

辽宁西部人工林油松径向生长对气候要素的响应

高 瑾¹, 包 光^{1,2,3}, 吴买利¹, 刘 娜^{1,2,3}

1. 宝鸡文理学院 地理与环境学院, 宝鸡 721013

2. 宝鸡文理学院 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013

3. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

摘 要: 全球气候变化对森林生态系统产生广泛影响, 特别是对气候响应敏感的农牧交错带。辽西丘陵位于我国农牧交错带东北部, 为探究辽西丘陵人工林油松与气候要素的关系, 基于树木年代学方法, 利用树轮宽度年表, 对温度、降水、scPDSI 及生长期要素进行相关分析, 探究气象因子对树木径向生长的影响情况。结果表明: 油松标准化年表与上年 7 月、9 月及当年 5 月的气温呈负相关, 相关系数分别为 -0.457 、 -0.426 、 -0.471 ($p < 0.05$), 与当年 5 月的降水量呈正相关, 相关系数为 0.52 ($p < 0.05$); 年表与逐月 scPDSI 显著正相关, 并表现出相近的周期变化, 表明水分胁迫是研究区油松生长的关键限制因子; 在不同阈值温度下, 辽西人工林油松径向生长与生长期活动积温和持续天数呈负相关, 由高温引起的水分蒸发是影响其径向生长的关键因子。最低温 11°C 阈值下对树木生长期影响大, 年表与其初日位序、积温、持续天数的相关系数分别达到 0.663 、 -0.619 、 -0.732 ($p < 0.01$); 通过 V-S 模型模拟出辽西油松的生长对春季的 9.0°C 和秋季的 9.5°C 较敏感, 生长期为 4—10 月, 生长速率的变化受温度和土壤湿度变化的影响。因此在进行人工油松林区经营抚育时, 可适当考虑造林树种对不同气候因子响应的敏感期, 注意水热合理配置, 以提高林区生态林的营林质量。

关键词: 气候响应; 人工林油松; 生长期参数; V-S 模型

Response of radial growth of planted *Pinus tabulaeformis* in western Liaoning to climatic factors

GAO Jin¹, BAO Guang^{1,2,3}, WU Maili¹, LIU Na^{1,2,3}

1. School of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China

2. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China

3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

Abstract: Background, aim, and scope Western Liaoning is located in the northeastern part of the agro-pastoral ecotone where a region influenced by global climate change in China. The relationships between radial growth of planted Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) and climate factors were analyzed by using tree-ring width index and

收稿日期: 2019-12-13; 录用日期: 2020-03-26; 网络出版: 2020-04-10

Received Date: 2019-12-13; Accepted Date: 2020-03-26; Online first: 2020-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41301101); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2018JM-208); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金 (SKLLQG2031); 宝鸡文理学院研究生创新科研项目 (YJSCX18YB18)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41301101); Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (2018JM-208); Open Fund of State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology (SKLLQG2031); Graduate Innovative Research Projects of Baoji University of Arts and Sciences (YJSCX18YB18)

通信作者: 包 光, E-mail: baoguang23@163.com

Corresponding Author: BAO Guang, E-mail: baoguang23@163.com

引用格式: 高 瑾, 包 光, 吴买利, 等. 2020. 辽宁西部人工林油松径向生长对气候要素的响应 [J]. 地球环境学报, 11(6): 629–638.

Citation: Gao J, Bao G, Wu M L, et al. 2020. Response of radial growth of planted *Pinus tabulaeformis* in western Liaoning to climatic factors [J]. Journal of Earth Environment, 11(6): 629–638.

