

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.06.003

许玲玲,同小娟,张劲松,等.山西灵空山油松径向生长对气候变化的响应[J].中国农业气象,2020,41(6):357-367

山西灵空山油松径向生长对气候变化的响应*

许玲玲¹, 同小娟^{1**}, 张劲松², 孟平², 王鑫¹, 李俊³

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院林业研究所国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 为探讨暖温带半湿润区不同生长阶段油松径向生长对气候变化的响应, 以山西灵空山国家级自然保护区的油松人工林为研究对象, 建立该地区 1951–2018 年树轮标准化年表, 采用相关分析法对树轮生长动态及其与气候因子的关系进行分析。结果表明: 灵空山地区油松树木年表包含了丰富且敏感的气候信息, 适合进行树木年轮学分析, 不同生长阶段油松的径向生长对气候响应程度不同, 敏感性表现为过熟期 (0.354) > 幼龄期 (0.338) > 中龄期 (0.324) > 近熟期 (0.308) > 成熟期 (0.297)。信噪比、所有序列平均相关系数、平均指数等参数中, 过熟期均大于其它龄期, 分别达到了 23.803、0.515、0.994, 说明过熟期更适合用于进行年轮气候学研究。响应函数分析表明, 油松幼龄期和中龄期年表对各月气候因子均较敏感, 而近熟期、成熟期以及过熟期年表对降水更加敏感并表现出显著的相关关系, 且径向生长与降水的相关系数均大于幼龄期和中龄期。灵空山油松年轮宽度与气候因子的响应模式受生长阶段的影响, 温度和降水是影响油松幼龄期和中龄期径向生长的主要因子, 降水则是近熟期、成熟期以及过熟期木质部生长的主要制约因子。

关键词: 油松; 径向生长; 树轮宽度年表; 气候变化; 不同生长阶段

Response of Radial Growth of *Pinus tabulaeformis* to Climatic Factors in the Lingkong Mountain, Shanxi Province

XU Ling-ling¹, TONG Xiao-juan¹, ZHANG Jin-song², MENG Ping², WANG Xin¹, LI Jun³

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: In order to explore the response of *Pinus tabulaeformis* radial growth to climate change at different growth stages in the warm temperate subhumid zone, this paper conducted in the Lingkong Mountain of Shanxi Province, established the tree-ring standardized chronology from 1951 to 2018 in the area, and used correlation analysis to analyze tree-ring growth dynamics and its relationship with climate factors. The results showed that the tree rings of *Pinus tabulaeformis* contained rich and sensitive climate information, which was suitable for tree ring analysis. The response of the radial growth of *Pinus tabulaeformis* in different forest ages to climate was not same, and the sensitivity was in the order of over mature forest(0.354), young forest(0.338), middle age forest(0.324), near mature forest(0.308) and mature forest(0.297). The signal-to-noise ratio and the correlation coefficients of average phase of all sequences and average index of the over mature forest were larger than those of other age groups, reaching 23.803, 0.515 and 0.994, respectively. It is indicated that over mature forest was more suitable for studying

*收稿日期: 2019-12-04

**通讯作者同小娟, E-mail: tongxj@bjfu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31872703; 31570617)

第一作者联系方式: 许玲玲, E-mail:1773712156@qq.com

ring climatology. The response function analysis showed that the young and medium forests were all sensitive to the climate factors of each month, while the near mature, mature and over-mature forests of *Pinus tabulaeformis* were more sensitive to precipitation and showed a significant correlation, and the correlation coefficient between radial growth and precipitation was greater than that between the young forest and the medium forest. The response function analysis showed that the radial growth of the young-aged forest has a significant negative correlation with maximum temperature and temperature amplitude in June, a significant positive correlation with minimum temperature in February and October, a significant positive correlation with precipitation in August, a significant positive correlation with the radial growth of middle-aged forest and the average lowest temperature in July, and a significant positive correlation with the temperature amplitude in January. The radial growth of near mature forest was positively correlated with precipitation in October of last year, but negatively correlated with precipitation in October of that year, and the correlation coefficient between the radial growth of *Pinus tabulaeformis* and precipitation in the later growth stage was greater than that of young-aged forest and middle-aged forest. The radial growth of mature forest was positively correlated with precipitation in July and August. The radial growth of over mature forest was positively correlated with precipitation in November of last year, and it had a significant negative correlation with precipitation in January and May of the same year with the correlation coefficients more than 0.7. The response of the ring width to climate variables of *Pinus tabulaeformis* in the Lingkong mountain was affected by age factors. Temperature and precipitation were the main factors affecting the radial growth of young and middle aged forests, while precipitation was the main factor restricting the xylem growth of near mature, mature and over mature forests.

Key words: *Pinus tabulaeformis*; Radial growth; Tree-ring width chronology; Rlimatic factors; Different growth stages

随着工业的发展、森林的过渡采伐、化石燃料的燃烧和土地利用方式的改变, 大气 CO₂ 浓度呈不断升高趋势^[1]。长期以来, 气候变化对森林生产力的影响始终是生态学和林学的研究热点之一, 尤其在全球变暖的大背景下, 研究过去长时间序列里气候因子对生产力的影响机制, 对了解并预测未来气候条件下的森林生长具有重要意义^[2]。最新数据显示, 近 5a 中国新造人工林 4.47 亿 hm², 比 5a 前增长了 21.31%, 中国人工林总面积已位居全球之首^[3], 但人工林面临着质量不高、结构不合理、立地条件差等问题^[4], 在此背景下研究过去气候对人工林生长的影响, 可为预测未来气候变化条件下人工林生长变化提供重要依据。

油松 (*Pinus tabuliformis*) 分布于吉林南部、辽宁、河北、河南、山东、山西、内蒙古、陕西、甘肃、宁夏、青海及四川等省区, 生于海拔 100–2600m 地带, 其具有适应性强, 根系发达, 耐干旱瘠薄等特点, 可以作为荒山造林的先锋树种, 在北方干旱地区造林中得到广泛应用。树木年轮以其定年准确、连续性好、分辨率高、样本易获得以及对环境变化敏感性等优势, 已成为对全球变化特别是对过去

