

秦岭太白红杉径向生长对气候响应的时间稳定性研究

黄一祎¹, 秦进^{1,2*}, 许思琰¹

¹商洛学院城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛

²商洛学院陕西高校新型智库商洛发展研究院, 陕西 商洛

收稿日期: 2025年2月28日; 录用日期: 2025年3月21日; 发布日期: 2025年3月28日

摘要

随着树轮气候学的发展, 研究发现树轮指标在时间上对气候因子的响应存在着不稳定性, 即“分异问题(Divergence problem)”: 随着全球气候变暖的加剧, 树木生长对气候的响应关系会发生改变。本研究基于采样区附近平原、山地气象站共存的现状, 首先运用皮尔逊相关分析法探析太白红杉差值年表与气候要素的响应关系, 探讨不同站点器测数据对太白红杉(*Larix chinensis*)树轮-气候响应关系研究的影响, 随后优选出相关性最高的气象数据, 将气象数据分解成前25年(1960~1984年)与后25年(1985~2009年)两组, 判断太白红杉树轮-气候响应的时间稳定性。结果发现: 选择不同气象站的气象数据对树轮-气候关系研究会产生影响, 太白红杉在不同时间段对气候的响应模式存在显著差异性, 印证了秦岭地区树轮-气候响应也存在时间上的不稳定性, 即“分异问题”是客观存在的, 由此可知, 伴随着全球气候变暖, 秦岭太白山自然保护区太白红杉的径向生长在不同时间段对于气候要素的响应特征、响应模式存在显著分异。

关键词

秦岭, 太白红杉, 气象数据选择, 树木年轮

Study on the Temporal Stability of Climatic Response in Radial Growth of *Larix chinensis* in the Qinling Mountains

Yiyi Huang¹, Jin Qin^{1,2*}, Siyan Xu¹

¹School of Urban and Rural Planning and Architecture Engineering, Shangluo University, Shangluo Shaanxi

²The New Style Think Tank of Shaanxi Universities, Shangluo Development Research Institute, Shangluo Shaanxi

*通讯作者。

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Mar. 21st, 2025; published: Mar. 28th, 2025

Abstract

With the development of dendroclimatology, research has revealed the instability of the response of tree-ring indicators to climate factors over time, namely the “Divergence problem”: as global warming intensifies, the response relationship between tree growth and climate changes. Based on the co-existence of plain and mountain meteorological stations near the sampling area, this study first uses the Pearson correlation analysis method to explore the response relationship between the residual chronology of *Larix chinensis* and climate elements, and discusses the impact of instrumental data from different stations on the study of the tree ring-climate response relationship of *Larix chinensis*. Subsequently, the meteorological data with the highest correlation is selected, and the meteorological data is divided into two groups: the early 25-year period (1960~1984) and the later 25-year period (1985~2009) to determine the temporal stability of the tree ring climate response of *Larix chinensis*. The results show that the selection of meteorological data from different meteorological stations has an impact on the study of the tree ring climate relationship. There are significant differences in the response patterns of *Larix chinensis* to climate in different time periods, confirming that there is also temporal instability in the tree ring climate response in the Qinling region, that is, the “Divergence problem” objectively exists. It can be seen that with global warming, the radial growth of *Larix chinensis* in the Taibai Mountain Nature Reserve in the Qinling Mountains has significant differences in response characteristics and response patterns to climate elements in different time periods.

Keywords

Qinling Mountains, *Larix chinensis*, Meteorological Data Selection, Tree-Ring

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人类持续消耗化石能源所排放的大量温室气体导致了全球气候的不断变暖，使世界众多地区出现了干暖化趋势日益加重[1]、生态环境威胁逐步加深的现象[2]。部分森林的物种分布、组成、甚至结构功能已经被迫改变[3]~[5]，因而气候变化对森林结构动态的冲击引起了广泛关注[6]。厘清气候变化对树木生长的影响有助于预测森林的动态，树木年轮因具有定年准确、连续性强、测量精确、易于采样和易获复本等特点[7]，成为分析近期全球变暖对树木生长影响过程的绝佳材料。

秦岭横亘于我国中部，是北亚热带与暖温带气候过渡带的最大生物基因宝库和最重要生态屏障，该地区高山 - 亚高山地带与周边人类活动密集地区处于相互隔离状态，因而拥有丰富多样的天然森林资源，一直以来都是气候变化研究与监测的绝佳区域[8]。秦岭树木年轮学研究自 20 世纪 90 年代就已经开始，并获得了颇多成果。例如，吴祥定[9]等，分析了华山松(*Pinus armandii*)树轮年表对气候的响应特征，发现华山松径向生长与 6 月气温具有密切的关系，还受到当年 4 月气温和 4~7 月降水的影响；康永祥等[10]，探析了太白山太白红杉(*Larix chinensis*)树轮与气候要素之间的关系，发现太白红杉径向生长对气温的敏感性较降水强，降水对树木生长的滞后作用较气温明显；Yan 等[11][12]，发现太白山太白红杉的径向生

长主要受气温的限制，尤其是生长季气温的限制；Dang 等[13]，发现初春和夏季的温度是低、中海拔油松(*Pinus tabuliformis*)径向生长的主要限制因子，而高海拔限制因子为当年夏季降水；Liu 等[14]，认为秦岭南坡巴山冷杉(*Abies fargesii*)树轮宽度对于前一年9月至当年4月气温有较强响应，而北坡树木对于当年初夏气温响应敏感；戴军虎、邵雪梅等[15]，运用太白红杉树轮资料重建了太白山地区近300a的温暖指数；Chen 等[16]，基于岷江冷杉(*Abies faxoniana*)重建了整个西秦岭地区2~7月的气温；而Hu 等[17]，则利用太白红杉树轮资料重建了秦岭中部1814年以来的平均最低气温变化序列。

以上研究均证明秦岭地区树木年轮中蕴含丰富的气候信号，随着树轮气候学的发展，研究发现树轮指标在时间上对气候因子的响应存在着不稳定性，即“分异问题(Divergence problem)”: 随着全球气候变暖的加剧，树木生长对气候的响应关系会发生改变[18]。例如，Jiao 等[19]，对西伯利亚落叶松和雪莲云杉的径向生长响应进行了时间稳定性评价，发现西伯利亚落叶松和施伦克云杉表现出不同的时间稳定性和径向生长模式，建议在重建历史气候和模拟森林发展趋势时考虑径向生长对气候变化的响应稳定性评价；Cao 等[20]，研究了中朝边境朝鲜松和蒙古栎、东北白桦树沿海拔梯度对气候变暖的响应，发现树木生长-气温关系的敏感性是随海拔变化而变化的，并且存在种间差异。综上所述，“分异问题”的存在会对基于均一性原理而重建的气候变化产生不容忽视的影响，甚至会误导人们对于树木生长与气候环境之间关系的认识，已有众多研究表明，秦岭地区近期经历了气温突变，对于这样一个复杂的生态过渡带，“分异问题”必然存在且干扰着人们对于秦岭地区树轮-气候响应真相的判断，这会导致气温突变前制定树木的保护策略、方案并不适用于气温突变后，因此，在秦岭地区开展树轮-气候响应“分异问题”的具体表现与规律具有明确价值[21]。