meteorological data in western Liaoning. This study is of great significance for the management and maintenance of the planted *P. tabuliformis* forest under the context of continuous warming. **Materials and methods** The tree-ring chronology was developed from cores of planted Chinese pine for western Liaoning. The correlations between the chronology and temperature, precipitation, scPDSI and threshold temperatures were calculated during the period from 1983 to 2012, and the variations of tree-ring width were verified by V-S model simulation. **Results** The standardized chronology of *P. tabuliformis* showed a negative correlation with the temperature in previous July, September and current May, with a correlation coefficient of -0.457 , -0.426 and -0.471 ($p < 0.05$), and a positive correlation with the precipitation in current May, with a correlation coefficient of 0.52 ($p < 0.05$). The chronology was positively correlated with scPDSI on the monthly scale. Radial growth of *P. tabuliformis* was negatively correlated with accumulated temperature and duration of different threshold temperatures during the current growth period. The minimum temperature of 11°C had a great influence on pines. The correlation coefficients between tree-ring index and its initial date sequence, accumulated temperature and duration were 0.663 , -0.619 and -0.732 ($p < 0.01$), respectively. The V-S model results showed that *P. tabuliformis* was sensitive to 9°C in spring and 9.5°C in autumn. The current growth season occurred from April to October, and the variability of growth rate was affected by both temperature and soil moisture. **Discussion** Drought stress was the main factor limiting the response of *P. tabuliformis* growth to climate. This response pattern was confirmed by positive correlations of the tree-ring chronology with moisture condition including precipitation and scPDSI, and negative correlations with temperature condition including accumulated temperature and duration. The results of the V-S model demonstrated the similar growth-climate relationship. **Conclusions** The radial growth of planted *P. tabuliformis* in western Liaoning was dominated by moisture stress during the growth season. Longer growth period and more accumulated temperature caused by increasing temperatures in spring and autumn could enhance the risk of radial growth of Chinese pine planted in study area. **Recommendations and perspectives** The response pattern of *P. tabuliformis* to different climate factors should be considered in the management and nurturing of planted Chinese pine forest in western Liaoning, and the reasonable allocation of water and heat should be paid more attention to improve the quality of ecological effect.

Key words: climate response; planted *Pinus tabuliformis*; growth period parameters; V-S model

全球变化是人类面临的严峻挑战, 中国气象局气候变化中心发布的《中国气候变化蓝皮书(2019)》显示我国由全球气候变化引发的高温、洪涝、干旱等重大灾害风险正在加大, 未来可能进一步加剧。陆地生态系统对气候变化的响应十分敏感和广泛, 特别是在生态脆弱的中高纬度、高山和亚高山地区。森林作为陆地生态系统的主体, 分布广泛、生物多样性丰富, 对缓解气候变化起着至关重要的作用, 气候变化反过来又影响森林生态系统的动态变化, 两者相互制约相互影响。气候变暖已经对全球植被分布产生了重要影响(Parmesan et al, 2003; Root et al, 2003; Elliott et al, 2015), 为恢复和重建森林, 增加森林覆盖率, 各地人工林发展迅速。占陆地森林生态系统总面积 7% 的人工林在缓解全球和区域资源与环境问题中发挥着越来越重要的作用(FAO, 2010)。

对数据的定量分析是自然地理学研究气候变化所关注的基础, 在明晰气候变化对树木生长影响的诸多方法中, 树木年轮以其定年准确、分辨率高、连续性好、方便采样等优点, 被广泛应用于代用指标气候学的研究工作(Fritts, 2001)。为了提高全球气候变化背景下人工林的稳定性, 探究其与气候因子的响应关系十分必要。基于树木年轮学方法, 发现大兴安岭南段华北人工林落叶松的径向生长主要受到当年冬季月降水量的显著影响, 且对于干旱胁迫有明显的“滞后”(梁慧敏等, 2019); 黑龙江帽儿山地区不同种源人工林樟子松径向生长与前年 8 月降水量负相关, 与当年 2 月温度和 6 月降水正相关(徐静等, 2016); 陕北黄土区人工林油松的关键限制因子是生长季前期降水量和生长季温度(梁非凡等, 2015); 秦淮以南的人工林马尾松, 在湿热地区升温会加快