全球气候与环境变化研究的重要基础资料^[5-6]。因此, 利用树木年轮分析方法研究气候变化对森林的影响具有极其重要的生态学和实际意义^[7]。

国际上常用树木年轮学研究气候变化和树木生长的关系以及重建气候序列^[8-11]。Metsarant 等^[12]利用加拿大温哥华冷杉林 (*Abies fabri*) 的年轮数据, 分析了森林的生长动态, 发现模型计算出来的生产力与实际计算的生产力存在差异。Vieira 等^[13]研究了不同生长阶段海岸松 (*Pinus pinaster*) 年轮以及密度对地中海气候的响应, 发现幼龄期早材宽度对气候响应更敏感, 而老龄生长阶段晚材宽度对气候的响应更强。Bogino 等^[14]分析了海岸松和欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 1975–1999 年树轮稳定碳同位素与水分利用率, 表明海岸松的水分利用率与冬季和春季的相对湿度呈负相关关系。张朋磊等^[8]建立了不同纬度兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 年轮宽度年表, 并分析了不同纬度气候因子变化规律以及气候因子对年表的影响, 发现随着纬度的升高, 气温升高对落叶松的径向生长所产生的作用由抑制转为促进。油松由于其年轮变化线清晰明显, 可进行可靠的年轮分析和定年, 是用于气候与环境重建的重要树木年代学代

用资料, 所以被许多学者作为研究对象探讨气候与树木生长的关系^[15-18], 然而针对不同生长阶段林分对气候响应的相关研究并不多, 对于林分生长阶段、林木大小、林分密度以及其它因素引起的树木径向生长尚需深入研究。

本研究以树木年轮学为基础, 以灵空山不同生长阶段油松树为研究对象, 建立了灵空山不同生长阶段油松树轮标准化年表, 通过对影响油松生长的气候因子进行 Pearson 相关分析, 获得各气候因子与油松年轮宽度的相关性及其响应函数, 明确对油松年轮宽度生长有重要影响的气候因子, 以期为深入研究该区域气候变化及灵空山油松对气候变化的响应提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点山西灵空山国家级自然保护区灵空山林场 (36°67'44"N, 112°09'80"E), 位于山西沁源县西南部及古县北部, 地处太岳山脉中段的深山腹地, 属温带大陆性气候, 四季分明, 年平均气温 6.2°C, 日照时数 2600h, 降水量 662mm, 无霜期 145d 左右, 海拔 1583-1660m (平均 1618m)。该地区植被为以油松为主的温性针阔混交林, 群落乔木优势种有油松、辽东栎 (*Quercus wutaishanica*), 伴生树种有白蜡 (*Fraxinus chinensis*)、杜梨 (*Pyrus betulifolia*)、漆树 (*Toxicodendron vernicifluum*) 等阔叶树; 灌木有黄刺玫 (*Rosa xanthina*)、土庄绣线菊 (*Spiraea pubescens*)、金花忍冬 (*Lonicera chrysantha*) 等; 草本植物主要有披针苔草 (*Carex lanceolata*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*)、苍术 (*Atractylodes lancea*) 等。

1.2 样品的采集与处理

2019年6月, 按照国际年轮数据库 (ITRDB) 的标准, 在海拔 1503-1524m 油松生长良好且未间伐区域内, 设置 20m×20m 的油松人工林样地, 样地为西南坡, 凸形坡, 坡度 37°~43°, 郁闭度 0.72, 每木检尺结果为油松平均胸径 24.32cm, 密度为 1125 棵·hm⁻²。在样地内选取 20 棵健康优势树, 利用生长锥在胸径 (1.3m) 高处向东西和南北两个方向垂直钻取两根树芯, 树芯采集后将样品及时放入吸管中保存并编号记录好样点信息, 采集结束后, 使用树木生长愈合剂对其进行涂抹, 防止虫蚁蛀食。共获得 20 棵树的 40 根树芯, 基本可以反映样地的油松生长情况。样本采集后带回实验室, 放置于通风处

阴干, 将样本固定于木条上并使用 200、400 和 600 目砂纸依次打磨, 直至油松年轮在肉眼下清晰可辨。

1.3 制作年表

1.3.1 年表制作方法

使用 Lintab6 结合 TASP-Win 软件测量年轮宽度, 精确至 0.01mm, 在双筒显微镜下用骨架法进行目视交叉定年, 使用 COFECHA 软件对初步测量的树轮宽度进行交叉定年检验, 根据 COFECHA 交叉定年程序检验测量结果, 可以对测量错误或定年错误进行修改, 把主序列相关性差的样芯剔除, 确保定年和测量准确, 检验出来定年错误的样芯用年轮分析系统重新测量树轮宽度, 并用 COFECHA 软件再次进行交叉定年。用 ARSTAN 软件对相关性高的序列进行年轮宽度的标准化以及年轮宽度年表制作, 由于树木的生长不仅受环境和生态因子的影响, 而且还受到自身生理因子的控制, 所以通过消除非气候因素和树木生长趋势的影响即树轮去趋势处理, 进而得到标准化年表 (standard chronology, STD)。ARSTAN 软件去趋势的原理是利用一定的曲线模型来拟合树木生长趋势, 利用年轮序列与拟合曲线序列的比值得到去趋势序列。年表中的年轮宽度指数 (RWI) 为实际测得年轮宽度与去趋势后的年轮宽度值的比值。

参照林业上对油松人工林生长阶段级和龄期的划分标准, 可知 0~20a 为幼龄期 (young-aged forest); 21~30a 为中期 (middle-aged forest), 31~40a 为近熟期 (near mature forest); 41~60a 为成熟期 (mature forest); 61a 以上为过熟期 (over mature forest)。

