

DOI: 10.20103/j.stxb.202304040680

侯德乐, 李金宽, 彭剑峰, 李佳欣, 彭猛, 韦晓旭, 马永涛, 吕润生. 秦岭东缘龙池曼华山松径向生长对多源数据气候因子的响应. 生态学报, 2024, 44(3): 1191-1202.

Hou D L, Li J K, Peng J F, Li J X, Peng M, Wei X X, Ma Y T, Lü R S. Responses of *Pinus armandii* Franch ring growth to climatic factors from multi-source at the top of Longchiman in the eastern Qinling Mountains, China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 1191-1202.

秦岭东缘龙池曼华山松径向生长对多源数据气候因子的响应

侯德乐¹, 李金宽¹, 彭剑峰^{1,2,*}, 李佳欣¹, 彭猛¹, 韦晓旭¹, 马永涛³, 吕润生⁴

1 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

2 河南省地球系统观测与模拟重点实验室, 开封 475004

3 河南省林业科学研究院, 郑州 450002

4 嵩县林业局, 洛阳 471400

摘要: 全球变暖影响着树木的结构和功能, 反之影响着树木生长对气候变化的响应。秦岭是我国南北方的分界线, 同时也是亚热带气候和温带气候的过渡带, 作为区域气候变化的敏感地带, 已有许多学者在该地区开展树轮气候学研究。基于秦岭东缘伏牛山龙池曼顶部的华山松 (*Pinus armandii* Franch.) 树轮宽度建立了不同年表, 分析该地区树木生长对嵩县站器测气象数据 (SX) 和格点气象数据 (CHN) 的响应。结果表明: (1) 树轮差值年表 (RES) 的统计参数优于标准年表 (STD), 含有较丰富的环境信息, 适于树轮气候学研究; (2) RES 年表与 SX 器测数据和 CHN 格点数据的相关分析结果都表明, 龙池曼顶部华山松径向生长受上一年的气候条件影响较大, 且对气温的响应高于降水, 与上年 7—8 月和当年 1 月的平均气温以及上年 5 月降水量呈显著负相关, 与上年 8 月的降水呈显著正相关; (3) CHN 格点数据能更全面地揭示月平均最高温对华山松径向生长的影响, RES 年表对两个数据集当年夏季 (7—9 月) 的降水量都呈负相关, 但达到显著负相关的月份有差异; (4) 多源气候数据均表明该地区存在暖干化趋势, 升温不利于华山松的生长。若未来暖干化持续, 秦岭东缘龙池曼地区华山松生长会进一步受限, 从而影响该地区的森林植被生产力和固碳潜力。

关键词: 华山松; 多源气候数据; 树轮宽度年表; 气候响应; 秦岭东缘

Responses of *Pinus armandii* Franch ring growth to climatic factors from multi-source at the top of Longchiman in the eastern Qinling Mountains, China

HOU Dele¹, LI Jinkuan¹, PENG Jianfeng^{1,2,*}, LI Jiixin¹, PENG Meng¹, WEI Xiaoxu¹, MA Yongtao³, LÜ Runsheng⁴

1 College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

2 Henan Key Laboratory of Earth System Observation and Modeling, Henan University, Kaifeng 475004, China

3 Henan Academy of Forestry, Zhengzhou 450002, China

4 Forestry Bureau of Songxian County, Luoyang 471400, China

Abstract: Global warming affects the structure and function of trees, which in turn affects the response of tree growth to climate change. In this study, we chose the eastern Qinling Mountains as the research area, because the Qinling Mountains are not only the dividing line between the north and south of China, but also the transitional region between the subtropical and temperate climate. As a sensitive zone of climate change, many scholars have carried out dendroclimatology research in this area. Therefore, we collected *P. armandii* core samples at an altitude of more than 2032m. Different chronologies were

基金项目: 国家重大研究计划 (2018YFA0605601); 国家自然科学基金资助项目 (42077417, 41671042)

收稿日期: 2023-04-04; 网络出版日期: 2023-11-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jfpeng@vip.henu.edu.cn

established based on the tree-ring width of *P. armandii* at the top of Longchiman of Funiu Mountain in the eastern edge of the Qinling Mountains to analyze the responses of tree growth to instrumental meteorological data from Songxian station (SX) and 1km resolution gridded data (CHN) in this area. The results showed that: (1) the statistical parameters of the tree-ring residual chronology (RES) were better than those of the standard chronology (STD), which contained richer environmental information and were suitable for the study of dendroclimatology. (2) The results of the correlation analysis of RES with both SX and CHN showed that the radial growth of *P. armandii* at the top of Longchiman was greatly affected by the climatic conditions of the previous year, and responded more to temperature than precipitation, with a significantly negative correlation with the average temperature in July-August of the previous year and January of the current year, as well as the precipitation in May of the previous year, and a significantly positive correlation with the precipitation in August of the previous year. (3) CHN provided a fuller picture of the effect of mean monthly maximum temperature on radial growth of *P. armandii*. The RES had a negative correlation with precipitation in summer (July—September) of the current year in both datasets, but there were differences in the months that reached a significantly negative correlation. (4) Multi-source climatic data showed that there was a warming and drying trend in this area, and the rising temperature was not conducive to the growth of *P. armandii*. There is a great potential in reflecting regional climate change by using *P. armandii* which growing at high elevations in the eastern Qinling Mountains. If warming and drying continues in the future, the growth of *P. armandii* in Longchiman will be further restricted, thus affecting the forest vegetation productivity and carbon sequestration potential in this area.

Key Words: *Pinus armandii*; multi-source climatic data; tree ring; climate response; eastern Qinling Mountains

气候变化及其产生的影响推动了从最初研究使用气象仪器观测记录变化的单一大气科学,发展到了涉及多学科的大气科学,也成为学界普遍关注的焦点问题^[1]。树木生长不仅受树木本身的遗传因子影响,还受外界环境条件的支配,在外界环境因子中气候要素的影响又往往是变化最大、最敏感的^[2],树木年轮资料具有定年准确、分辨率高、连续性强、树轮宽度量测精确和地域分布广泛等特点^[3-4],因此树轮气候学从上世纪末开始便成为研究气候变化的手段之一。

20世纪90年代以来,中国树轮气候学研究取得较大进展^[5],大多研究集中在树木径向生长对气候因子的响应和利用长年表重建过去的气候及水文等变化^[6]。目前,树木径向生长对气候因子的响应研究,有从海拔梯度、坡向的差异入手研究树木生长对气候响应差异的^[2, 7-10],有利用同一地区不同树种进行气候响应分析的^[11-16],有通过对树木划分不同年龄组来探究树龄对气候响应影响的^[6, 17-19],也有根据树轮和气候的响应关系探究树木生态弹性的^[20-23],都取得了非常大的进展。但是基于不同气象数据来源进行树轮-气候响应关系对比的研究较少,当树轮样点与所选择的气象站点之间存在距离、海拔等空间差异时,可能会对分析结果有重要影响^[24]。由英国东英吉利大学气候研究单位(Climatic Research Unit,简称CRU)提供的格点气候数据经历多年的发展和完善已被广泛应用到气候变化的研究中且被证明具有可靠性和适用性^[25-27],近年逐渐被应用到树轮气候学的研究中。李宗善等^[28]在北京东灵山地区对辽东栎的研究中发现,年表与CRU网格点气候数据的相关性结果与器测数据具有较好的一致性;秦进等^[24]在秦岭地区对巴山冷杉的研究中发现,差值年表对器测、格点气温数据的响应显著时段具有极强一致性,对降水数据的响应特征分异明显;秦进等^[17]基于CRU格点数据探究不同龄组巴山冷杉径向生长与气候要素之间的响应关系,取得了可观的成果。

