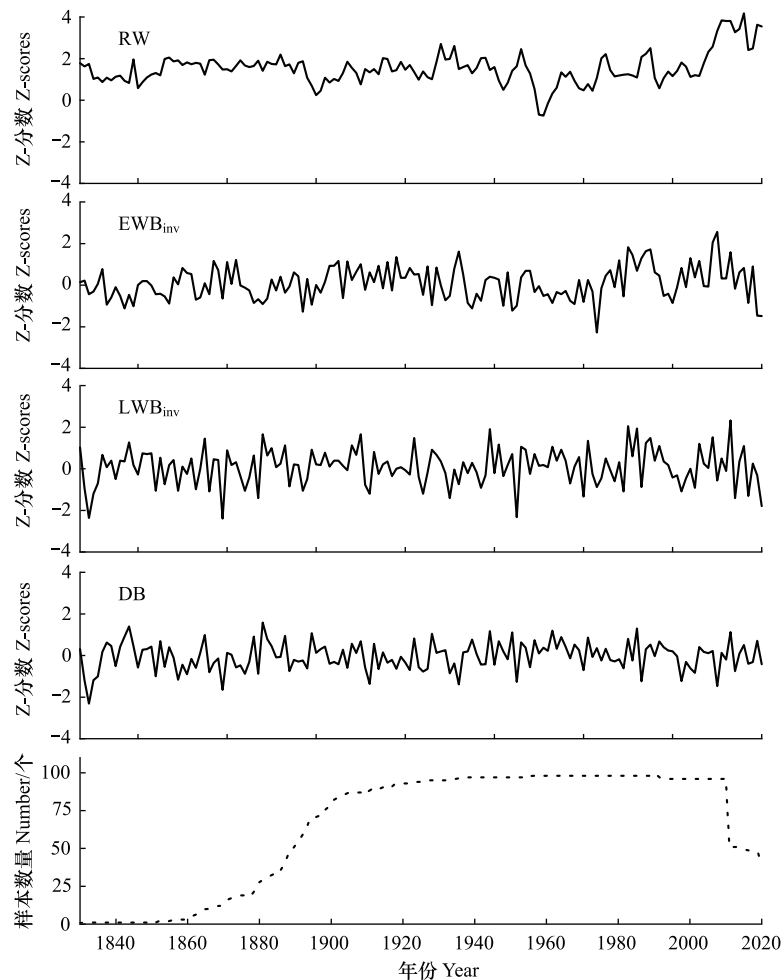


图2 树轮标准年表 Z-分数及样本量

Fig.2 Tree ring standard chronology Z-scores and sample size

RW:树轮宽度;EWB_{inv}:树轮早材蓝光强度;LWB_{inv}:树轮晚材蓝光强度;DB:树轮早晚材蓝光强度差

木生长。EWB_{inv}与TMN、TMP相关性较弱(图3),其中与6月TMP正相关达到0.05的显著性水平,与6月、6—7月、6—8月等组合TMX整体上呈显著正相关(图3),这意味着巴山冷杉EWB_{inv}并不遵循常规的“气温高-生长快-细胞大-EWB_{inv}值小”这一规律,该地区近似海拔高度的研究^[28]也发现6—8月气温偏高反而限制树木径向生长。LWB_{inv}与TMN、TMP、TMX正相关较为显著,其中与7—8月、8月TMP相关分别为0.58和0.59($P < 0.05$)(图3)。LWB_{inv}与树轮密度具有一致变化趋势,气温高促进树轮密度增大^[6-7, 9],与之相应的LWB_{inv}值就大。DB与LWB_{inv}相似,与TMN、TMP、TMX正相关较为显著,其中与8月TMP相关最高为0.62($P < 0.05$)(图3)。综上,发现DB与8月TMP之间具有最高的相关系数。树轮-气候要素相关分析结果(图3)还表明,树轮蓝光强度年表对上年的气候的响应较为微弱且仅体现在月份组合上,例如LWB_{inv}与上年9月至当年8、9、10月TMP呈显著性正相关;而对于单独月份,LWB_{inv}、LWB_{inv}、DB三种蓝光强度年表与PRE、TMN、TMP、TMX均未呈现显著性相关。