树木年代学研究中, 有一些常用的年表统计参量, 包括年轮宽度指数、信噪比、平均敏感度、样本间相关系数、样本总体代表性、样本一阶自相关系数。

1.3.2 年表统计参量

(1) 年轮宽度指数

在树木年轮宽度年表建立的过程, 采用统计学方法对年轮宽度序列进行曲线拟合 (样条函数, 双曲线, 多项式, 指数函数), 得到树木生长的期望值 (Y_i), 年轮宽度指数 (I_i) 是树木年轮实际宽度值 (W_i) 与期望值 (Y_i) 之比。

$$I_i = \frac{W_i}{Y_i} \quad (1)$$

(2) 信噪比

信噪比 (SNR, signal-to-noise ratio) 是树轮年表中气候信息与非气候噪声的比值, 信噪比数值越大, 年表中所包含的气候信息越多, 可用来衡量样本中包含的环境信息量的大小, 表达式为

$$SNR = \frac{N \bar{r}_{bt}}{1 - \bar{r}_{bt}} \quad (2)$$

式中, N 代表样本数, \bar{r}_{bt} 代表不同样芯之间的平均相关系数。

(3) 样本一阶自相关系数

样本一阶自相关系数 (AC, autocorrelation) 表示上一年的气候因子对当年年轮生长的影响, 一阶自相关系数越大, 说明上一年的气候因子对当年年轮生长的影响越大, 反之, 则表明影响较小。

(4) 样本间相关系数

样本间相关系数 (mean inter-series correlation, rbar) 是不同样本序列间年轮宽度变化一致性大小的统计量。样本间相关系数越大, 样本序列间相似度越高, 表明样本序列受到相似的环境气候因子影响, 样本序列间年轮宽度变化较一致。

(5) 平均敏感度

平均敏感度 (MS, mean sensitivity) 是衡量年轮宽度逐年变化的统计量, 平均敏感度越大, 树木生长受气候因子的限制作用就越大, 大部分研究中, 质量较好的年表的平均敏感度取值范围在 0.1~0.6, 大部分数值在 0.1~0.4, 表达式为

$$MS = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{2(x_{i+1} - x_i)}{x_{i+1} + x_i} \right| \quad (3)$$

式中, x_i 为第 i 个年轮宽度值; x_{i+1} 为第 $i+1$ 个年轮宽度值; n 为样本年轮总数。

(6) 第一主成分所占方差量

第一主成分所占方差量 (variance in first eigenvector) 是反映年表中各样本序列同步性大小的统计参数, 其值越大, 气候因子对树木年轮宽度生长的限制作用越大。

1.4 气候数据

气候数据来源于 CRU TS 4.02 全球气候数据库, 其网格点的间隔为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 选择了距离采样点经纬度最近且海拔差距最小的网格点的气候数据作为本研究使用的气候数据。经过整理后得到灵空山林场 1951–2018 年的降水量、平均气温、最高气温、

最低气温、干旱指数、以及气温幅值的逐月数据和逐年数据。干旱指数为月尺度的帕默尔干旱指数 (PDSI), 气温幅值为月尺度平均最高气温与平均最低气温的差值。研究区属于温带大陆性气候, 雨热同期现象明显, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 从降水的季节分布来看, 一年中的大多数雨量集中在夏季且气温与降水量的变化趋势类似。考虑到气候因子的“滞后效应”, 选择上年 9 月–当年 10 月的气候数据进行分析。

1.5 数据分析

采用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检测法检验 1951–2018 年灵空山不同生长阶段各气候因子的变化^[19], 同时对不同生长阶段各气候因子的年际变化进行线性拟合。采用 Pearson 相关分析法研究不同生长阶段树木年轮宽度指数与逐月月平均气温、降水量、最低气温、最高气温、气温幅值、干旱指数的相关关系, 分析不同月份气候对油松生长的影响及不同时期的主导因素。

利用 Origin2018 作图, 利用 SPSS 分析统计年表和气候的相关性。

2 结果与分析

2.1 树轮宽度年表统计特征分析

表 1 为灵空山油松标准化年表的各项基本统计特征。由表可以看出, 5 个龄期油松序列与主序列的平均相关系数分别为 0.447、0.475、0.349、0.447、0.515, 均在 0.4 左右波动, 表明取样点的样本序列与主序列的同步性较好。不同生长阶段油松样本序列的一阶自相关系数均达到 0.5 以上, 其中成熟期达到 0.734, 说明油松的径向生长受到上一年气候因子的影响作用较大, 而这一现象在成熟期表现最为明显。平均敏感度用来度量相邻年轮之间年轮宽度的变化情况, 5 个龄期的平均敏感度分别为 0.338、0.324、0.308、0.297、0.354, 从不同龄期油松年表特征可以看出, 平均敏感度、信噪比等指标均较高, 说明所建立的年表包含较多的气候信息, 可以用于年表与主要气候因子的相关性分析。各龄期的油松样本总体代表性均达到了 0.85 的可接受水平, 分别为 0.931、0.934、0.938、0.961、0.96, 且第一主成分所占方差量均较大, 说明适用于气候因子的响应分析。从灵空山油松年轮宽度标准化年表 (图 1) 可以看出, 树轮宽度随着时间序列发生变化且存在频繁波动。

表 1 灵空山油松树轮宽度年表的统计特征

Table 1 Chronology statistics of the ring-width of *P. tabulaeformis* in the Lingkong Mountain

统计特征 Statistical characteristics	幼龄期 Young-aged	中龄期 Middle-aged	近熟期 Near mature	成熟期 Mature	过熟期 Over mature
年份 Year	1951–1971	1972–1981	1982–1991	1992–2011	2012–2018
平均敏感度 Mean sensitivity(MS)	0.338	0.324	0.308	0.297	0.354
标准差 Standard deviation(SD)	0.231	0.193	0.156	0.212	0.189
信噪比 Signal-to-noise ratio	15.264	14.264	15.238	24.564	23.803
平均指数 Mean index	0.831	0.989	0.996	0.992	0.994
一阶自相关系数 First autocorrelation coefficient	0.524	0.632	0.632	0.734	0.599
所有序列平均相关系数 Mean correlation among all radii	0.447	0.475	0.349	0.447	0.515
样本总体代表性 Expressed population signal	0.931	0.934	0.938	0.961	0.96
第一主成分所占方差量 Variance in first eigenvector(%)	41.9	42.4	42.3	41.1	42.2

