

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170161

秦岭不同年龄太白红杉径向生长对气候因子的响应

闫伯前¹ 林万众¹ 刘琪璟² 于 健^{2,3}

(1 北京农学院植物科学技术学院 2 北京林业大学林学院 3 江苏农林职业技术学院)

摘要: 秦岭地区是我国最为典型的太白红杉温带针叶林分布区,也是受全球气候变化影响最为显著的地区之一。已有的研究已经显示树木的生理特征会随着树木年龄发生变化,这可能会造成与树木生长有关的气候信号随时间改变。为探索该区不同年龄太白红杉树木径向生长对气候变化的响应差异,本研究运用树木年轮气候学传统方法,研究了不同年龄太白红杉年表特征及其与气候因子的关系,以期揭示年龄因素对年表的潜在影响。结果表明:1)不同年龄太白红杉径向生长对气候因子的响应存在差异,老龄组太白红杉年表较中、低龄组年表对气候因子的响应更加敏感,更适合用于年轮气候学研究;2)响应函数分析表明,老龄组太白红杉年表对生长季早期和春季温度以及春季降水更加敏感,而幼龄组太白红杉年表与各月气候变量均未表现出显著相关关系。综上所述,太白红杉年轮宽度与气候变化的响应模式受年龄因素影响,高龄年轮年表对气候响应的敏感性更高,包含更多的气候信息。该研究结果为全球变暖背景下秦岭高山林线太白红杉林的合理经营管理及该区域气候重建提供了一定的基础数据。

关键词: 秦岭; 太白红杉; 径向生长; 气候变化; 年龄

中图分类号: S718.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2017)09-0058-08

YAN Bo-qian¹; LIN Wan-zhong¹; LIU Qi-jing²; YU Jian^{2,3}. **Age-dependent radial growth responses of *Larix chinensis* to climatic factors in Qinling Mountains, northwestern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2017)**39**(9) 58-65 [Ch, 46 ref.]

1 College of Plant Science and Technology, Beijing University of Agriculture, Beijing, 110016, P. R. China;

2 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;

3 Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Zhenjiang, Jiangsu, 212400, P. R. China.

Qinling Mountains, located in northwestern China, is the most typical distribution area of temperate coniferous forests, and is also one of the most significant areas affected by global climate change. Several studies have demonstrated that tree physiological characteristics undergoes changes with age. This may cause growth-related climate signals to vary over time. To explore this age-dependent effect, in this study, we tested the consistency of climate-growth responses in tree-ring series from *L. chinensis* trees of different age classes in relation near the alpine timberline in Qinling Mountains, a total of 240 tree-ring cores were sampled in the Aoshan, second peak of Qinling Mountains. In the concentrated distribution area of the upper limit, *L. chinensis* was grouped into three age classes: trees younger than 40 years (young age class, YAC), trees of 41 – 80 years of age (middle age class, MAC) and trees older than 81 years (old age class, OAC). Residual chronologies of the three age classes were built to analyze the climate-growth relationships using correlation and response functions. The results were as follows: 1) differing among the three age classes, the chronology of old age class was more sensitive to climate change than the others, which was suitable for dendroclimatological analysis. 2) Response function analyses indicated that early growing season, early spring temperature and spring precipitation were the principal

收稿日期: 2017-05-03 修回日期: 2017-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370587)、江苏农林职业技术学院科技项目(110751168)。

第一作者: 闫伯前,博士,讲师。主要研究方向:植物遗传学。Email:yanboq@sohu.com 地址:110016 北京市昌平区回龙观北朱辛庄北农路7号北京农学院植物科学技术学院。

责任作者: 于健,博士,讲师。主要研究方向:年轮气候学。Email: yujian1986829@sina.com 地址:100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学林学院。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

factors limiting its growth in the old age classes. However, there was no significant correlation between young age classes and all climate variables. Overall, the effects of age on the response of tree-ring width of *L. chinensis* to climate change, and the results of this study confirmed that the climate signal was maximized in older trees. Our study provides some basic data for the rational management of *L. chinensis* forest in relation near the alpine timberline in Qinling Mountains and the climate reconstruction in the region.

Key words Qinling Mountains; *Larix chinensis*; radial growth; climate change; age

工业革命以来,CO₂的大量排放导致全球气候变暖不断加剧,致使地球遭受严重危害^[1]。气候变化对中国水资源、农业和森林都产生了巨大影响^[2-3]。尽管森林可以通过碳固定减缓全球气候变暖,但森林在全球气候变暖下仍将面临巨大压力^[3]。生长在北半球中纬度地区的树木生长能够揭示树木碳固定显著的年际变化,这种变化被广泛归因于气候变化,尤其是近期全球气候变暖和干旱胁迫^[4]。气候变暖造成的干旱胁迫是导致半干旱地区树木死亡的最大驱动因素,同时气候变暖也不可避免地对区域和全球森林生产力和碳固定等造成极大影响^[5]。目前,一些北半球森林地区正遭受着相当频繁和严重的干旱压力,未来全球气候变暖将进一步加剧干旱胁迫^[6]。这意味着分布在北方高纬度地区的森林生态系统更易受气候变化的影响。因此,探讨树木径向生长对气候变化的响应对准确预报未来气候变暖对北方森林的影响至关重要。

