

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2021.30268

冯娟, 华亚伟, 张志成, 刘康, 刘波, 张锋. 秦岭南坡镇安油松径向生长-气候因子关系对气温突变的响应[J]. 植物科学学报, 2021, 39(3): 268-277

Feng J, Hua YW, Zhang ZC, Liu K, Liu B, Zhan F. Response of the relationship between *Pinus tabuliformis* Carr. radial growth and climatic factors to abrupt changes in temperature in Qinling Zhen'an[J]. *Plant Science Journal*, 2021, 39(3): 268-277

秦岭南坡镇安油松径向生长-气候因子关系对气温突变的响应

冯娟¹, 华亚伟¹, 张志成¹, 刘康^{1*}, 刘波¹, 张锋²

(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127;

2. 西安泾渭湿地自然保护区管理中心, 西安 710021)

摘要: 以陕西镇安木王国家森林公园的油松(*Pinus tabuliformis* Carr.)为样本, 运用响应函数及滑动相关分析等树木年代学方法, 研究油松径向生长与气候因子之间的关系及其对气候变化的响应。结果显示: 研究区平均气温在1989年发生显著突变, 较突变前升高约1.4℃; 气温突变后的树轮宽度平均指数1.04, 明显大于气温突变前的平均轮宽指数0.87, 气温的升高有助于样地油松的生长。相关分析结果表明, 油松对温度的需要贯穿于整个生长季, 当年3-4月份的温度是对样地油松生长起关键促进作用的因子, 而前一年11月份温度的“滞后作用”不可忽略。降水不是该地区油松的主要限制因子, 但当年2月份适宜的水分条件有利于树木的生长。气温突变后, 滑动相关分析结果显示研究区油松与当年2月份的降水以及当年3-4月份的温度具有稳定的正相关性; 树木径向生长与其它月份的气候因子之间的关系有所波动。因此在进行区域气候重建时, 应该把树木生长-气候关系随时间变化的波动考虑在内。

关键词: 油松; 径向生长; 气温突变; 响应关系; 秦岭南坡

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2021)03-0268-10

Response of the relationship between *Pinus tabuliformis* Carr. radial growth and climatic factors to abrupt changes in temperature in Qinling Zhen'an

Feng Juan¹, Hua Ya-Wei¹, Zhang Zhi-Cheng¹, Liu Kang^{1*}, Liu Bo¹, Zhang Feng²

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China;

2. Xi'an Jingwei Wetland Nature Reserve Management Center, Xi'an 710021, China)

Abstract: Using *Pinus tabuliformis* Carr. samples obtained in the Muwang National Forest Park in Zhen'an, Shaanxi, we studied the relationship between radial growth of *P. tabuliformis* and climatic factors using response functions, moving correlation analysis, and other dendrochronological methods. We further explored the response of this relationship to climate change. Results showed that: (1) Based on the Mann-Kendall test, average temperature in the study area exhibited a significant abrupt change in 1989, with temperatures 1.4℃ higher than before the change. (2) Based on statistical analysis of standard chronology, the average tree-ring index (1.04) after the abrupt temperature change was significantly greater than the index (0.87) before the change, indicating that the increase in temperature was beneficial for *P. tabuliformis* growth. (3) Correlation analysis showed that the temperature demands of *P.*

收稿日期: 2020-10-13, 修回日期: 2020-11-23。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601192)。

This work was supported by a grant from the National Natural Science Foundation of China (41601192)。

作者简介: 冯娟(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向为生态学与生态规划(E-mail: Fengjuan600@163.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: liuk63@126.com)。

tabuliformis run throughout the entire growing season. The temperature, especially in March and April, had a positive effect on *P. tabuliformis* growth. The temperature from the previous November also had an effect on matter accumulation in *P. tabuliformis*. Precipitation was not the major limiting factor for growth, but moderate precipitation in February had a positive effect on radial growth. (4) Precipitation in February and average temperatures in March and April maintained a stable positive correlation with *P. tabuliformis* in the study area; the relationship between radial growth of the trees and climatic factors fluctuated in the other months. Based on the above results, fluctuations in the tree growth-climate relationship over time should be considered when carrying out regional climate reconstruction research.

Key words: *Pinus tabuliformis*; Radial growth; Abrupt change in temperature; Response; Southern slopes of Qinling Mountains

森林作为陆地生态系统的主体, 不仅具有许多与人类福祉息息相关的重要生态功能, 而且还是储存环境信息的“档案库”^[1]以及外部气候要素变化的指示器^[2]。自 20 世纪以来, 全球增温趋势显著, 气候变化持续加剧^[3, 4]。气候条件的改变将直接影响陆地生态系统中各功能的良性发挥, 全球树木生长既受限于气候条件, 对温度和降水变化敏感, 又能对气候变化作出反馈, 因此探讨气候变化对森林生态系统的影响成为了一个重大科学问题。鉴于树轮资料有定年准确、连续性强、分辨率高、轮宽量测精度高、与气候要素相关度高、易于采样和复本量好等特有的优势^[5, 6], 运用树木年代学的方法, 建立树轮年表与气候因子的相关性, 能够揭示气温升高对区域植被的影响。研究表明, 树木径向生长对气候因子的敏感性会随气候条件的改变而发生变化, 并进一步影响树木的径向生长^[7]。例如 Zhang 等^[8]研究了祁连山油松 (*Pinus tabuliformis* Carr.) 生长对气候变化的敏感性, 发现年轮宽度与气候因子之间的关系随着气候的变化并不稳定, 近几十年来对温度的敏感性下降。张艳静等^[9]对天山中段不同地区雪岭云杉 (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) 径向生长对气候变暖的响应差异研究中指出, 乌苏地区森林下限雪岭云杉径向生长随温度升高而降低, 体现出树木生长与温度变化的“分离现象”, 而石河子地区, 增温有效地促进了雪岭云杉的生长。以上研究表明, 增温对不同地区、同一地区不同海拔的同一树种或不同树种生长的影响具有差异性。因此, 在全球气候变化的背景下, 在不同区域内检验树木径向生长对限制气候因子随时间变化的响应情况进行研究是十分必要的。

