

DOI: 10.5846/stxb202101070076

李轩, 彭剑峰, 李静茹, 杨柳, 崔佳月, 彭猛, 李成蹊. 伏牛山龙池漫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.

Li X, Peng J F, Li J R, Yang L, Cui J Y, Peng M, Li C X. Climate-growth response of *Pinus tabulaeformis* in the south slope of Longchiman, Mt. Funiu, central China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2865-2877.

伏牛山龙池漫南坡油松径向生长对气候变化的响应

李 轩¹, 彭剑峰^{1,2,3,*}, 李静茹¹, 杨 柳¹, 崔佳月¹, 彭 猛¹, 李成蹊¹

¹ 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

² 河南大学环境与规划国家级实验教学示范中心, 开封 475004

³ 河南省地球系统观测与模拟重点实验室, 开封 475004

摘要: 树龄是森林结构、成分变化的重要诱导因素, 它极大地影响着森林的生长动态乃至分布格局, 因此不同年龄尺度的树木径向生长对气候变化的响应研究, 对全球气候变化背景下的森林保护和管理有着十分重要的科学意义。油松是我国的特有树种, 在我国北方地区广泛分布, 河南西部伏牛山地处南北气候过渡的敏感地带, 是油松分布的南界。以伏牛山地区龙池漫南坡原始森林的油松树轮为研究对象, 依据系统聚类分析将样芯宽度序列分为两个年龄组, 最终建立了整体及不同树龄的树轮宽度标准年表(STD)。研究结果表明: (1) 树轮标准年表的信噪比 SNR 和样本总解释量 EPS 值都较高, 说明年表含有较丰富的环境信息; (2) 当年 5 月的水热因子是龙池漫油松径向生长的主要限制因子; (3) 老龄油松和幼龄油松的树轮宽度生长变化均呈下降趋势, 但是幼龄树的树轮宽度下降幅度远大于老龄树; (4) 建立了不同分组油松的生长模型, 并基于模型确定了树轮生长的最显著因子, 同时也发现幼龄油松对气象因子响应敏感, 受到的抑制作用也较为强烈。因此随着全球气候变暖趋势增大, 龙池漫低海拔地区将更加不利于幼龄油松的生长, 这将影响油松的抚育更新及油松种群在低海拔地区生态群落中的地位, 甚至造成油松将向更高海拔地区迁移, 这一研究结果也为伏牛山地区的森林管理和抚育更新提供了科学依据。

关键词: 伏牛山地; 油松; 年龄组; 树轮宽度年表; 气候响应

Climate-growth response of *Pinus tabulaeformis* in the south slope of Longchiman, Mt. Funiu, central China

LI Xuan¹, PENG Jianfeng^{1,2,3,*}, LI Jingru¹, YANG Liu¹, CUI Jiayue¹, PENG Meng¹, LI Chengxi¹

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

² National Demonstration Center for Environmental and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

³ Henan Key Laboratory of Earth System Observation and Modeling, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: Tree age is a significant inducer factor in the change of forest structure and composition and it greatly affects the growth dynamics and distribution pattern of forests. So, the study has very important scientific implications to forest protections and managements under the background of global climate change based on the responses of radial growth of trees to climate change on different age scales. *Pinus tabulaeformis* carr. is an endemic species to China and widely distributed in northwestern, northeastern and northern China. Mt. Funiu in western Henan Province is located in the sensitive zone of climate transition from north subtropical to south warm temperate in eastern China, which is considered as the southern boundary of *Pinus tabulaeformis* distribution in eastern China. Although some studies on the relationship between tree growths and climate change had been carried out in Mt. Funiu, there are few studies on the response of tree growths to climate change on different age scales. In this paper, tree rings of *Pinus tabulaeformis* from the southern slope of the

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671042, 42077417)

收稿日期: 2021-01-07; 网络出版日期: 2021-12-15

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

primeval forest in Mt. Funiu were taken and the samples were divided into two age groups based on systematic cluster analysis. Finally, different tree ring-width standard chronologies (STD) for the whole and different tree-ages were developed. The study results showed that: (1) these standard chronologies had higher value of signal-to-noise ratio (SNR) and expressed population signal (EPS), so they indicated that these contained a variety of environmental information; (2) The main limiting factors for the radial growth of *Pinus tabulaeformis* in Longchiman were the hydrothermal factors in May of the current year; (3) The tree-ring width growths of both older and younger *Pinus tabulaeformis* showed a decreasing trend, but the decreasing amplitude of the tree ring width of younger trees was much greater than that of the older; (4) The growth models of different groups of *Pinus tabulaeformis* were established and the most significant limiting factor of each group was determined based on models. Also the study found that the radial growth of younger *Pinus tabulaeformis* was more sensitive response to climate factors and more inhibited. Hence, with the global warming increasing, the growth of younger *Pinus tabulaeformis* will be more unfavorable in the lower altitude area of Longchiman and affect the tending and regeneration and the status of *Pinus tabulaeformis* population in the ecological community of the low altitude area, at last even may cause *Pinus tabulaeformis* to migrate to higher altitude or colder area. The results also provide some scientific basis for forest management and tending and regeneration in Mt. Funiu.

Key Words: Funiu Mountain; *Pinus tabulaeformis*; age groups; tree ring width chronology; climate response

气候变化对陆地生态系统产生非常大的影响,尤其是对森林生态影响更加显著^[1-2],不仅可以通过直接影响树木的代谢过程来影响生物量,还可以影响到森林的结构和功能^[3-4],进而影响着森林的分布格局^[5-7],而且也会引发一系列的生态问题,导致树木生长下降、树木死亡事件增多及森林由“碳汇”向“碳源”转变的风险^[8-9]。因此,理解气候变化对树木生长的影响机制对于准确预测树木个体的死亡时间及森林动态十分必要,也有助于更好的预测未来气候变化情景下的森林动态及森林演替的方向。树轮以其具有定年准确、分辨率高、连续性强、数据量测精确和样本分布广泛等特点,在全球气候变化研究中已被广泛应用^[10],尤其是利用树轮资料(宽度、密度等)重建区域过去气候变化^[11-13]。

经历多年的发展,树轮气候学研究在我国也已取得较大的进展,目前主要在高寒的青藏高原^[13-16]和干旱的西北地区^[17-20],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;东部季风湿润区的研究起步相对较晚,如 Cai 等^[21]在大别山分析了不同海拔的马尾松和黄山松对气候变化的响应;Duan 等^[22]利用湖南省、江西省 5 个采样点马尾松树轮资料重建了中国东南地区 1849—2008 年间 1—4 月平均气温;甘展峰等^[23]研究了福建长汀福建松对气候的响应;陈峰等^[24]用福建沙县马尾松树轮宽度分析与夏季-太平洋涛动指数的关系;张芳芳等^[25]研究了湖北神农架地区巴山冷杉树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的气候意义。目前虽然有一些关于全球气候变化对我国南北分界线伏牛山地区森林生态影响的研究^[26],但在树轮研究方面仍多集中在该地区的优势种华山松,如 Peng 分析了白云山不同年龄华山松^[27]、不同海拔华山松^[28]及不同树种(华山松和日本落叶松)^[29]对气候的响应,史江峰等^[30]用华山松宽度序列重建了秦岭东缘冬季气温变化。大多数研究集中在树轮指数与气象因子的响应上,从微观尺度上将树木生理观测实验结合树轮的研究^[31]以及宏观尺度上树木径向生长对森林管理措施比如间伐造成的小气候变化的响应、利用树轮资料估算区域森林碳汇的固碳能力的研究^[32-33]较少。