秦岭是横亘于中国中部地区的一条东西走向的山脉,是青藏高原以东的最高峰,西起甘肃省境内,东至河南省西部,主体位于陕西省南部与四川省北部交界处,全长约为1 500 km。秦岭不仅被认为是亚热带和暖温带的重要分界线,同时也是长江和黄河的重要分水岭。由于其独特的地理位置使得秦岭山脉南北坡气候差异明显,南坡温暖湿润,北坡寒冷干旱,秦岭以北地区较其以南地区环境暖干化趋势更加明显^[7]。因此,秦岭也被认为是中国气候变化最敏感区域之一^[8-9]。太白红杉(*Larix chinensis*)亦称太白落叶松,为中国特有树种,属于国家二级保护珍稀植物,是秦岭山区唯一生存的落叶松属植物,广泛分布于秦岭高山和亚高山地带,其中尤以在太白山分布最为广泛,分布海拔为2 800~3 500 m^[10-11]。由于该区域仍处于原始状态,受人类活动影响较少,是评估树木生长对气候变化响应的理想地区之一^[12-13]。然而,目前秦岭植被破坏严重,气候不断向暖干化趋势发展^[11]。因此,探讨秦岭地区太白红杉径向生长对气候变化的响应,对了解全球气候变化背景下北半球高纬度森林的响应,尤其是秦岭地区高山林线的动态变化具有重要意义。

基于定年准确、分辨率高、样本分布广泛、易于获取、时间序列长并记录了树木生长丰富的信息等特点,树木年轮近些年已被广泛应用于评估树木生长与气候变化关系^[12,14]以及古气候重建^[15-16]。太白红杉年轮界限非常清晰,近些年已成为年轮气候学研究的主要树种之一^[17-18]。尽管太白红杉年轮气候学研究已经取得了一些成果,但以往研究多基于不同海拔^[19]、不同坡向^[18]以及气候重建^[16,20]等方面开展研究,很少涉及与年龄有关的气候敏感性差异的研究。目前,关于去除生理趋势后年表是否仍受到年龄因素的影响以及不同年龄对气候因子的响应是否一致等方面仍然面临较大争议。多数研究表明树木生理特征会随年龄的变化而变化,这也许会造成与树木有关的气候信号随时间改变^[21-22]。例如,Wu等^[23]对天山不同年龄雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)年轮生长对气候响应进行研究,发现年龄较小的树木气候敏感性更高。赵志江等^[24]研究了川西亚高山不同年龄紫果云杉(*Picea purpurea*)径向生长与气候因子的关系,得出幼龄组云杉包含的气候信息要优于中龄组和老龄组云杉。Carrer等^[22]探讨了不同龄级欧洲落叶松(*Larix decidua*)和瑞士石松(*Pinus cembra*)树木生长对气候变化的响应,结果显示年龄越大的树木具有更大的气候信号。王晓明等^[25]对长白山北坡不同年龄红松(*Pinus koraiensis*)年表及其对气候的响应进行研究,发现高龄年表对气候响应的敏感性更高,包含有更多的气候信息。Wang等^[26]研究得出中国东北部兴安落叶松(*Larix gmelinii*)年龄 ≥ 150 年和 < 150 年对气候的响应不同。然而,有部分研究结论表明年龄因素不会显著影响年轮年表气候信号,例如:Colenutt等^[27]研究指出加拿大高山落叶松(*Larix lyallii*)高龄和低龄年表对气候响应模式基本一致;Esper等^[28]也发现不同龄级瑞士石松年轮宽度的气候信号没有明显变化。基于上述争议,为了进一步验证年龄因素对树木径向生长对气候变化的响应是否存在影响,本研究以秦岭地区重要保护树种太白红杉为研究对象,利用传统年轮气候学方法,探讨不同年龄太白红杉年表对气候变化响应的异同,以期揭示

全球气候变化背景下该地区高山林线太白红杉群落的动态变化,并为未来重建该区域气候变化提供一定的基础数据。

1 研究区域概况

秦岭有狭义和广义之分,狭义上的秦岭位于北纬 32°~34°之间,介于关中平原和南面的汉江谷地之间,是嘉陵江、洛河、渭河、汉江 4 条河流的分水岭,东西绵延 400~500 km,南北宽达 100~150 km;广义上的秦岭是横贯中国中部的东西走向山脉。广义的秦岭也是长江和黄河流域的分水岭。秦岭以南属亚热带气候,以北属暖温带气候。由于秦岭南北的温度、气候、地形均呈现差异性变化,因此秦岭—淮河一线成为了中国地理上最重要的南北分界线^[7]。秦岭山脉最高峰为太白山,制高点拔仙台海拔达 3 767.2 m,也是青藏高原以东第一高峰。鳌山属于秦岭的主脉,古称垂山、武功山,中隔跑马梁与拔仙台东西遥遥相望,又称西太白,海拔 3 476.0 m,为太白境内第二高峰。该区气候特征为受季风影响的温带大陆性季风气候,夏季温暖湿润,冬季寒冷干旱,温度与降水四季变化明显。秦岭地区雨热同期,降水导致的干湿季节差异明显。年平均温度 13.16℃,1 月份最冷(0.02℃),7 月份最热(25.60℃),多年平均降水量为 658.7 mm,降水量主要集中在 7—9 月,约占全年降水量的 52% 以上。太白山具有明显的植被垂直更替,代表了中国西北主要森林类型。随海拔升高,南坡植被依次为栓皮栎(*Quercus variabilis*)林(750~1 300 m)、针阔混交林(1 300~2 300 m)、桦木(*Betula* spp.)林(2 300~2 650 m)、针叶林(2 650~3 400 m)和亚高山草甸(大于 3 400 m)^[11]。