在我国秦岭地区, 自 1959 年以来, 其南北坡的气温变化率均高于同时期全球的增温速率^[10]。秦岭属我国暖温带向亚热带气候过渡的敏感地带, 树木生长对气候变化敏感, 也是我国较早开展树木年轮学研究的热点区域之一。目前, 对秦岭地区树轮气候学的研究主要体现在不同海拔、不同树种、不同坡向等树木径向生长与气候因子的关系以及对气候因子的重建工作上, 且以巴山冷杉 (*Abies fargesii* Franch.)^[11, 12]、太白红杉 (*Larix chinensis* Beissn.)^[13]、秦岭冷杉 (*Abies chensiensis* Tiegh.)^[14]等研究对象为主, 虽然前人研究了太白红杉、巴山冷杉对气候变化的响应并取得一定的成果^[15-17], 但在气候变暖背景下, 分析油松树木径向生长对气候变化的响应关系以及敏感性的研究还相对较少。因此, 本研究以秦岭南坡中段镇安县木王国家森林公园的油松树轮为对象, 利用树木年代学的分析方法, 建立标准化年表 (tree ring standard chronology, STD), 分析木王油松径向生长对气候变化的响应情况, 指出气候变化对油松生长带来的影响, 以期气候变化背景下秦岭地区树木年轮的研究提供资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

木王国家森林公园 (33°21'22"~33°28'22"N, 108°34'50"~108°42'25"E) 位于秦岭南坡中段、陕西省镇安县西部, 海拔 1200~2602 m。该区域属北亚热带季风性半湿润气候, 根据镇安气象站实测资料 (1958-2018 年) 显示, 镇安地区平均气温约 13.2℃, 7 月最热, 1 月最冷; 年降水量约

786 mm, 雨季 (5–9 月) 占全年总降水量的 72.6%, 其中 7 月平均降水量最多, 1 月最少。

1.2 样本采集

依据树木年轮野外采样原则, 于 2018 年 7 月在木王国家森林公园的双头马景区 (33°23′34″N, 108°36′44″E, 海拔 2100 m) 采集了受人类影响小、与周围树种无明显竞争且生长在坡度较陡地段的健康油松样芯 (图 1)。根据国际树轮数据库 (ITRDB, <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo-search/>) 的标准, 以对打的形式在每棵树的胸径处用生长锥钻取 2 个 1/2 直径的样芯, 采集的方向与树干横截面保持水平。本次采样共 31 颗树 62 个样芯。

1.3 气象资料

选取距离采样点最近的镇安气象站 (33°15′36″N,

109°05′24″E, 海拔 694 m) 1958–2018 年的气候数据 (图 2), 该数据来源于中国气象数据共享网站 (<http://data.cma.cn/>), 其中小部分缺测值用对应时期的多年平均值代替。由于温度、降水不仅影响当年树木的生长, 还会影响到下一年甚至以后几年树木的生长^[18], 因此本研究选取上一年 10 月到当年 9 月的月平均气温和月降水量进行分析。

1.4 年表建立

将油松样芯, 依照树木年轮研究中的通用方法对样品进行预处理、标注、交叉定年。使用 LINT-AB6.0 年轮宽度测量仪在 0.01 mm 水平上测量轮宽, 运用 COFFECHA^[19] 对交叉定年结果进行检验, 去除与主序列结果相关性较差的样芯, 最终保留 30 棵树 55 个样芯用于年表构建。利用 AR-STAN 程序的负指数函数对树轮宽度数据进行去趋

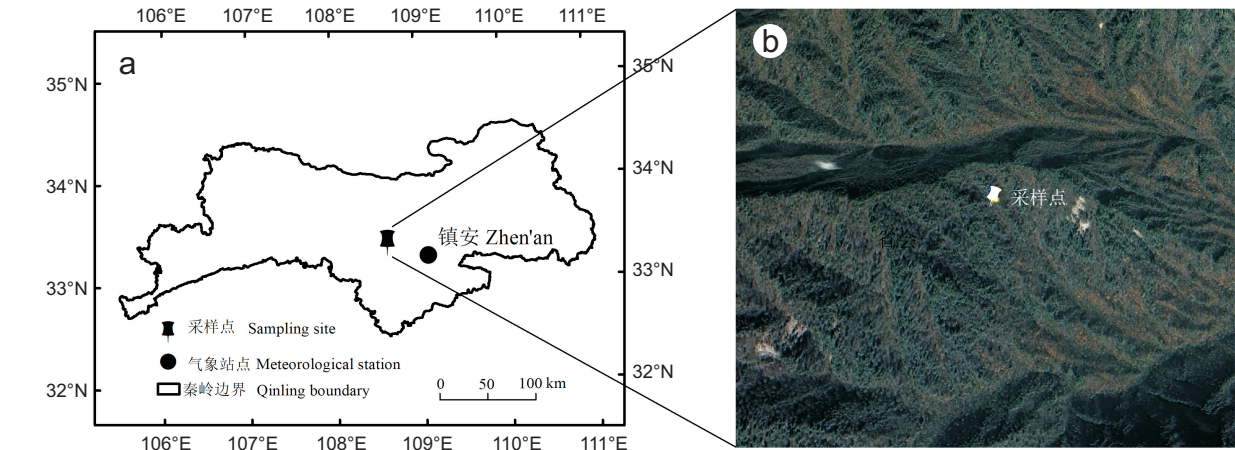


图 1 采样点和气象站分布
Fig. 1 Sample sites and meteorological stations

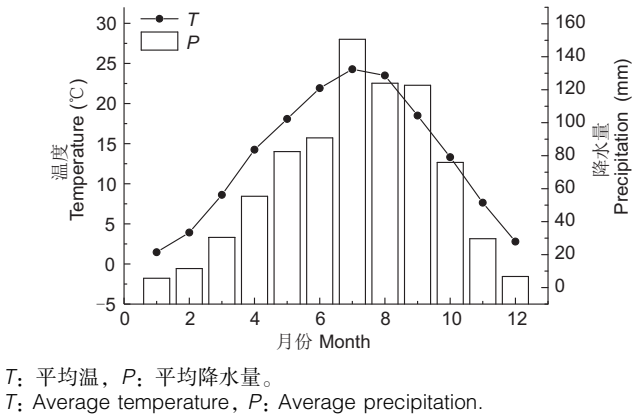


图 2 镇安气象站 1958–2018 年气象数据
Fig. 2 Meteorological data from Zhen'an Meteorological Station from 1958 to 2018