伏牛山地属于秦岭余脉,是我国东部季风区暖温带的南界,属于生态交错带,具有明显的过渡性、脆弱性、敏感性、尺度性和动态性等特征,被认为是对气候变化反应最敏感的地区^[34-35];油松主要分布在我国华北、西北和东北地区,伏牛山是油松分布南界^[36],主要分布在海拔 900—1800m 的地区,因此这里也是油松树木年轮研究的理想区域,如 Shi 等^[37]、Liu 等^[38]、Peng 等^[11]都已在伏牛山及所属的石人山、白云山等地开展了油松树轮与气候关系的相关研究工作。龙池漫属于伏牛山山系,主峰海拔 2129m,是油松分布的南界和上界,海拔较高且尚未开发,保存有大面积的原始森林,该地区仅见 Shi 等^[37]、田沁花等^[39]做了一些气候重建研究。

在伏牛山大多数树轮的研究集中在海拔梯度和不同树种方面^[28-29,37],然而树龄是森林结构、成分变化的重要诱导因素^[31,40-43],它极大地影响着森林的生长动态乃至分布格局^[41,44],尚未发现油松径向生长对气候变化响应年龄差异的研究。

本研究旨在分析龙池漫油松径向生长对伏牛山南、北坡气候的响应差异;探讨油松径向生长—气候响应的年龄差异并找出油松径向生长的显著气候因子;建立不同龄级油松气候—生长模型。这对评估气候变暖背景下龙池漫油松未来分布变化、利用油松树轮重建伏牛山地区气候有普遍的意义,也能为伏牛山地区森林管理和抚育更新提供科学依据。

1 数据获取和研究方法

1.1 研究区概况

龙池漫位于河南省洛阳市嵩县南部,东邻平顶山市鲁山县,西与西峡和栾川县相望(图1),主峰海拔2129m,属于秦岭东支余脉伏牛山部分,山地多由燕山期花岗岩组成,山坡大多悬崖峭壁,地表附有较薄的土壤,土质疏松,上部有较厚的枯枝落叶。气候属于大陆性季风气候区,多年平均气温13.76℃,年降水量844mm,雨热同期,气候属于大陆性季风气候区,位于北亚热带向暖温带过渡地带。植被在低海拔地区以栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)、山茱萸(*Cornus officinalis* Sieb. et Zucc.)等居多,高海拔地区以油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)和华山松(*Pinus armandii* Franch.)为主,夹杂高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum* (L.) Wahlenb)等灌木^[45]。龙池漫人口密度小,山势陡峭,很难进入,受人为因素干扰较少,因此保有自然原貌和原始森林,因此龙池漫是树轮研究的理想区域。

1.2 树轮数据获取

2020年11月,选择河南省伏牛山自然保护区龙池漫南坡(图1)原始森林区(33.71°N,111.98°E,海拔1600—1750m)的一片油松林区作为采样点,凡胸径约大于20cm的油松皆采,共采集35棵油松共53根样芯。

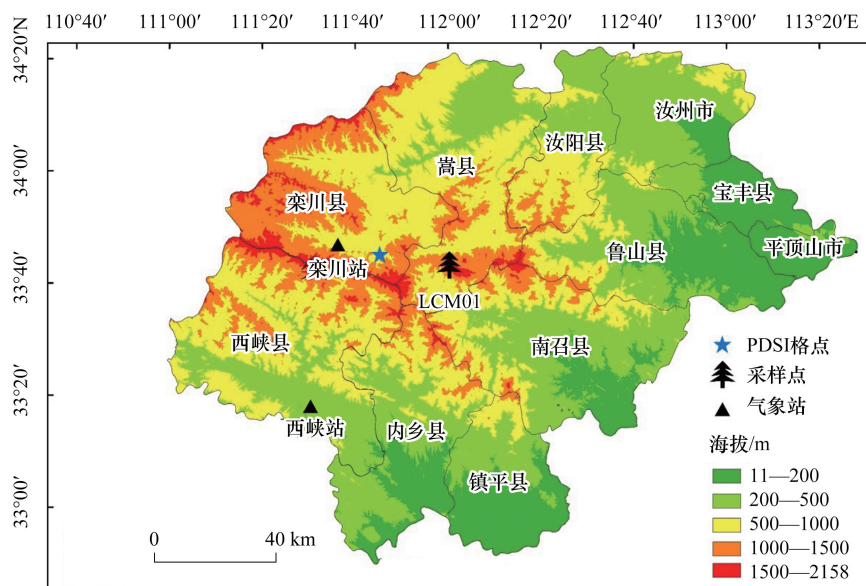


图1 采样点和附近气象站位置示意图

Fig.1 Location map of sampling site and meteorological stations nearby

PDSI: 帕尔默干旱指数 Palmer Drought Severity Index

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、打磨、交叉定年、宽度测量,并用 COFECHA 程序^[46]对定年结果进行质量控制,剔除一些年轮异常、腐芯或测量困难的样芯,最终选取

29 棵树 45 根样芯。把通过 COFECHA 程序定年检验无误的 45 根样芯宽度序列,依据 SPSS 26 软件做系统聚类分析,明显地将 45 根样芯分为老龄和幼龄两个组(图 2),其中老龄油松共 12 树 20 芯,年龄段介于 94—183 年间,平均年龄 131 年;幼龄油松共 17 树 25 芯,年龄段在 44—74 年间,平均年龄为 60 年。

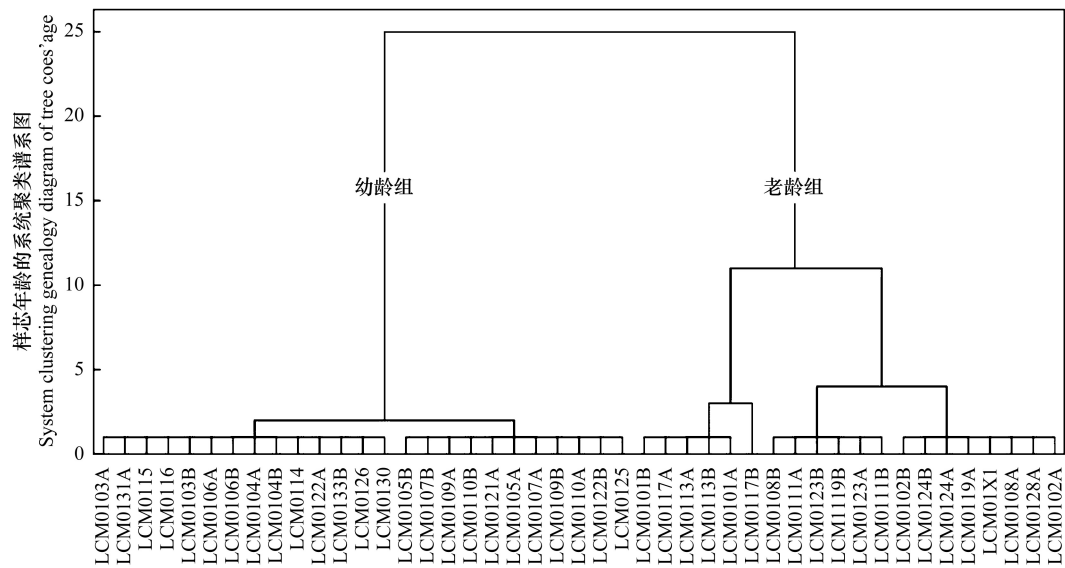


图 2 样芯年轮序列的聚类分析谱系图(横坐标为样芯的编号)

Fig.2 The cluster genealogy map based on ring-width series of the tree cores (The horizontal coordinates are the serial number of the sample core)

根据树轮聚类分析的结果,把整体、老龄和幼龄组的样芯分别用 ARSTAN 程序^[47]形成年表。首先要进行标准化,即去树木生长趋势,线性函数适用于年龄较短、没有明显生长趋势的树轮样本,负指数函数能较好地拟合树轮宽度快速下降和之后缓慢递减的趋势。标准化之后再进行均值化,常见的方法有算数平均和双权重平均法^[48—49],最后获得一系列树轮年表,其中 3 个标准年表(STD)和样本量见图 3,各组年表的统计特征见表 1。