鉴于树木年轮资料和气候要素的数理统计关系是重建当地或周围地区气候变化历史的基础，且秦岭具有地形复杂、局地气候差异明显的特点，有必要首先探究气象数据选取对树轮宽度-气候响应关系的影响，随后再筛选出相关系数最高的气象数据，探析秦岭太白红杉径向生长对气候响应的时间稳定性。太白山是我国东部最高峰，位于秦岭南北坡分界线上，对全球和区域气候变化敏感，当地特有的纯林树种太白红杉轮宽变化特征明显，其生长极少受到人类活动的干扰，提供了树轮气候学研究的理想条件。本研究建立了太白红杉树轮宽度年表，首先利用太白山自然保护区周边气象台站器测数据探讨与太白红杉相关系数最强的数据来源，随后将数据分成前25年和后25年两部分，以判断树轮气候响应的时间稳定性。研究结果不仅有助于促进人们对太白红杉与气候之间关系的认识，同时为探讨该树种在未来气候变化情景下的碳源、碳汇问题提供基础。

2. 研究区概况与研究方法

2.1. 研究区概况

太白山位于西安市西南方向113 km，跨周至、眉县与太白三县(北纬 $33^{\circ}49' \sim 34^{\circ}10'$ ，东经 $107^{\circ}19' \sim 107^{\circ}58'$)，主峰拔仙台是青藏高原以东最高峰(海拔3771.2 m)，1965年9月成为国家级自然保护区，面积达56325 ha，森林覆盖率达82.2%，现有国家二、三级保护植物15种以上。太白山山体呈东西走向，是秦岭主脊线的核心部分，属典型的东亚大陆性季风气候，冬季寒冷多风，夏季温暖高湿，主峰地区年平均气温和降水量分别约为1.8~2.1°C和800~900 mm，最高温和最大降水常现于每年7月。此种气候条件能有效维持植物在碳水化合物合成过程中的生理活动，提高了养分和矿质元素的传递效率，并补充了足够的土壤水分。

当地植被垂直分带明显，植被类型随海拔由低到高依次为落叶阔叶林、针阔混交林、针叶林和亚高山草甸，在海拔3000~3500 m的林带范围内有以当地命名的代表性松科乔木太白红杉广泛分布，太白红杉群系上接第四纪冰川作用形成的巨型碎石海遗迹，下接巴山冷杉群系[10]。

2.2. 样本采集与年表研制

太白红杉分布于太白山森林最上限且对环境变化敏感, 属于生态阈限边缘[21]的树种。本文轮宽数据来自2013年秋季在太白山北坡海拔3060~3210 m范围内采集的太白红杉样本。采样工作基于国际标准树轮数据库(ITRDB)所提供的策略, 结合敏感性原则、生态环境原理和复本原则等, 挑选太白山北坡太白红杉群落中的直立健康树木进行采样, 采样区位置如图1所示。采样时, 使用生长锥从同一棵树胸高位置相互垂直的方向钻取2个包含了树皮和树心的样芯, 将取得的树芯装入已提前编号的样本专用细筒中, 累计采集样本62个。

随后, 将树芯样本进行固定、风干、打磨、剖光和清洁, 直到树芯表面光滑、平整, 所有年轮清晰度达到分析要求, 然后使用精度为0.01 mm的LINTAB轮宽分析仪进行宽度测定, 数据以特定文件储存于计算机[22]。随后, 使用COFECHA程序进行交叉定年以排除干扰信号, 确保测量数据的准确性, 确定树木年轮宽度序列的准确年份[23]。淘汰掉干扰年表一致性的部分轮宽序列, 最终筛选出与主序列一致性最强的45个树轮样本。最后, 通过Arstan软件[24]采用负指数函数或样条函数拟合来消除树木本身遗传因子产生的生长趋势以及树间干扰产生的抑制和释放的生长趋势[25], 最终得到3种年表:STD(标准年表)、RES(标准年表)和ARS(自回归年表)。

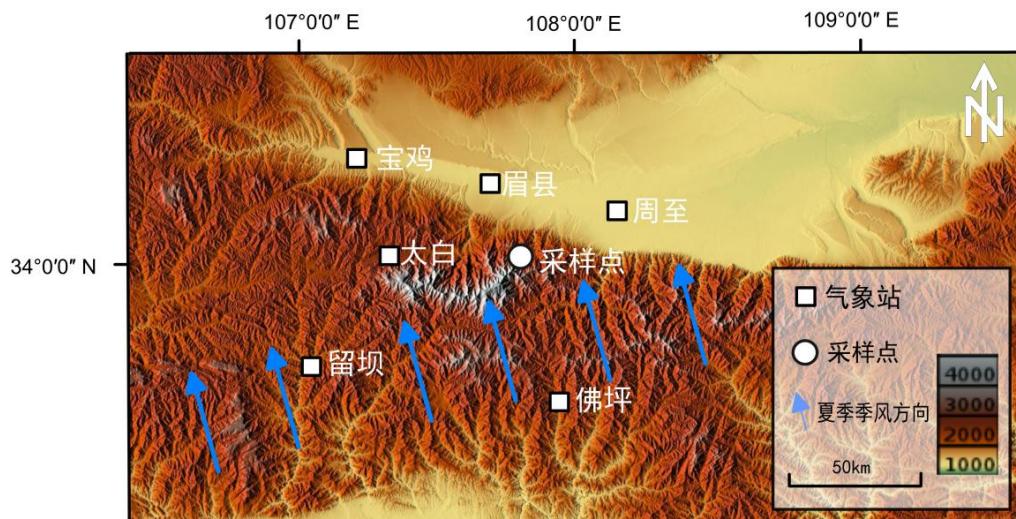


Figure 1. Distribution of tree-ring sampling points and weather stations
图1. 树轮采样点及气象站分布