势和标准化, 最终得到 3 种树轮年表: 标准化年表、差值年表及自回归年表, 本文选取标准化年表进行研究。

1.5 研究方法

通过 Mann-Kendall 方法对镇安气象站 1958–2018 年的平均气温进行突变检验, 确定研究区可能发生气温突变的年份。

运用 SPSS 22 软件, 计算标准化年表值与镇安气象站 1958–2017 年气候因子的 Pearson 相关系数, 分析树木径向生长对气候因子的响应。

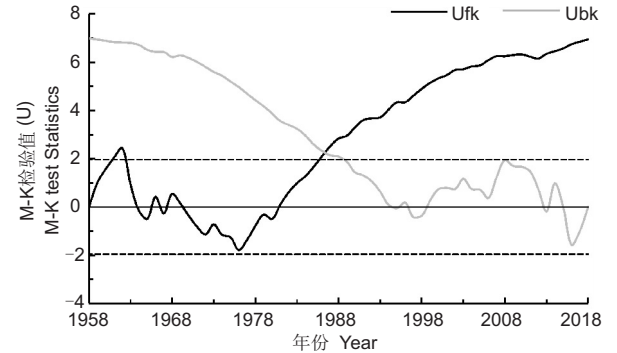
利用 Dendroclim 2002 软件的滑动相关函数功能分析油松树轮标准年表与气候因子响应随时间变化的动态关系(滑动窗口 26 年)。

2 结果与分析

2.1 气温的 Mann-Kendall 检验与气象数据分析

本研究对镇安气象站 1958–2018 年的年平均气温进行 Mann-Kendall 检验, 结果表明 1989 年为研究区平均气温升高的突变点(图 3)。1958–2018 年平均气温的标准误差为 0.1 mm, 平均气温为 13.2℃; 1958–1988 年平均气温为 12.5℃; 1989–2018 年平均气温为 13.9℃, 较突变前升高 1.4℃。

经线性拟合发现, 降水总体呈下降趋势(图 4)。1958–2018 年平均年降水量为 785.9 mm; 1958–1988 年平均年降水量为 818.2 mm; 1989–2018 年平均年降水量为 798.2 mm, 较突变前减少 20 mm。



Ufk: 正常的统计值时间序列; Ubk: 逆序的统计值时间序列。虚线表示在 0.05 水平上差异显著。
Ufk: Normal statistical time sequence; Ubk: Inverted statistical time sequence. Dotted line in figure represents 0.05 significance level.

图3 镇安气象站 1958–2018 年年均温 Mann-Kendall 检验
Fig. 3 Results of annual mean temperature by Mann-Kendall test from 1958 to 2018

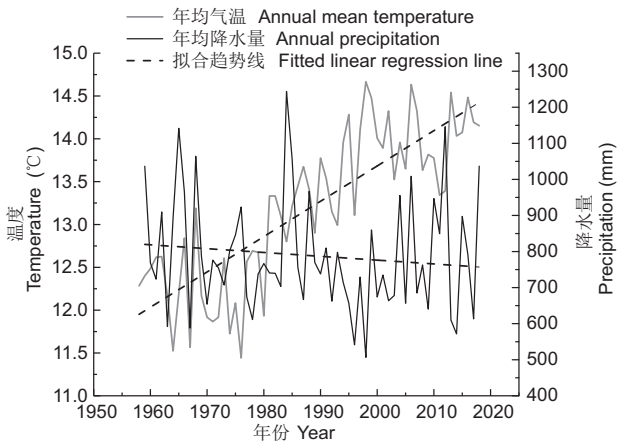


图4 镇安气象站 1958–2018 年年均气温和年总降水量年际变化
Fig. 4 Annual mean temperature and precipitation from 1958 to 2018

2.2 树轮年表的特征

本研究通过树木年轮学方法得到研究区油松标准年表及其样本量(图 5)。木王国家森林公园油松树轮宽度年表长 165 年(1953–2017 年), 按照年表的总体代表性大于 0.85 的标准, 其可靠时段为 1910–2017 年。年表的平均敏感度为 0.23, 信噪比为 10.43, 一阶自相关系数达到 0.50(表 1)。以上年表特征值反映本次采样比较成功, 年表中包含较多的气候信息, 可用于进行气候研究。

近 60 年来, 树轮指数和年均温变化趋势一致, 均呈现增加的趋势(图 5)。经统计, 1989 年之后(1989–2017 年)的平均年轮指数为 1.04, 明显高于突变前(1958–1988 年)的平均年轮指数 0.87。油松的平均年轮指数增幅较大, 说明气候变暖有利于研究区油松的生长。

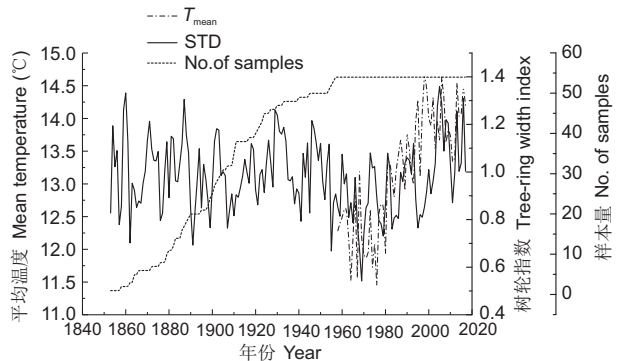


图5 油松树轮标准年表及其样本量
Fig. 5 Standard tree-ring width chronology and number of samples of *Pinus tabulaeformis*