秦岭作为我国天然的南北分界线,是区域气候变化的敏感地带,成为许多学者研究气候变化和植被响应的热点地区,在当地借助树轮资料开展树木生长对气候变化响应的研究已经取得了重要进展^[29]。而秦岭东缘深入中原大地,距离海岸线较近,与秦岭中段相比有不同的水热条件,气候状况更为复杂,在伏牛山(包括白云山、石人山(尧山)等地)^[30-34]做了一些树轮气候重建研究,但大都是利用油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.);华山松树轮研究也不少,主要是华山松树轮生长与气候因子的关系研究,如王婷等^[35]和李雪楠等^[36]

分别在伏牛山南坡和木札岭开展了研究,气候重建较少,仅见史江峰等^[37]利用鸡角尖高海拔华山松重建了百年冬半年温度,也有华山松与其他针叶树种的对比研究^[38-39]。龙池曼是伏牛山唯一未被开发的地区,最高海拔 2129m,华山松主要分布在海拔 1800m 以上区域,该区域目前已见有不同年龄油松径向生长对气候变化响应^[6]和高温重建^[30]的研究,尚未见有学者开展对龙池曼顶部华山松树轮的研究。

本文首次引入中国 1km 分辨率气候数据集^[40-43]开展树轮与气候响应的研究,其目的是:1) 建立秦岭东缘龙池曼顶部华山松年表,精准揭示该地区华山松径向生长与气候因子的响应关系;2) 分析全球变暖背景下,该区域暖干化趋势对华山松径向生长产生的影响,为伏牛山高海拔森林生态系统和环境演化的预估提供依据。本文研究结果可以为气象数据难以获取或有缺失的地区提供多源气象数据选择的参考。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于河南省洛阳市嵩县南部的龙池曼林区主峰附近,采样点龙池曼顶(33.70°N, 112.01°E, 海拔 2032 m 以上)地处秦岭东缘伏牛山脊线。山顶北侧有一冰斗积水成湖,常年不干,谓之“龙池”^[44]。这里属于北亚热带与暖温带过渡地区,雨热同期;在植被上是我国暖温带落叶阔叶林带与北亚热带常绿落叶阔叶林带的交接之地,植物资源比较丰富,有高等维管束植物近 2000 种,其中木本植物 400 余种,也分布着各种类型的珍贵稀有植物^[45]。华山松在伏牛山高海拔地区有分布,处于华山松在我国分布范围的东部边缘,又处在当地海拔上界,对气候变化的响应尤为敏感。且龙池曼尚未进行旅游开发,地势陡峭,人口密度小,保有原始森林区,加之华山松年轮比较清晰,所以龙池曼华山松是理想的树轮年代学研究对象。

1.2 树轮数据获取及年表建立

于 2022 年 7 月在秦岭东缘伏牛山龙池曼(图 1)采集华山松树轮样芯,采样遵循树轮气候学基本原理^[46],选取该区域华山松胸径较大、年龄长短不同、小生境不同的健康树采集样本,每树用生长锥在胸径位置的不同方向取 1—2 芯作为样本,共采集 33 株样树,59 根树芯样本,标注为 LC01。

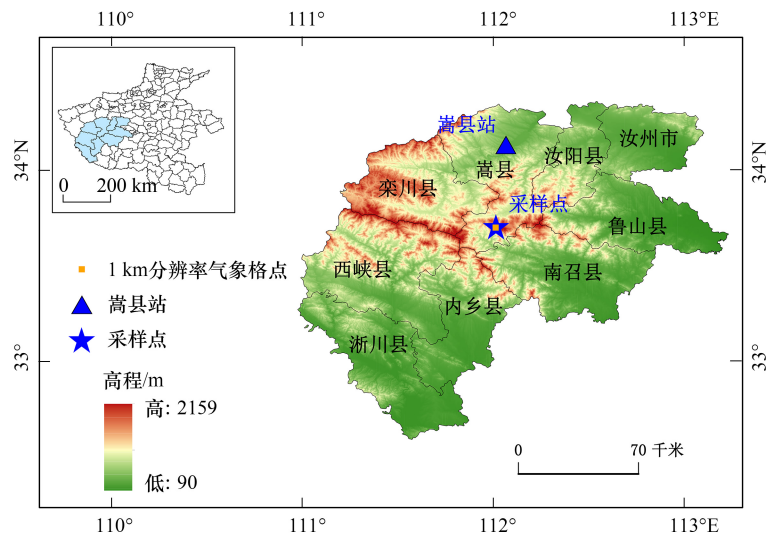


图 1 采样点、气象站以及格点数据位置示意图

Fig.1 Location map of sampling site and meteorological station and gridded data

样本带回实验室后,采用国际树轮库的标准树轮研究方法,对样芯进行固定、晾干、打磨、交叉定年、宽度测量,并用 COFECHA 程序^[47]对交叉定年结果进行检验,剔除一些年轮模糊不清、腐芯或损坏的样芯,最终选取 33 株树,57 根样芯。再通过 ARSTAN 程序^[48]建立树轮宽度年表,采用负指数函数或线性函数拟合去掉树木本身遗传因子产生的生长趋势和树木之间干扰竞争产生的抑制和释放等的生长趋势,最后建立了华山松树

轮宽度标准年表(STD)和差值年表(RES)(图2)。

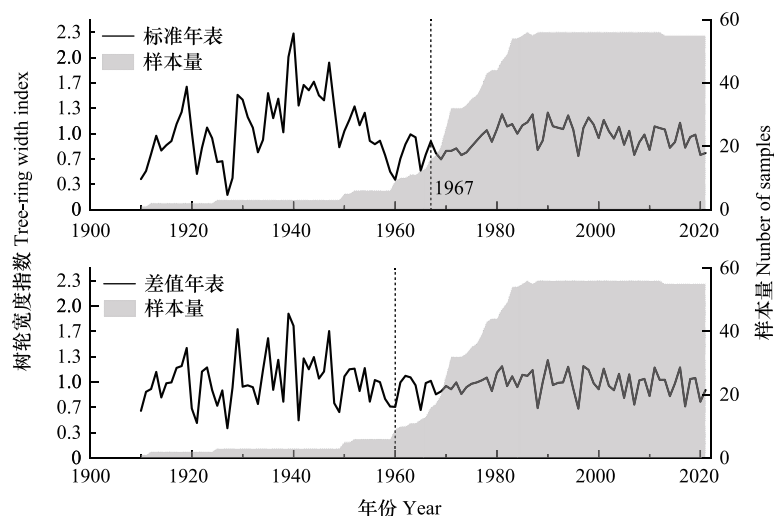


图2 树轮宽度标准年表(STD)和差值年表(RES)与样本量(竖线表示 SSS>0.85 的年份)