2.3. 气象资料的与数据分析

虽然在采样点近距离已设有多个高海拔气象站[26], 但数据时段仅在10a以内, 因此选取了最靠近太白山采样区的6个标准气象站(图1)50a(1960~2009年)逐月平均气温和平均总降水进行相关分析。本研究将此6站按来源分为2类并按海拔从低到高进行编号, 即3个关中平原气象站(下文简称为平原站)与3个秦岭山地气象站(下文简称为山地站), 详情见表1。一方面考虑到气候对植物径向生长的“滞后效应”, 即树木生长不仅与当年的气候条件有关也受上年气候因子的影响。因此, 首先选取上年6月~当年9月的月均温和月平均总降水量共计32个变量与太白红杉轮宽年表进行Pearson相关分析。另一方面, 植物生长受气候条件的影响一般具有持续性, 即季节的气候状况对树木生长的影响有更好的代表性。随后, 进一步计算当年1~9月生长季连续多月气候要素均值, 形成新的30个变量与太白红杉年表重新进行相关分析。本研究中年表及气候因子的相关分析基于SPSS软件实现。图2为近50a采样区周边气象站降水、气

温逐月均值分布情况。

Table 1. Detailed table of standard weather stations around the sampling area
表 1. 采样区周边标准气象站详情表

编号	气象站名	经度	纬度	海拔/m	与采样点水平距离/km
平原_1	周至	108°12'	34°12'	433.10	42.70
平原_2	眉县	107°48'	34°17'	517.60	32.10
平原_3	宝鸡	107°12'	34°24'	612.40	67.00
山地_1	留坝	106°57'	33°39'	1032.10	92.00
山地_2	佛坪	107°59'	33°31'	1087.70	54.50
山地_3	太白	107°18'	34°3'	1543.60	45.80

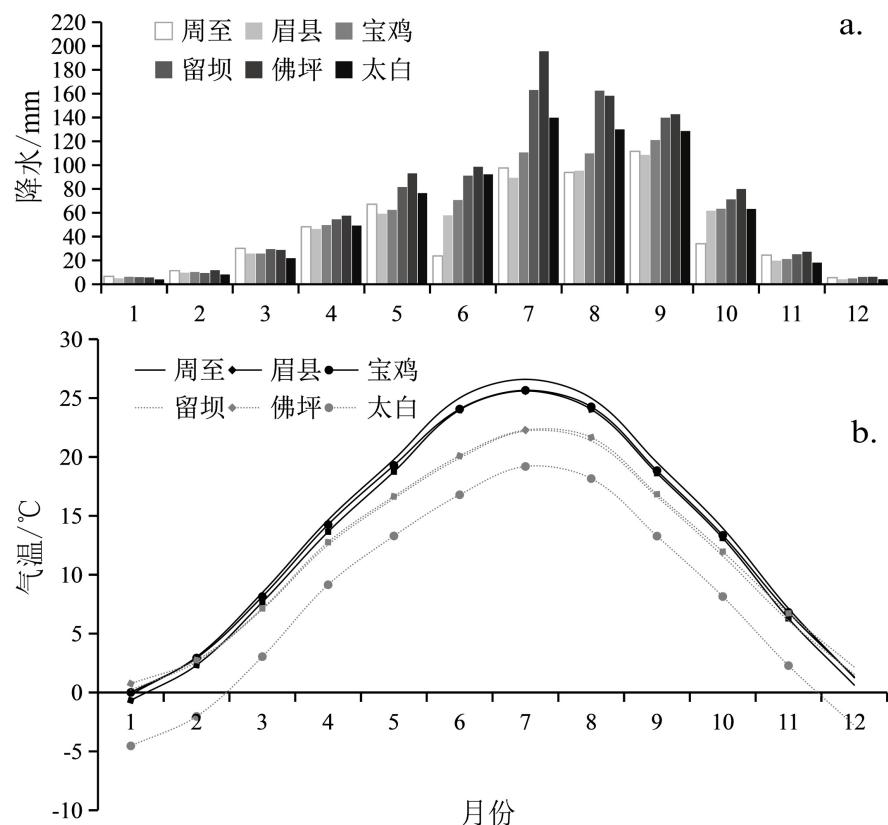


Figure 2. Monthly mean distribution of precipitation (a.) and temperature (b.) at the surrounding meteorological stations in the sampling area of recent 50a

图 2. 近 50a 采样区周边气象站降水(a.)、气温(b.)逐月平均值分布图

3. 结果

3.1. 不同来源气象数据比较

由图 2 可以看出, 研究区属于典型的温带大陆性季风气候特征, 6 站逐月平均气温及平均总降水量最高值均出现于 7 月份, 最高温与最高降水的时段基本一致, 全年气温以 6~8 月为最高, 降水以 7~9 月为最高。各站的气温、降水值高低分布存在一定的地带性变化规律, 月均温随海拔升高而递减, 年均温

最高的为平原 1 号周至气象站, 而最低的为山地 6 号太白气象站。南坡气象站降水量比北坡气象站降水量高, 降水量最高的 2 站为山地 2 号佛坪气象站与山地 1 号留坝气象站, 而降水量最低的 2 站为平原 1 号周至气象站与平原 2 号眉县气象站。

为了判断各气象站逐月气温、降水数据走势的一致性, 分别计算了年均温最高的周至气象站与其他 5 个气象站的逐月温差以及降水量最高的佛坪气象站与其他 5 个气象站逐月降水差, 得到图 3。可以清楚的看到, 周至站逐月气温与其他站点逐月气温的温差走势相对比较一致, 与平原 2 站的温差基本在 1°C 以内。然而, 佛坪站逐月降水与任意站点逐月降水差值的走势均不一致。