2 材料与方法

2.1 样本采集

2014 年 7 月,在秦岭鳌山北坡跑马梁附近选择人为干扰较少且群落结构完整的太白红杉森林上限分别设置 3 个 30 m(水平方向)×100 m(坡向方向)的临时样地进行调查。该区域气候类型为暖温带气候。样地内群落林下灌木主要为高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum*)。林下草本植物主要包括羊须草(*Carex callitrichos*)、结状飘拂草(*Fimbristylis rigidula*)、秦岭党参(*Codonopsis tsinlingensis*)、黑蕊虎耳草(*Saxifraga melanocentra*)、太白山葱(*Allium prattii*)、掌叶大黄(*Rheum Palmatum*)、小丛红景天(*Rhodiola dumulosa*)和野棉花(*Anemone vitifolia*)等。

按照树木年代学方法,对 3 个样地内太白红杉年轮样芯进行全样地钻取,同时在样地外也钻取了一些太白红杉年轮样芯作为补充。钻取方式为利用生长锥在树木胸径位置钻取完整年轮样芯(尽可能保证通过髓芯),钻取方向为平行山坡等高线。为减少对树木的损害,每株树仅钻取一根年轮样芯。将取到的样芯装入自制纸筒内,记录取样时间、树木的胸径、树皮厚度及生长状况等信息。共钻取 240 根太白红杉年轮样芯。

2.2 年表建立

将采集的样芯带回实验室,用白乳胶将样芯粘贴在特制的木槽上,取一根木槽将其背面压在样芯上面,用细绳将 2 根木槽扎紧固定以防样芯翘起。放置 24 h 待胶干燥后将细绳拆下,并经 300、600 目的砂纸逐级打磨,直到年轮界限在显微镜下清晰可见。在双筒显微镜下用骨架图法进行目视交叉定年。利用 LINTAB[™] 6.0(精度为 0.01 mm)测量年轮宽度。对已测量年轮宽度并且接近髓心的年轮样芯通过 Rozasd 的方法^[29]判断年龄,最终得到每根样芯树木胸高处的年龄。参照林业上对主要树种龄级和龄组的划分标准,对不同树龄太白红杉年轮样芯进行分组,具体分为:幼龄组(Young Age Classes, YAC),小于 40 年的样芯;中龄组(Middle Age Classes, MAC),年龄为 41~80 年的样芯;老龄组(Old Age Classes, OAC),大于 81 年的样芯。

分组完成后,运用 COFECHA 程序^[30]分别对各年龄组的太白红杉年轮序列的定年和测量结果进行检验,剔除树龄较短且与主序列相关性差难以交叉定年的样芯,将保留的样芯用于年表建立。幼龄组、中龄组和老龄组交叉定年成功的样芯数量分别为 55、53 和 85 根。然后,运用 ARSTAN 程序^[31]建立年表。经反复研究尝试,最终以 2/3 的年龄作为步长的样条函数法去除树木本身的遗传因子和干扰竞争产生的生长趋势(简称去趋势),并对去趋势的序列以双重平均法合成标准年表(STD);以时间序列的自回归模型对去趋势的序列再次标准化,以双权重平均法将差值序列合成差值年表(RES)(图 1)。本研究选用统计特征值更高,年表质量更好且仅包含高频变化的差值年表用于年轮气候学分析。

2.3 气候资料与统计分析

选取距离采样点最近的宝鸡气象站(图 2,地理位置:34°21'N, 127°08'E;海拔:612.4 m),记录时间长度为 1959—2004 年,该站距离采样点的水平距离为 55.67 km。气象要素包含月平均温度(T_m)、月平均最高温度(T_{max})、月平均最低温度(T_{min})和月总降水量(P_m)。气候资料由中国气象科学数据共享