1953—2020年期间,在原序列及一阶差分序列上,LWB_{inv}与8月平均气温均具有较高的一致性(图4),相关系数分别为0.58和0.73($P < 0.05$);DB与8月平均气温也具有较高的一致性(图4),相关系数分别为0.62和0.67($P < 0.05$)。上述结果表明,在原序列上,较LWB_{inv}年表,DB年表展示出与气温之间具有更高的一致性,这可能源于LWB_{inv}年表心材-边材可能的肉眼不可见颜色偏差^[29]或其他因素降低了树轮-气候要素之间

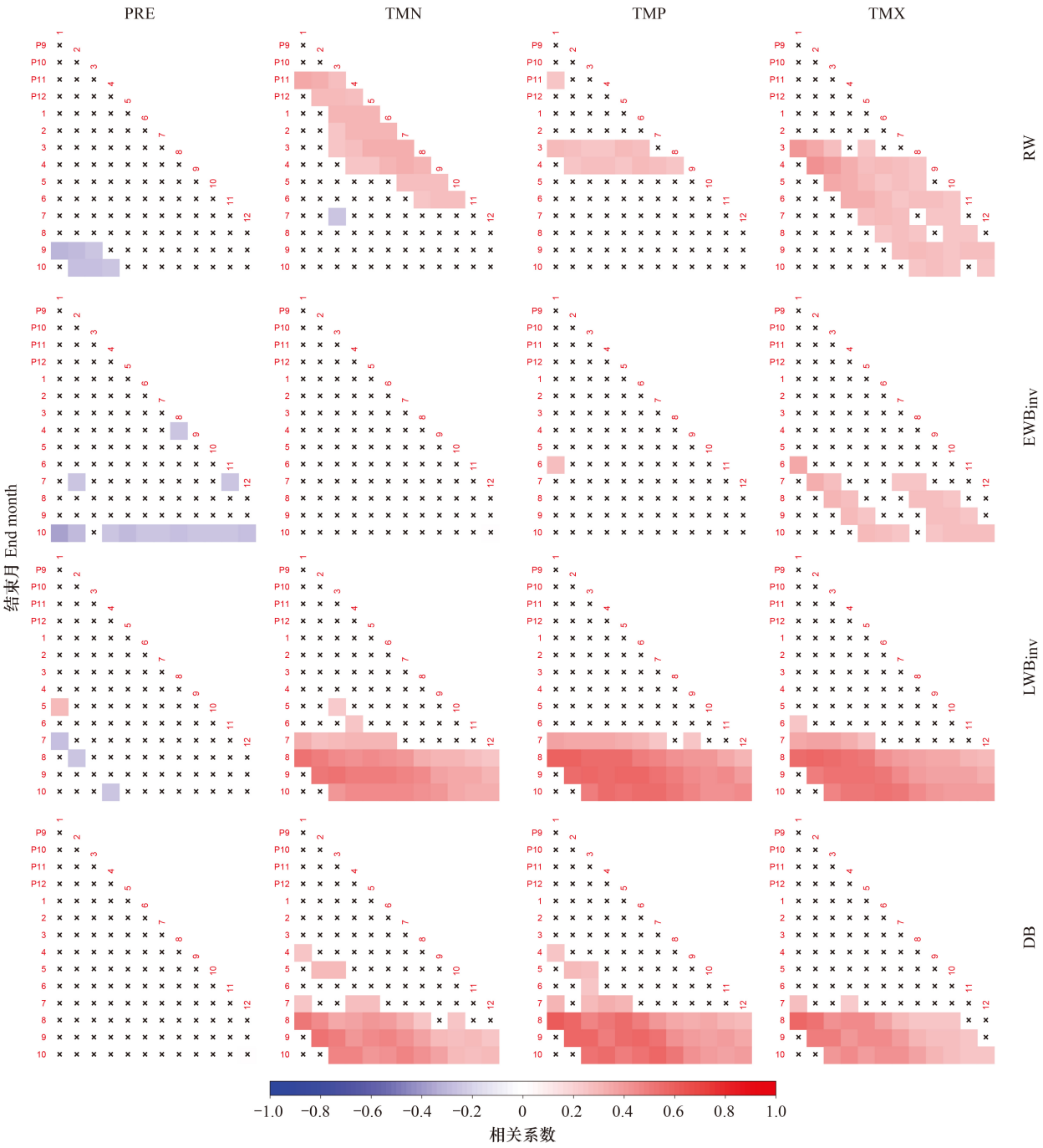


图3 年表与气候要素之间相关分析

Fig.3 Correlation analysis of chronologies against different climate targets

×:代表未达到0.05的显著性水平,彩色方框代表达到了0.05的显著性水平;对角线数字代表其所在列窗口宽度,即连续的月份数量;P:上一年;PRE:月降水量;TMN:月平均最低气温;TMP:月平均气温;TMX:月平均最高气温

的相关性;在一阶差分序列上,LWB_{inv}年表则展现出与气温之间具有更高的一致性,这表明DB年表通过差值计算会损失部分气候信号,特别是高频气候信号。