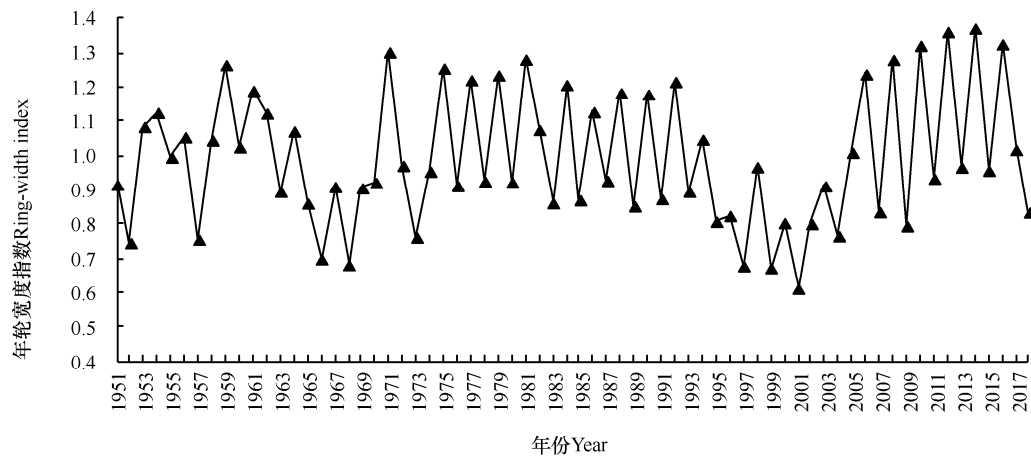


图 1 灵空山油松年轮宽度标准化年表 (1951–2018 年)

Fig. 1 Standard chronology of ring width of *Pinus tabulaeformis* in the Lingkong mountain (1951–2018 年)

2.2 同期气候因子变化特征分析

图 2 为 1951–2018 年年平均降水量、平均气温、最高气温、最低气温、气温幅值以及干旱指数的变化。统计分析发现, 1951–1971 年油松幼龄期间, 研究区年平均气温、平均最高气温、气温幅值以及干旱指数均有下降, 但变化趋势不显著, 其中平均气温以及平均最高气温分别以 $0.013^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $0.033^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率下降, 降水量以及最低气温总体有上升, 但趋势不显著。在 1972–1981 年油松中龄期间, 平均气温的上升速率为 $0.022^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$, 降水量的下降幅度为 $0.109\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 但变化趋势均不显著。1982–1991 年油

松近熟期间, 除降水量以 $0.299\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率下降外, 其它气候因子均有所上升, 但亦均未达显著水平。1992–2011 年油松成熟期间, 年降水量、平均气温以及最高气温变化均不显著, 但最低气温以及气温幅值的变化均达到极显著水平 ($P<0.01$), 最低气温以 $0.06^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率上升, 气温幅值的下降速率为 $0.05^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。2012–2018 年油松过熟期间年降水量、平均气温、最高气温、最低气温以及干旱指数均呈上升趋势, 其中平均气温以及最低气温的上升幅度分别为 $0.135^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $0.17^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$, 均达到了极显著水平 ($P<0.01$)。

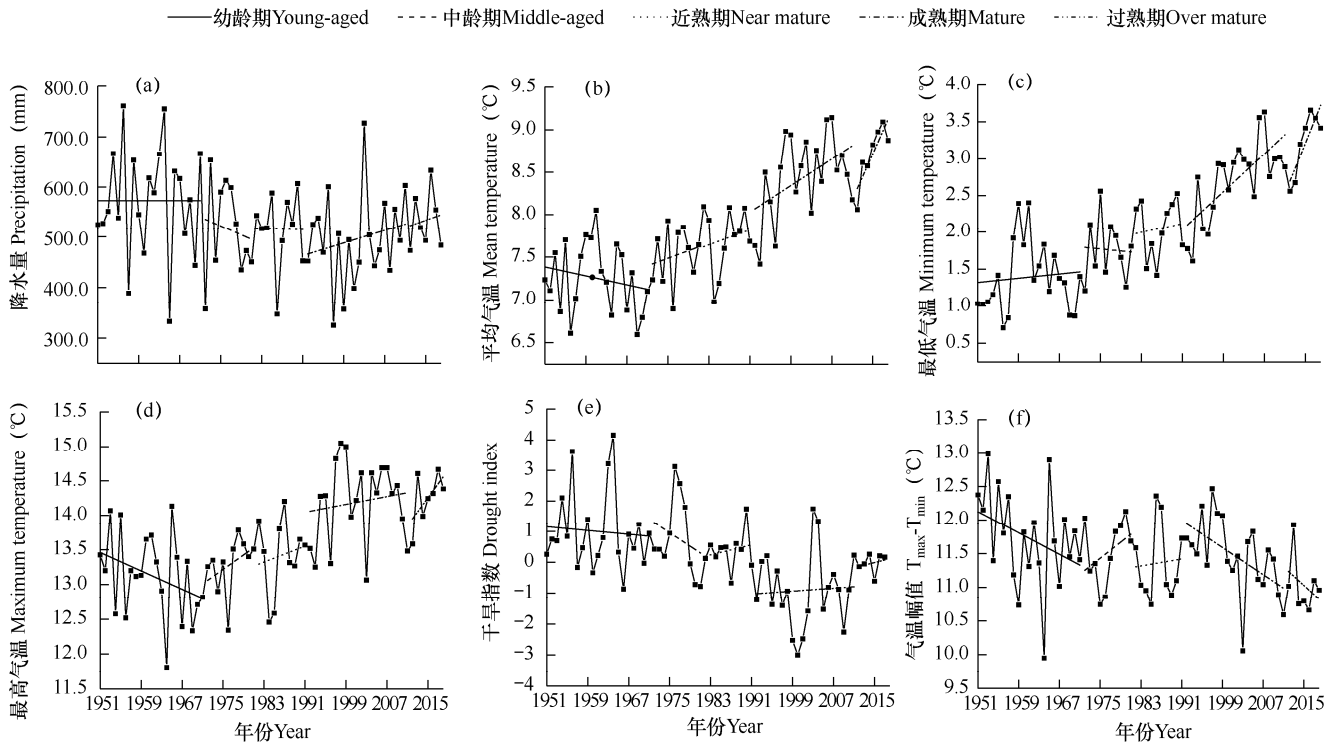


图 2 1951–2018 年年降水量、平均气温、平均最高气温、平均最低气温、气温幅值以及干旱指数的变化

Fig. 2 Changes of annual precipitation, average temperature, average maximum temperature, average minimum temperature, $\bar{T}_{max} - \bar{T}_{min}$ and drought index in 1951–2018