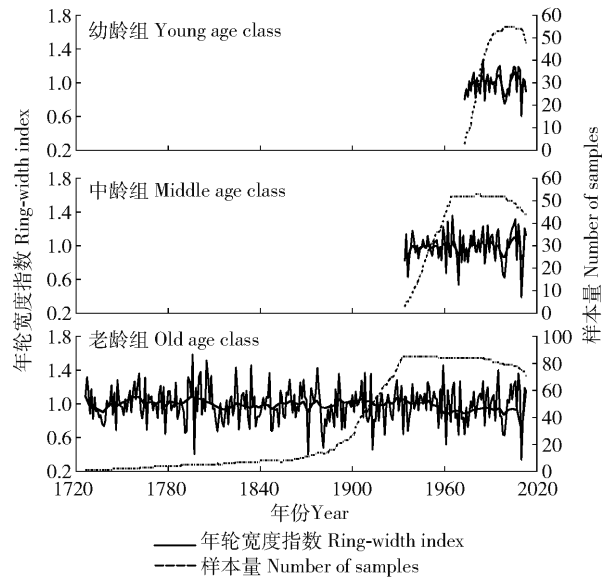


图1 秦岭不同年龄太白红杉差值年表

Fig.1 Residual chronology of *Larix chinensis* at different age classes

网提供 (<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。采用 Mann-Kendall 方法^[32] 和 Double-mass 方法^[33] 对宝鸡气象站气候资料进行均一性检验。结果表明,该站气候数据变化相对均一,可用于代表气候的基本特征。本研究通过计算不同年龄太白红杉年表的统计特征值来评估年表的可靠性。对不同龄组太白红杉年轮年表与逐月气候因子分别进行响应函数分析,获得不同龄组太白红杉年轮年表与气候因子之间的关系。由于3个龄组太白红杉树龄存在较大差异,为了更好地比较不同龄组树木生长对气候的影响差异,本研究以幼龄组树木的时间跨度(1974—2004年)作为响应分析区间。由于树木生长对气候变化的响应存在“滞后效应”,即树木的生长受上年和当年气候条件的共同影响。因此,选取上年5月到当年9月共17个月的气候指标进行分析。响应函数分析由 DendroClim 2002 程序实现,通过1 000次 bootstrap 抽样过程计算相关系数,在0.05水平下

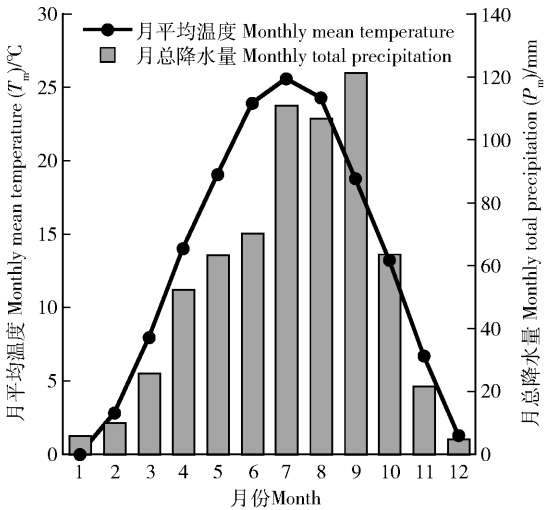


图2 研究区域温度和降水量的月值变化

Fig.2 Monthly changes of air temperature and precipitation in the study area

检验相关显著性^[34]。

3 结果与分析

3.1 年表的统计特征

不同龄组太白红杉差值年表的统计参数如表1所示,老龄组太白红杉差值年表时间跨度最长,超过288年(1726—2013年),而有效年表公共区间长度为129年(1914—2013年)。中龄组年表时间跨度为99年(1915—2013年),公共区间为63年(1951—2013年)。幼龄组年表时间跨度最短,年表时间跨度仅为49年(1965—2013年)。3个龄组差值年表的标准差介于0.17~0.22之间,平均敏感度介于0.19~0.24之间,树木间相关系数为0.34~0.43,信噪比介于21.25~47.55之间,第1主成分解释量为40.9~57.3%,样本总体代表性高达0.95~0.98,均超过了样本总体代表性(EPS)可以接受的临界阈值为0.85^[35]。一般认为,高质量的年表一般具有标准差大、平均敏感度大、信噪比大和样本总