为检验神农架巴山冷杉树轮蓝光强度年表是否存在尾端效应,逐次剔除了树轮序列最新近形成的尾端数据(表3)。逐次剔除1年尾端数据过程中,原序列LWB_{inv}与8月平均气温的相关系数有一定变化,剔除尾端1、2、4年后,相关系数有所提升,而一阶差分序列LWB_{inv}与8月气温的相关性稳定;原序列及一阶差分序列

DB 与 8 月气温的相关性均十分稳定。原序列上 LWB_{inv} 与 8 月平均气温相关关系的些许变化是偶然还是必然,以及是由于潜在的肉眼不可见的边材-心材颜色差异导致,或是其他因素导致尚需进一步研究。特别是去掉 2020 年数据后,相关系数提升了 0.04,那么在树轮蓝光强度研究中是否需要去除尾端最新生长的 1 年数据?这需要通过对同一样地进行多年连续采样、分析予以确定。

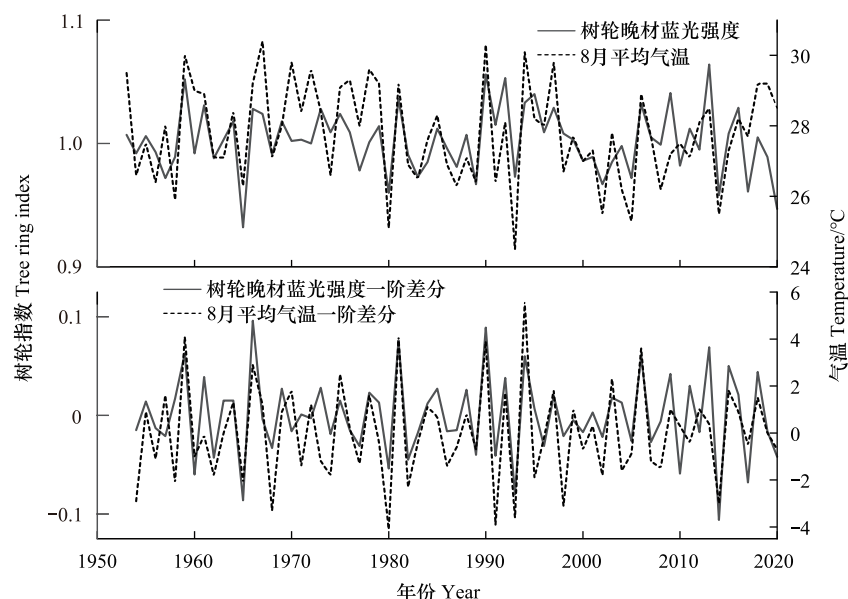
表 3 原序列和一阶差分序列逐次剔除 1 年数据后树轮晚材蓝光强度 (LWB_{inv})、树轮早晚材蓝光强度差 (DB) 年表与 8 月气温相关分析

Table 3 Correlation analysis between LWB_{inv} and DB with August temperatures after sequentially excluding 1-year data for both the original sequences and the first-order difference sequences