2.3 气候变化对油松年轮宽度的影响

由于油松年轮生长可能受上年气象因子影响^[20-22]，因此，选择各阶段上一年 9 月–当年 10 月的月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降水量、月气温变幅以及月干旱指数与油松年轮宽度标准化年表分别进行相关性分析，结果见图 3。由图可见，油松幼龄期径向生长与当年 8 月降水量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)，与 6 月最高气温和气温幅值均呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)。近熟期的径向生长与上年 10 月降水量呈显著正相关，而与当年 10 月降水量呈显著负相关关系，且油松的径向在生长后期与降水的相关系数均大于幼龄期与中龄期。成熟期径向生长与 7 月和 8 月的降水量呈显著正相关。过熟期的径向生长与上年 11 月降水量呈显著正相关，而与当年 1 月和 5 月的降水量分别呈极显著和显著负相关，且相关系数均达到 0.7 以上。

由图 3 可见，油松的径向生长在不同的生长阶段对气温的响应程度也各不相同。幼龄期的径向生长与当年 6 月最高气温呈显著负相关，与当年 2 月

和 10 月最低气温分别呈极显著和显著正相关，与 6 月气温幅值呈显著负相关。中龄期的径向生长与 7 月平均最低气温呈极显著正相关关系，与 1 月气温幅值呈显著正相关而与 7 月气温幅值呈极显著负相关。近熟期的径向生长与 4 月最低气温和上年 10 月气温幅值呈显著负相关，与上年 12 月气温幅值呈显著正相关。成熟期的径向生长与当年 1 月平均气温呈显著负相关，与 1 月最高气温呈极显著负相关，与 3 月最高气温呈显著负相关，与上年 12 月和 1 月气温幅值呈显著负相关。过熟期的径向生长与 2 月和 8 月最高气温呈显著负相关，且相关系数达到 0.7，明显高于其它龄期，与月平均气温、最低气温以及气温变幅的相关关系均未达到显著水平。

幼龄期径向生长与 8 月和 10 月干旱指数呈显著正相关，近熟期径向生长与 7 月和 8 月干旱指数分别达到了极显著与显著正相关水平；过熟期径向生长与上年 11 月以及当年 4 月干旱指数显著正相关。可见，树轮宽度受外界环境因素的影响随时间序列产生不同的变化趋势。

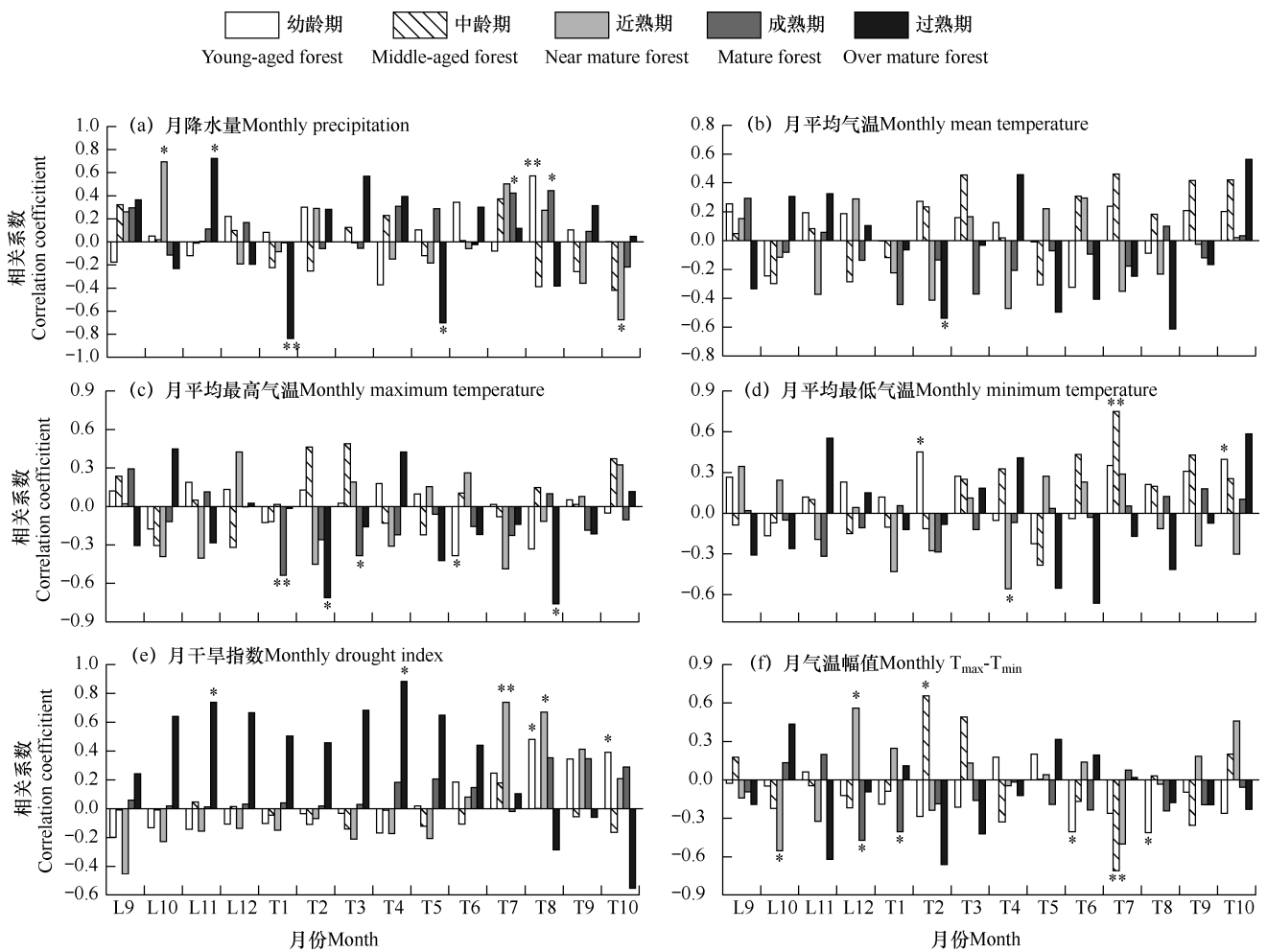


图 3 不同生长阶段油松标准化年表与月平均气候因子之间的相关关系 (1951–2018)

Fig. 3 Correlation between standardized chronology of *Pinus tabulaeformis* and monthly climate factors in different growth stages (1951–2018)

注：L9–L12 代表上一年 9–12 月份，T1–T10 代表当年 1–10 月份。*、** 分别表示相关系数通过 0.05、0.01 水平的显著性检验。
 Note: L9–L12 represent September to December in last year, T1–T10 represent January to October in this year. * means $P < 0.05$, ** means $P < 0.01$.