表1 年表的统计参数及公共区间分析结果

Tab.1 Statistics of ring-width chronologies and common interval analysis

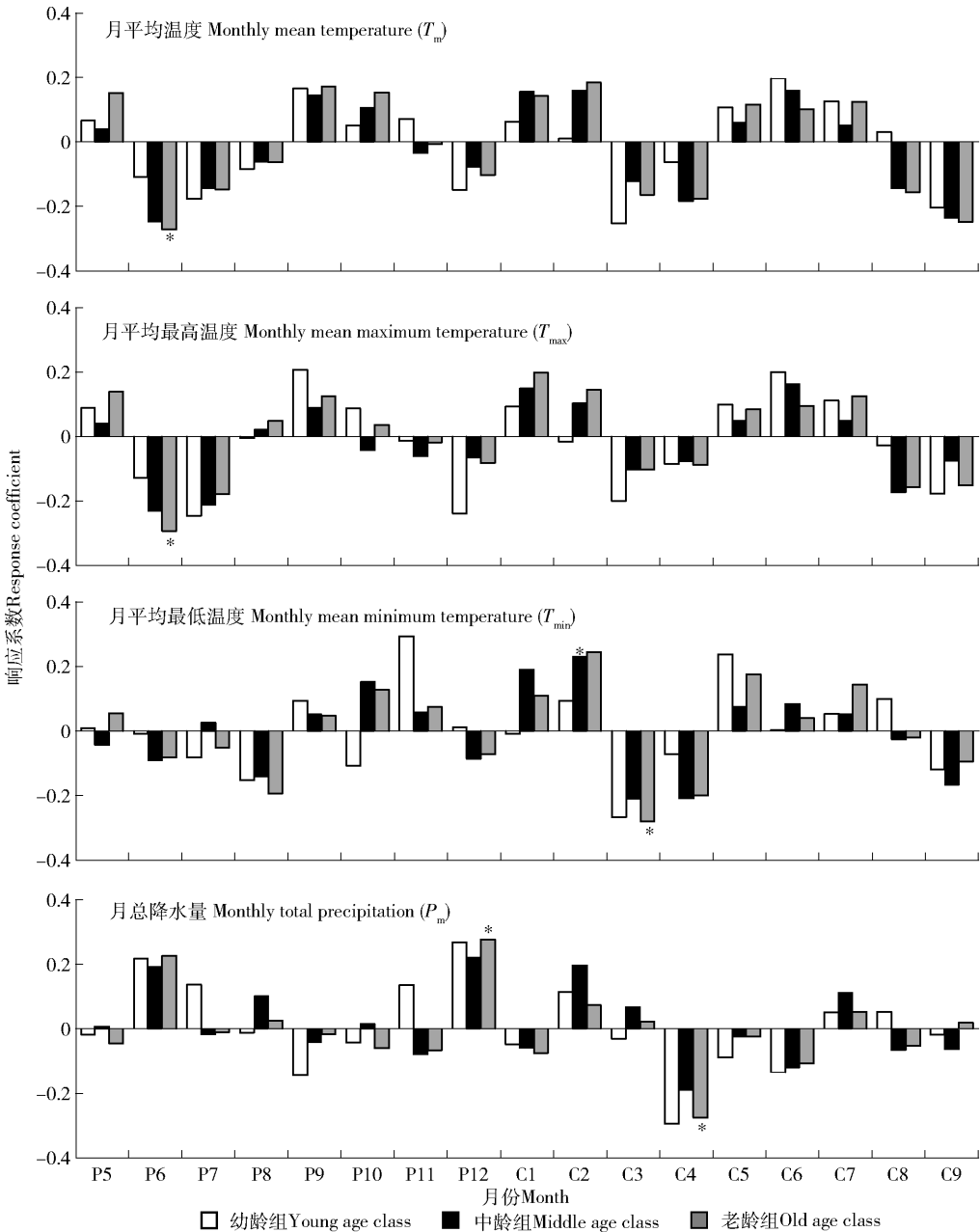
统计特征 Statistic characteristics	幼龄组 Young age class	中龄组 Middle age class	老龄组 Old age class
时间序列 Record period	1965—2013 年 Year 1965—2013	1915—2013 年 Year 1915—2013	1726—2013 年 Year 1726—2013
平均值 Mean index	1.000	0.990	0.994
平均敏感度 Mean sensitivity	0.196	0.213	0.237
标准差 Standard deviation	0.171	0.177	0.212
一阶自相关 First order autocorrelation	0.018	0.023	0.000
树间相关系数 Correlation between trees	0.345	0.431	0.364
信噪比 Signal-to-noise ratio	21.259	47.554	33.114
样本总体代表性 Expressed population signal	0.955	0.979	0.980
第1主成分方差解释量 Variation in first eigenvector/%	40.9	47.3	43.3

体代表性高等特点^[36]。综上表明,本研究建立的不同龄组太白红杉差值年表对气候变化均具有一定的敏感性,并且老龄组太白红杉年表在多项统计特征值上都明显优于其他 2 个龄组年表的统计特征值,表明老龄组太白红杉较中、幼龄组太白红杉对气候变化更加敏感,更适于进行年轮气候学分析。

3.2 年轮指数与气候因子的关系

响应函数分析结果(图 3)表明:老龄组太白红

杉径向生长与上年 6 月平均温度和最高温度呈显著负相关,与上年 6 月最低温度也呈负相关,但未达到显著水平,与当年 3 月最低温度呈显著负相关;与当年 12 月降水量呈显著正相关,与当年 4 月降水量呈显著负相关。中龄组太白红杉年轮宽度负响应于上年 6 月平均温度、最高温度和最低温度,正响应于当年 2 月最低温度,与各月降水量均未达到显著相关水平;幼龄组太白红杉生长与各月温度和降水量均未达到显著相关水平。



* 表示达到 95% 的显著水平。P5,P6,⋯,P12 代表上年 5,6,⋯,12 月份;C1,C2,⋯,C9 代表当年 1,2,⋯,9 月份。* means significant level at $P < 0.05$ level; P5,P6,⋯,P12 represent May, June,⋯, December of previous year; C1,C2,⋯,C9 represent January, February,⋯, September of current year.