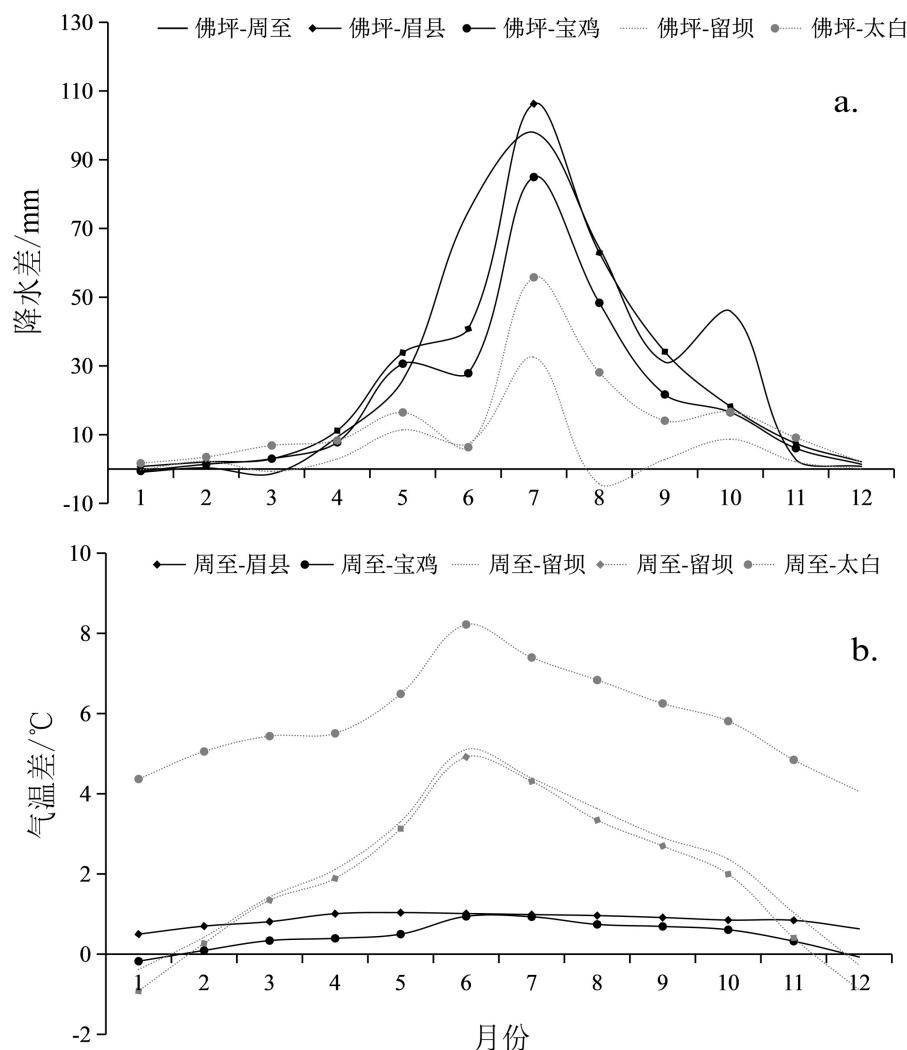


Figure 3. Monthly temperature difference between Zhou-Zhi meteorological station and other 5 stations (a.), monthly precipitation difference between Foping Meteorological Station and other 5 stations (b.)

图 3. 周至气象站与其他 5 站逐月温差(a.), 佛坪气象站与其他 5 站逐月降水差(b.)

3.2. 年表统计特征分析

表 2 列出了太白红杉轮宽 RES 与 STD 年表描述性特征统计参数值。可见, 太白红杉差值年表(RES)的平均敏感度(Mean sensitivity)、标准偏差(Standard deviation)、信噪比(Signal-to-noise ratio)、样本总体代表性(Expressed population signal)、第一特征根变异解释量(Variance in first eigen-vector/%)均高于标准年表

(STD)，这反映了差值年表(RES)包含了相对更加强烈的环境信号，因此本研究使用 RES 年表来分析太白红杉树轮与气候要素之间的关系。作为判断树轮年表优劣的核心指标，平均敏感度分别为 0.21 (RES) 和 0.17 (STD)，均高于 0.14 的阈值，代表树木年轮宽度波动能够强烈反应周边环境的变化[21]。标准年表 (STD) 一阶自相关系数达到 0.51，说明当年太白红杉树木年轮宽度也在一定程度上地反映上年的气候状况 [27]。样本总体代表性均超过 96%，超过临界阈值 85%，说明样本包含的环境信号能代表总体特征[28]， $\text{EPS} > 0.85$ 的起始年份为 1873 年，所对应的样本量为 9 个。第一特征根变异解释量均超过 30%，表明树木生长因子相对集中，各个样本序列同步性强，树内平均相关系数和树间平均相关系数分别指示来源于同株及不同株树木年轮逐年宽度变化的一致性，其值越高也说明树木生长的一致性越好[21]。综上所述，本研究所研制的太白红杉轮宽年表具有良好树木年代学研究价值。图 4 展示了太白红杉轮宽 RES 年表与样本量在不同年份的对应关系。

Table 2. Descriptive characteristics of ring width chronology of Taibai Sequoia
表 2. 太白红杉轮宽年表描述性特征统计表

统计量	RES	STD
平均敏感度	0.21	0.17
标准差	0.19	0.22
一阶自相关系数	0.01	0.51
第一特征根变异解释量	46.60	44.79
信噪比	2.67	2.29
树内平均相关系数	0.56	0.56
树间平均相关系数	0.40	0.41
年表长度/a	165	165
样本总体代表性	96.8%	96.3%

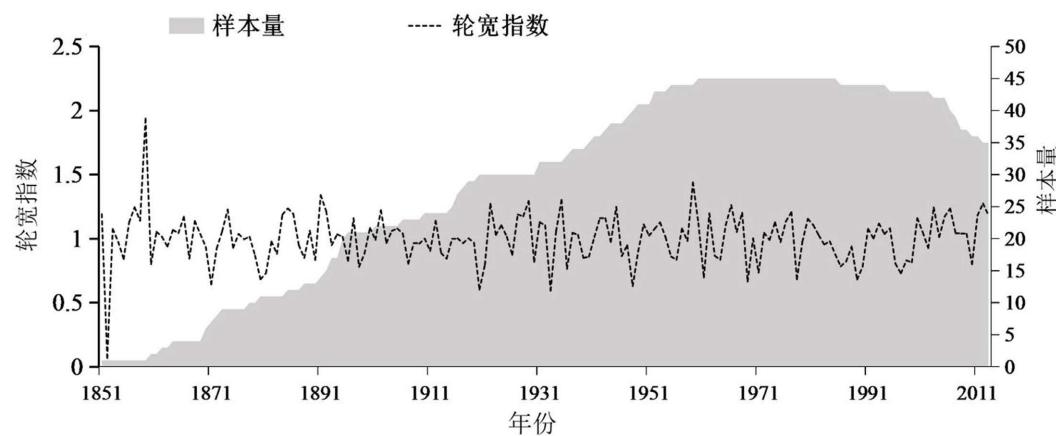


Figure 4. Chronology and sample size of ring width RES of Taibai Sequoia
图 4. 太白红杉轮宽 RES 年表与样本量

3.3. 太白红杉树轮宽指数与不同气象站气候因子的关系及其稳定性

3.3.1. 太白红杉与不同气象站逐月气温、降水的关系

轮宽指数与平原、山地 6 站逐月气温的相关系数在走势上并无较大差别(图 5)，均显示树轮宽度与当

年 2~7 月生长季气温正相关(留坝 5 月气温除外), 而与上年 12 月气温负相关, 2~5 月气温与轮宽指数的正相关呈逐月递减的趋势, 但却于 6 月迅速增至极值, 通过了 95% 的显著性检验。虽然轮宽指数与平原 3 站 8 月气温负相关系数均通过了 95% 的显著性检验, 其中, 宝鸡站气象数据与太白红杉树轮宽度相关系数相对最高, 轮宽指数与秦岭山地 3 站 8 月份气温的相关性并不显著。