3 讨论与结论

3.1 讨论

油松 5 个龄期的平均敏感度均在 0.3 左右，信噪比、标准差较高以及一阶自相关系数均较高，表明树木年轮年表中含有较高的气候信息且油松年轮宽度的生长受上一年气候因子的影响较大，油松年轮宽度的生长具有滞后效应^[23]，样本总体代表性达到了 0.85 可接受水平，适用于进行年轮气候学分析，由标准化年表可知，各龄期第一主成分所占方差量均较大，适用于气候因子的响应分析^[24]，过熟期与成熟期的信噪比高于其它龄期且数值大小较一致，说明过熟期与成熟期包含有更多的气候信息，且在这

两个龄期内油松的径向生长无明显差异^[25]，不同生长阶段油松的径向生长对气候响应敏感度不同，其中幼龄期与中龄期的敏感性大于近熟期和成熟期，这与 Wu 等^[26]研究的不同生长阶段天山云杉的径向生长对气候的响应结果一致，但是也有研究发现树木随着生长阶段的生长，水分运输速率会下降，使过熟期径向生长对气候的敏感性更大^[27-28]，导致有关生长阶段对树木生长与气候关系的研究结果和结论在一些树种和地区上出现差异。

不同生长阶段油松的径向生长对气候的响应程度不同。Wang 等^[29]对中国东北不同生长阶段兴安落叶松的径向生长作了相关研究，研究结果表明落叶

松的径向生长对气候的响应随生长阶段的变化而显著变化。Yu 等^[30]对祁连山不同生长阶段的刺柏进行了研究,发现老龄刺柏的径向生长比幼龄刺柏对气候响应更为敏感,相似的研究结论也被发现于地中海气候的巴西栎中^[31]。研究表明,中国东部地区油松径向生长主要受到夏季温度和降水的影响^[8]。从生理学角度讲,春季树木开始生长,降水增加,则早材细胞分裂快,细胞数量多且体积大,所以易形成宽年轮^[32]。温度和降水对树木的影响是两者综合影响的结果,降水增加,阴雨天时间加长,光照不足,温度下降,树木光合作用速率下降,细胞分化推迟,纤维减少,细胞壁变薄^[33]。

由油松幼龄期径向生长与月气候因子的相关性分析可以看出,年轮宽度与降水量多呈正相关关系,其中与当年 8 月降水量呈显著正相关。王亚军等^[32]采集了宁夏罗山上限和下限的油松树轮样本,分别建立了年表,发现该地区的油松年表与当年 3、5 月的降水量呈显著正相关。崔明星等^[34]对木兰围场地区、赤峰围场地区的树木与气候因子的相关性研究均发现,树木生长与气温具有显著负相关关系,与降水具有正相关关系。

近熟期的径向生长与上年 10 月降水量呈显著正相关,而与当年 10 月降水量呈显著负相关。这是由于上年冬季长期气团所控制的持续影响,当地空气湿度小、土壤水分含量低,天空晴朗少云,太阳辐射增强,气候干燥多风,土壤中的水分对树木生长起着极为关键的作用。此时,降水的增加有利于树木的径向生长,上年的充足降水也可以降低干旱胁迫的危险,并有助于增强光合速率,促进树体内糖分的合成和贮存,为下一年生长积累能量^[35]。张芬等^[23]研究祁连山东部不同生长阶段油松径向生长对气候的响应也得出相同结论,不同生长阶段组油松树轮指数与当年 9、10 月温度呈正相关,与当年 8–10 月的降水量呈负相关关系,过熟期相关性达到了显著水平。

成熟期油松年轮宽度与上年生长后期的平均气温、最高气温以及最低气温均呈明显的负相关关系。这可能是由于冬季树木的光合作用已经停止,冬季温度高时树木的呼吸作用和代谢作用较高,加速了树木体内供翌年生长所储存的营养物质的消耗,进而对树木生长产生不利的影响^[8]。过熟期径向生长与当年 1 月和 5 月降水量呈显著负相关。1 月是油松生

长的萌芽期,此时油松树木生长在外形上虽不明显,但是树木体内的生命活动仍在进行。缺水时,树木叶片萎蔫,气孔关闭,二氧化碳扩散阻抗增加,光合作用受到明显抑制,植物根系活动相对减弱,树干本身细胞的分裂、伸长都受到抑制^[33],成熟期油松年轮宽度与 5 月降水量呈显著负相关。这主要是由于油松已经基本完成了树木形成层细胞的分裂和生长,开始进入光合作用产物积累阶段,降水较多,导致云层较厚,阻止太阳光线,减缓光合作用,从而不利于油松生长^[36]。成熟期油松年轮宽度与当年 2 月和 8 月最高气温呈显著负相关。在油松生长季温度的升高会导致土壤水分的蒸发量增大,影响降水对土壤水分的补给,间接表现为气温与年轮宽度呈负相关^[37]。

在油松幼龄期和中龄期时,年轮宽度标准化年表与温度的相关系数均高于与降水量的值,而在成熟期则相反。这说明温度是影响幼龄期和中龄期径向生长的主要因子,而降水则是近熟期、成熟期以及过熟期木质部生长的主要制约因子。Sanchez-Salguero 等^[38]对亚欧大陆不同生长阶段钩松林线对温度敏感性响应的变化发现,生长阶段对温度的响应也取决于气温变化的速率,但整体上幼龄期比老龄生长阶段对温度的敏感性更强。在本研究中,研究区油松人工林样地还存在坡度、林分密度等的差异,其中密度对于人工林胸径和材积的生长过程影响也十分明显,这些因子对油松对气候因子的响应过程有何影响以及最稳定的人工林密度等问题,还需进一步深入研究。