Fig.2 The tree-ring standard chronology (STD) and residual chronology (RES) and number of samples (Vertical line shows the beginning year of SSS>0.85)

STD:标准年表 Standard chronology; RES:差值年表; Residual chronology; SSS:子样本信号强度 Subsamples signal strength

1.3 气象资料来源

气象站数据选择距离采样点 47 km 的嵩县气象站 (34.133°N, 112.067°E, 440.7m), 来源中国国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn>), 区间为 1963—2018 年, 气候要素包括月平均气温 (T)、月平均最高气温 (T_{\max})、月平均最低气温 (T_{\min})、月降雨量 (P), 简记为 SX。考虑到采样点与气象站点存在海拔和距离上的差异, 同时为了探究轮宽年表与器测和格点数据之间的相关关系, 为龙池曼顶华山松树木年轮气候学的研究提供新的数据来源, 利用 Matlab 从中国 1km 分辨率逐月气象要素数据集^[49-52]中分别提取了覆盖采样区的单个栅格 (33.6963°N—33.7046°N, 112.0085°E—112.0169°E) 平均气温、月平均最低温、月平均最高温、月降水量, 区间为 1963—2018 年, 简记为 CHN。该数据集是在 CRU 发布的全球 0.5° 气候数据集以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据集的基础上, 通过 Delta 降尺度方案, 采用双线性空间插值方法得到, 并使用 496 个独立气象观测点数据进行验证, 结果可信。

从 SX、CHN 逐月平均气温、平均最低温、平均最高温和平均总降水量分布状况 (图 3) 可以看出, 两个数据集的气温年内变化趋势一致, CHN 的平均温度要显著低于 SX, 高温月份都在 6—8 月, 降水都集中在 7—9 月, 多年平均降水量都在 800 mm 左右。再对两个数据集的各个气候要素分别做相关分析, 结果显示 (表 1), 各要素相关系数接近于 1, 且均通过 0.01 显著性检验, 说明两个数据集间有很强的相关性, 可以进一步与树轮宽度指数做响应分析。

表 1 SX、CHN 各气候因子间的相关系数

Table 1 Correlation coefficient of climate factors between SX and CHN

	平均气温 Monthly mean temperature	平均最低温 Monthly minimum temperature	平均最高温 Monthly maximum temperature	降水量 Monthly precipitation
相关系数 Correlation coefficient	0.998	0.998	0.994	0.994

表中数值 $P < 0.01$, CHN: 1km 分辨率气象数据集 1km resolution meteorological data

对 SX、CHN 自 1964—2018 年的年平均气温和年降水量波动趋势进行了分析 (图 4)。SX 和 CHN 的年均气温都有线性上升的趋势, 增长幅度分别为每 10 年上升 0.21°C 和每 10 年上升 0.28°C。二者的年降水量拟合

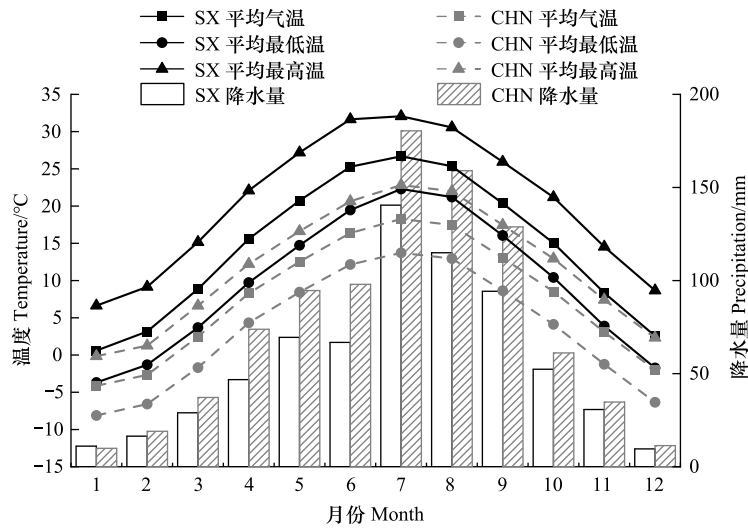


图 3 SX、CHN 气象资料(1963—2018)

Fig.3 Climatic data of the SX, CHN (1963—2018)

SX:嵩县气象站 Songxian station;CHN:1km 分辨率气象数据集 1km resolution meteorological data

直线斜率虽然在 0.05 的置信水平下没有显著异于 0,但均表现出了震荡下降的趋势,CHN 的降幅大于 SX。从年平均气温和年降水量的波动趋势来看,研究区的气候在近 56 年以来有暖干化的趋势。

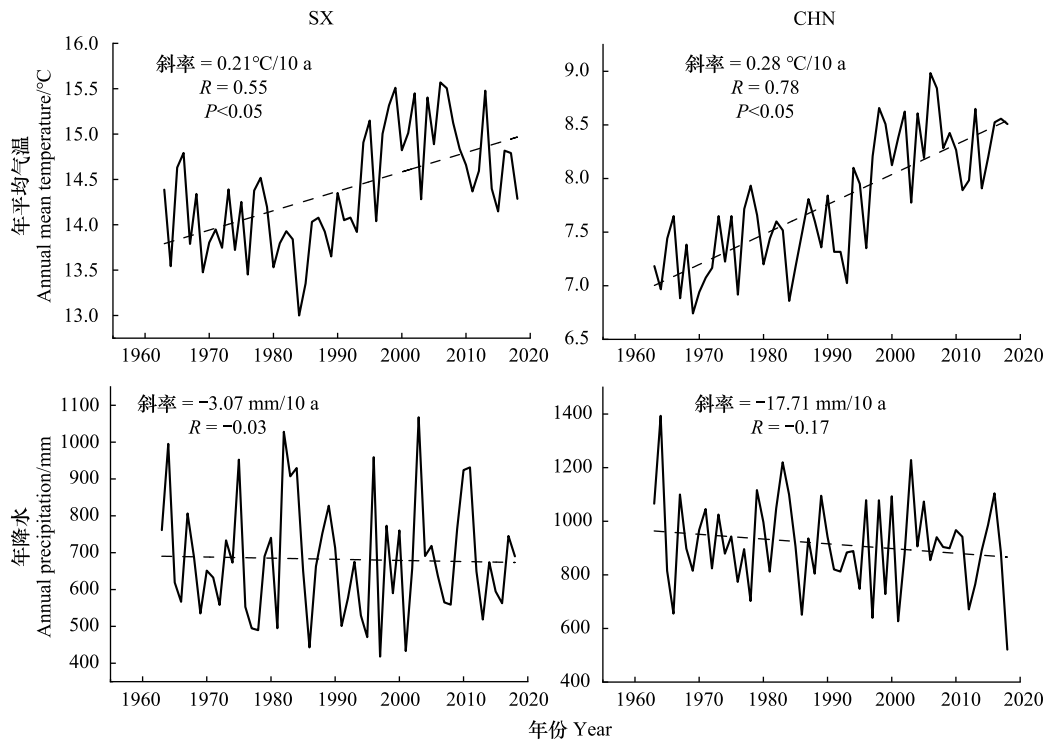


图 4 SX、CHN 年平均气温与年降水波动趋势

Fig.4 The changing trend of annual mean temperature and annual precipitation in SX and CHN