图 3 不同年龄太白红杉差值年表与气候因子的响应分析

Fig.3 Response function analysis of residual chronology of *L. chinensis* in relation to monthly climatic factors in different age classes

4 讨论与结论

4.1 不同龄组年表统计特征比较

以往研究表明,树木的生理特征会随年龄变化而变化^[22]。基于不同龄级太白红杉差值年表统计特征值对比可知(表1),太白红杉差值年表包含了较多的气候信号,对气候变化反映较为敏感,可适用于进行年轮气候学研究,这与前人对太白红杉的研究结论一致^[18-20]。Sun等^[17]对中国落叶松属树木生长与气候变化的关系进行研究,也发现落叶松属植物对气候变化响应敏感。由表1可知,年表统计量随年龄存在明显变化,具体表现为:太白红杉差值年表各项统计特征值随年龄的增加而增加,这与前人对不同年龄欧洲落叶松和瑞士石松的研究结果存在差异^[22]。但是,相反的研究结果也被报道于欧洲阿尔卑斯山中部的瑞士石松^[28]、天山的雪岭云杉^[23]和川西亚高山的紫果云杉^[24]。以上这些研究结果均显示出年表统计特征值幼龄组年表高于老龄组。这种年龄因素导致树木生长和气候变化响应关系差异的原因主要归因于树种综合基因特征、站点小气候不同和去趋势方法的差异^[23,26]。以上研究可以明显反映老龄组太白红杉较中、幼龄组太白红杉对气候变化更加敏感,包含更多的气候信息,这与前人对不同龄级红松^[25]、兴安落叶松^[26]和欧洲落叶松和瑞士石松^[22]等研究的结论一致。

4.2 不同龄组径向生长与气候因子的关系

由图3可知不同年龄太白红杉径向生长对气候变化响应差异明显,这与Wang等^[26]对中国东北不同年龄兴安落叶松的研究结论一致。赵志江等^[24]也发现不同年龄紫果云杉径向生长对气候响应存在差异。以上研究说明年龄因素可以较大程度地影响树木生长对气候变化的敏感性。具体表现为:老龄组太白红杉年表对生长季早期和春季温度以及春季降水更加敏感,而幼龄组太白红杉年表与各气象指标均未达到显著相关关系。中、高龄组太白红杉年轮与上年6月温度呈显著负相关,相似的研究结论也被发现于红松^[37-38]和巴山冷杉(*Abies fargesii*)^[13]中。王晓春等^[39]研究表明大兴安岭北部樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)树木生长与6月气温负相关。戴君虎等^[8]指出西安和大爷海在6月初有一比较明显的短暂旱季,但持续时间极短。6月温度对树木径向的负响应模式已被广泛报道在中国东北^[40]和干旱半干旱地区^[41]。由此可见,6月气温对树木径向生长活动具有重要作用。本研究采样点位于半干旱的高海拔地区,降水量较为丰富,全年52%的降水量出现在7—9月,6月份降水量仅为70.5 mm。一般来讲,生

长季早期高温伴随降水量严重不足会导致树木蒸腾作用和土壤蒸发量增加,进而会产生强烈的水分胁迫限制树木生长^[37],这也可以从太白红杉与6月降水量正相关得以证明。

以往研究表明高海拔地区树木生长主要受温度影响,低海拔地区树木生长主要受降水量控制^[14]。戴君虎等^[8]指出在太白山及附近山区,降水基本不是植物生长的限制因子。然而,本研究却发现上年12月和当年4月降水量对太白红杉径向生长具有明显限制作用,这与前人得出的研究结论存在差异^[14,42]。Dang等^[13]研究发现在秦岭高海拔地区,夏季降水量影响巴山冷杉树木径向生长。Liang等^[43]也发现在尼泊尔喜马拉雅山脉林线上方糙皮桦(*Betula utilis*)的生长主要受水分可用率的限制,也就是说,干旱驱动亚高山林线。戴君虎等^[8]研究得出对于山体而言,从山麓向上,在某一高度以内,降水量随高度的增加而增加,达到这一高度时降水量最大,之后降水量又随海拔高度的上升而减小。基于以上分析,本研究采样点位置有可能恰好位于降水量明显减少这一海拔高度,因而降水量也成为限制太白红杉径向生长的因子之一。此外,高山林线附近气候条件极其严酷,譬如,低温、强风、积雪覆盖、土层较浅并且缺乏植被覆盖,进而导致水分储存率非常低。秦岭地区树木生长活跃期一般大致在4—9月^[44],在高海拔地区每年积雪在4、5月份开始融化,积雪融化的水分对树木生长的作用等同于降雨,而且融雪的速度较慢且持续时间较长,此时水分较为充足,如果4月份降水量过多会导致对树木生长产生不利影响。除此之外,4月份降水过多还会造成温度下降、光照减弱,植物光合作用速率也会随之下降,不利于植物营养物质累积,容易产生窄轮^[18]。此外,太白红杉中龄组年轮宽度与当年2月温度呈显著正相关,这种响应模式也被前人报道^[45]。Dang等^[13]研究表明早春温度是控制大陆气候区亚高山环境的主要限制因子。刘洪滨等^[46]也得出生长季前期温度是秦岭南坡佛坪树木生长的主要限制因子。温暖的早春温度有利于降低冬季休眠水平,增加土壤和叶片温度,促进根系和茎枝快速生长,诱导更早的积雪融化,进而可以延长生长季,导致形成层活动开始时间提前和增加光合物质供给,导致宽轮的产生。然而,幼龄组太白红杉差值年表与各月气候变量均未表现出显著相关关系,这或许进一步表明年龄因素对树木径向生长和气候变化响应模式的影响存在差异。为什么会存在这种差异?目前,还不能从机理上深入揭示不同龄级太白红杉径向生长对于气候因子的响应差异。王晓春等^[26]研究推断生理过程或者依靠树木年龄的水分限制,以及去