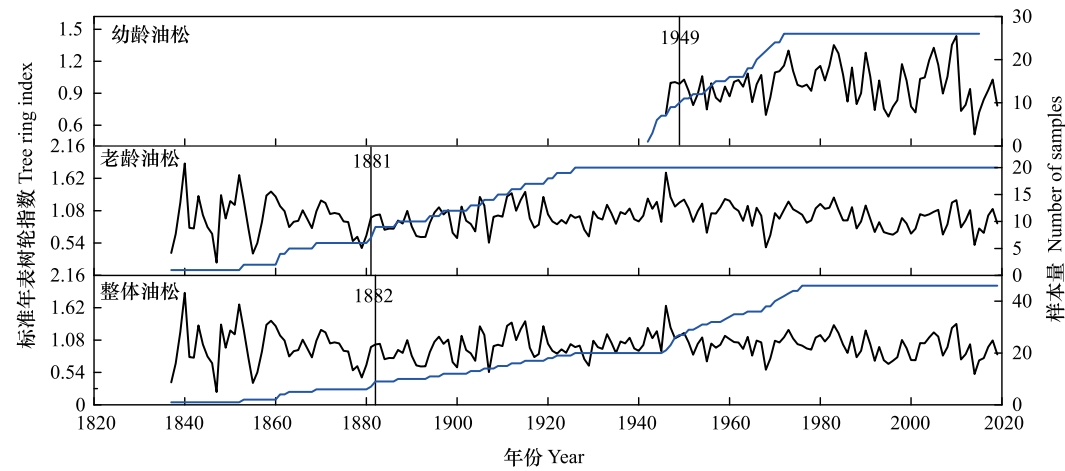


图 3 不同龄级树轮宽度标准年表(STD)及样本量(竖线为 SSS>0.85 的起始年份)

Fig.3 The tree-ring width standard chronologies at different age-groups and number of samples (Vertical line shows the beginning year of SSS>0.85)

STD:标准年表 Standard chronology; SSS: 子样本信号强度 Subsample Signal Strength

表 1 整体、老龄和幼龄树轮宽度标准年表(STD)统计特征值

Table 1 Statistics of tree-ring width standard chronologies for whole, and old-age and young-age groups

特征 Characteristics	整体组 Total	老龄组 Old-age	幼龄组 Young-age
年表样本量 Samples in chronology/(芯/树)	45/29	20/12	25/17
平均敏感度(MS)Chronological mean sensitivity	0.211	0.216	0.178
标准差 Standard deviation	0.236	0.241	0.185
公共区间(年)Common period (year)	1980—2010	1980—2010	1980—2010
所有样芯间相关系数(R_1) All series correlation (R_1)	0.378	0.377	0.393
树内相关系数(R_2) Correlation within trees (R_2)	0.648	0.638	0.657
树间相关系数(R_3) Correlation between trees (R_3)	0.374	0.366	0.387
信噪比(SNR) Signal-noise ratio	27.959	12.104	16.855
样本总体解释量(EPS) Expressed population signal	0.965	0.924	0.944

1.3 气象数据

选取离采样点较近的西峡站(33.3°N,111.5°E,252m)和栾川站(33.78°N,111.6°N,751.5m) 2 个气象站(数据来自中国气象数据共享服务系统(<https://data.cma.cn/>)) 1961—2016 年的月平均气温、月平均最高温、月平均最低温和月降水量 4 个气象因子指标作为分析对象。西峡站的多年月平均温 15.27℃,年降水量 847.92mm,栾川站的多年月均温 12.26℃,年降水量 841.45mm(图 4)所示,它们降水都主要集中在夏季,具有雨热同期的特点。PDSI 月份数据来自 Climate Explore (<http://climexp.knmi.nl/>) 离采样点最近的格点(33.75°N,111.75°N)数据。

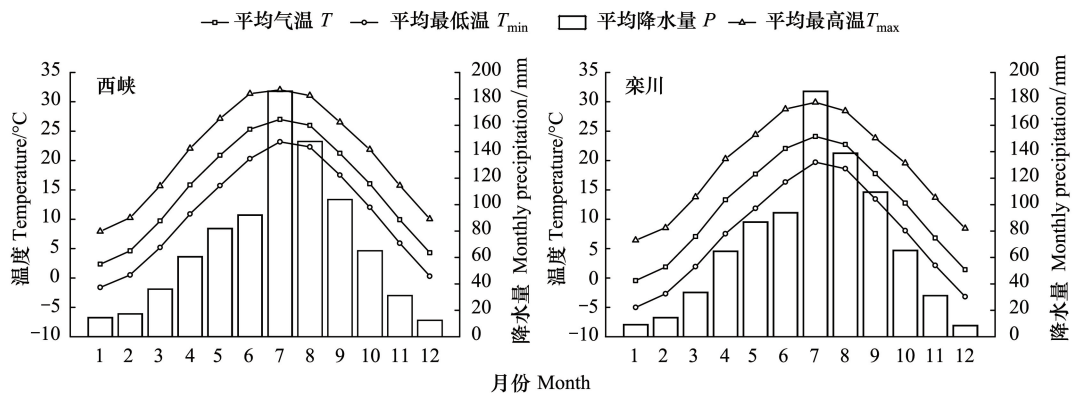


图 4 西峡站和栾川站气象站资料(1961—2016)

Fig.4 Climatic data from Xixia and Luanchuan Meteorological Station (1961—2016)

1.4 研究方法

本研究利用树木年轮学的专业软件 Dendroclim2002^[50]对树木年轮标准年表(STD)与两个气象站 4 个气象指标及 PDSI 指数(1961—2016 年)做皮尔逊相关分析,从上年 5 月到当年 11 月共 19 个月来分析伏牛山南、北坡气候对油松径向生长的影响,选择相关较好的气象站;利用相关较好的气象站和不同年龄油松的标准年表做相关分析,对比不同年龄油松径向生长—气候响应差异并找出影响显著的气候因子;用 SPSS 26 软件对相关显著的气候因子和树轮标准年表做回归分析,建立不同龄级油松的生长模型。

2 结果分析

2.1 树轮宽度年表的统计特征

龙池漫油松树轮宽度年表的平均敏感度(MS)、信噪比(SNR)、总体样本解释量(EPS)较高,说明油松的

标准年表保留了较多的气候信息(表1)。为了对比分析不同年龄组的公共统计特征,研制年表时采用统一的公共区间 1980—2010 年。研究发现老龄油松具有更高的平均敏感度和标准差,且整体组的信噪比 SNR (27.959) 和样本总体解释量 EPS(0.965) 最高,幼龄组油松次之,这与 Peng 等^[27] 在白云山的研究相似。由于采样点坡度较大和采样难度较大,获取的样本量相对较少,一些树只取到单芯,油松的样芯间相关系数(R_1)、树内的相关系数(R_2)和树间的相关系数(R_3)相差不大,表明采样点油松的树木年轮宽度变化具有较高的一致性。幼龄油松的相关值稍大,这可能与幼龄油松的样本量较大有关。