表 1 年表统计特征
Table 1 Statistical characteristics of standard tree-ring width chronologies

特征 Characteristic	数值 Value
年表研制样本量(树/芯) Sampling cores in chronologies (tree/core)	30/55
序列长度 Time span	1853–2017
公共区间 Common interval	1910–2017
指数均值 Mean indices	0.98
标准差 Standard deviation	0.15
平均敏感度 Mean sensitivity	0.23
一阶自相关系数 First-order autocorrelation coefficient	0.50
所有样芯平均相关系数 Mean correlation coefficient among all series	0.23
树间平均相关系数 Mean correlation coefficient between trees	0.22
树内平均相关系数 Mean correlation coefficient within trees	0.52
信噪比 Signal-to-noise ratio	10.43
总体代表性 Expressed population signal	0.91
第一主成分解释量 First principal component interpretation	0.26

2.3 树木生长对气候的响应

2.3.1 树轮宽度年表与气候因子的相关性

1958–2017 年木王国家森林公园油松树轮标准年表与镇安气象站温度和降水的整体相关分析结果表明，研究区油松径向生长基本上与温度均呈正相关，且标准年表与温度的相关性明显强于降水（图 6）。标准年表与当年 2–4、6–7 以及 9 月的

月均温呈极显著的正相关，与上一年 11 月、当年 1 月的月均温呈显著的正相关。标准年表与不同月份的降水量有不同的响应，有且仅与当年 2 月的月均降水量呈显著正相关关系。说明温度，特别是 3–4 月温度，是该地区油松径向生长的主要限制因子。
2.3.2 气温突变前后标准年表与气候因子的关系

在 1959–1988 年时段内，除上一年 10 月、当年 5 月和 8 月外，木王国家森林公园油松年轮宽度指数与其它各月温度均呈正相关，标准年表与月均降水量的相关性不显著（图 7）。在 1989–2017 年时段内，油松年表与当年 3–4 月温度正相关加强，与 3 月温度正相关达到显著水平。标准年表与当年 2 月降水量正相关关系加强（图 7）。

2.4 树轮宽度年表与重要气候因子的动态关系

利用滑动相关分析的方法对树木生长与气候因子关系的时间动态分析（图 8，滑动窗口为 26 年），检验树轮指数与气候因子之间的关系随时间变化的响应情况。结果显示，树轮指数与 3–4 月温度以及 2 月降水量的正相关性未发生改变。自 2002 年起，树轮指数与 3 月温度以及 2 月降水的正相关关系达到显著水平。油松树木生长与其它月份的气候因子之间的关系并不稳定，随着时间的推移表现出一定的变化。

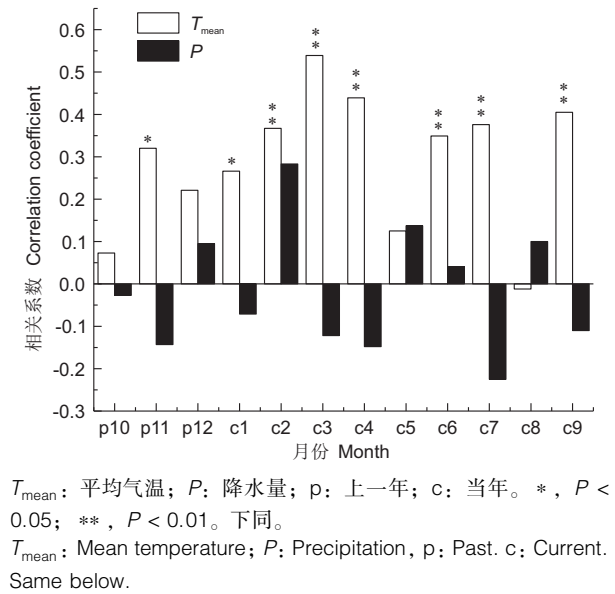


图 6 油松标准年表 (STD) 与月气候因子的相关性 (1958–2018 年)
Fig. 6 Correlation coefficients between standardized chronologies and monthly climatic factors