其生长,而在较干旱地区升温则限制其生长(封晓辉,2011)。

辽西丘陵位于我国对气候变化反应敏感的农牧交错带东北部,是全球变化的重点研究地区之一(吴传钧等,1999),受到了很多学者的广泛关注(包光等,2013a,2013b;包光,2014;Liu et al,2019)。油松分布广、适应性较强,能作为良好的自然资料来反映树木生长与环境的关系(Liu et al,2015;贾飞飞等,2019;Jian et al,2019),是国内进行树木年轮学研究的主要目标树种之一。树轮气候学多以恢复器测时段之前气候因子的历史变化特征为研究目标,而使用年代相对较短的人工林探讨树木的径向生长变化与环境生态因子的响应对于区域营林造林和森林健康保护具有现实意义和价值,基于此,本研究旨在通过月尺度气候要素的相关分析、关键温度阈值的确定和生长模拟参数的筛选,探讨辽西丘陵地区人工林油松树木年轮宽度变化对局地气候环境因子的响应特征,从而为研究区域人工林油松的合理管理与保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辽西地区($119^{\circ}42'—122^{\circ}31'48''E$, $40^{\circ}21'—42^{\circ}14'24''N$)以低山丘陵为主,地势自西北向东南的辽河平原、渤海逐级降低,是我国东北林区向内蒙古草原及华北平原的过渡地带,属于典型的生态交错区,是我国东北、华北地区的生态屏障。该地区植物组成以华北区系植物为主,主要树种有油松、辽东栎、槲栎。本区属中温带半干旱大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季炎热干燥,年均气温 $8—9^{\circ}C$,年均降水量 $450—600\text{ mm}$ (丁一汇等,2013)。采样点位于阜新烟台营子村($121^{\circ}34'16''E$, $42^{\circ}00'25''N$,海拔 205 m),主要地貌为低山丘陵,以地带性土壤褐土为主。

1.2 树轮数据的标准化与拟合

对人工林油松进行树芯采集,用生长锥在胸高处钻取样芯,每棵树两颗芯,共取20棵树40根芯。将样芯带回实验室后,采用国际标准树轮年代学研究方法(Holmes,1983)对样本进行预处理,经固定、打磨,对于那些断裂、生长奇异点过多等因素导致的不合适本研究的样芯予以剔除,最终选取30根样芯用于年表的构建。利用

LINTAB6年轮测量仪获取样芯逐年生长量(精度为 0.01 mm)。利用ARSTAN程序(Cook and Kairiukstis,1990)中的负指数对年轮序列进行去趋势和标准化,来消除树木生长过程中与年龄增长相关联的生长趋势,以保留更多的低频变化趋势,最终得到当地油松的标准年表STD、差值年表RES和自回归年表ARS。选用标准化年表进行树木生长与气候间的相关分析。

1.3 气象数据的统计与处理

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),选择距离采样点最近的阜新气象站进行分析,根据该站1951—2012年观测记录(图1),年平均温度 $8.25^{\circ}C$,年均最高温度 $14.66^{\circ}C$,年均最低温度 $2.51^{\circ}C$,年总降水 484 mm ,温度和降水峰值均在7月。本研究所涉及到的气候资料有平均温度、最高温度、最低温度、总降水量,此外还选择了自校正帕尔默指数(self-calibrated Palmer drought severity index, scPDSI)格点数据进行分析($119^{\circ}15'E$, $40^{\circ}15'N$)。scPDSI是最重要的气象干旱指数之一,该指数能反映干旱的成因、程度、持续时间(Zhang and Zhou,2015)。考虑到气候环境因子的滞后效应及适宜树木生长的水热干湿条件,本研究选择上年7月(p7)至当年10月(c10)的气象数据与油松年表进行相关分析。

利用气象站日值数据,对数据进行5日滑动平均处理,用来确定不同阈值温度的初日位序、终日位序、持续时间和活动积温。虽然有研究发现 $5^{\circ}C$ 是计算农业和林业有效积温的一个常用标准(Monteith,1981),但考虑到不同生长环境的限制因素不同,本研究从 $0^{\circ}C$ 开始,每隔 $0.5^{\circ}C$ 直到 $15^{\circ}C$,共确定31个温度阈值(侯鑫源等,2015),得到不同起始温度的初日位序、终日位序、持续时间和活动积温4个指标数据,对于每一年都有3个不同的生长期参数序列(平均温度、最低温度、最高温度)。年表与气候要素之间的分析用SPSS 22、Matlab 2016软件,图片用Origin 8.5绘制。