时间 Time	晚材蓝光强度年表 Latewood blue intensity chronology	晚材蓝光强度 年表一阶差分 The first difference of latewood blue intensity chronology	早晚材蓝光强度 差年表 Delta blue intensity chronology	早晚材蓝光强度 差年表一阶差分 The first difference of delta blue intensity chronology
1953—2011	0.66	0.74	0.63	0.68
1953—2012	0.65	0.74	0.63	0.67
1953—2013	0.64	0.72	0.63	0.67
1953—2014	0.66	0.73	0.64	0.68
1953—2015	0.66	0.74	0.64	0.68
1953—2016	0.66	0.74	0.64	0.68
1953—2017	0.64	0.73	0.64	0.68
1953—2018	0.64	0.73	0.62	0.68
1953—2019	0.62	0.73	0.63	0.68
1953—2020	0.58	0.73	0.62	0.67

所有相关系数均达到了 0.05 的显著性水平

本文发现, LWB_{inv} 、DB 年表能够很好响应 8 月平均气温的变化,这与在青藏高原东南部地区的研究^[19]具有很高的 consistency。作为树轮密度的替代性树轮指标,树轮蓝光强度与树轮密度对气候的响应具有一致性,多项基于树轮蓝光强度的研究^[22, 29—31]证实了其对夏季气温重建的能力,而树轮密度对夏季气温的重建能力^[4—5, 7, 10]已经得到了广泛的证实。然而,无论原序列上还是一阶差分序列,在 20 世纪 70 年代初期, LWB_{inv} 、DB 年表均与 8 月气温存在不一致现象(图 4),这可能源于某种气候要素波动或生物竞争等的影响,具体原因有待于进一步调查。



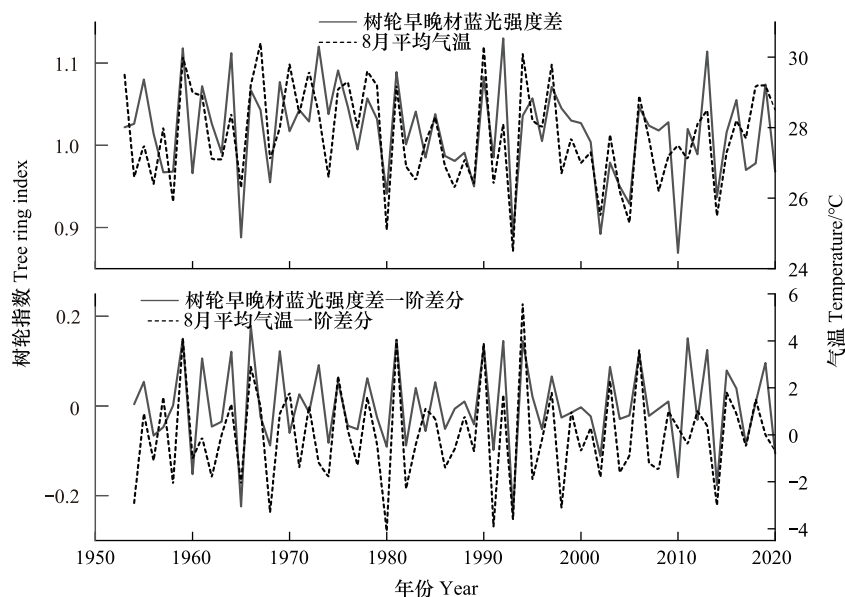


图4 LWB_{inv}、DB 年表与 8 月气温对比

Fig.4 Comparison of LWB_{inv} and DB with August temperatures

3 结论

本文以神农架地区巴山冷杉为研究对象,分析了传统的树轮宽度指标和新兴的树轮蓝光强度等指标对气候要素的响应,发现树轮蓝光强度指标在研究区域具有较高的树轮气候学应用价值。研究结果为基于蓝光强度的亚热带地区树轮气候重建奠定了基础,主要研究结论如下:

(1) 在神农架巴山冷杉树轮宽度、早材蓝光强度、晚材蓝光强度、早晚材蓝光强度差四种树轮指标中,树轮晚材蓝光强度和树轮早晚材蓝光强度差是很好反映 8 月气温变化的指标。