由图 6 可见, 太白红杉树轮宽度指数与 6 站逐月降水的相关系数一致性显然不及与 6 站气温相关系数, 但整体上反映轮宽与上年 6 月及当年 8、9 月降水正相关, 而与当年 2~6 月降水负相关。树木年轮指数与平原 3 站降水的相关系数逐月走势比较一致, 当年 4~6 月的降水与轮宽指数的负相关较强, 且呈现梯度递减之势, 至当年 8 月, 降水与轮宽指数又转换为显著的正相关关系。轮宽指数与山地 3 站降水相关性分析结果各异, 与留坝气象站降水的负相关从 1 月持续至 7 月, 且在 6 月通过 95% 显著性检验($r = -0.286$), 仅与佛坪 8 月降水的负相关通过了 95% 的显著性检验, 与太白气象站降水的相关分析结果还显示上年 12 月~当年 2 月降水对树木生长存在较强的正相关, 这一现象与其他 5 站的反差十分鲜明。

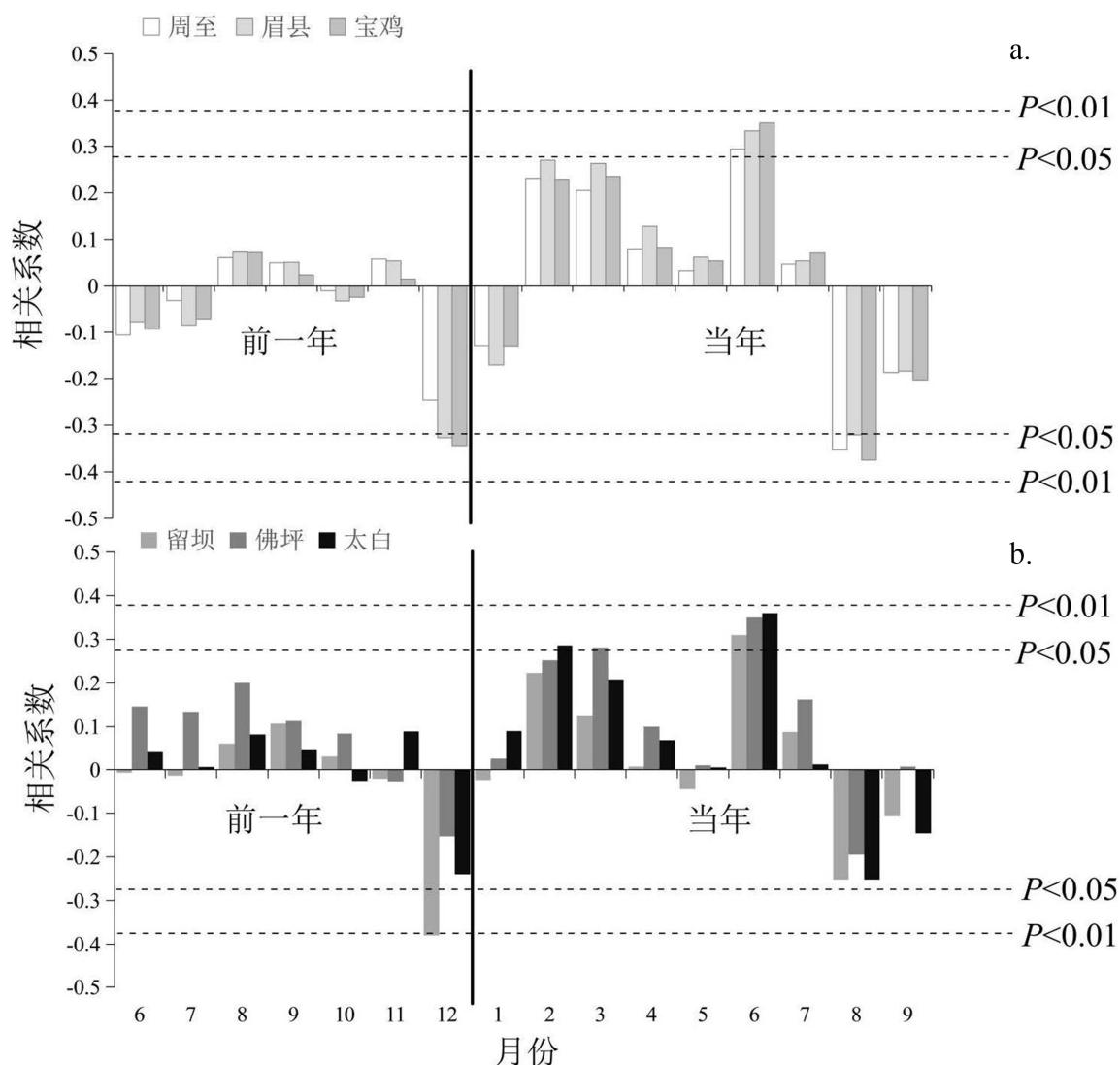


Figure 5. Correlation coefficient between tree ring width index and monthly mean temperature (a.: plain weather station; b.: Mountain weather station)

图 5. 树轮宽度指数与逐月平均气温相关系数(a.: 平原气象站; b.: 山地气象站)