再对两个数据集的平均气温进行 Mann-Kendall 检验(图 5)。结果显示,SX 和 CHN 均有突变升温现象,SX 在 1993 发生了突变升温,而 CHN 在 1994 发生了突变升温,置信水平都高。本研究选择以 CHN 为例,做气温突变前后 RES 年表与气候因子的响应关系。

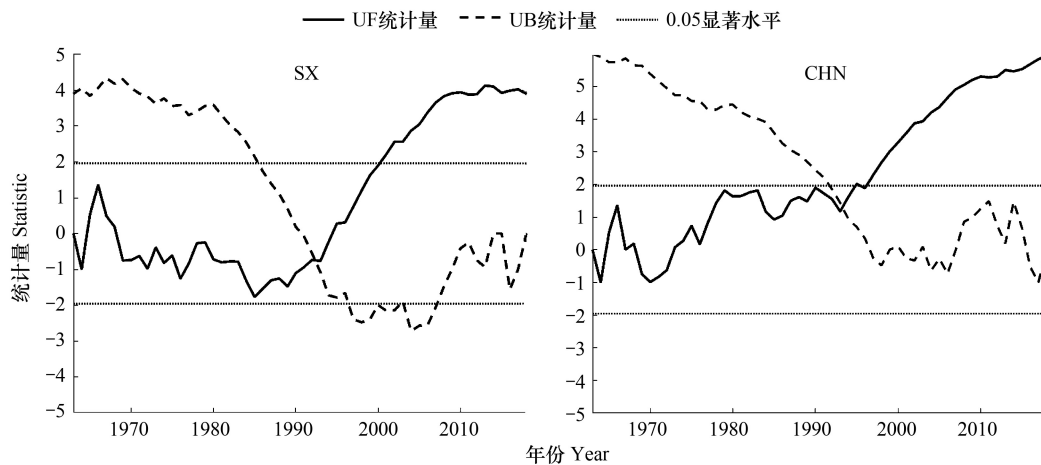


图5 SX和CHN年均温的Mann-Kendall检验

Fig.5 Mann-Kendall test results of annual mean temperature of SX and CHN

UF:顺序统计量 Order statistics; UB:逆序统计量 Reverse statistics

1.4 研究方法

利用 Mann-Kendall 检验对两个数据集的气候要素进行突变检验;运用相关分析方法分析树轮生长与气候要素之间的响应,由于树木生长受上年和当年气候因子的共同影响,选取平均气温大于 5℃ 的上年 3 月至当年 11 月期间共 21 个月的气象要素进行相关分析。相关分析通过树木年轮学软件 Dendroclim 2002^[53] 和 SPSS 25 软件完成。

2 结果与分析

2.1 年表统计特征参数比较

秦岭东端龙池曼华山松树轮宽度 STD 年表和 RES 年表的统计特征参数见表 2。根据子样本信号强度 (SSS) 大于 0.85 的年份确定二者的可靠年表起始年分别为 1967 和 1960。两个年表的平均敏感度都达到 0.22 以上,样本总体解释量均在 94% 以上,超过了 85% 的可接受临界阈值^[24],且 STD 年表和 RES 年表都有较高的信噪比,综合表明研究区内的华山松树轮宽度年表适用于树木年代学的研究。

表 2 树轮宽度 STD 年表和 RES 年表统计特征对比

Table 2 Comparison of statistical characteristics of STD and RES

年表特征 Chronology characteristics	标准年表 STD	差值年表 RES
样本量/(芯/树) Sample size/(core/tree)	57/33	57/33
平均指数 Mean index	1.011	0.998
平均敏感度 Mean sensitivity (MS)	0.228	0.261
标准差 Standard deviation (SD)	0.334	0.248
公共区间/年 Common period/a	1988—2012	1988—2012
序列平均相关 Mean correlation among all series	0.224	0.347
平均树内相关 Mean correlation within a tree	0.429	0.563
平均树间相关 Mean correlation between trees	0.22	0.344
信噪比 Signal-to-noise ratio (SNR)	15.85	29.251
样本总体解释量 Expressed population signal (EPS)	0.941	0.967
子样本信号强度>0.85 的年份 The year of subsample signal strength (SSS)>0.85	1967	1960

平均敏感度 (MS) 的数值越大代表气候因子对树木生长的限制作用越显著,表明样本保存的气候信息相对较多,华山松 RES 年表平均敏感度(0.261)超过了 STD 年表(0.228),表明 RES 年表包含更多气候信息。平均相关系数衡量各样本树轮宽度数据的同步性和相似性,包括序列平均相关、平均树内相关、平均树间相关,上述三个统计值越大,表明不同样芯的年轮宽度变化越一致,所包含的气候变化信息量越大,从表 2 中可以明显看出 RES 年表的相关性比 STD 更好。信噪比(SNR)是度量全部样本表达共同气候信息量多少的统计量,信噪比越大,说明样本包含的气候信息越多,更有利于研究^[54],RES 年表的信噪比远大于 STD 年表,所反映的气候信息更多。通过对比发现,华山松 RES 年表的统计特征均优于 STD 年表,表明 RES 年表代表性较好,更能反映伏牛山龙池曼地区的气候信号。这与邵雪梅等^[55]在秦岭东部华山的研究结果显示差值年表含有更多的气候要素变化信息一致;李雪楠等^[36]也发现在该地区,差值年表含有较丰富的气候信息,更适合气候响应分析。故本文选取 RES 年表与气候因子进行相关分析,区间为 1963—2018 年。

2.2 树木生长对气候的响应特征

2.2.1 树木生长对 SX、CHN 的响应关系

用 Dendroclim 2002 对 RES 年表和 SX、CHN 分别做 Pearson 相关分析,结果见图 6。与器测数据 SX 的相关关系结果表明,RES 年表对上年 7—8 月和当年 1 月平均气温表现出显著的负相关关系;与上年 5 月和当年 7 月的降水量呈显著负相关关系,与上年 8 月降水呈显著正相关;与月平均最低温和月平均最高温的相关性较弱,分别与上年 7 月平均最低温和上年 8 月平均最高温呈较强的负相关关系。这表明上年 7—8 月的水热条件对华山松径向生长的影响较大。