趋势方法差异是造成不同年龄树木生长-气候响应存在差异的重要原因。Wu 等^[23]研究表明年龄因素对树木生长与气候因子关系的影响差异主要归因于树种综合基因特征和站点小气候不同,这也表明在利用年轮作为代理资料进行古气候重建之前必须考虑年龄因素和特殊物种的气候响应。

参 考 文 献

- [1] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象, 1994, 20(12): 19-26.
DING Y H, DAI X S. Temperature variation in China during the last 100 years [J]. Meteorological Monthly, 1994, 20(12): 19-26.
- [2] PIAO S L, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in china[J]. Nature, 2010, 467:43-51.
- [3] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. Science, 2008, 320: 1444-1449.
- [4] WANG W Z, LIU X H, SHAO X M, et al. Differential response of Qilian juniper radial growth to climate variations in the middle of Qilian Mountains and the northeastern Qaidam Basin[J]. Climatic Change, 2015, 133: 237-251.
- [5] XU C Y, LIU H Y, ANENKHOV O A, et al. Long-term forest resilience to climate change indicated by mortality, regeneration, and growth in semiarid southern Siberia [J]. Global Change Biology, 2017, 23: 2370-2382.
- [6] GAZOL A, CAMARERO J, ANDEREGG W R L, et al. Impacts of droughts on the growth resilience of northern hemisphere forests[J]. Global Ecology and Biogeography, 2017, 26: 166-176.
- [7] 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 J P, 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.
- [8] 戴君虎, 崔海亭, 唐志尧, 等. 太白山高山带环境特征[J]. 山地学报, 2001, 19(4): 299-305.
DAI J H, CUI H T, TANG Z Y, et al. Characteristics of alpine physical environment on Taibai Mountain[J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(4): 299-305.
- [9] 李双双, 延军平, 万佳. 全球气候变化下秦岭南北气温变化特征[J]. 地理科学, 2012, 32(7): 853-858.
LI S S, YAN J P, WAN J. The characteristics of temperature change in Qinling Mountains [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(7): 853-858.
- [10] YU X M, ZHOU Q, QIAN Z Q, et al. Analysis of genetic diversity and population differentiation of *Larix potaninii* var. *chinensis* using microsatellite DNA [J]. Biochemical Genetics, 2006, 44: 491-501.
- [11] ZHAO X G, MA C H, XIAO L. The vegetation history of Qinling Mountains, China [J]. Quaternary International, 2014, 325: 55-62.
- [12] SHI J F, LI J B, COOK E R, et al. Growth response of *Pinus tabulaeformis* to climate along an elevation gradient in the eastern Qinling Mountains, central China [J]. Climate Research, 2012, 53: 157-167.
- [13] DANG H S, JIANG M X, ZHANG Q F, et al. Growth responses of subalpine fir (*Abies fargesii*) to climate variability in the Qinling Mountain, China [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 240: 143-150.
- [14] 于健, 徐倩倩, 刘文慧, 等. 长白山东坡不同海拔长白落叶松径向生长对气候变化的响应 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(1): 24-35.
YU J, XU Q Q, LIU W H, et al. Response of radial growth to climate change for *Larix olgensis* along an altitudinal gradient on the eastern slope of Changbai Mountain, Northeast China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(1): 24-35.
- [15] LÜ L X, ZHANG Q B. Tree-ring based summer minimum temperature reconstruction for the southern edge of the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. Climate Research, 2013, 56: 91-101.
- [16] GARFIN G M, HUGHES M K, LIU Y, et al. Exploratory temperature and precipitation reconstructions from the Qinling Mountains, North-Central China [J]. Tree-Ring Research, 2005, 61: 59-72.
- [17] SUN Y, WANG L L, CHEN J, et al. Growth characteristics and response to climate change of *Larix miller* tree-ring in China [J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53: 871-879.
- [18] 秦进, 白红英, 李书恒, 等. 太白山南北坡高山林线太白红杉对气候变化的响应差异 [J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5333-5342.
QIN J, BAI H Y, LI S H, et al. Differences in growth response of *Larix chinensis* to climate change at the upper timberline of southern and northern slopes of Mt. Taibai in central Qinling Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): 5333-5342.
- [19] 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.
KANG Y X, LIU J H, DAI S F, et al. Characteristics of ring-width chronologies of *Larix chinensis* and their responses to climate change at different elevations in Taibai Mountain [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2010, 38(12): 141-147.
- [20] 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.
DAI J H, SHAO X M, CUI H T, et al. Reconstruction of past eco-climate by tree-ring width index of *Larix chinensis* on Mt. Taibai [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(4): 428-435.
- [21] KONTER O, BÜNTGEN U, CARRER M, et al. Climate signal age effects in boreal tree-rings: lessons to be learned for paleoclimatic reconstructions [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 142: 164-172.
- [22] CARRER M, URBINATI C. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra* [J]. Ecology, 2004, 85: 730-740.
- [23] WU G J, XU G B, CHEN T, et al. Age-dependent tree-ring growth

responses of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) to climate: a case study in the Tianshan Mountain, China [J]. *Dendrochronologia*, 2013, 31: 318–326.