(2) 较树轮早晚材蓝光强度差,在高频上树轮晚材蓝光强度与气温之间具有更为紧密的关联。

参考文献 (References):

- [1] Wang J L, Yang B, Ljungqvist F C. A millennial summer temperature reconstruction for the eastern Tibetan Plateau from tree-ring width. *Journal of Climate*, 2015, 28(13): 5289-5304.
- [2] Büntgen U, Esper J, Frank D C, Nicolussi K, Schmidhalter M. A 1052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures. *Climate Dynamics*, 2005, 25(2/3): 141-153.
- [3] 焦亮, 马罗, 张同文. 基于树轮记录的阿尔泰山中段 1798 年以来 6—7 月平均最低气温变化研究. *生态学报*, 2021, 41(5): 1944-1958.
- [4] Esper J, Duthorn E, Krusic P J, Timonen M, Büntgen U. Northern European summer temperature variations over the Common Era from integrated tree-ring density records. *Journal of Quaternary Science*, 2014, 29(5): 487-494.
- [5] Esper J, Klippel L, Krusic P J, Konter O, Raible C C, Xoplaki E, Luterbacher J, Büntgen U. Eastern Mediterranean summer temperatures since 730 CE from Mt. Smolikas tree-ring densities. *Climate dynamics*, 2020, 54:1367-1382.
- [6] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, Wang L L, Yu S L, Zhang R B, Fan Z A, Shang H M, Zhang T W, Li Y. Tree ring density-based summer temperature reconstruction for Zajsan Lake area, East Kazakhstan. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(7): 1089-1097.
- [7] Fan Z X, Bräuning A, Yang B, Cao K F. Tree ring density-based summer temperature reconstruction for the central Hengduan Mountains in Southern China. *Global and Planetary Change*, 2009, 65(1/2): 1-11.
- [8] Yu S L, Yuan Y J, Wei W S, Chen F, Zhang T W, Shang H M, Zhang R B, Qing L. A 352-year record of summer temperature reconstruction in the western Tianshan Mountains, China, as deduced from tree-ring density. *Quaternary Research*, 2013, 80(2): 158-166.
- [9] Yin H, Li M Y, Huang L. Summer mean temperature reconstruction based on tree-ring density over the past 440 years on the eastern Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 2021, 571: 81-88.