2.2 油松径向生长与气候要素的关系

2.2.1 整体油松标准年表与气候要素的相关分析

用 Dendroclim 2002 软件分析了整体组油松标准年表与栾川、西峡两站气象因子的相关性,其结果如图 5。

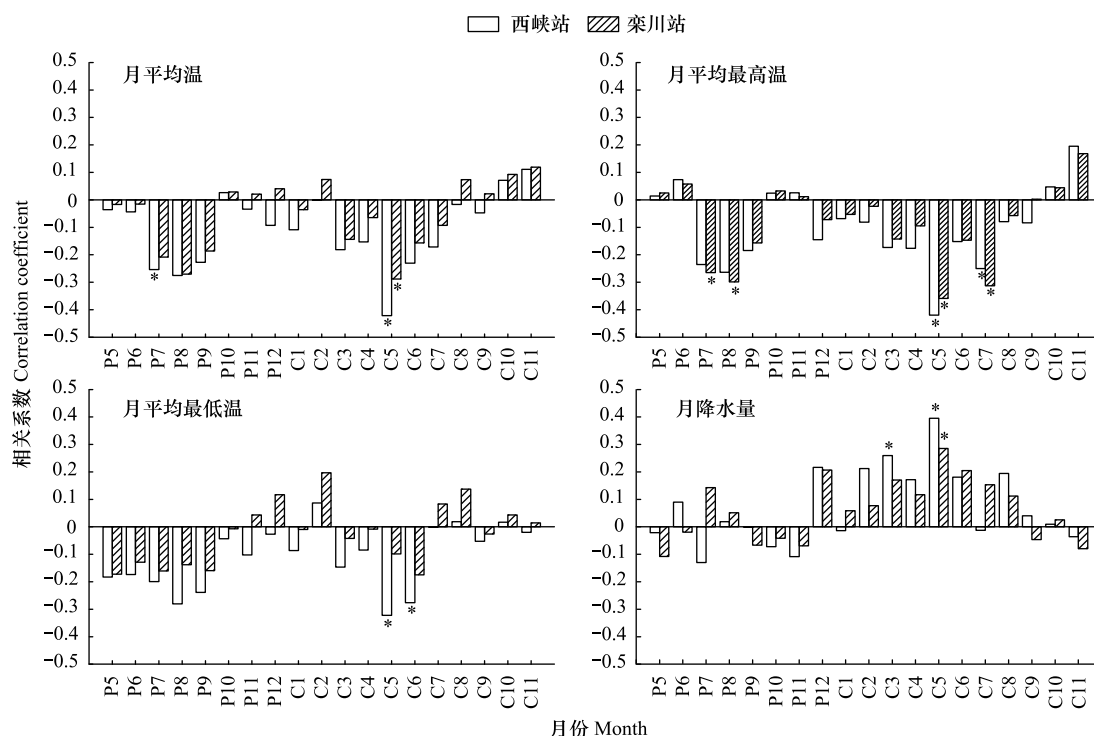


图 5 整体油松树轮宽度标准年表与月均温、月均最高温、月均最低温和降水量的相关分析

Fig.5 Correlation between monthly T, Tmax, Tmin and Precipitation of Xixia and Luanchuan station and whole tree-ring width chronology of *Pinus tabulaeformis*

*: $P < 0.05$; P5: 上年 5 月; C1: 当年 1 月

整体油松与栾川站的当年 5 月平均温度达到显著相关;与当年 5 月、7 月、以及上年 7 月、8 月的平均最高温显著负相关;与当年 5 月降水量显著相关,相关系数仅 0.29。与西峡站的当年 5 月平均温度相关显著;与当年 5 月、7 月的月平均最高温显著相关;与当年的 5 月、6 月的月平均最低温相关显著;与当年 3、5 月降水量显著相关。

与各月份的 PDSI 指数呈正相关(图 6),其中当年 4—9 月达到显著相关,当年 5 月份的相关系数最高,达到 0.52;与当年 5—7 月 PDSI 指数相关系数为 0.54。

整体油松标准年表与两站春末及夏季的水热因素相关显著,尤其是与当年 5 月气候因子的相关系数最大,这与彭剑峰等^[51] 在神农山地区的研究结果基本一致。从单个气象要素来看整体油松与同是位于龙池堰南侧的西峡站的相关系数较高,例如与西峡站当年 5 气温的相关系数要比栾川站高 0.06—0.22 之间,月降水量的相关系数要比栾川高出 0.11。

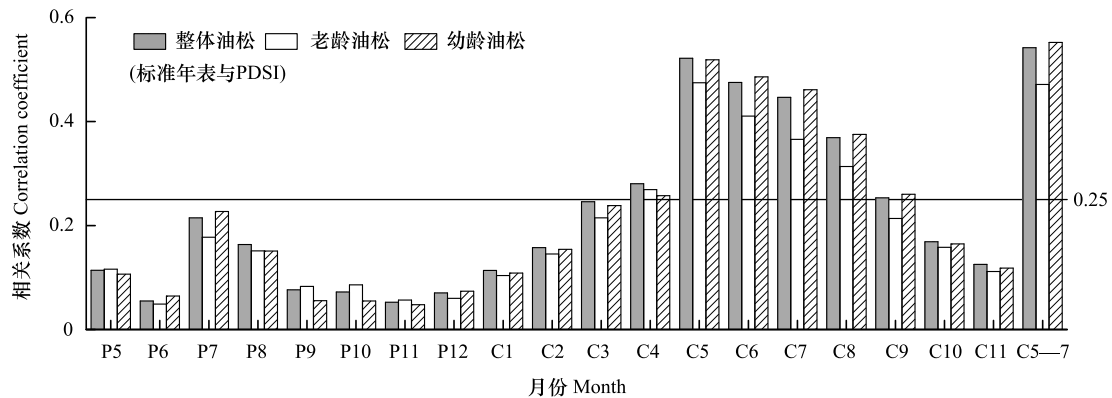


图6 整体组、老龄组和幼龄组油松树轮宽度标准年表与月 PDSI 指数(1961—2016)的相关系数

Fig.6 Correlation between monthly PDSI (1961—2016) and whole tree-ring width chronology of *Pinus tabulaeformis*

横线代表达到显著相关的阈值

2.2.2 不同年龄组油松树轮宽度标准年表与气候要素的相关分析

鉴于整体油松树轮宽度标准年表与西峡站气象因子的相关较高,不同年龄油松径向生长仅与西峡站气候因子做相关分析(图7)。

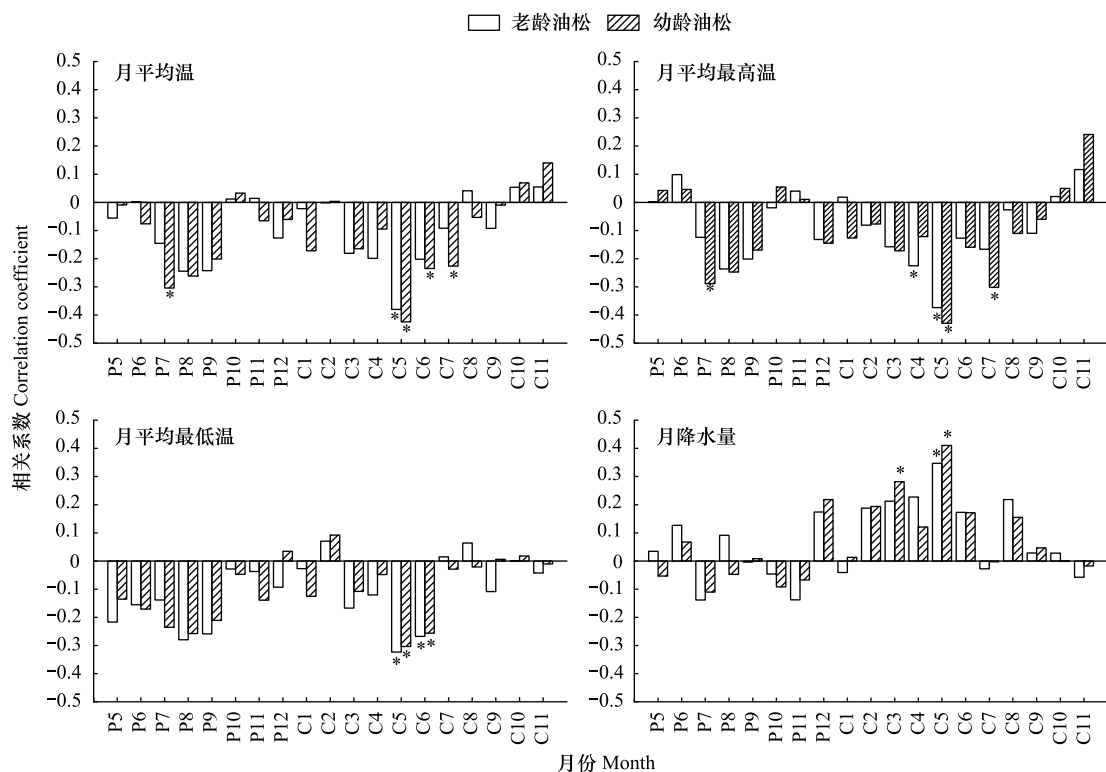


图7 老龄、幼龄油松树轮宽度标准年表与西峡站气候因子的相关分析

Fig.7 Correlations between the old and young *Pinus tabulaeformis* standard chronologies and climatic factors of Xixia station