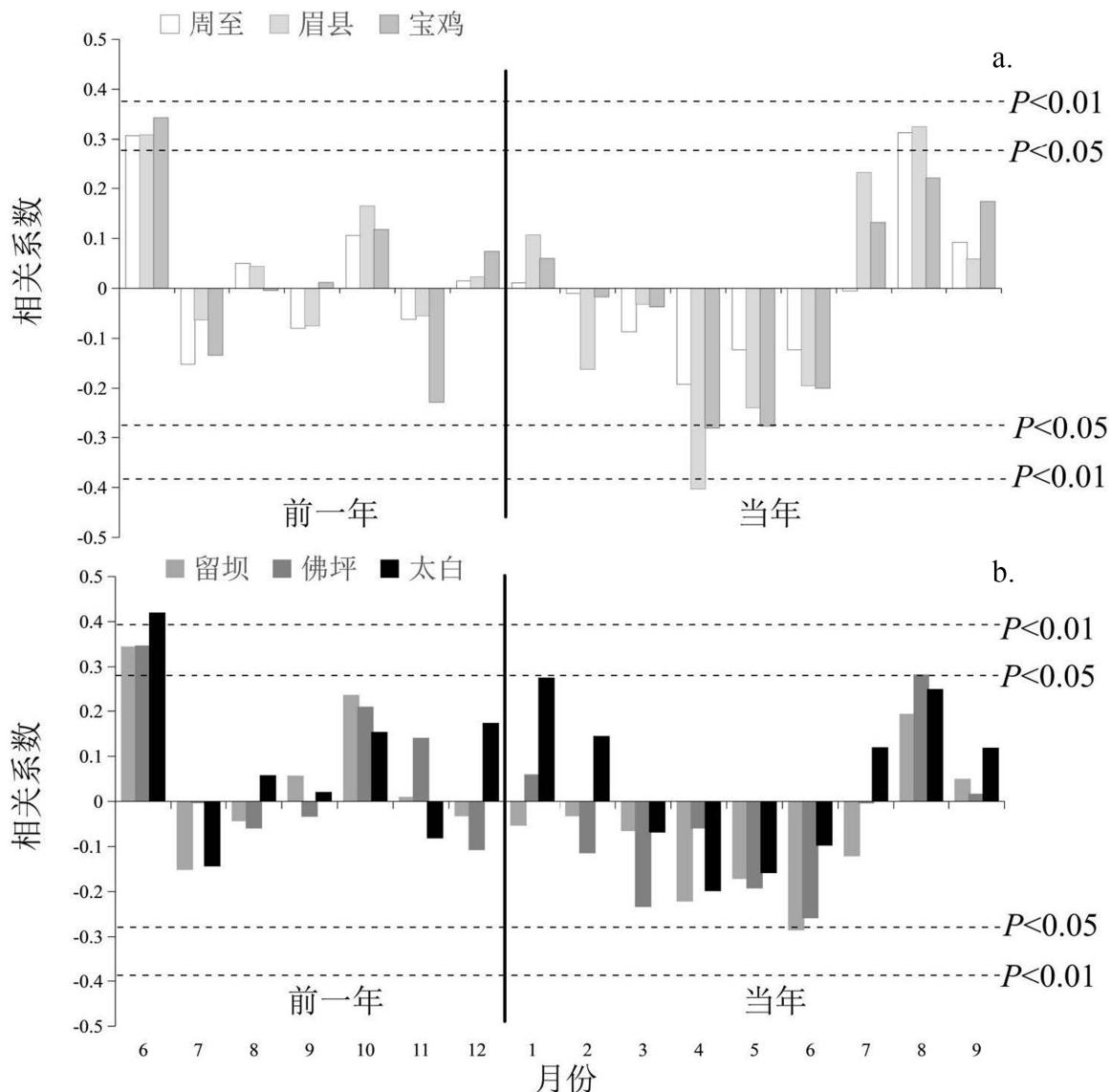


Figure 6. Correlation coefficient between tree ring width index and monthly average total precipitation (a.: plain meteorological station; b.: Mountain weather station)

图 6. 树轮宽度指数与逐月平均总降水量相关系数(a. 平原气象站; b. 山地气象站)

3.3.2. 太白红杉对气候响应的时间稳定性

鉴于轮宽指数与宝鸡气象站的相关系数最高, 选用当地气象数据进行太白红杉树轮宽度对气候响应的时间稳定性研究, 分别研究太白红杉树轮宽度对气候响应的特征在前 25 年(1960~1984 年)和后 25 年(1985~2009 年)的差别, 横向比较太白红杉对气候响应的时间稳定性情况。由图 7 可知, 在 1960~1984 年期间, 太白红杉树轮宽度指数与上年 12 月及当年 8 月气温呈显著负相关(-0.413 、 -0.431), 然而在 1985~2009 年期间, 太白红杉树轮宽度指数仅与当年 4 月气温显著正相关($r=0.405$, $P < 0.05$)。降水方面, 在 1960~1984 年期间(图 8), 太白红杉树轮宽度指数仅与上年 6 月降水显著正相关, 然而在 1985~2009 年期间(图 8), 太白红杉树轮宽度指数却与当年 4 月降水呈极显著负相关($r=-0.567$, $P < 0.01$), 表明太白红杉在 1960~1984 年与 1985~2009 年期间对气候响应特征不仅不一致, 甚至还存在相反的情况, 反映了太白红杉对气候变化的响应模式存在时间上的不稳定性。

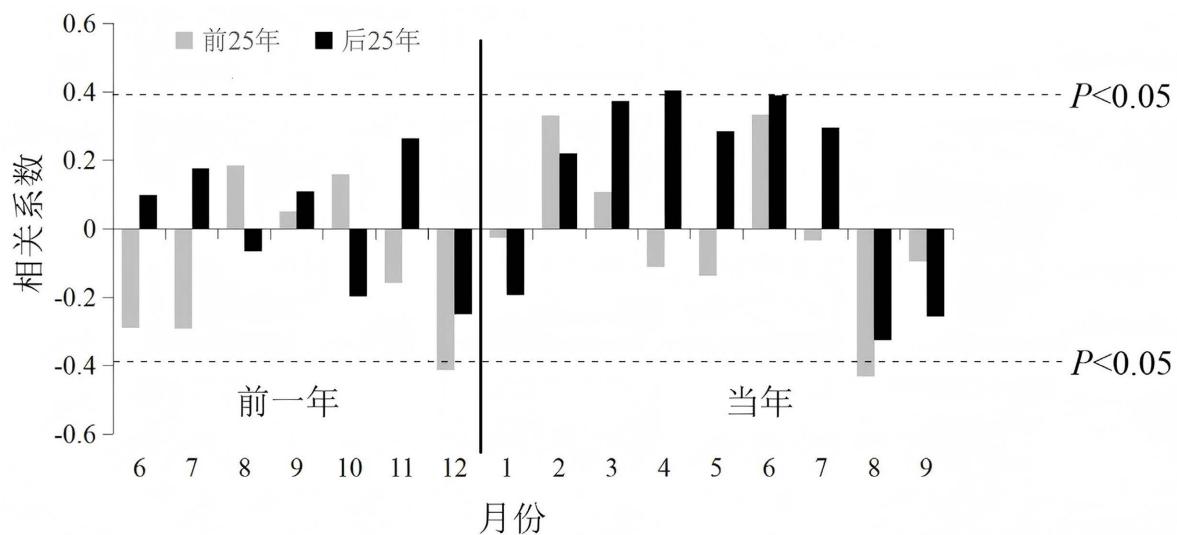


Figure 7. Correlation coefficients between tree ring width index and monthly mean temperature during 1960~1984 and 1985~2009, respectively