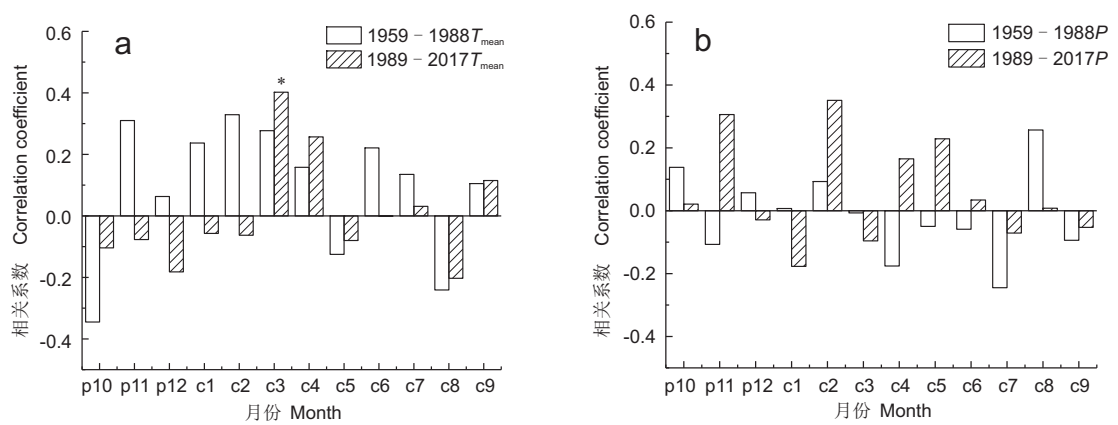
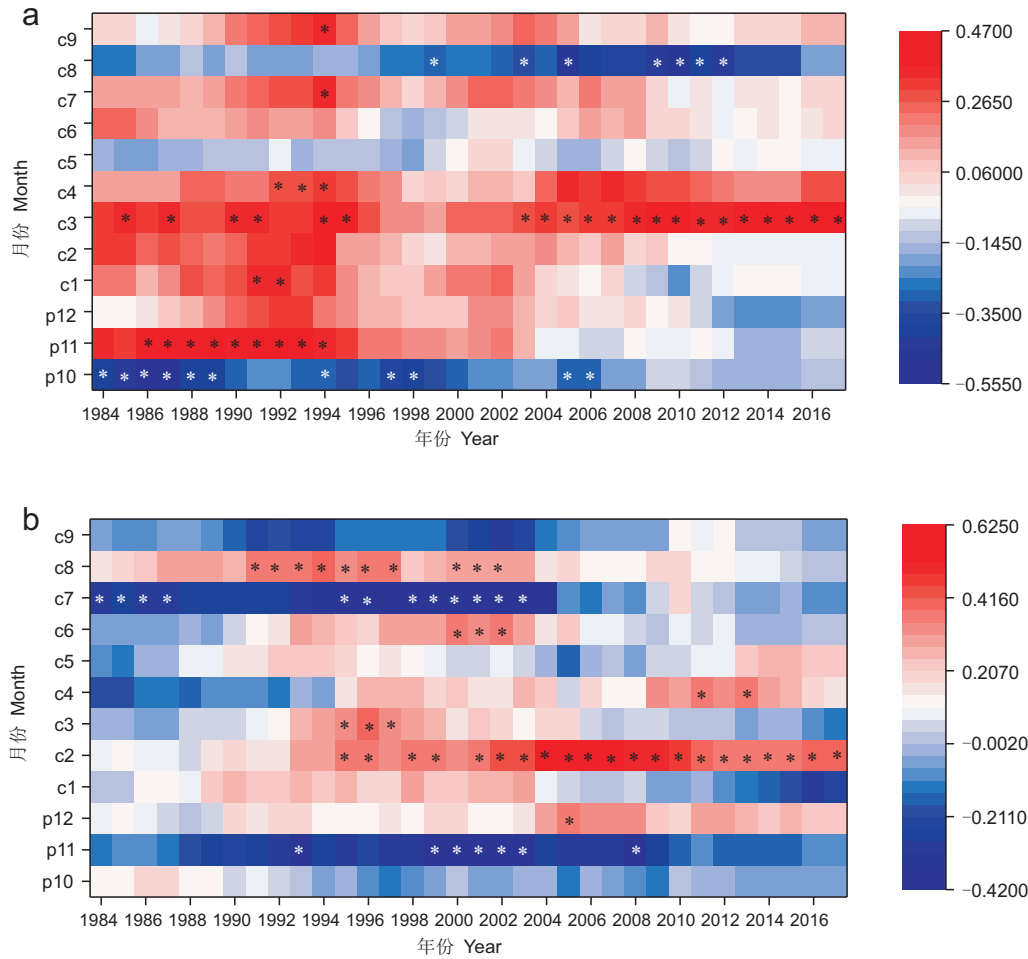


图 7 油松标准年表 (STD) 与月气候因子的相关性 (1958–1988 年及 1989–2018 年)
Fig. 7 Correlation coefficients between standardized chronologies and monthly climatic factors



a: 标准年表与月均温的滑动相关; b: 标准年表与月降水量的滑动相关。
a: Moving correlation analysis of standardized chronology with monthly average temperature; b: Moving correlation analysis of standardized chronology with monthly precipitation.

图 8 油松标准年表 (STD) 与月均温 (a)、降水量 (b) 的滑动相关分析
Fig. 8 Moving correlation analysis of standardized chronologies and monthly climatic factors

3 讨论

3.1 研究区的气候特征

近年来,全球发生了以变暖为主要特征的气候变化,在此背景下,秦岭地区气温呈上升趋势。研究表明^[20, 21],快速升温发生在 20 世纪 90 年代。经过 Mann-Kendall 检验,本研究发现研究区平均气温也从 20 世纪 90 年代开始快速升温。从选取的镇安气象站 1958–2018 年的气象资料来看,研究区近 60 年来气温呈上升趋势,与秦岭地区气温变化整体趋势一致,降水变化趋势不大,呈略微下降趋势,这跟前人^[22–24]对秦岭地区气候的研究结果一致,即:近几十年来,秦岭地区气温普遍上升,降水逐渐减少,气候暖干化特征明显。

3.2 油松径向生长与气候因子的关系

树木年轮学理论认为年表中各相关系数、信噪比、样本总体代表性、平均敏感度等统计值越大,则表明年表中含有丰富的环境信息^[25]。本研究使用的标准化年表的总体代表性自 1910 年以来超过 0.85 的最低阈值,平均敏感度达到 0.20~0.29 的阈值、信噪比满足大于 3 的限定,表明选取的标准年表中包含较多的气候信息量,可信度高,可用于树轮气候学研究。另外,相关分析结果显示,油松树轮宽度年表与上一年 11 月份平均气温显著正相关($r=0.32$, $P<0.05$),这归因于气候对树木生长的滞后效应,由年表统计特征中油松样本序列的一阶自相关系数(0.50)反映出来。

相关分析结果揭示了温度是该区域树木生长的主要影响因子,树轮指数与 1–7 月份温度呈显著正相关。这与研究佛坪龙草坪油松^[26]、太白山油松^[27]、佛坪岳坝保护站油松^[28]、秦岭落叶松^[29] (*Larix chinensis* Mill.) 发现树轮指数与 1–4 月份、6–7 月份温度呈正相关关系的结论相似。相关峰值出现在 3–4 月份,与研究秦岭佛坪油松^[11, 26]、木王油松^[30]、镇安鹰嘴崖秦岭冷杉^[14, 31, 32]、秦岭华山松 (*Pinus armandii* Franch.) 以及镇安冷杉^[11, 33] 树木年轮密度所揭示的 3–4 月份气温是秦岭地区树木生长季初期的主要限制因子的结果一致。此外分段相关分析结果表明,气温突变后,即 1989–2017 年,油松树轮宽度年表与 3–4 月温度的正相关加强,并由不显著达到显著水平。经滑动相关分析验证,本研究发现树轮指数与 3–4 月平均温保