从相关分析的结果来看,不同年龄组油松与西峡站春末夏初的气温降水相关显著。老龄油松仅与当年5月的平均温显著相关;幼龄油松与上年7月和当年5、6、7月平均温达到显著相关。老龄油松与当年4、5月平均最高温显著相关,幼龄油松与上年7月和当年的5、7月平均最高温显著相关。老龄和幼龄油松均与当年的5、6月平均最低温显著相关。老龄油松与当年5月降水量相关显著,幼龄油松与当年3、5月降水量相关显著。

老龄油松与当年4—8月单月的PDSI指数相关显著(图6),其中与当年5、5—7月的相关系数最高都为0.47以上;幼龄油松与当年4—9月单月的PDSI指数显著相关,其中与当年5月份的相关系数最高为0.52,与当年5—7月的PDSI指数相关系数达到0.55。

总之,老龄、幼龄油松受5月温度和降水影响显著,而幼树限制因子较多,不仅受当年5月的温度和降水影响,还会受到6、7月高、低温和3月降水的影响,PDSI指数的限制作用基本一致,5—7月相关系数最高。

3 讨论

3.1 影响龙池壩油松树轮宽度生长的气候因子

春夏初的水热条件是龙池壩油松的径向生长的限制因素,尤其是5月份,与其他相关显著的月份相比,当年5月的相关系数要高出0.04—0.17。春夏之交的高温对油松径向生长有显著的限制作用,水分充足的条件则有利于油松的生长。与Peng等^[27-28,51]在河南山白云、伏牛山、神农山;田沁花等^[39]在伏牛山的研究及Zhao等^[52]在白云山、龙池壩的研究结果基本一致,然而刘禹等^[38]在石人山(海拔2010m)的研究表明油松生长与当年1—3月、5月平均最低温正相关,与本研究结果有一定的差异,可能是采样点位置的不同。龙池壩位于暖温带大陆性季风气候区,5月份雨季尚未来临,而此时气温虽然能满足油松光合作用的热量需求,但水分条件欠缺导致油松出现明显的干旱胁迫会使细胞气孔关闭,出现“碳饥饿”现象,导致光合速率下降^[53-54]。5月份高温少雨不会使初级生产力(GPP)变大,而夜间温度高,呼吸作用强又加剧能量消耗,导致净初级生产力(NPP)下降^[55]。因此5月的水热条件不仅是龙池壩油松径向生长的限制因子,也是整个豫西山地油松径向生长的限制因子。

本研究中油松树轮宽度标准年表(STD)与气候因子、PDSI相关分析表明,单一的温度、降水量因子对油松的影响不如综合性指标PDSI指数显著,如与当年5月份的气温和降水量相关系数最高分别是-0.42和0.4,而与当年5月的PDSI指数则高达0.52。PDSI指数不仅综合考虑了温度和降水,而且还顾及到前期干旱事件对土壤水分的影响^[56],因此油松径向生长对PDSI的响应最好。与PDSI指数月份组合的相关系数大于单月,其中与当年5—7月PDSI指数为最高为0.55,可以看出明显的气候因子的累积效应明显,这与Zhao等^[52]在伏牛山、Peng等^[27]在白云山的研究结果基本一致。

3.2 油松径向生长对伏牛山两侧气候响应的差异

龙池壩南坡油松径向生长受伏牛山南侧气候影响较大。伏牛山大致呈东西走向,对冬夏季风都有明显的阻挡作用,伏牛山两侧的气候差异显著。栾川与西峡的气候特征相似,主要区别在1月气温。栾川气象站位于伏牛山北侧深受寒冷的冬季风影响,1月份月均温在0℃以下,属于暖温带大陆性季风气候;西峡气象站位于伏牛山南侧,冬季冷空气受到地伏牛山阻挡,1月份均温在0℃以上,属于亚热带季风气候。采样点和西峡站都位于龙池壩的南侧因而相关好,与龙池壩北侧的栾川站的相关稍弱,刘禹等^[57]在秦岭中部利用南、北坡油松树轮温度重建研究也有类似的结果。在今后的研究中要重视坡向因素对油松径向生长的影响。

3.3 不同年龄组油松对气候因子的响应差异

从不同年龄油松的标准年表与西峡站气候因子的相关系数来看,上年7月平均温、平均最高温对幼龄油松呈现出明显的“滞后效应”。刘禹等^[19]在贺兰山油松的研究中也发现气候因子的滞后效应,张芬等^[58]在祁连山东部油松径向生长对气候的响应中表明不同年龄油松对气候因子的响应存在差异,幼龄油松也存在“滞后效应”。幼龄树的根系不发达,幼龄树不能从更广阔、更深的区域获取生长必需的水分,因此幼龄油松对外界环境因子的抵抗力弱^[33,59-60]。

3.4 不同年龄油松1990年以来生长下降的差异

无论老龄油松还是幼龄油松的树轮宽度在近十几年明显出现降低趋势,这里固然有油松年龄的缘故,但气候因子造成的影响也不容忽视^[61]。与老龄油松相比,幼龄油松在20世纪90年代以后的树轮的平均宽度下降迅速、幅度很大(图8),其中1995年和2014年呈现极端窄轮,尤其是2014年年轮宽度值最小。与相应

的前 5 年平均宽度相比,老龄油松在 1995、2014 年树轮宽度分别下降了 16%、50.2%;而幼龄油松在 1995、2014 年树轮宽度分别下降了 26.7%、54.9%,显然不同年龄油松对相同的气候条件树轮宽度下降的幅度存在差异,幼龄油松下降速度远大于老龄油松(图 8)。Lambert 等^[62]在加拿大的树木结合胸径和树高地上生物量方程研究中提到树桩(stump)的生物量可以代表 75%的总生物量,因此龙池漫南坡油松树轮宽度出现不同程度的下降现象是否是生长衰落现象呢?值得进一步研究。