2 结果与分析

2.1 年表的统计特征

建立的年表跨度为1978—2012,共35年,以子样本信号强度(subsample signal strength)(Fritts,2001)大于0.85确定年表可靠时段

为 1983—2012, 共 30 年。年表统计特征如表 1 所示, 公共区间选用 1990—2010 年, 平均敏感度为 0.281, 信噪比为 17.173, 样本代表性为 0.945, 这些数值反映了样本中所含有的气候信息量较高及样本共有信息较多, 所建立的年表较好地反映了理论年表, 可用于树木年轮气候学的研究。

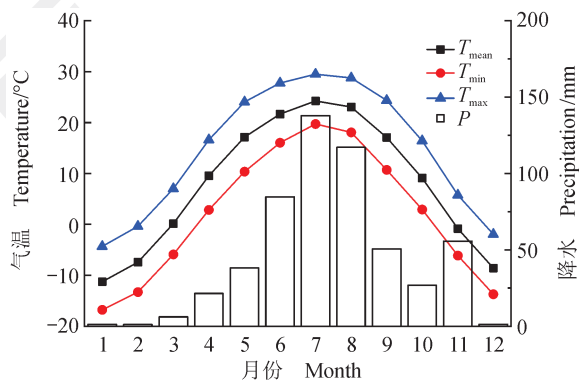


图 1 阜新站温度和降水多年平均逐月变化 (1951—2012)

Fig.1 Monthly variation of temperature and precipitation in Fuxin station (1951—2012)

2.2 径向生长与气象要素的相关分析

外界环境因子中, 温度和降水是影响树木径向生长的重要因子。由图 2 可以看出, 生长期前期 (c3—c4) 温度的高低对年表的影响较低, 年表与上年 7 月、9 月及当年 5 月的相关系数分别达到 -0.457 、 -0.426 、 -0.471 , 通过了 95% 的置信度检验; 年表与降水的月相关性整体弱于温度, 仅表现在与当年 5 月降水显著正相关 ($p < 0.01$), 相关系数为 0.52。有研究表明, 在受东亚夏季季风影响的干旱和半干旱地区, 树轮生长与降水关系密切 (Liang et al, 2008; 彭俊杰等, 2012; Wang and Liu, 2017), 与本研究中年表和温度相关性较强这一结论稍有出入。

scPDSI 在干旱半干旱地区是重要的气候指标, 它的变化对当地生态系统的发生发展有很大影响, 树轮宽度指数与 scPDSI 的相关系数在 95% 的置信范围内都呈显著正相关, 且在较冷月份 (p10—c3) 与较暖月份 (p7, c5—c7) 的相关性都通过了 99% 的置信度检验, 表现为极显著正相关, 这一分析结果与我国北方其他半干旱地区树轮宽度年表对 PDSI 的响应结果一致 (张芬等, 2017)。油松树轮宽度年表与 scPDSI、温度和降水的相关分析结果表明, 在研究区干旱胁迫是限制人工林

油松生长的主要原因。

表 1 辽西油松标准年表主要统计特征
Tab.1 Statistic characteristics of tree-ring standard chronology

项目	Item	参数值	Parameter
时间跨度	SSS>0.85	1983—2012	
平均敏感度	MS	0.281	
标准差	SD	0.200	
信噪比	SNR	17.173	
树间相关系数	Rbar	0.484	
样本代表性	EPS	0.945	

2.3 径向生长与其他生长期参数的相关分析

积温是针对日平均温度而言的, 日平均温度比日最高、日最低温度更能较全面地反映出一天中温度的平均状况, 但极端温度更能触发树木生长发育变化机制 (Li et al, 2017), 因此本文利用日平均温度、日最高、日最低温度分别计算积温, 并分别与年表做相关分析, 如图 3 所示。