3.2 结论

(1) 不同生长阶段油松的径向生长对气候响应敏感性不同,过熟期敏感性最大,而幼龄期和中龄期的敏感性大于近熟期和成熟期。信噪比、所有序列平均相关系数、平均指数等参数中,过熟期均大于其它龄期,过熟期更适合用于年轮气候学研究。

(2) 幼龄期油松的径向生长与当年 6 月最高气温以及气温幅值呈显著负相关,与当年 2 月和 10 月的最低气温分别呈极显著和显著正相关,与 8 月降水量呈极显著正相关关系。中龄期油松的径向生长与 7 月平均最低气温呈极显著正相关关系,与 1 月的气温变幅呈显著正相关。近熟期油松的径向生长与上年 10 月降水量呈显著正相关,而与当年 10 月降水量呈显著负相关关系,且油松的径向在生长后

期与降水的相关系数均大于幼龄林和中龄林。成熟期油松径向生长与7月和8月的降水量呈显著正相关;过熟期的径向生长与上年11月降水量呈显著正相关,与当年1月和5月的降水量分别呈极显著和显著负相关关系,且相关系数均达到0.7以上。

(3)在油松幼龄期和中龄期,年轮宽度标准化年表与温度的相关系数均高于与降水量的值,而在成熟期则相反。说明温度是影响幼龄期和中龄期径向生长的主要因子,而降水量则是近熟期、成熟期以及过熟期木质部生长的主要制约因子。

参考文献 References

- [1] 张蕊,赵钰.基于稳定碳同位素技术研究大气CO₂浓度升高对植物土壤系统碳循环的影响[J].应用生态学报,2017,28(7):2379-2388.
Zhang R,Zhao Y.Investigation on effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on plant-soil system carbon cycling:based on stable isotopic technique[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(7):2379-2388.(in Chinese)
- [2] 成泽虎.基于树轮宽度的北京松山油松林生长-气候关系研究[D].北京:北京林业大学,2016.
Cheng Z H.Response of *Pinus tabulae* forests to climate changes based on tree-ring data in Songshan,Beijing, China[D].Beijing: Beijing Forestry University,2016.(in Chinese)
- [3] 刘源森.辽宁省三北防护林体系人工林营造现状及对策[J].辽宁农业科学,2019,(1):64-66.
Liu Y S.Present situation and countermeasures of plantation construction of Sanbei shelterbelt system in Liaoning province[J]. Liaoning Agricultural Sciences,2019, (1):64-66. (in Chinese)
- [4] 潘嘉雯,林娜,何茜,等.我国3个桉树人工林种植区生产力影响因素[J].生态学报,2018,38(19):6932-6940.
Pan J W,Lin N,He Q,et al.Factors influencing the productivity of three Eucalyptus plantation areas in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(19):6932-6940.(in Chinese)
- [5] Kang H,Liu X,Guo J,et al.Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of *Schrenk spruce* (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains,northwestern China[J].Ecological Indicators,2019, 104:24-31.
- [6] Wood L J,Smith D J,Demuth M N.Pre-1930 unstable relationship between climate and tree-ring width of *Pinus taiwanensis* Hayata in southeastern China[J].Quaternary Research,2011,76(3):305-313.
- [7] 张波,周梅,赵鹏武,等.树木年轮分析方法在气候变化对森林影响研究中的应用[J].内蒙古林业调查设计,2017, 40(5):90-93.
Zhang B,Zhou M,Zhao P W,et al.Application of tree-ring analysis method to the study of forest influence in climate change[J].Inner Mongolia Forestry Investigation and Design,2017,40(5):90-93.(in Chinese)
- [8] 张朋磊,刘滨辉.气候变化对不同纬度兴安落叶松径向生长的影响[J].东北林业大学学报,2015,43(3):10-13.
Zhang P L,Liu B H.Effect of climate change on *Larix gmelinii* growth in different latitudes[J].Journal of Northeast Forestry University,2015,43(3):10-13.(in Chinese)
- [9] Jiao L,Jiang Y,Zhang W,et al.Divergent responses to climate factors in the radial growth of *Larix sibirica* in the eastern Tianshan Mountains,northwest China[J].Trees,2015,29(6): 1673- 1686.
- [10] 邱华,刘建泉,李进军,等.祁连山地区青海云杉年轮宽度对气候变化的响应[J].林业科技通讯,2017(1):3-7.
Di H,Liu J Q,Li J J,et al.The tree-ring width of *Picea crassifolia* in response to climate change in Qilian Mountain area[J].Forest Science and Technology,2017(1): 3-7.(in Chinese)
- [11] Liang H,Huang J,Ma Q,et al.Contributions of competition and climate on radial growth of *Pinus massoniana* in subtropics of China[J].Agricultural and Forest Meteorology, 2019,274:7-17.
- [12] Metsaranta J M,Trofymow J A,Black T A,et al.Long-term time series of annual ecosystem production (1985- 2010) derived from tree rings in Douglas-fir stands on Vancouver Island,Canada using a hybrid biometric-modelling approach[J].Forest Ecology and Management,2018,429: 57-68.
- [13] Vieira J,Campelo F,Nabais C.Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate[J].Trees,2009, 23(2):257-265.
- [14] Bogino S M,Bravo F.Carbon stable isotope-climate association in tree rings of *Pinus pinaster* and *Pinus sylvestris* in Mediterranean environments[J].Bosque