持着稳定的正相关,且随气候因子的变化,树木生长与 3 月平均温的敏感性也逐步增强。这主要是由于研究区树木的活跃生长期大致在 4–9 月,树木生长初期温度的高低决定了树木生长期开始的早晚,在水分条件充足的情况下,生长季初期气温升高达到树木开始生长所需的最低温度时,树木形成层细胞开始分裂,促进树木形成层活动提早^[34],此时较高的气温有利于早材宽年轮的形成,与当年 3–4 月份较高的气温相关值对应,也与秦岭南坡其它地区树种的研究结论一致。其次,轮宽序列与前一年 11 月份气温正相关性达到显著水平,说明气温对研究区油松径向生长的“滞后作用”明显,较温暖的冬季有助于避免样地油松细胞组织冻结,减少树木体内同化物的消耗,为树木来年生长储存能量^[35–38]。树木年轮生长与冬半年温度的正相关关系在许多前人研究中也有报道,如对秦岭地区木王油松^[39, 30]、火地塘林区油松^[26]、佛坪油松^[40] 等的研究。

本研究中,大部分月份的降水对木王国家森林公园油松的影响微弱,这是因为样地海拔较高、气候湿润,丰富的降水量能够满足树木的生长需求,降水不是限制该地区树木生长的主要气候因子。蔡秋芳等^[27]在陕西太白山树轮气候学研究中指出太白山油松树木生长对降水的需求较低,半湿润区丰富的降水能满足太白山油松树木的生长。杨凤萍等^[40]在研究秦岭火地塘油松和华山松生产力与气候因子的关系时发现,降水量对油松和华山松林生产力的影响均不显著,证明降水条件的变化对树木轮宽的生长作用微弱,与本研究结果一致。但是,研究区油松与当年 2 月份降水的正相关性达到显著水平。气温突变后,树轮指数与 2 月份降水量保持着稳定的正相关,且随气候因子的变化,树木生长与 2 月份降水量的敏感性也逐步增强。原因一方面是生长季前充足的降水有利于油松早材的形成,且此时充足的土壤水分会极大地满足生长期的根系对水分及养分的吸收,加快光合作用,形成宽轮。另一方面,温度升高促使生长季提前,使得油松生长对降水的需求增加,当年 2 月份降水对树木生长的促进作用加强。

3.3 树木生长趋势的探讨

本研究发现,近 60 年来树轮指数随温度的升高呈线性增加趋势,推断镇安地区春季升温有效地

促进了树木的径向生长。在其它湿润地区, 我们也发现了受温度控制的树种, 树木生长随温度升高呈上升趋势的现象, 如王慧敏^[28]通过分析气候变暖对佛坪油松树轮宽度的影响, 发现油松的平均年轮宽度指数随温度的升高增幅较大。杨凤萍等^[40]在探究秦岭火地塘林区油松和华山松林乔木层净生产力与气候因子的关系时指出, 在全球气候变暖的背景下油松林和华山松林生产力整体上呈波动上升趋势, 温度的上升有利于油松和华山松的生长。另外, 气候变暖还促进了其他树种的径向生长, 如Liu等^[44]基于太白红杉对气候变化的响应研究中指出, 随着春季温度的上升太白红杉径向生长呈增加趋势。刘兰等^[42]在研究秦岭林线树木径向生长对气候变化的响应中发现, 在全球变暖的大趋势下, 温度的上升促使太白红杉和秦岭冷杉树木径向生长量在未来呈明显增加的趋势。以上结果印证了秦岭南坡植被净初级生产力随气温上升而增加的结论^[43]以及气温升高可能促进树木生长的推测^[44], 符合秦岭南坡及其分水岭地区树木生长对温度的要求。因此, 在秦岭分水岭和南坡林线地区温度控制型树种的径向生长可能随着气候变暖呈增加趋势。

参考文献:

- [1] 刘可祥, 张同文, 张瑞波, 喻树龙, 黄力平, 等. 不同树高处树轮密度变化特征及其对气候的响应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 503-512.
Liu KX, Zhang TW, Zhag RB, Yu SL, Huang LP, et al. Characteristics of tree-ring density at different stem heights and their climatic responses[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 503-512.
- [2] 蔡秋芳, 刘禹, 段丙闯. 树轮多指标研究在亚热带古气候重建中的作用——以桂林地区为例[J]. 地球环境学报, 2019, 10(2): 141-148.
Cai QF, Liu Y, Duan BC. Role of tree-ring multiproxy in palaeoclimate reconstruction in subtropical China, taking Guilin as an example[J]. *Journal of Earth Environment*, 2019, 10(2): 141-148.
- [3] 第三次气候变化国家评估报告编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[R]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-976
- [4] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [5] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 勾晓华, 喻树龙, 等. 天山山区树轮气候研究若干进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 1-9.