[24] 赵志江, 康东伟, 李俊清. 川西亚高山不同年龄紫果云杉径向生长对气候因子的响应 [J]. *生态学报*, 2016, 36 (1): 173–179.

ZHAO Z J, KANG D W, LI J Q. Age-dependent radial growth responses of *Picea purpurea* to climatic factors in the subalpine region of western Sichuan Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 173–179.

[25] 王晓明, 赵秀海, 高露双, 等. 长白山北坡不同年龄红松年表及其对气候的响应 [J]. *生态学报*, 2011, 31(21): 6378–6387.

WANG X M, ZHAO X H, GAO L S, et al. Age-dependent growth responses of *Pinus koraiensis* to climate in the north slope of Changbai Mountain, north-eastern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6378–6387.

[26] WANG X C, ZHANG Y D, MCRAE D J. Spatial and age-dependent tree-ring growth responses of *Larix gmelinii* to climate in northeastern China [J]. *Trees*, 2009, 23: 875–885.

[27] COLENUTT M E, LUCKMAN B H. Dendrochronological investigation of *Larix lyallii* at Larch Valley, Alberta [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, 21(8): 1222–1233.

[28] ESPER J, NIEDERER R, BEBI P, et al. Climate signal age effects: evidence from young and old trees in the Swiss Engadin [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255: 3783–3789.

[29] ROZAS V. Tree age estimates in *Fagus sylvatica* and *Quercus robur*: testing previous and improved methods [J]. *Plant Ecology*, 2003, 167: 193–212.

[30] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bull*, 1983, 43(1): 69–95.

[31] COOK E R, HOLMES R L. Users manual for program ARSTAN [M]. Tucson: Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, 1986.

[32] KENDALL M G. Rank correlation methods [M]. London: Edward Arnold, 1990.

[33] KOHLER M A. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1949, 82: 96–97.

[34] BINODI F, WAIKUL K. Dendroclim 2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies [J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(3): 303–311.

[35] WIGLEY T M L, BRIFFA K R, JONES P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology [J]. *Journal of Climatology & Applied Meteorology*, 1984, 23: 201–213.

[36] 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, 10(2): 188–196.

WU X D. Application of tree ring analysis to the study on environment variation [J]. *Quaternary sciences*, 1990, 10(2): 188–196.

[37] WANG X C, ZHANG M H, JI Y, et al. Temperature signals in tree-ring width and divergent growth of Korean pine response to recent climate warming in northeast Asia [J]. *Trees*, 2016, 31: 415–427.

[38] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 等. 不同纬度阔叶红松林红松径向生长对气候因子的响应 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1341–1352.

LIU M, MAO Z J, LI Y, et al. Response of radial growth of *Pinus koraiensis* in broad-leaved Korean pine forests with different latitudes to climatic factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1341–1352.

[39] 王晓春, 宋来萍, 张远东. 大兴安岭北部樟子松树木生长与气候因子的关系 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(3): 294–302.

WANG X C, SONG L P, ZHANG Y D. Climate-tree growth relationships of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the northern Daxing'an Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(3): 294–302.

[40] ZHU L J, LI Z S, ZHANG Y D, et al. A 211-year growing season temperature reconstruction using tree-ring width in Zhangguangcai Mountains, Northeast China: linkages to the Pacific and Atlantic Oceans [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37: 3145–3153.

[41] CAI Q F, LIU Y. Climatic response of three tree species growing at different elevations in the Lüliang Mountains of northern China [J]. *Dendrochronologia*, 2013, 31: 311–317.

[42] SIDOR C G, POPA I, VLAD R, et al. Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (Romania) [J]. *Trees*, 2015, 29: 985–997.

[43] LIANG E Y, DAWADI B, PEDERSON N, et al. Is the growth of birch at the upper timberline in the Himalayas limited by moisture or by temperature? [J] *Ecology*, 2014, 95: 2453–2465.

[44] 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 X D, SHAO X M. A preliminary analysis on response of tree-ring density to climate in the Qinling Mountains of China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1994, 5(2): 253–256.

[45] 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): 874–880.

CAI Q F, LIU Y, WANG Y C. Dendroclimatic investigation of Chinese pine in Taibai Mountain, Shaanxi Province [J]. *Journal of Earth Environment*, 2012, 3(3): 874–880.

[46] 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 H B, SHAO X M. Reconstruction of January to April temperature at Qinling MTS from 1789 to 1992 using tree ring chronologies [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(2): 188–196.

(责任编辑 冯秀兰
责任编委 张会儒)