经计算, 日平均温度、日最高、日最低温度范围均在 $0—15^{\circ}\text{C}$, 年表与平均温和最高温各阈值生长期参数的相关性并不是很显著, 但与最低温各阈值生长期参数的相关性较好。年表与积温、生长持续天数大都呈负相关 (图 3a、3b), 相关系数呈波动变化, 其相关性在最低温度 $9.5—12.5^{\circ}\text{C}$ 阈值下, 均通过了 99% 的置信度检验, 尤其在最低温度 11.0°C 时, 年表与积温、生长持续天数的相关系数分别为 -0.619 、 -0.732 。这些阈值温度对应了 4 月末及 5 月这一时间段, 说明油松早期生长受此时段温度的控制, 但随着温度阈值的提高、生长天数的增加, 树木的生长反而受制约。

树木形成层活动的初始日期受外界环境的强烈影响, 并且树木的最大生长率与温度密切相关 (Begum et al, 2010)。如图 3c 所示, 年表与平均气温和最低温度初始日期几乎都呈正相关。其中, 年表与 $2.5—3.5^{\circ}\text{C}$ 阈值的平均温度初始日期显著正相关 ($p < 0.05$), 与 9.5°C 、 10.5°C 、 11.0°C 、 11.5°C 阈值的最低温初始日期极显著正相关 ($p < 0.01$), 与最高温的初始日期相关性低。年表与终止日期正相关说明终日时间越迟越能促进树木径向生长, 负相关则说明终日时间越迟对树木径向生长越不利。如图 3d 所示, 在 $0—15^{\circ}\text{C}$ 阈值范围内, 年表与平均气温的终止日期在 0.5°C 和 6.0°C 时表现为显著正相关 ($p < 0.05$), 相关系

数为0.419、0.428,在较高温度阈值下表现为负相关;年表与最低气温的终止日期几乎都呈负相关,说明最低温终日序列的延后会抑制树木径向生

长,在12.5℃时表现最明显,相关系数为-0.365($p < 0.05$);年表与最高温的终止日期均未表现出显著相关性。

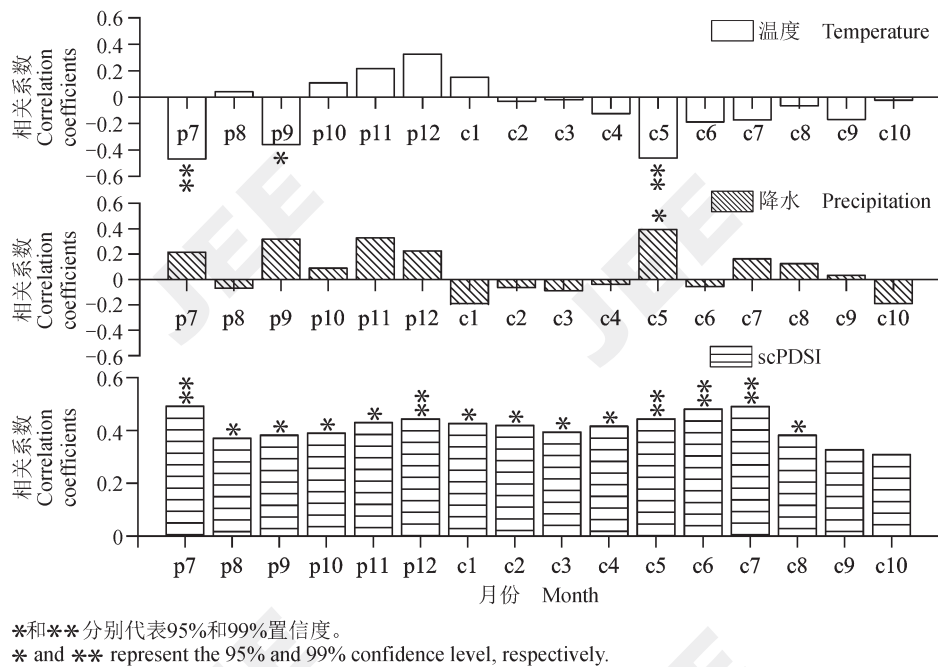


图2 树轮宽度标准年表与月气候因子的相关系数

Fig.2 Correlation coefficients between tree-ring standard chronology and monthly climatic factors