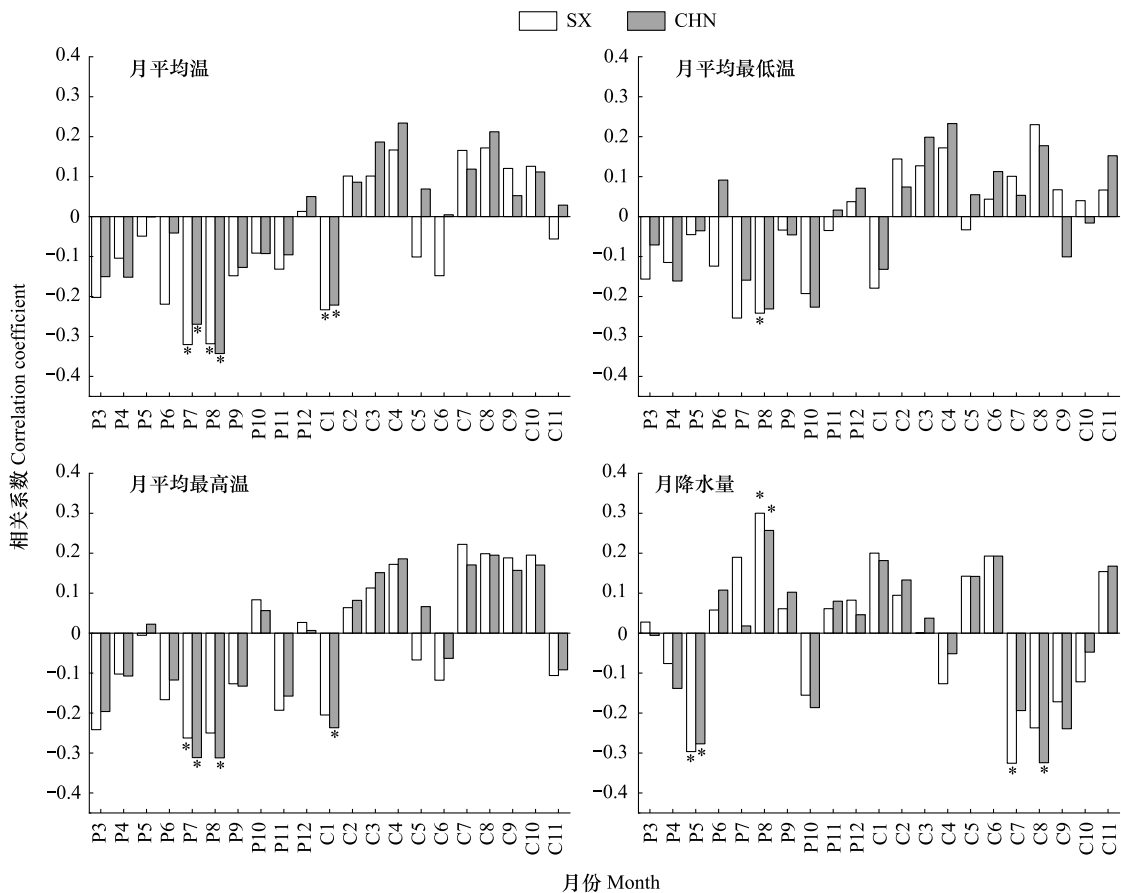


图 6 RES 年表与 SX、CHN 气候数据的相关分析

Fig.6 Correlation analysis of RES with climatic data of SX and CHN

* : $p < 0.05$; P3: 上年 3 月; C1: 当年 1 月

RES 年表与 CHN 格点数据的相关性结果同 RES 年表与 SX 器测数据的结果有很好的 consistency, 特别是在月平均气温和上一年降水量上, 对于月平均最低气温的响应都不明显, 都指示华山松径向生长与上一年的气候条件相关性更大。但是 RES 年表对 CHN 上年 8 月和当年 1 月的平均最高气温表现出较强的负相关关系; 对于当年的降水量, SX 的显著负相关在 7 月, 而 CHN 在 8 月。

2.2.2 树木生长对气温突变的响应

以 CHN 气温突变年 1994 年为界, 对其年均温曲线和 RES 年表(1963—2018) 进行分段趋势拟合, 结果如图 7。气温突变前(1953—1993) RES 年表与气温同向增长, 拟合线斜率都大于 0; 但在突变之后(1994—2018), 华山松树轮宽度指数增长的趋势与升温的趋势相反, 树轮宽度指数上升的趋势消失, 呈现下降态势。由此可见, 气温突变对秦岭东缘华山松径向生长有一定影响, 华山松在气温突变前的长势较好, 而在升温后生长速度逐渐放缓, 表明这种突变升温对华山松径向生长起到抑制作用。

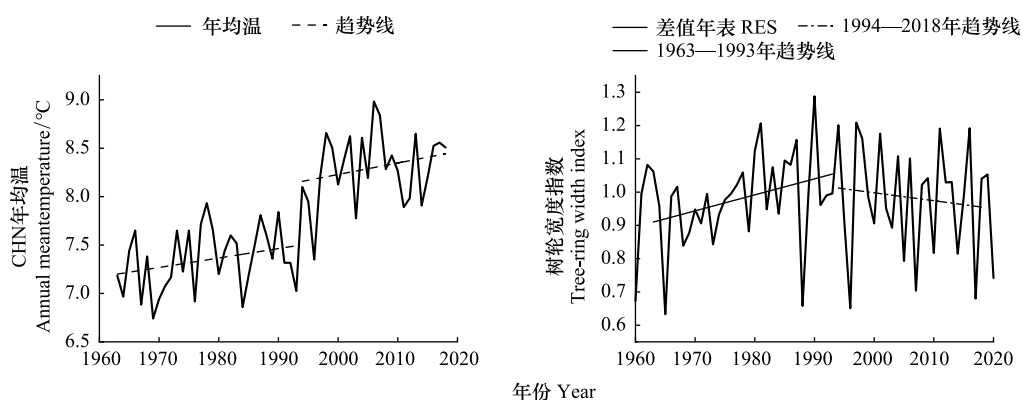


图 7 CHN 年均温与 RES 年表突变趋势拟合(1963—2018)

Fig.7 The mutation trend fitting of RES and CHN's annual mean temperature (1963—2018)

由图 8 可以得知, 在气温突变前后, RES 年表对 CHN 的各个气象要素表现出的相关性有明显不同。在气温突变前, RES 年表与上年 12 月和当年 6 月降水量、当年 3 月最低温呈显著正相关, 与上年 8 月的均温和最高温呈显著负相关。在气温突变后, RES 年表与当年 8 月降水量、上年 3 月最高温、上年 10 月最低温、当年 9 月最低温呈显著负相关关系, 只与当年 10 月最高温表现出较强的正相关关系。从整体上看: 气温突变后, 降水的显著相关月份减少, 气温指标的显著相关月份增多; 负相关关系在气温突变后更多, 华山松的生长也由此受到了一定的抑制。