图 7. 树轮宽度指数分别与 1960~1984、1985~2009 年逐月平均气温的相关系数

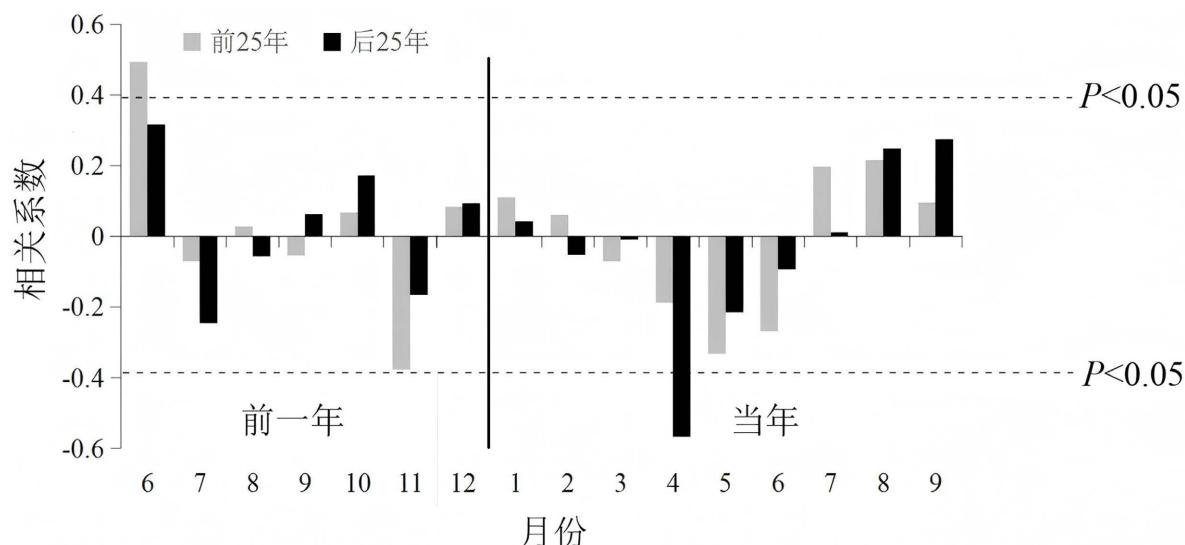


Figure 8. Correlation coefficients between tree ring width index and monthly average total precipitation during 1960~1984 and 1985~2009, respectively

图 8. 树轮宽度指数分别与 1960~1984、1985~2009 年逐月平均总降水量的相关系数

4. 讨论

本研究表明, 太白红杉树木年轮宽度指数与平原、山地各站单月气温数据的相关系数仅存在一定的微差异, 整体上反映了比较一致的树轮-气温响应关系。相关值高低变化与距离、海拔、地形并没有明确关联, 说明气象数据来源选择对树轮-气温响应分析结果影响不大。这是由于各站气象数据逐月气温虽然在数值上因海拔差异有高低之分, 但气温的空间分布情况受地形的影响较降水要弱, 逐月气温差值变化明显比降水更有规律性(图 3), 与张凌楠等[21]在贺兰山地区对油松的相关研究结论一致, 也与闫伯前等[12]对鳌山地区太白红杉树轮-气候响应研究结论相似。太白红杉轮宽年表与 6 气象站单月平均总降水量的相关分析结果表明, 平原地区降水数据与树轮宽度的相关系数逐月变化趋势比较相似, 但山地

各站降水数据与树木年轮宽度的相关系数逐月变化趋势存在较大差异,表明在进行树轮-降水响应分析时,山地降水数据的来源选取有探究的必要。以上均反映了秦岭山地降水空间分布的复杂性,山区降水分布的影响因素与山脉走向、海拔、坡向、坡度、气流湿度等密切关联,降水数据的来源选择变化对树轮-降水响应关系的影响具有不可预测性,已有研究发现,秦岭不同地区的降水随高度变化存在不同的类型,并非绝对随海拔升高而增加[29]。

通过比较太白红杉轮宽年表与前25年(1960~1984年)以及后25年(1985~2009年)气温、降水数据的皮尔逊相关分析结果可知,太白红杉在不同时间段对气候的响应模式存在显著差异性,在前25年间,上年6月降水促进了太白红杉的生长,而上年12月气温与当年8月气温却抑制着树木的生长过程,但在后25年间,当年4月的降水和气温分别对太白红杉树木年轮的增宽起到决定性的作用,印证了树轮-气候响应的确存在时间上的不稳定性,即“分异问题”是客观存在的,在全球变暖的背景下,秦岭地区温度显著上升,尤其是最低温度增幅更明显[30]。1960~2009年间,生长季气温的上升可能导致了树木对温度敏感性的转变,前期(1960~1984)冬季(上年12月)温度较低,此时的低温可能通过延长休眠期或冻害抑制生长,从而表现为显著负相关;而后期(1985~2009)随着气温的升高,春季(当年4月)升温促进萌发的作用更显著,从而形成正相关[31]。而降水方面,有研究显示,秦岭地区近年来降水波动加剧,极端干旱事件频发[32]。前25年的夏季(上年6月)降水比较充足因而促进了树木来年的生长,表现为显著正相关,但是后25年春季(当年4月)降水的过度增加可能伴随低温或土壤过湿,又抑制根系活动,从而导致了显著负相关[33]。由此可知,秦岭太白山自然保护区太白红杉的径向生长在两个时间段对于气候要素的响应特征、响应模式存在显著区别,反映了全球暖干化趋势对植被的影响。

5. 结论

本研究表明,太白红杉树木年轮宽度指数与平原、山地各站单月气温数据虽有细微差异,但整体树轮-气温响应关系一致,气象数据来源选择对其分析结果影响不大,这与相关研究结论相符。然而,在树轮-单月降水响应分析中,山地降水数据来源选取有必要探究,反映出秦岭山地降水空间分布复杂,降水数据来源选择对树轮-降水响应关系影响不可预测。此外,太白红杉在不同时间段(1960~1984年与1985~2009年)对气候的响应模式差异显著,印证了树轮-气候响应存在时间上的不稳定性,即“分异问题”客观存在,意味着全球气候变暖背景下,秦岭太白山自然保护区太白红杉径向生长在不同时段对气候要素的响应特征与模式存在显著区别。然而,本研究结果由于局限于秦岭局部地区,研究时段也仅局限于前后25年,不足以揭示气候变化对树轮-气候响应模式影响的普遍规律,所以后续需要在更多有高山气象站的山地进行深入研究,并借助滑动相关分析等方法,揭示树轮-气候响应在秦岭地区的不稳定性情况从而证实以上观点。

基金项目

本研究由省级大学生创新创业训练项目(S202211396076);陕西高校青年创新团队“商洛发展研究创新团队”(2022-65);商洛学院科研项目(18SKY005)资助。