为进一步判断油松生长变化,本文采用气象数据通过V-S模型对其生长情况进行拟合,通过多次比较(Evans et al, 2006),确定出与年表拟合效果最好的参数值(表2),其模拟出的树轮指数变化如图4所示,模拟后的树轮年表与STD年表相关系数为0.619,经过5年滑动处理后,模拟数值与STD年表数值相关系数为0.693,均通过99%的显著性检验(图4a)。模拟序列与实测序列吻合度较好,辽西丘陵人工林油松的径向生长基本符合V-S模型机制,因此利用该模型揭示人工林油松生长与气候因子的关系具有可行性,同时油松径向生长与其限制性气候因子的关系可以从树木生理学的角度进一步探讨。在本研究中,V-S模型模拟出油松的生长期(图4b)温度从开始时的9.5℃到生长季结束时的9.1℃,持续天数从第97天到第306天,表明油松当年主要生长期为4月到10月。模拟树木样本总体平均生长速率(Gr)、土壤湿度引发的平均生长速率(GrW)及温度引发的平均生长速率(GrT)进行统计分析,模拟结果如图4c所示,树木开始生长至结束,经历了五个受不同因子影响的生长过程。从第97天树木进入生长期至GrT与GrW第一

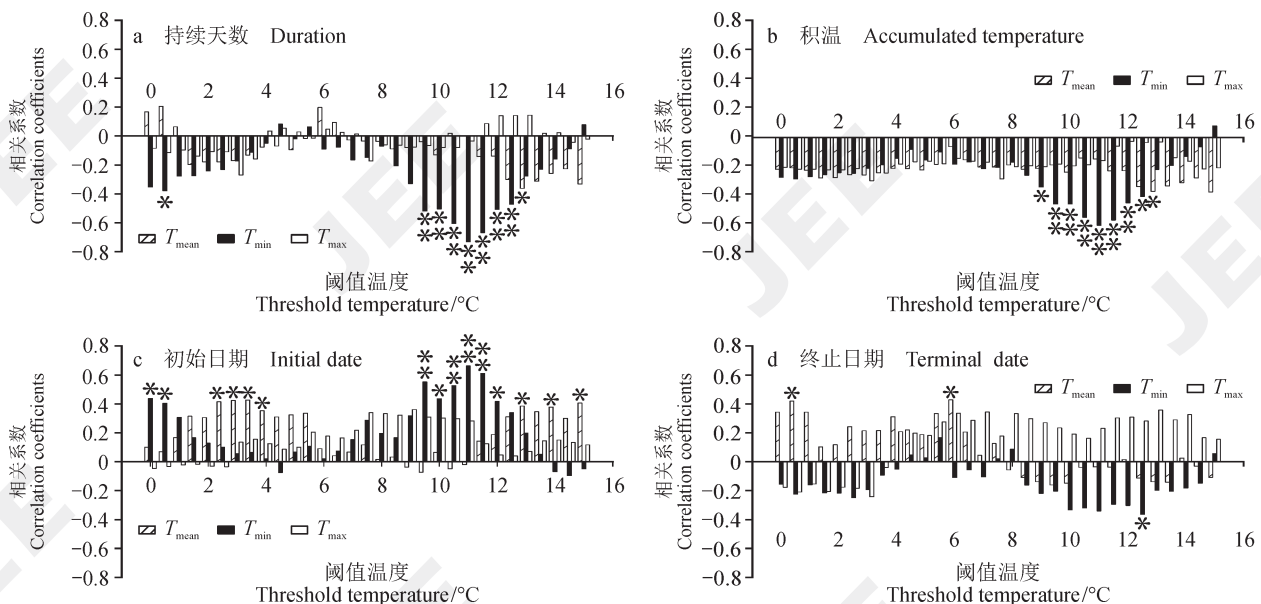
次相等(第135天),温度对树木生长的影响显著,平均生长速率较快;在第136天至第二次相等(第189天),树木形成层开始形成后,温度基本满足年轮的生长,由于降水量少,土壤湿度对树木生长的影响显著,同时平均生长速率放缓;在第190天至第三次相等(第233天)期间,主要降水季到来使树木生长所需的土壤湿度有保证,形成层细胞的增加、年轮的形成受到温度的影响;在第234天至第四次相等(第274天)期间,由于降水量的减少,树木生长受到土壤湿度的影响;第274天之后至生长结束日,生长再次受到温度的影响。