3 讨论

3.1 树木生长与气候因子的响应关系

RES 年表与器测数据 SX 和格点数据 CHN 的相关分析均表明, 华山松径向生长对气温的响应强于对降水的响应, 主要受到上年 7—8 月和当年 1 月的气温以及上年 5 月降水量的限制, 而上年 8 月的降水促进了华山松的生长。尤其是上一年 8 月的气温指标对华山松的生长限制最强, 可见该地区华山松径向生长对温度的响应更大, 该结论与李雪楠等人^[36]在该区域的研究结果一致。伏牛山地区 8 月气温最高, 强烈的蒸腾作用和太阳辐射加剧土壤水分流失, 华山松叶片气孔关闭, 光合作用减弱, 进而抑制形成层细胞的发育生长。

本研究中 RES 年表与降水量之间的相关关系与邵雪梅等^[55]、尹训钢等^[56]在陕西华山发现的华山松径向生长与当年 5—6 月降水呈正相关, 与 8 月降水呈负相关的结果一致, 但是这些学者结论中 5—6 月的正相关为显著, 而本研究中华山松径向生长与 8 月降水的负相关达到显著, 这表明龙池曼顶华山松受降水的抑制作用比促进作用强。这是由于树木对水分的需求存在阈值, 龙池曼顶部有“龙池”等积水湖, 华山松在此处的生境并不缺少水源, 导致降水的促进作用在相对缺水的华山地区更明显; 加之伏牛山地区与华山地区相比雨季

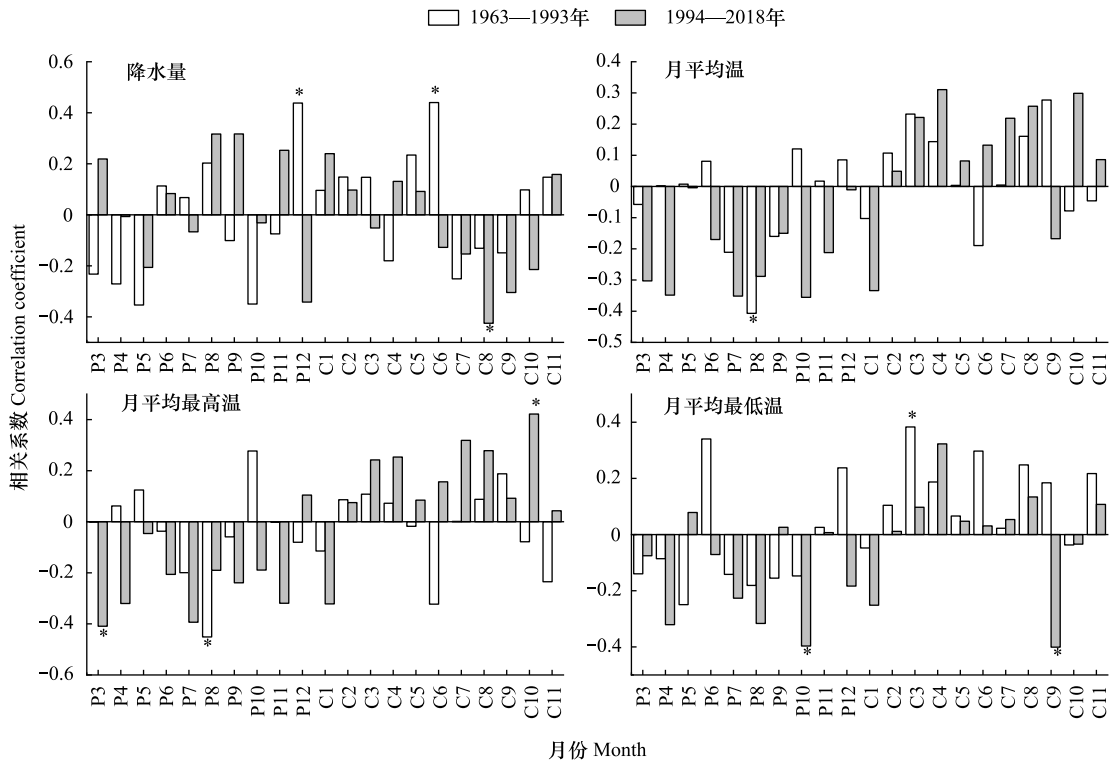


图 8 气温突变前后 RES 年表与 CHN 的相关关系

Fig.8 The correlation between RES and CHN before and after abrupt temperature change

更长,季风带来的降水更多,且距离海岸线较近,使其在当年 8—9 月份易受到台风影响,阴雨天气使得光合作用减弱,抑制了华山松的生长。但同时体现出,上一年生长季的水分积累,有利于树木下一年的生长,表现出明显的生长滞后效应。

3.2 树木生长对 SX 器测数据和 CHN 格点数据响应分析

伏牛山地区华山松轮宽差值年表与 SX、CHN 两个气象数据集的气候因子之间的相关关系几乎完全同向(图 6),仅存在数值上的区别,在显著相关的月份上也有很多重合部分。SX、CHN 在月平均气温的显著相关月份上完全相同,在月平均最低温上二者也相近,但 CHN 在月平均最高温表现出的显著相关关系更多,能更全面地揭示了华山松径向生长与月平均最高温的响应关系。这是由于高分辨的格点气象数据在计算时考虑了温度在垂直方向上的递减率,对采样点附近的温度体现更好。

RES 年表对 SX、CHN 的降水量的响应一致性也很强,尤其是对上一年的降水在显著相关的月份上一致,但对于当年的降水量出现了分异,SX 和 CHN 分别与 7 月和 8 月的降水呈显著负相关。作为重要的气象要素之一,降水量本身具有很强的随机性^[57],空间分布也存在异质性,精准预测降水量一直是气象研究所面临的难题和挑战,秦进等人^[24]也发现轮宽年表对器测数据和格点数据的响应存在月份和季节上的分异性。根据已有研究^[28, 58-60]表明,格点数据能较准确地描述中国大陆地区的降水特征,且本研究中的 SX 和 CHN 对于降水的响应有很好的 consistency,都能够揭示树木生长与降水之间的关系。

3.3 气温突变前后华山松径向生长对气候的响应

根据 Mann-Kendall 检验的结果可以发现,CHN 在 1993—1994 年发生了突变升温,这与前人^[11, 16, 61-62]在我国很多地方发现 1995 年前后发生气温突变情况一致。RES 年表在突变前后对 CHN 气候因子的响应差异很大(图 8),突变前的正向相关性更多,特别是对降水量的响应;而突变后,气温指标所表现出的负相关关系占比更多。可以得出在本研究中,龙池曼华山松在气温突变前受降水量的促进作用更大,而在气温突变后,温

度成为生长的限制因子。

气温突变前,RES 年表与上年 12 月和当年 6 月降水量、当年 3 月最低温呈显著正相关,与上年 8 月的均温和最高温呈显著负相关。中国北方地区 12 月干旱少雨,降水和温度大幅下降,树木基本停止生长,但是仍存在微弱的生理活动,此时较高的温度和较多的降水,均会促进有机物质的合成与存储,同时延长生长季,积累更多的营养物质^[63, 64],尹训钢等人^[56]在气温突变前(1953—1989)对华山松的研究也表明上一年的降水会对树木生长有一定影响;6 月雨季开始,温度相对适中,此时丰沛的降水可以为正值生长季的华山松提供相对充足的水分条件。温度是诱发形成层活动开始的主要因素,当年 3 月平均最低温越高,华山松会提前进入生长季,细胞生长量增加。