- (Valdivia),2014,35(2):175-184.
- [15] 王玉涛,刘平,魏忠平.油松人工林单木胸径生长量与竞争因子的关系[J].沈阳农业大学学报,2016,47(3): 299-306.
Wang Y T,Liu P,Wei Z P.The relationship between DBH growth and competition factors for *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016,47(3):299-306.(in Chinese)
- [16] 姜庆彪,赵秀海,高露双,等.不同径级油松径向生长对气候的响应[J].生态学报,2012,32(12):3859-3865.
Jiang Q B,Zhao X H,Gao L S,et al.Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(12):3859-3865.(in Chinese)
- [17] 朱娜,陈红林,张群,等.秦岭南坡油松树轮碳稳定同位素对气候因子的响应[J].西北林学院学报,2019,34(3): 21-27.
Zhu N,Chen H L,Zhang Q,et al.Research on the change of $\delta^{13}\text{C}$ of *Pinus tabulaeformis* on the southern of Qinling Mountains and its relationship with climatic factors[J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(3):21-27. (in Chinese)
- [18] 牛豪阁.祁连山东部三种针叶树径向生长动态对气候的响应[D].兰州:兰州大学,2018.
Niu H G.Intra-annual stem radial growth dynamics of three coniferous species in response to climate in the eastern Qilian Mountains[D].Lanzhou:Lanzhou University,2018. (in Chinese)
- [19] Yuan M,Wang L,Lin A,et al.Variations in land surface phenology and their response to climate change in Yangtze River basin during 1982-2015[J].Theoretical and Applied Climatology,2019,137(3-4):1659-1674.
- [20] 靳翔,徐庆,刘世荣,等.川西亚高山岷江冷杉和铁杉年轮对气候因子的响应[J].林业科学,2013,49(1):21-26.
Jin X,Xu Q,Liu S R,et al.Responses of the tree-ring of *Abies faxoniana* and *Tsuga chinensis* to climate factors in Sub-Alpine in Western Sichuan[J].Scientia Silvae Sinicae, 2013,49(1):21-26.(in Chinese)
- [21] 张瑞波,袁玉江,魏文寿,等.西伯利亚落叶松树轮稳定碳同位素对气候的响应[J].干旱区研究,2012,29(2): 328-334.
Zhang R B,Yuan Y J,Wei W S,et al.Response of stable carbon isotope of *Larix sibirica* Ledeb.tree-rings to climate change[J].Arid Zone Research,2012,29(2):328-334.(in Chinese)
- [22] 商志远,王建,张文,等.大兴安岭北部樟子松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的高向变化及其与树轮宽度的关系[J].应用生态学报,2013,24(1):1-9.
Shang Z Y,Wang J,Zhang W,et al.Vertical variability of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* tree ring $\delta^{13}\text{C}$ and its relationship with tree ring width in northern Daxing'an Mountains of Northeast China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2013,24(1):1-9.(in Chinese)
- [23] 张芬,勾晓华,苏军德,等.祁连山东部不同树龄油松径向生长对气候的响应[J].冰川冻土,2011,33(3):634-639.
Zhang F,Gou X H,Su J D,et al.Age-dependent responses of tree radial growth of *Pinus tabulaeformis* to climate in easter section of the Qilian Mountains[J].Journal of Glaciology and Geocryology,2011, 33(3):634-639.(in Chinese)
- [24] 刘兰妹,赵羿涵,高露双.杉木人工林径向生长对气候因子的响应[J].东北林业大学学报,2014,(5):6-8.
Liu L M,Zhao Y H,Gao L S.Response of radial growth of *Cunninghamia lanceolata* plantation to climate[J].Journal of Northeast Forestry University,2014,(5):6-8.(in Chinese)
- [25] Dorado L I,Gutiérrez E,Heinrich I,et al. Age effects and climate response in trees:a multi-proxy tree-ringtest in old-growth life stages[J].European Journal of Forest Research,2012,131(4):933-944.
- [26] Wu G,Xu G,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(4):318-326.
- [27] Carrer M,Urbinati C.Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*[J]. Ecology,2004,85(3):730-740.
- [28] Marziliano P A,Tognetti R,Lombardi F.Is tree age or tree size reducing height increment in *Abies alba* Mill.at its southernmost distribution limit[J].Annals of Forest Science,2019,76(1):17-29.
- [29] Wang X,Zhang Y,McRae D J.Spatial and age-dependent tree-ring growth responses of *Larix gmelinii* to climate in northeastern China[J].Trees,2009,23(4): 875-885.
- [30] Yu G,Liu Y,Wang X,et al.Age-dependent tree-ring growth responses to climate in Qilian juniper (*Sabina przewalskii* Kom.)[J]. Trees,2008,22(2):197-204.
- [31] Fayyaz P,Zolfaghari R,Balapour S.Age-dependent response to extreme Mediterranean climate in annual rings of brant 's oak (*Quercus brantii* Lindl.)[J].Dendrobiology,2017,78:

- 32-39.
- [32] 王亚军,马玉贞,郑影华,等.河北太行山南段树木年轮指示的167年来5-7月相对湿度变化[J].生态学报,2019,39(12):1-9.
Wang Y J, Ma Y Z, Zheng Y H, et al. The study of variation in relative humidity from May to July during the past 167 years in the southern Taihang Mountains in Hebei province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 1-9. (in Chinese)
- [33] 杨银科,黄强,刘禹,等.云杉树轮生长密度对气候要素的响应分析[J].西安理工大学学报,2012,28(4):432-438.
Yang Y K, Huang Q, Liu Y, et al. Response analysis between climate factors and the density of wood growth of *Picea Crassifolia*[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(4): 432-438. (in Chinese)
- [34] 崔明星,何兴元,陈玮,等.河北木兰围场油松年轮生态学的初步研究[J].应用生态学报,2008,19(11):2339-2345.
Cui M X, He X Y, Chen W, et al. Dendrochronology of Chinese pine in Mulan-Weichang, Hebei province: a primary study[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(11): 2339-2345. (in Chinese)
- [35] Takahashi K A K Y H. Effects of climate on the radial growth of tree species in the upper and lower distribution limits of an altitudinal ecotone on Mount Norikura, central Japan[J]. Ecological Research, 2003, 1(18): 519-558.
- [36] 卞建新.不同立地樟子松径生长特征及其对气候变化的响应[J].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
Bian J X. Effect of different site conditions on the growth of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and its response to climate change[J]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [37] 梁非凡,朱清科,王露露,等.陕北黄土区油松径向生长对气候因子的响应[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(5):33-41.
Liang F F, Zhu Q K, Wang L L, et al. Influence of climate factors on radial growth of *Pinus tabulaeformis* in loess area of Northern Shanxi[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2015, 43(5): 33-41. (in Chinese)
- [38] Sanchez-Salguero R, Camarero J, Gutiérrez E, et al. Climate warming alters age-dependent growth sensitivity to temperature in Eurasian Alpine treelines[J]. Forests, 2018, 9(11): 688.