- Zhang RB, Yuan YJ, Wei WS, Gou XH, Yu SL, et al. Research advances of dendroclimatology in Tianshan Mountains[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2016, 10(4): 1-9.
- [6] 杨柳, 李静茹, 彭剑峰, 霍嘉新, 陈亮. 1801年以来河南尧山地区油松记录的4-7月高温变化及影响机制研究[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 1-14.
Yang L, Li JR, Peng JF, Huo JX, Chen L. Temperature variation and influence mechanism of *Pinus tabulaeformis* ring width recorded since 1801 at Yao Mountain, Henan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 1-14.
- [7] 金敏艳, 李进军, 车宗玺, 王放, 张军周, 勾晓华. 祁连山中部祁连圆柏年内径向生长对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7699-7708.
Jin MY, Li JJ, Che ZX, Wang F, Zhang JZ, Gou XH. Intra-annual radial growth response of Qilian juniper (*Juniperus przewalskii*) to climate factors in the central Qilian Mountains, northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7699-7708.
- [8] Zhang F, Gou XH, Liu WH, Levia DF, Li YJ. Individual and time-varying tree-ring growth to climate sensitivity of *Pinus tabuliformis* Carr. and *Sabina przewalskii* Kom. in the eastern Qilian Mountains, China[J]. *Trees*, 2013, 27: 359-370.
- [9] 张艳静, 于瑞得, 郑宏伟, 甘森, 杨美琳, 石冰冰. 天山西部雪岭云杉径向生长对气候变暖的响应差异[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2149-2159.
Zhang YJ, Yu RD, Zhen HW, Gan M, Yang ML, Shi BB. Difference in response of radial growth of *Picea schrenkiana* to climate warming in the eastern and western Tianshan Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(8): 2149-2159.
- [10] 张扬, 白红英, 苏凯, 黄晓月, 孟清, 郭少壮. 1960-2013年秦岭陕西段南北坡极端气温变化空间差异[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1297-1308.
Zhang Y, Bai HY, Su K, Huang XY, Meng Q, Guo SZ. Spatial variation of extreme temperature change on southern and northern slopes of Shaanxi section in Qinling Mountains during 1960-2013[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1297-1308.
- [11] 吴祥定, 邵雪梅. 中国秦岭地区树木年轮密度对气候响应的初步分析[J]. 应用气象学报, 1994, 5(2): 253-256.
Wu XD, Shao XM. A preliminary analysis on response of tree-ring density to climate in the Qinling Mountains of China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1994, 5(2): 253-256.
- [12] Dang HS, Jiang MX, Zhang QF. Growth responses of subalpine fir (*Abies fargesii*) to climate variability in the Qinling Mountain, China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240(1-3): 143-150.

- [13] 李书恒, 侯丽, 史阿荣, 陈兰, 朱显亮, 白红英. 基于 Biome-BGC 模型及树木年轮的太白红杉林生态系统对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7435–7446.
Li SH, Hou L, Shi AR, Chen L, Zhu XL, Bai HY. Response of *Larix chinensis* forest ecosystem to climate change based on Biome-BGC model and tree rings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20): 7435–7446.
- [14] 刘洪滨, 邵雪梅. 采用秦岭冷杉年轮宽度重建陕西镇安 1755 年以来的初春温度[J]. 气象学报, 2000, 58(2): 223–233.
Liu HB, Shao XM. Reconstruction of early-spring temperature at Zhen'an from 1775 using tree-ring chronologies[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(2): 223–233.
- [15] 杨文峰, 李兆元, 吴素良, 董亚非, 吴祥定. 秦岭太白山树木年轮对气候变化的响应分析[J]. 陕西气象, 1993(5): 9–11.
Yang WF, Li ZY, Wu SL, Dong YF, Wu XD. Response of tree-ring width to climate change in Mount Taibai of Qinling Mountains[J]. *Shaanxi Meteorology*, 1993(5): 9–11.
- [16] 康永祥, 刘婧辉, 孙菲菲, 代栓发, 何小军. 太白山高山林线区太白红杉林年轮宽度对气候变化的响应[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(8): 12–44.
Kang YX, Liu JH, Liu FF. Responses of tree ring width of *Larix chinensis* in the regions of alpine timberline in Taibai Mountain to climate change[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(8): 12–44.
- [17] 秦进, 白红英, 周旗, 王俊, 李书恒, 等. 牛背梁自然保护区林线不同海拔巴山冷杉径向生长对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 148–155.
Qin J, Bai HY, Zhou Q, Wang J, Li SH, et al. Radial growth response of *Abies fargesii* to climate change from different elevations at timberline of Niubeiliang Natural Reserve[J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(1): 148–155.
- [18] 吴祥定. 树木年轮分析在环境变化研究中的应用[J]. 第四纪研究, 1990(2): 188–196.
Wu XD. Application of tree ring analysis in environmental change research[J]. *Quaternary Sciences*, 1990(2): 188–196.
- [19] Henrid. GM. Evaluating cross dating accuracy a manual and tutorial for the computer program[J]. *Tree-Ring Res*, 2001, 57(2): 205–221.
- [20] 李双双, 芦佳玉, 延军平, 刘宪锋, 孔锋, 王娟. 1970–2015 年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义[J]. 地理学报, 2018, 73(1): 13–24.
Li SS, Lu JY, Yan JP, Liu XF, Kong F, Wang J. Spatio-temporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 13–24.
- [21] 李英杰, 延军平, 刘永林. 秦岭南北气候干湿变化与降水非均匀性的关系[J]. 干旱区研究, 2016, 3(33): 619–627.
Li YJ, Yan JP, Liu YL. Relationship between dryness/wetness and precipitation heterogeneity in the north and south of the Qinling Mountains[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 3(33): 619–627.
- [22] 白红英, 马新萍, 高翔, 侯钦磊. 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.
Bai HY, Ma XP, Gao X, Hou XL. Variations in January temperature and 0°C isothermal curve in Qinling Mountains based on DEM[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1443–1450.
- [23] 延军平, 郑宇. 秦岭南北地区环境变化响应比较研究[J]. 地理研究, 2001, 20(5): 576–582.
Yan JP, Zheng Y. A comparative study on environmental change response over the northern and the southern regions of the Qinling Mountains[J]. *Geographical Research*, 2001, 20(5): 576–582.
- [24] 齐贵增, 白红英, 孟清, 赵婷, 郭少壮. 1959–2018 年秦岭南北春季气候时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1079–1091.
Qi GZ, Bai HY, Meng Q, Zhao T, Guo SZ. Climate change in the Qinling Mountains in spring during 1959–2018[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5): 1079–1091.
- [25] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 买尔当·克依木. 近 40 年河北坝上地区杨树人工林径向生长对气候变化的响应差异[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9108–9119.
Liu YL, Xin ZB, Li ZS, Maierdang Keyimu. Climate effect on the radial growth of *Populus simonii* in Northwest of Hebei for last four decades[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(24): 9108–9119.
- [26] 刘洪滨, 邵雪梅. 秦岭南坡佛坪 1789 年以来 1–4 月平均温度重建[J]. 应用气象学报, 2003, 14(2): 188–196.
Liu HB, Shao XM. Reconstruction of January to April mean temperature at Qinling Mountains from 1789 to 1992 using tree ring chronologies[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(2): 188–196.
- [27] 蔡秋芳, 刘禹, 王艳超. 陕西太白山树轮气候学研究[J]. 地球环境学报, 2012, 3(3): 875–880.
Cai QF, Liu Y, Wang YC. Dendroclimatic investigation of Chinese pine in Taibai Mountain, Shannxi province[J]. *Journal of Earth Environment*, 2012, 3(3): 875–880.
- [28] 王慧敏. 秦岭山地油松树轮宽度对气候因子变化的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [29] 刘禹, 刘娜, 宋慧明. 以树轮宽度重建秦岭中段分水岭地区 1–7 月平均气温[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(5): 260–265.
Liu Y, Liu N, Song HM. Reconstructed mean air temperature from January to July at the divide sampling site in the Mid-Qinling Mountains with tree-ring widths[J]. *Advances*