3 讨论

一般来说,在半干旱地区水分和温度对植被覆盖和径向生长有较大影响(Chen et al, 2012),高温会导致蒸发量增大,树木的蒸腾作用加强,同时降水匮乏,土壤和树干内部水分缺失,导致窄轮的形成。根据辽宁西部农作物生长季各月干湿指数时间分布情况,西北部低山丘陵5月属于重旱气候类型(高淑新等, 2017)。从5月温度、降水的年际变化可以看出(图5a),年表与

气候变化趋势相近,对气候的响应表现得很好:1985—1998 年树轮指数有明显增加趋势,对比该时段 5 月温度、降水的趋势线,温度降低或平稳,加之降水增多,会促进树木的径向生长;同时,

窄轮与极端天气高度吻合,如 1999—2005 时段。根据先前气象资料,2000 年我国北方遭受了范围广、持续时间长的旱灾,春夏连旱严重(包光等,2015),对农林业造成重大影响。



*和** 分别代表95%和99%置信度。

* and ** represent the 95% and 99% confidence level, respectively.

图 3 树轮宽度标准年表与不同阈值生长参数的相关系数

Fig.3 Correlation coefficients between tree-ring standard chronology and different threshold growth parameters

表 2 辽西油松生理过程模拟参数

Tab.2 Physiological process simulation parameters based on VS mode

参数指标	Parameters	取值	Numerical value
最低生长温度	$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	9	
最适生长温度下限	$T_{\text{opt}1}/^{\circ}\text{C}$	13	
最适生长温度上限	$T_{\text{opt}2}/^{\circ}\text{C}$	24	
最高生长温度	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	31	
生长的最低土壤湿度	$W_{\min}$	0.01	
生长的最优土壤湿度下限	$W_{\text{opt}1}$	0.15	
生长的最优土壤湿度上限	$W_{\text{opt}2}$	0.8	
生长的最高土壤湿度	$W_{\max}$	0.9	
开始生长的积温	$T_{\text{beg}}/^{\circ}\text{C}$	60	

利用功率谱方法对 1983—2012 年 scPDSI 指数与树轮进行周期分析(图 5b)。结果表明:在 $p < 0.1$ 的显著性水平下,1983—2012 年树轮指数存在着 10.8 a、6.3 a、4.9 a、4 a、3.3 a 的变化准周期,而 1983—2012 年 scPDSI 指数存在着 12.5 a、8 a、4.8 a、4 a 的变化准周期。两者的振荡周期有一定的相似性,这与已有的 scPDSI 指数变化周期存在于我国北方地区树轮研究的结果