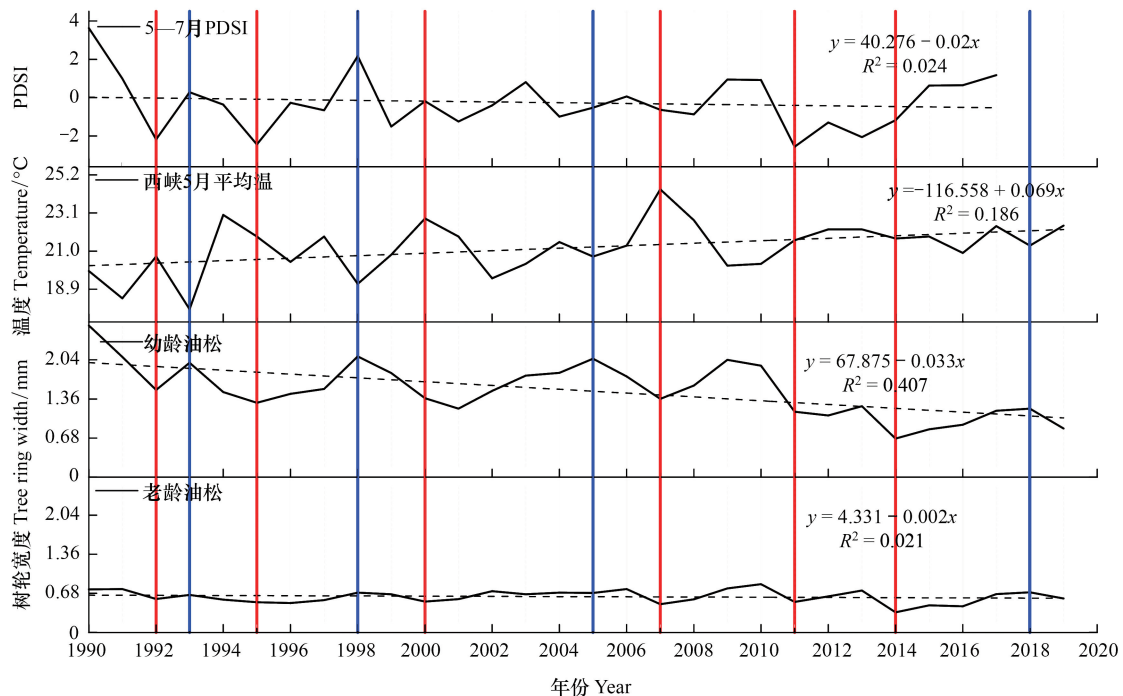


图 8 5—7 月 PDSI 及西峡站 5 月平均温和老龄树、幼龄树树轮的平均宽度变化对比

Fig.8 PDSI of May—July and mean temperature of May of Xixia station and tree-ring width of old and young *Pinus tabulaeformis*

蓝色竖线代表宽轮年,红色竖线代表窄轮年,黑色斜虚线代表要素的趋势

在全球温度变化趋势短期内不变的大背景下^[63],一些报道显示北方针叶林的生长发生改变从而导致分布变化的风险上升^[8-9]。西峡站气象资料显示,20 世纪 90 年代以后 5 月平均温度呈上升趋势(图 8),夏季初期高温不利于龙池漫油松的生长,尤其是低海拔地区,这与 Peng 等^[11]、Shi 等^[37]在伏牛山地区的研究相似,Li 等^[64]用 Maxent 模型对我国杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 分布模拟结果表明其分布的重心有北移的趋势,然而刘禹等^[38]在石人山的研究中提到海拔 2010m 处的油松树轮捕捉到了 20 世纪气候升温的信号且气温上升有利于油松的生长。本研究的采样点海拔较低(1650—1750m),幼龄油松径向生长呈现出与年龄不相符的生长下降,而老龄油松由于年龄因素必然不断衰退,油松的生长量下降甚至死亡数量增加,导致油松的更新能力降低甚至失去更新能力。龙池漫较低海拔地区未来的森林生态因种群改变而降低地区生态稳定性、增加生态失衡的风险。

4 龙池漫油松生长模型

本研究尝试分析(1961—2016 年)整体组、老龄及幼龄油松的标准年表指数(W_{st} 、 W_{ot} 、 W_{yt})与 T_{c5} 、 T_{p7} 、 P_{c3} 、 P_{c5} 、 $PDSI_{c5-c7}$ 等显著因子利用多元线性回归分析方法和步进回归方法,分别建立不同年龄油松的生长模型,以对比两种方法结论的异同。

4.1 油松径向生长多元线性回归模型的建立

基于油松树轮标准年表与西峡站气象因子的相关分析,发现影响龙池漫油松径向生长的主要限制因子为

当年 5 月平均温(T_{c5})、上年 7 月平均温(T_{p7})、当年 3、5 月降水量(P_{c3} 、 P_{c5})。

为了确定所有的显著气象因子与树轮指数间的定量关系,采用多元线性回归的方法,把所有的显著因子 T_{c5} 、 T_{p7} 、 P_{c3} 、 P_{c5} 加入生长模型以探讨它们对龙池垭油松径向生长的影响,整体组、老龄及幼龄油松的多元线性回归生长模型为(1)、(2)、(3)式,它们的统计量(表 2)。

$$W_{zt} = 30105 + 0.002 \times P_{c3} + 0.001 \times P_{c5} - 0.049 \times T_{p7} - 0.046 \times T_{c5} \quad (1)$$

$$W_{ot} = 2.541 + 0.001(P_{c3} + P_{c5}) - 0.031 \times T_{p7} - 0.042 \times T_{c5} \quad (2)$$

$$W_{yt} = 3.516 + 0.002 \times P_{c3} + 0.001 \times P_{c5} - 0.063 \times T_{p7} - 0.047 \times T_{c5} \quad (3)$$

表 2 不同年龄组标准年表与 T_{c5} 、 T_{p7} 、 P_{c3} 、 P_{c5} 的多元线性回归模型的统计量

Table 2 The statistics of multiple linear regression models for different age groups standard chronologies and T_{c5} 、 T_{p7} 、 P_{c3} 、 P_{c5}

	R	R^2	R^2_{adj}	F
整体组 Total	0.572	0.327	0.273	6.081
老龄组 Old-age	0.473	0.223	0.161	3.596
幼龄组 Young-age	0.603	0.363	0.312	7.132

R 为相关系数($P < 0.01$), R^2 , R^2_{adj} 为调整后的 R^2 , F 为方差检验; T_{c5} : 西峡站当年 5 月平均温 The Mean Temperature in May of Current Year; T_{p7} : 西峡站上年 7 月平均温 The Mean Temperature in July of Last Year; P_{c3} : 西峡站当年 3 月降水量 The Mean Precipitation in March of Current Year; P_{c5} : 西峡站当年 5 月降水量 The Mean Precipitation in May of Current Year

4.2 油松径向生长线性步进回归生长模型的建立:

本研究再用步进回归的方法,设定自变量 $F \leq 0.05$ 进入回归模型,若 F 的概率 ≥ 0.1 则剔除变量,确定主导气候因子与树轮指数的定量关系。将所有 T_{c5} 、 T_{p7} 、 P_{c3} 、 P_{c5} 做步进回归逐步剔除最终保留最重要限制因子,整体组、老龄及幼龄油松的步进回归生长模型分别为(4)、(5)、(6),确定不同油松径向生长与最显著气象因子间的定量关系。

$$W_{zt} = 2.313 - 0.064 \times T_{c5} \quad (4)$$

$$W_{ot} = 2.143 - 0.057 \times T_{c5} \quad (5)$$

$$W_{yt} = 2.409 - 0.068 \times T_{c5} \quad (6)$$

不同年龄组标准年表与 T_{c5} 、 T_{p7} 、 P_{c3} 、 P_{c5} 步进回归分析的最终都只保留了当年 5 月平均温,可见 5 月均温是油松的主要限制因子,其相关统计量见表 3。

表 3 不同年龄组标准年表与 T_{c5} 、 T_{p7} 、 P_{c3} 、 P_{c5} 的步进回归模型中 T_{c5} 的相关统计量

Table 3 The statistics of T_{c5} in the stepped regression models of T_{c5} 、 T_{p7} 、 P_{c3} 、 P_{c5} and the standard chronologies of different age groups

	R	R^2	R^2_{adj}	F
整体组 Total	0.419	0.176	0.16	11.286
老龄组 Old-age	0.37	0.137	0.12	8.383
幼龄组 Young-age	0.413	0.171	0.155	10.912