气温突变后,RES 年表与当年 8 月降水量、上年 3 月最高温、上年 10 月最低温、当年 9 月最低温呈显著负相关关系,只与当年 10 月最高温表现出较强的正相关关系。3 月和 10 月处在树木生长期的始末,上一年 3 月最高温和 10 月最低温越高,呼吸作用的消耗增多,不利于树木为下一年的生长积累有机物质。最低气温易受到天气状况尤其是云量的影响,9 月处于渐冷的阶段,此时的平均最低温越高,说明云量较大,昼夜温差小,不利于有机物质的积累。10 月位于雨季之后,此时平均最高温越高,说明光照越强,利于光合作用的进行。

气温突变前后,华山松径向生长与气候因子响应差异显著,但均表现出了明显的滞后效应,即上一年的气候条件对树木生长的影响较大。气温突变后,RES 年表与气象因子表现出的显著负相关关系更多,华山松对温度因子的响应也变得更敏感,由于华山松适于分布较为湿润和不甚炎热的环境,所以突变升温抑制了华山松径向生长。

4 结论

伏牛山龙池曼地区华山松树轮宽度 RES 年表包含丰富的气候信息,适于树轮气候学分析和研究。RES 年表与器测数据 SX 和格点数据 CHN 的相关分析结果都表明,龙池曼顶部华山松径向生长受上一年的气候条件影响较大,主要受到上年 7—8 月和当年 1 月的平均气温以及上年 5 月降水量的限制,上年 8 月的降水起到促进作用。且对气温的响应高于降水,这表明龙池曼顶部华山松的生境内水分条件较为适宜。

与 SX 相比,CHN 能更为全面地揭示月平均最高温对华山松径向生长的影响。CHN 数据集显示,龙池曼地区近 56 年来存在暖干化的趋势,且在 1994 年发生突变升温,华山松的径向生长因此受到一定抑制,在气温突变前降水是龙池曼华山径向生长的促进因子,而在气温突变后,华山松生长受温度的限制增加。若未来暖干化持续,华山松生长将会进一步受限,进而对该地区的森林植被生产力和固碳潜力产生负面影响。

SX、CHN 气候要素有很强的相关性,华山松轮宽 RES 年表对二者的响应特征也基本一致。使用 CHN 格点气象数据能反映该地区突变升温的过程,同时更为全面地揭示了龙池曼顶部华山松年轮中的气候变化信号,可以为气象站距离采样点远、气象数据难以获取或有缺失的地区提供多源气象数据选择的参考。

参考文献(References):

- [1] Delbart N, Le Toan T, Kergoat L, Fedotova V. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: a free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982-2004). *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(1): 52-62.
- [2] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 刘普幸, 张永, 方克艳. 阿尼玛卿山地不同海拔青海云杉(*Picea crassifolia*) 树轮生长特性及其对气候的响应. *生态学报*, 2007, 27(8): 3268-3276.
- [3] 吴祥定. 树木年轮分析在环境变化研究中的应用. *第四纪研究*, 1990, 10(2): 188-196.
- [4] 邵雪梅. 树轮年代学的若干进展. *第四纪研究*, 1997, 17(3): 265-271.
- [5] 方克艳, 陈秋艳, 刘昶智, 曹春福, 陈亚君, 周非飞. 树木年代学的研究进展. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 1879-1888.
- [6] 李轩, 彭剑峰, 李静茹, 杨柳, 崔佳月, 彭猛, 李成蹊. 伏牛山龙池曼南坡油松径向生长对气候变化的响应. *生态学报*, 2022, 42(7): 2865-2877.
- [7] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 刘普幸, 张永香, 张永, 田沁花. 阿尼玛卿山不同海拔祁连圆柏树轮宽度年表特征对比分析. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 713-721.

- [8] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 方克艳, 张芬. 坡向对海拔梯度上祁连圆柏树木生长的影响. 植物生态学报, 2010, 34(5): 517-525.
- [9] 勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, 彭剑峰, 强维亚, 陈拓. 祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化. 生态学报, 2004, 24(1): 172-176.
- [10] 石仁娜·加汗, 张同文, 喻树龙, 姜盛夏, 许仲林. 天山不同海拔雪岭云杉径向生长对气候变化的响应. 干旱区研究, 2021, 38(2): 327-338.
- [11] 李静茹, 彭剑峰, 杨柳, 崔佳月, 李轩, 彭猛. 川西高原两种针叶树径向生长对气候因子的响应. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3512-3520.
- [12] 蔡秋芳, 刘禹. 山西中条山白皮松和华山松径向生长对气候变化的响应及气候意义. 地球环境学报, 2015, 6(4): 208-218.
- [13] 杨婧雯, 张秋良, 宋文琦, 张旭, 李宗善, 张远东, 王晓春. 大兴安岭兴安落叶松和樟子松径向生长对气候变化的响应差异. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3415-3427.
- [14] 郭冬, 张同文, 吐尔逊·哈斯木, 张瑞波, 喻树龙, 刘可祥, 苟晓霞, 刘蕊, 石仁娜·加汗, 王兆鹏, 如先古丽·阿不都热合曼, 阿依姆古丽·赛麦提. 西昆仑山两种针叶树种径向生长及其对气候变化的响应. 生态学报, 2022, 42(24): 10226-10240.
- [15] 薛盼盼, 缪宁, 王东, 张远东. 川西亚高山林线岷江冷杉和红杉对气候变化的响应. 生态学报, 2022, 42(23): 9701-9711.
- [16] 贾飞飞, 孙翠洋, 孙红月, 李鑫. 昌岭山两个优势树种径向生长对气候变化的响应. 生态学报, 2019, 39(17): 6332-6340.
- [17] 秦进, 白红英, 赵培, 杨娜娟, 岳军伟. 秦岭不同龄组巴山冷杉径向生长对气候因子的响应差异. 生态学报, 2022, 42(17): 7167-7176.
- [18] 彭剑峰, 刘玉振, 王婷. 神农山白皮松不同龄组年轮-气候关系及 PDSI 重建. 生态学报, 2014, 34(13): 3509-3518.
- [19] Peng J F, Peng K Y, Li J B. Climate-growth response of Chinese white pine (*Pinus armandii*) at different age groups in the Baiyunshan National Nature Reserve, central China. *Dendrochronologia*, 2018, 49: 102-109.
- [20] 李颖俊, 方克艳, 白毛伟, 曹新光, 董志鹏, 唐婉儒, 梅泽鹏. 闽东南地区马尾松古树对气候变化和虫灾的生态弹性. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3539-3547.
- [21] Andivia E, Ruiz-Benito P, Díaz-Martínez P, Carro-Martínez N, Zavala M A, Madrigal-González J. Inter-specific tolerance to recurrent droughts of pine species revealed in saplings rather than adult trees. *Forest Ecology and Management*, 2020, 459: 117848.
- [22] Gazol A, Camarero J J, Anderegg W R L, Vicente-Serrano S M. Impacts of droughts on the growth resilience of Northern Hemisphere forests. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26(2): 166-176.
- [23] Fang O Y, Zhang Q B. Tree resilience to drought increases in the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 245-253.
- [24] 秦进, 白红英, 赵培, 岳军伟, 王蓉. 基于器测和格点气象数据的巴山冷杉树轮——气候响应对比研究. 干旱区资源与环境, 2021, 35(10): 105-111.
- [25] 黄秋霞, 赵勇, 何清. 基于 CRU 资料的中亚地区气候特征. 干旱区研究, 2013, 30(3): 396-403.
- [26] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, David VINER. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化. 大气科学, 2006, 30(5): 894-904.
- [27] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 陈建徽, 王劲松. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1647-1657.
- [28] 李宗善, 陈维梁, 韦景树, 买尔当·克依木, 张育新, 张霜, 王晓春. 北京东灵山辽东栎林树木生长对气候要素的响应特征. 生态学报, 2021, 41(1): 27-37.
- [29] Qin J, Bai H Y, Su K, Liu R J, Zhai D P, Wang J, Li S H, Zhou Q, Li B. Comparison of instrumental and interpolated meteorological data-based summer temperature reconstructions on Mt. Taibai in the Qinling Mountains, northwestern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 133(1): 633-645.
- [30] 田沁花, 刘禹, 蔡秋芳, 包光, 王伟平, 薛文亮, 朱文杰, 宋慧明, 雷莺. 油松树轮记录的未来 134 年伏牛山 5—7 月平均最高温度. 地理学报, 2009, 64(7): 879-887.
- [31] Shi J F, Li J B, Cook E, Zhang X Y, Lu H Y. Growth response of *Pinus tabulaeformis* to climate along an elevation gradient in the eastern Qinling Mountains, central China. *Climate Research*, 2012, 53: 157-167.
- [32] 刘禹, 张艳华, 蔡秋芳, 宋慧明, 马永永, 梅若晨. 基于树轮宽度重建的河南石人山地区 1850 年以来季节最低温度及 20 世纪增温. 地球环境学报, 2015, 6(6): 393-406.
- [33] Peng J F, Li J B, Yang L, Li J R, Huo J X. A 216-year tree-ring reconstruction of April - July relative humidity from Mt. Shiren, central China. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(14): 6055-6066.
- [34] 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高温变化及影响机制. 生态学报, 2021, 41(1): 79-91.
- [35] 王婷, 沈连峰, 叶永忠, 高海强, 徐萌. 伏牛山华山松径向生长对气候变化的响应. 河南科学, 2010, 28(12): 1549-1551.
- [36] 李雪楠, 霍嘉新, 杨柳, 彭剑峰. 木札岭华山松树轮宽度年表的建立及其气候响应. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2020, 44(3): 157-162.
- [37] 史江峰, 鹿化煜, 万建东, 李升峰, 聂宏善. 采用华山松树轮宽度重建秦岭东缘近百年冬半年温度. 第四纪研究, 2009, 29(4): 831-836.