- in *Climate Change Research*, 2009, 5(5): 260–265.
- [30] 华亚伟, 张红娟, 刘康. 基于油松树轮重建陕西省镇安县 165 年以来 3–4 月平均最高气温[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 381–387.
- Hua YW, Zhang HJ, Liu K. Reconstruction of the March–April average maximum air temperature over 165 years based on *Pinus tabulaeformis* tree-rings of Zhen'an County, Shaanxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(2): 381–387.
- [31] 刘禹, 马利民, 蔡秋芳, 安芷生. 依据陕西秦岭镇安树木年轮重建 3–4 月份气温序列[J]. 自然科学进展, 2001, 11(2): 47–52.
- Liu Y, Ma LM, Cai QF, An ZS. Reconstruction of March to April temperature using tree ring data of Qinling Mountains, Shaanxi province[J]. *Progress in Natural Science*, 2001, 11(2): 157–162.
- [32] 刘洪滨, 邵雪梅. 利用树轮重建秦岭地区历史时期初春温度变化[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 879–884.
- Liu HB, Shao XM. Reconstruction of early-spring temperature of Qinling Mountains using tree-ring chronologies[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 879–884.
- [33] 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): 175–181.
- Shao XM, Wu XD. Tree-ring chronologies for *Pinus armandi* Franch. from Huashan, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(2): 175–181.
- [34] 邓晨晖, 白红英, 翟丹平, 高山, 黄晓月, 等. 气候变化背景下 1964–2015 年秦岭植物物候变化[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7882–7893.
- Deng CH, Bai HY, Zhai DP, Gao S, Huang XY, et al. Variation in plant phenology in the Qinling Mountains from 1964–2015 in the context of climate change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 7882–7893.
- [35] Peterson DW, Peterson DL. Effects of climate on radial growth of subalpine conifers in the North Cascade Mountains[J]. *Can J Forest Res*, 1994, 24(9): 1921–1932.
- [36] 陈慕亚, 刘康, 张红娟, 张越. 基于太白山南坡巴山冷杉 NPP 动态变化的时间序列模型预测效果对比[J]. 植物科学学报, 2020, 38(3): 323–334.
- Chen MY, Liu K, Zhang HJ, Zhang Y. Comparison of time series models for predicting net primary productivity dynamic changes of *Abies fargesii* Franch. on the southern slopes of Taibai Mountain[J]. *Plant Science Journal*, 2020, 38(3): 323–334.
- [37] Zhang H, Shao XM, Zhang Y. Which climatic factors limit radial growth of Qilian juniper (*Juniperus przewalskii* Kom.) at the upper tree line on the northeastern Tibetan Plateau? [J]. *J. Geogr. Sci.*, 2015, 25(10): 1173–1182.
- [38] 邵雪梅, 范金梅. 树轮宽资料所指示的川西过去气候变化[J]. 第四纪研究, 1999(1): 81–89.
- Shao XM, Fan JM. Past climate changes in western Sichuan indicated by tree-ring width data[J]. *Quaternary Sciences*, 1999(1): 81–89.
- [39] Liu Y, Linderholm HW, Song H. Temperature variations recorded in *Pinus tabulaeformis* tree rings from the southern and northern slopes of the central Qinling Mountains, central China[J]. *Boreas*, 2008, 38: 285–291.
- [40] 杨凤萍, 胡兆永, 侯琳, 蔡靖, 崔聚, 张硕新. 秦岭火地塘林区油松和华山松林乔木层净生产力与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6489–6500.
- Yang FP, Hu ZY, Hou L, Cai J, Cui C, Zhang SX. Relationship between net primary productivity of tree layer in *Pinus tabulaeformis* and climate factors at Huoditang forest region in the Qinling Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6489–6500.
- [41] Liu B, Liang EY, Liu K, Camarero JJ. Species and elevation-dependent growth responses to climate warming of mountain forests in the Qinling Mountains, central China[J]. *Forests*, 2018, 9(5): 248.
- [42] 陈兰, 李书恒, 侯丽, 史阿荣, 白红英. 基于 Vaganov-Shashkin 模型的太白红杉径向生长对气候要素的响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2470–2480.
- Chen L, Li SH, Hou L, Shi AR, Bai HY. Response of *Larix chinensis* radial growth to climatic factors based on the Vaganov-Shashkin model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2470–2480.
- [43] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 李锐. 气候变化对秦岭南北植被净初级生产力的影响(II)——近 52 年秦岭南北植被净初级生产力[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 45–51.
- Jiang C, Wang F, Mu XM, Li R. Effects of climate change on net primary productivity of vegetation in the northern and southern regions of the Qinling Mountains (II): Net primary productivity of vegetation in recent 52a[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(6): 45–51.
- [44] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 967–973.
- Fang JY, Chen AP. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 43(9): 967–973.

(责任编辑: 周媛)