鉴于 PDSI 指数是复合指标,因此将 3 个标准年表单独与当年 5—7 月 PDSI 指数建立线性回归生长模型。不同年龄组标准年表树轮指数与 PDSI_{c5-c7} 指数做线性回归模型的相关统计量见表 4。

$$W_{zt} = 0.968 + 0.067 \times \text{PDSI}_{c5-c7} \quad (7)$$

$$W_{ot} = 0.942 + 0.057 \times \text{PDSI}_{c5-c7} \quad (8)$$

$$W_{yt} = 0.988 + 0.072 \times \text{PDSI}_{c5-c7} \quad (9)$$

通过以上的生长模型可以看出当年 5 月平均温和 5—7 月 PDSI 指数对各年龄组油松生长模型都能保留较高的解释量,尤其是 5—7 月的 PDSI 指数对龙池垭油松径向生长的影响显著,这为今后气候重建打下良好的基础。

不同年龄组油松对气候因子响应分析结果也与生长模型结果一致,都与当年 5 月平均温度及当年 5—

7 月 PDSI 指数具有较高的相关性。

表 4 不同年龄组标准年表与 PDSI_{CS-C7} 指数的线性回归模型的相关统计量

Table 4 The statistics of linear regression models between standard chronologies of different age groups and PDSI_{CS-C7} index

	<i>R</i>	<i>R</i> ²	<i>R</i> _{adj} ²	<i>F</i>
整体组 Total	0.536	0.288	0.275	21.812
老龄组 Old-age	0.452	0.204	0.189	13.849
幼龄组 Young-age	0.545	0.297	0.284	22.82

5 结论

树轮 STD 年表的信噪比(SNR)、样本总解释量(EPS)以及敏感度(MS)值都较高,表明龙池漫南坡油松树轮包含较丰富的环境信息,适合进行树轮与气候因子关系研究。相关分析发现龙池漫较低海拔地区油松径向生长的主要限制因子是当年 5 月水热因子和 5—7 月 PDSI 指数,并且与龙池漫南坡气候因子的关系比北坡密切。

不同龄级的油松对气象因子的响应存在差异,幼龄油松的径向生长受环境因素的影响较老龄油松强烈;幼龄油松与气候因子的相关系数较大且达到显著的月份多;幼龄油松的径向生长不仅受当年夏季高温的制约还受上年夏季高温的影响,呈现明显的滞后效应,幼龄油松出现了与年龄不相符的生长下降现象。

通过对与龙池漫油松径向生长的显著因子和树轮标准年表指数做多元和步进回归分析,建立 3 个年表的生长模型,确定了树轮指数与西峡站的 5 月平均温和 5—7 月 PDSI 指数间的定量关系。在目前全球气候变化趋势下,龙池漫山地低海拔地区将更加不利于幼龄油松的生长,随着老龄油松不断死去,最终会危及油松种群在低海拔地区生态群落中的地位,甚至造成龙池漫山地油松带将向更高海拔迁移,增加该地区生态失衡的风险。

参考文献(References):

- [1] Charney N D, Babst F, Poulter B, Record S, Trouet V M, Frank D, Enquist B J, Evans M E K. Observed forest sensitivity to climate implies large changes in 21st century North American forest growth. *Ecology Letters*, 2016, 19(9): 1119-1128.
- [2] 游桂莹, 张志渊, 张仁铎. 全球陆地生态系统光合作用与呼吸作用的温度敏感性. *生态学报*, 2018, 38(23): 8392-8399.
- [3] Luo Y, Chen H Y H, McIntire E J B, Andison D W. Divergent temporal trends of net biomass change in western Canadian boreal forests. *Journal of Ecology*, 2019, 107(1): 69-78.
- [4] 李娜妮, 何念鹏, 于贵瑞. 中国东北典型森林生态系统植物叶片的非结构性碳水化合物研究. *生态学报*, 2016, 36(02): 430-438.
- [5] Seidl, Honkaniemi J, Aakala T, Aleinikov A, Senf C. Globally consistent climate sensitivity of natural disturbances across boreal and temperate forest ecosystems. *Ecography*, 2020, 43(7): 967-978.
- [6] Lyu L, Zhang Q B, Pellatt M G, Büntgen U, Li M H, Cherubini P. Drought limitation on tree growth at the Northern Hemisphere's highest tree line. *Dendrochronologia*, 2019, 53: 40-47.
- [7] Babst F, Bouriaud O, Poulter B, Trouet V, Girardin M P, Frank D C. Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaat4313.
- [8] Case M J, Lawler J J, Tomasevic J A. Relative sensitivity to climate change of species in northwestern North America. *Biological Conservation*, 2015, 187: 127-133.
- [9] Sulla-Menashe D, Woodcock C E, Friedl M A. Canadian boreal forest greening and browning trends: an analysis of biogeographic patterns and the relative roles of disturbance versus climate drivers. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(1): 014007.
- [10] Flurin B, Paul B, Noah C, Friend A D, Girardin M P, Stefan K, Moore D, Kristina S, Jesper B, Olivier B. When tree rings go global: Challenges and opportunities for retro- and prospective insight. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 197: 1-20.
- [11] 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.
- [12] Wang F, Arseneault D, Pan B, Liao Q, Sugiyama J. Pre-1930 unstable relationship between climate and tree-ring width of *Pinus taiwanensis*