- [10] Li M Y, Duan J P, Wang L L, Zhu H F. Late summer temperature reconstruction based on tree-ring density for Sygera Mountain, southeastern Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 2018, 163: 10-17.
- [11] Sheppard P R, Graumlich L J, Conkey L E. Reflected-light image analysis of conifer tree rings for reconstructing climate. *The Holocene*, 1996, 6 (1): 62-68.
- [12] McCarroll D, Pettigrew E, Luckman A, Guibal F, Edouard J L. Blue reflectance provides a surrogate for latewood density of high-latitude pine tree rings. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2002, 34(4): 450-453.
- [13] Wilson R, Rao R, Rydval M, Wood C, Larsson L Å, Luckman B H. Blue Intensity for dendroclimatology: the BC blues: a case study from British Columbia, Canada. *The Holocene*, 2014, 24(11): 1428-1438.
- [14] Kaczka R J, Spyt B, Janecka K, Beil I, Büntgen U, Scharnweber T, Nievergelt D, Wilmking M. Different maximum latewood density and blue intensity measurements techniques reveal similar results. *Dendrochronologia*, 2018, 49: 94-101.
- [15] Reid E, Wilson R. Delta blue intensity *vs.* maximum density: a case study using *Pinus uncinata* in the Pyrenees. *Dendrochronologia*, 2020, 61: 125706.
- [16] 苑丹阳, 朱良军, 张远东, 李宗善, 赵慧颖, 王晓春. 吉林老白山鱼鳞云杉树轮蓝光强度和轮宽指数与气候响应关系随海拔变化的对比. *植物生态学报*, 2019, 43(12): 1061-1078.
- [17] Cao X G, Hu H B, Kao P K, Buckley B M, Dong Z P, Chen X L, Zhou F F, Fang K Y. Improved spring temperature reconstruction using earlywood blue intensity in southeastern China. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(12): 6204-6220.
- [18] Yue W P, Seftigen K, Chen F, Wilson R, Zhang H L, Miao Y L, Chen Y P, Zhao X E. *Picea schrenkiana* tree ring blue intensity reveal recent glacier mass loss in High Mountain Asia is unprecedented within the last four centuries. *Global and Planetary Change*, 2023, 228: 104210.
- [19] Li T, Li J B. August temperature reconstruction based on tree-ring latewood blue intensity in the southeastern Tibetan Plateau. *Forests*, 2023, 14 (7): 1441.
- [20] Chen Q M, Yue W P, Chen F, Hadad M, Roig F, Zhao X E, Hu M, Cao H H. Warm season temperature reconstruction in North China based on the tree-ring blue intensity of *Picea meyeri*. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33(12): 2511-2529.
- [21] Zheng Y H, Shen H F, Abernethy R, Wilson R. Experiments of the efficacy of tree ring blue intensity as a climate proxy in central and Western China. *Biogeosciences*, 2023, 20(16): 3481-3490.
- [22] Heeter K J, Harley G L, Maxwell J T, Wilson R J, Abatzoglou J T, Rayback S A, Rochner M L, Kitchens K A. Summer temperature variability since 1730 CE across the low-to-mid latitudes of western North America from a tree ring blue intensity network. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 267: 107064.
- [23] Buckley B M, Hansen K G, Griffin K L, Schmiede S, Oelkers R, D'Arrigo R D, Stahle D K, Davi N, Nguyen T Q T, Le C N, Wilson R J S. Blue intensity from a tropical conifer's annual rings for climate reconstruction: an ecophysiological perspective. *Dendrochronologia*, 2018, 50: 10-22.
- [24] Blake S A P, Palmer J G, Björklund J, Harper J B, Turney C S M. Palaeoclimate potential of New Zealand *Manoao colensoi* (silver pine) tree rings using Blue-Intensity (BI). *Dendrochronologia*, 2020, 60: 125664.
- [25] Wiles G C, Charlton J, Wilson R J S, D'Arrigo R D, Buma B, Krapek J, Gaglioti B V, Wiesenberg N, Oelkers R. Yellow-cedar blue intensity tree-ring chronologies as records of climate in Juneau, Alaska, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, 49(12): 1483-1492.
- [26] Wilson R, Allen K, Baker P, Boswijk G, Buckley B, Cook E, D'Arrigo R, Druckenbrod D, Fowler A, Grandjean M, Krusic P, Palmer J. Evaluating the dendroclimatological potential of blue intensity on multiple conifer species from Tasmania and New Zealand. *Biogeosciences*, 2021, 18(24): 6393-6421.
- [27] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(2): 201-213.
- [28] Dang H S, Zhang Y J, Zhang K R, Jiang M X, Zhang Q F. Climate-growth relationships of subalpine fir (*Abies fargesii*) across the altitudinal range in the Shennongjia Mountains, central China. *Climatic Change*, 2013, 117(4): 903-917.
- [29] Björklund J, Gunnarson B E, Seftigen K, Zhang P, Linderholm H W. Using adjusted Blue Intensity data to attain high-quality summer temperature information: a case study from Central Scandinavia. *The Holocene*, 2015, 25(3): 547-556.
- [30] Heeter K J, Harley G L, Maxwell J T, McGee J H, Matheus T J. Late summer temperature variability for the Southern Rocky Mountains (USA) since 1735 CE: applying blue light intensity to low-latitude *Picea engelmannii* Parry ex Engelm. *Climatic Change*, 2020, 162(2): 965-988.
- [31] Fuentes M, Salo R, Björklund J, Seftigen K, Zhang P, Gunnarson B, Aravena J C, Linderholm H W. A 970-year-long summer temperature reconstruction from Rogen, west-central Sweden, based on blue intensity from tree rings. *The Holocene*, 2018, 28(2): 254-266.