参考文献

- [1] Dai, A. (2012) Increasing Drought under Global Warming in Observations and Models. *Nature Climate Change*, **3**, 52-58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
- [2] Konisky, D.M., Hughes, L. and Kaylor, C.H. (2015) Extreme Weather Events and Climate Change Concern. *Climatic Change*, **134**, 533-547. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1555-3>
- [3] 陈禹衡,吕一维,殷晓洁.气候变化下西南地区12种常见针叶树种适宜分布区预测[J].南京林业大学学报(自然

- 科学版), 2019, 43(6): 113-120.
- [4] Grimm, N.B., Chapin, F.S., Bierwagen, B., Gonzalez, P., Groffman, P.M., Luo, Y., *et al.* (2013) The Impacts of Climate Change on Ecosystem Structure and Function. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **11**, 474-482. <https://doi.org/10.1890/120282>
- [5] Wolkovich, E.M., Cook, B.I., Allen, J.M., Crimmins, T.M., Betancourt, J.L., Travers, S.E., *et al.* (2012) Warming Experiments Underpredict Plant Phenological Responses to Climate Change. *Nature*, **485**, 494-497. <https://doi.org/10.1038/nature11014>
- [6] 王叶, 延晓冬. 全球气候变化对中国森林生态系统的影响[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 1009-1018.
- [7] Esper, J., Cook, E.R. and Schweingruber, F.H. (2002) Low-Frequency Signals in Long Tree-Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability. *Science*, **295**, 2250-2253. <https://doi.org/10.1126/science.1066208>
- [8] 白红英, 马新萍, 高翔, 等. 基于 DEM 的秦岭山地 1 月气温及 0°C 等温线变化[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1443-1450.
- [9] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立[J]. 地理学报, 1994, 49(2): 174-181.
- [10] 康永祥, 刘婧辉, 代拴发, 等. 太白山不同海拔太白红杉年轮生长对气候变化的响应[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(12): 141-147.
- [11] Yan, B., Yu, J., Liu, Q., Wang, L. and Hu, L. (2018) Tree-Ring Response of *Larix Chinensis* on Regional Climate and Sea-Surface Temperature Variations in Alpine Timberline in the Qinling Mountains. *Journal of Forestry Research*, **31**, 209-218. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0841-0>
- [12] 闫伯前, 林万众, 刘琪璟, 等. 秦岭鳌山太白红杉径向生长对气候因子的响应[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(6): 61-67.
- [13] Dang, H., Jiang, M., Zhang, Q. and Zhang, Y. (2007) Growth Responses of Subalpine Fir (*Abies fargesii*) to Climate Variability in the Qinling Mountain, China. *Forest Ecology and Management*, **240**, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.12.021>
- [14] Liu, Y., Linderholm, H.W., Song, H., Cai, Q., Tian, Q., Sun, J., *et al.* (2009) Temperature Variations Recorded in *Pinus tabulaeformis* Tree Rings from the Southern and Northern Slopes of the Central Qinling Mountains, Central China. *Boreas*, **38**, 285-291. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2008.00065.x>
- [15] 戴君虎, 邵雪梅, 崔海亭, 等. 太白山树木年轮宽度资料对过去生态气候要素的重建[J]. 第四纪研究, 2003, 23(4): 428-435.
- [16] Chen, F., Yuan, Y., Wei, W., Yu, S., Shang, H., Zhang, T., *et al.* (2014) Tree-Ring Based Temperature Reconstruction for the West Qinling Mountains (China): Linkages to the High Asia, Solar Activity and Pacific-Atlantic Ocean. *Geochronometria*, **41**, 234-244. <https://doi.org/10.2478/s13386-013-0159-9>
- [17] Hu, Y., Bao, G., Liu, N. and Qu, Y. (2018) May-July Mean Minimum Temperature Variability in the Mid-Qinling Mountains, Central China, since 1814 Ce. *Quaternary International*, **476**, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.02.012>
- [18] 盖学瑞, 于大炮, 王守乐, 等. 树轮-气候“分异问题”形成机制的研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3273-3280.
- [19] Jiao, L., Jiang, Y., Zhang, W., Wang, M., Wang, S. and Liu, X. (2019) Assessing the Stability of Radial Growth Responses to Climate Change by Two Dominant Conifer Trees Species in the Tianshan Mountains, Northwest China. *Forest Ecology and Management*, **433**, 667-677. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.046>
- [20] Cao, J., Liu, H., Zhao, B., Li, Z., Drew, D.M. and Zhao, X. (2019) Species-Specific and Elevation-Differentiated Responses of Tree Growth to Rapid Warming in a Mixed Forest Lead to a Continuous Growth Enhancement in Semi-Humid Northeast Asia. *Forest Ecology and Management*, **448**, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.065>
- [21] 张凌楠, 江源, 张文涛, 等. 树轮-气候响应研究中气象数据选择探究——以贺兰山油松为例[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2014(4): 402-406.
- [22] 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 等. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 629-639.
- [23] Qin, J., Bai, H., Su, K., Liu, R., Zhai, D., Wang, J., *et al.* (2018) Comparison of Instrumental and Interpolated Meteorological Data-Based Summer Temperature Reconstructions on MT. Taibai in the Qinling Mountains, Northwestern China. *Theoretical and Applied Climatology*, **133**, 633-645. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2394-8>
- [24] Fritts, H.C. (1976) Tree Rings and Climate. Academic Press.
- [25] Stokes, M.A. and Smiley, T.L. (1968) An Introduction to Tree Ring Dating. The University of Chicago Press.

- [26] Holmes, R.L. (1994) Dendrochronology Program Library Users Manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona.
- [27] Cook, E.R. (1985) A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization. University of Arizona.
- [28] Cook, E.R., Shiyatov, S. and Mazepa, V. (1990) Estimation of the Mean Chronology. In: Cook, E.R. and Kairiukstis, L.A., Eds., *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*, Kluwer Academic Publishers, 123-132.
- [29] 何军, 姚选平. 秦岭山地降水的若干特征[J]. 陕西气象, 1996(5): 22-23.
- [30] 于健, 林万众, 闫伯前, 等. 基于树木年轮重建秦岭太白山 1872 年以来 6~8 月最低温度变化[J]. 第四纪研究, 2018, 38(4): 971-980.
- [31] 闫伯前, 林万众, 刘琪璟, 等. 秦岭不同年龄太白红杉径向生长对气候因子的响应[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(9): 58-65.
- [32] 刘荣娟. 气候变化背景下秦岭太白红杉的时空响应[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2016.
- [33] 郭少壮, 白红英, 黄晓月, 等. 秦岭太白红杉林遥感物候提取及对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1123-1132.