- Hayata in southeastern China. *Dendrochronologia*, 2019, 57: 125629.
- [13] 勾晓华, 杨梅学, 彭剑峰, 张永, 陈拓, 侯宗东. 树轮记录的阿尼玛卿山区过去 830 年夏半年最高温变化. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 991-998.
- [14] 王亚军, 李明启. 中国利用树轮资料重建干湿变化研究进展. *地理科学进展*, 2016, 35(11): 1397-1410.
- [15] He M H, Yang B, Datsenko N M. A six hundred-year annual minimum temperature history for the central Tibetan Plateau derived from tree-ring width series. *Climate Dynamics*, 2014, 43(3-4): 641-655.
- [16] Wang J L, Yang B, Qin C, Kang S Y, He M H, Wang Z Y. Tree-ring inferred annual mean temperature variations on the southeastern Tibetan Plateau during the last millennium and their relationships with the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Climate Dynamics*, 2014, 43(3-4): 627-640.
- [17] Li J X, Song F B, Jin Y T, Yun R, Chen Z J, Lyu Z Y, Zhao Y, Cui D. Critical temperatures controlling the phenology and radial growth of *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* on the southern margin of a cold temperate coniferous forest. *Ecological Indicators*, 2021, 126(2): 107674-107686.
- [18] Fang, KY, Chen D, Gou, X H, D'Arrigo, Davi N. Influence of non-climatic factors on the relationships between tree growth and climate over the Chinese Loess Plateau. *Global and Planetary Change*, 2015, 132(9): 54-63.
- [19] 刘禹. Reconstruction of May-July precipitation in the north Helan Mountain, Inner Mongolia since A.D. 1726 from tree-ring late-wood widths. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(4): 405-409.
- [20] 张永香, 勾晓华, 胡文东, 彭剑峰, 刘普幸. 树轮记录的贺兰山区近百年来的干旱事件. *生态学报*, 2005(08): 2121-2126.
- [21] Cai Q F, Liu Y, Qian H J, Liu R S. Inverse effects of recent warming on trees growing at the low and high altitudes of the Dabie Mountains, subtropical China. *Dendrochronologia*, 2020, 59: 125649.
- [22] Duan J P, Zhang Q B, Lv L X, Zhang C. Regional-scale winter-spring temperature variability and chilling damage dynamics over the past two centuries in southeastern China. *Climate Dynamics*, 2012, 39(3-4): 919-928.
- [23] 甘展峰, 周非飞, 董志鹏, 李颖俊, 张雨, 方克艳. 福建长汀福建柏径向生长对气候变化的响应. *亚热带资源与环境学报*, 2017, 12(1): 13-18.
- [24] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 喻树龙, 张同文. 福建沙县马尾松树轮宽度与夏季亚洲-太平洋涛动指数的关系. *第四纪研究*, 2011, 31(01): 96-103.
- [25] 张芳芳, 郑永宏, 潘国艳, 袁帅, 孔繁希, 起永东, 王丹. 神农架地区树轮 $\delta^{18}O$ 序列的气候指示意义. *地理科学进展*, 2018, 37(7): 946-953.
- [26] 张晓东, 朱文博, 张静静, 朱连奇, 赵芳, 崔耀平. 伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应. *地理学报*, 2018, 73(001): 41-53.
- [27] 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.
- [28] Peng J F, Li J B, Wang T, Huo J X, Yang L. Effect of altitude on climate-growth relationships of Chinese white pine (*Pinus armandii*) in the northern Funiu Mountain, central China. *Climatic Change*, 2019, 154(1-2): 273-288.
- [29] Peng K Y, Peng J F, Huo J X, Yang L. Assessing the adaptability of alien (*Larix kaempferi*) and native (*Pinus armandii*) tree species at the Baiyunshan Mountain, central China. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 108-116.
- [30] 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(04): 831-836.
- [31] Li X X, Liang E Y, Gricar J, Prislan P, Rossi S, Cufar K. Age dependence of xylogenesis and its climatic sensitivity in Smith fir on the southeastern Tibetan Plateau. *Tree Physiology*, 2013, 33(1): 48-56.
- [32] 刘立斌, 许海洋, 郭银明, 梁辉, 芦晓明, 张慧, 梁尔源, 倪健. 基于树木年轮定量重建过去 50 年贵州典型森林优势树种的地上生物量与生产力变化. *生态学报*, 2020, 40(10): 3441-3451.
- [33] Kannenberg S A, Novick K A, Alexander M R, Maxwell J T, Moore D J P, Phillips R P, Anderegg W R L. Linking drought legacy effects across scales: From leaves to tree rings to ecosystems. *Global Change Biology*, 2019, 25(9): 2978-2992.
- [34] 张兴航, 张百平, 王晶, 余付勤, 赵超, 姚永慧. 中国南北过渡带东段样带植被序列与气候分界问题. *地理学报*, 2021, 76(01): 30-43.
- [35] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题. *地理科学进展*, 2019, 38(03): 305-311.
- [36] 徐化成, 孙肇凤, 郭广荣, 冯林. 油松天然林的地理分布和种源区的划分. *林业科学*, 1981, 17(3): 258-270.
- [37] Shi J F, Li J B, Cook E R, 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(2): 157-167.
- [38] 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(英文). *地球环境学报*, 2015, 6(06): 393-406.
- [39] 田沁花, 刘禹, 蔡秋芳, 包光, 王伟平, 薛文亮, 朱文杰, 宋慧明, 雷莺. 油松树轮记录的过去 134 年伏牛山 5-7 月平均最高温度. *地理学报*, 2009, 64(07): 879-887.

- [40] Zhang L N, Yuan J, Zhao S D, Zhang W T. Age and Climate Sensitivity of Radial Growth of *Picea crassifolia* to Climate in a Transitional Climatic Zone in Northwest China. *Polish Journal of Ecology*, 2018, 66(2): 114-125.
- [41] Schuster R, Oberhuber W. Age-dependent climate-growth relationships and regeneration of *Picea abies* in a drought-prone mixed-coniferous forest in the Alps. *Canadian Journal of Forest Research*, 2013, 7(43): 609-618.
- [42] Sun J Y, Liu Y. Age-independent climate-growth response of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carriere) in North China. *Trees-Structure and Function*, 2015, 2(29): 397-406.
- [43] Rozas V, Desoto L, Olano J M. Sex-specific, age-dependent sensitivity of tree-ring growth to climate in the dioecious tree *Juniperus thurifera*. *New Phytologist*, 2010, 182(3): 687-697.
- [44] Primicia I, Camarero J J, Jandan P, Cada V, Morrissey R C, Trotsiuk V, Bace R, Teodosiu M, Svoboda M. Age, competition, disturbance and elevation effects on tree and stand growth response of primary *Picea abies* forest to climate. *Forest Ecology and Management*, 2015, 354: 77-86.
- [45] 叶永忠, 杨清培, 翁梅, 范国强. 伏牛山森林群落物种多样性研究 I. 群落垂直分布与物种丰富度. *河南科学*, 1999, 17(6): 61-64.
- [46] Holmes R L. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78.
- [47] Cook E, Holmes R. Users manual for program AR-STAN. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1986, 302.
- [48] 李雪, 黄选瑞, 张先亮. 不同去趋势方法对树轮气候信号识别的影响. *生态学报*, 2021, 41(05): 1970-1978.
- [49] 彭小梅, 肖生春, 肖洪浪. 树木年轮轮宽年表建立方法研究进展. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 857-865.
- [50] Biondi F. Are Climate-Tree Growth Relationships Changing in North-Central Idaho, U.S.A.? *Arch Antarc Alp Res*, 2000, 32(2): 111-116.
- [51] 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.
- [52] Zhao Y S, Shi J F, Shi S Y, Ma X Q, Zhang W J, Wang B W, Sun X G, Lu H Y, Braeuning A. Early summer hydroclimatic signals are captured well by tree-ring earlywood width in the eastern Qinling Mountains, central China. *Climate of the Past*, 2019, 15(3): 1113-1131.
- [53] Taiz L, Zeiger E. *Plant Physiology*. 5th ed. Sunderland, Massachusetts U.S.A.: Sinauer Associates Inc., 2010.
- [54] Pallardy S G. *Physiology of Woody Plants*. 3rd ed. Boston: Elsevier, 2008.
- [55] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. 2nd ed. New York: Springer, 2011.
- [56] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [57] Liu Y, Linderholm H W, Song H M, Cai Q F, Tian Q H, Sun J Y, Chen D L, Simelton E, Seftigen K, Tian H, Wang R Y Bao G, An Z S. Temperature variations recorded in *Pinus tabulaeformis* tree rings from the southern and northern slopes of the central Qinling Mountains, central China. *Boreas*, 2010, 38(38): 285-291.
- [58] 张芬, 勾晓华, 苏军德, 高琳琳, 刘文火, 满自红. 祁连山东部不同树龄油松径向生长对气候的响应. *冰川冻土*, 2011, 33(03): 634-639.
- [59] Liu X S, Nie Y Q, Wen F. Seasonal Dynamics of Stem Radial Increment of *Pinus taiwanensis* Hayata and Its Response to Environmental Factors in the Lushan Mountains, Southeastern China. *Forests*, 2018, 9(7): 387-405.
- [60] Castagneri D, Battipaglia G, von Arx G, Pacheco A, Carrer M. Tree-ring anatomy and carbon isotope ratio show both direct and legacy effects of climate on bimodal xylem formation in *Pinus pinea*. *Tree Physiology*, 2018, 38(8): 1098-1109.
- [61] Anderegg W R L, Schwalm C, Biondi F, Camarero J J, Koch G, Litvak M, Ogle K, Shaw J D, Shevliakova E, Williams A P, Wolf A, Ziaco E, Pacala S. Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models. *Science*, 2015, 349: 528-532.
- [62] Lambert M C, Ung C H, Raulier F. Canadian national tree aboveground biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(8): 1996-2018.
- [63] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [64] Li Y C, Li M Y, Li C, Liu Z Z. Optimized Maxent Model Predictions of Climate Change Impacts on the Suitable Distribution of *Cunninghamia lanceolata* in China. *Forests*, 2020, 11(3): 1-25.