- [38] 王婷, 李聪, 张弘, 任思远, 李鹿鑫, 潘娜, 袁志良, 叶永忠. 宝天曼自然保护区不同针叶树径向生长对气候的响应. *生态学报*, 2016, 36(17): 5324-5332.
- [39] 李镇江, 于晨一, 刘升云, 闫瑞环, 黄心邓, 刘晓静, 陈志成, 王婷. 伏牛山南坡 3 种针叶树径向生长对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2023, 34(5): 1178-1186.
- [40] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901—2100. *Sustainability*, 2020, 12(2): 477.
- [41] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [42] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, Chen Y M, Cao Y, Ren J Y. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011-2100. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 183-194.
- [43] Peng S Z, Gang C C, Cao Y, Chen Y M. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(5): 2250-2264.
- [44] 任金武, 任冉, 任彦通. 秦岭淮河北分界线中段划定及淮河源头研究. *西部资源*, 2021, No.104(05): 175-177.
- [45] 陈翠云, 张益民, 王进涛, 侯小改. 龙池曼自然保护区珍稀、濒危保护植物的初步研究. *豫西农专学报*, 1989(1): 41-46.
- [46] 邵雪梅, 方修琦, 刘洪滨, 黄磊. 柴达木东缘山地千年祁连圆柏年轮定年分析. *地理学报*, 2003, 58(1): 90-100.
- [47] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. 1983:
- [48] Cook E R. A time series analysis approach to tree ring standardization; University of Arizona Tucson, 1985.
- [49] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月平均气温数据集(1901-2021)//国家青藏高原科学数据中心. 国家青藏高原科学数据中心. 2020.
- [50] 彭守璋. 中国 1km 分辨率月最低温度数据集(1901-2021)//国家青藏高原科学数据中心. 国家青藏高原科学数据中心. 2020.
- [51] 彭守璋. 中国 1km 分辨率月最高温度数据集(1901-2021)//国家青藏高原科学数据中心. 国家青藏高原科学数据中心. 2020.
- [52] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月降水量数据集(1901-2021)//国家青藏高原科学数据中心. 国家青藏高原科学数据中心. 2022.
- [53] Biondi F. Are climate-tree growth relationships changing in north-central Idaho, U.S.A.? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2000, 32(2): 111-116.
- [54] 方精云, 朱江玲, 石岳. 生态系统对全球变暖的响应. *科学通报*, 2018, 63(2): 136-140.
- [55] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立. *地理学报*, 1994, 49(2): 174-181.
- [56] 尹训钢, 吴祥定. 华山松树木年轮对气候响应的模拟分析. *应用气象学报*, 1995, 6(3): 257-264.
- [57] 苏京志. 降水时间随机性对月总降水量的影响. *大气科学学报*, 2019, 42(1): 109-116.
- [58] 王芝兰, 李耀辉, 王素萍, 冯建英, 王劲松. 1901—2012 年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1666-1673.
- [59] 张东, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 杨胜天. 基于 CRU 格点数据集的近百年渭河流域降水变化. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(2): 142-148.
- [60] 王丹, 王爱慧. 1901—2013 年 GPCP 和 CRU 降水资料在中国大陆的适用性评估. *气候与环境研究*, 2017, 22(4): 446-462.
- [61] Jiao L, Xue R H, Qi C L, Chen K, Liu X P. Comparison of the responses of radial growth to climate change for two dominant coniferous tree species in the eastern Qilian Mountains, northwestern China. *International Journal of Biometeorology*, 2021, 65(11): 1823-1836.
- [62] 彭钟通, 郭明明, 张远东, 顾峰雪, 邵辉, 刘世荣. 升温突变对川西道孚林线川西云杉和鳞皮冷杉生长的影响. *生态学报*, 2021, 41(20): 8202-8211.
- [63] 秦进, 白红英, 周旗, 王俊, 李书恒, 甘卓亭, 包光. 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. *干旱区地理*, 2017, 40(1): 147-155.
- [64] 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.