相一致(Zhang et al, 2017)。

以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温定义作物的活动积温,但不同地理环境会影响不同树木生长发生时的阈值温度,例如:乌鲁木齐河山区云杉生长的敏感温度为 5.7°C (袁玉江等,2005),神农架地区巴山冷杉开始径向生长的下限温度基本在 9°C 左右(侯鑫源等,2015),川西高原岷江冷杉在 7°C 时生长季开始、到 9.5°C 时生长季结束(郭滨德等,2019),而本研究中人工林油松的生长季从 9.5°C 开始;此外,也有大多数研究表明,在寒冷气候中生长的针叶树木质部活动可以在日最低气温 $\geq 4-5^{\circ}\text{C}$ 时发生(Boulouf Lugo et al, 2010; Rossi et al, 2008)。一些重要的最低温所起到的阈值效应比热积累效应更能影响树木的生长(Li et al, 2017),如图 3 所示,平均温 $2.5-3.5^{\circ}\text{C}$ 阈值、最低温 $0-0.5^{\circ}\text{C}$ 阈值下,初日位序的提前能加快冻土层化通(宗艳伟和宗英飞,2013),保证生长所需的土壤湿度,但达不到生长所需热量会抑制树木径向生长。本研究在最低温 11°C 阈值下,年表与生长参数的相关系数均通过 95% 的信度检验,年表对其变化敏感,最低温 11°C

发生在降水较少、干旱严重的5月, 积温的增加和持续时间的延长都会抑制树木生长, 所以木质部在适宜环境下产生细胞的速率比生长持续时间的长短更能决定树木的生长, 尤其在干旱条件下, 土壤湿度降低会减少树木的光合作用效率, 使得树木的真实生长时间缩短 (Ren et al, 2015)。

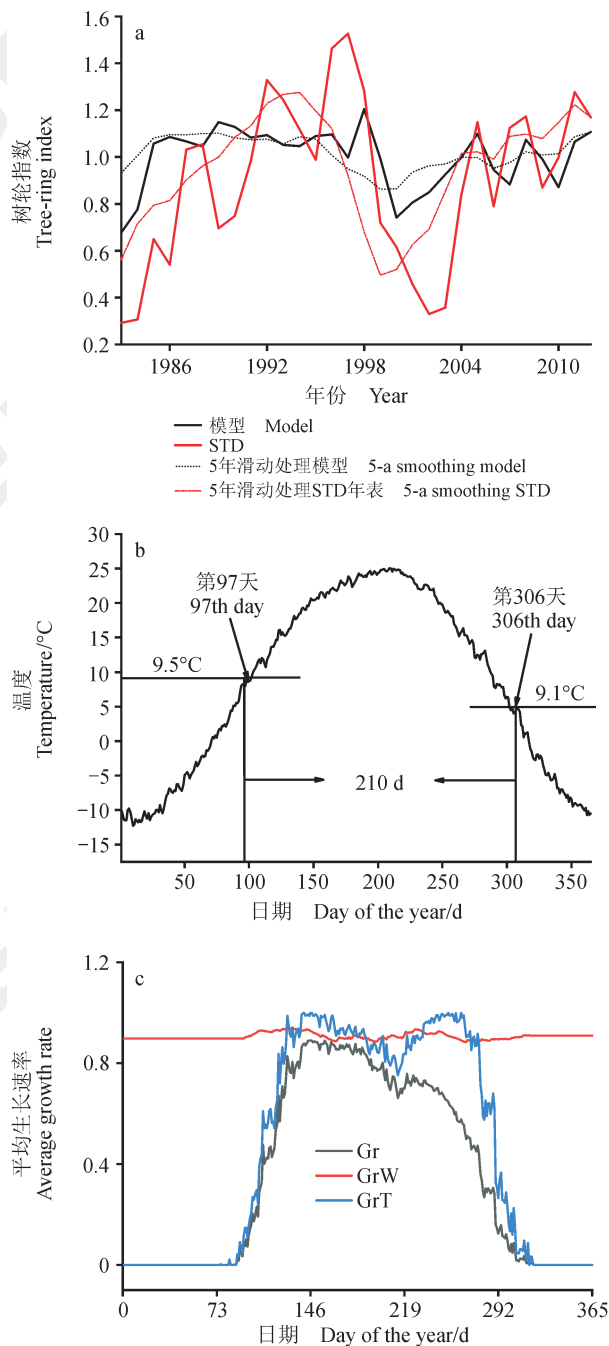


图4 V-S 模拟出树轮宽度指数年际变化 (a)、生长期变化 (b) 及平均生长速率 (c)

Fig.4 Simulated variability of tree-ring width index (a), the growth period (b) and the average growth rate (c)

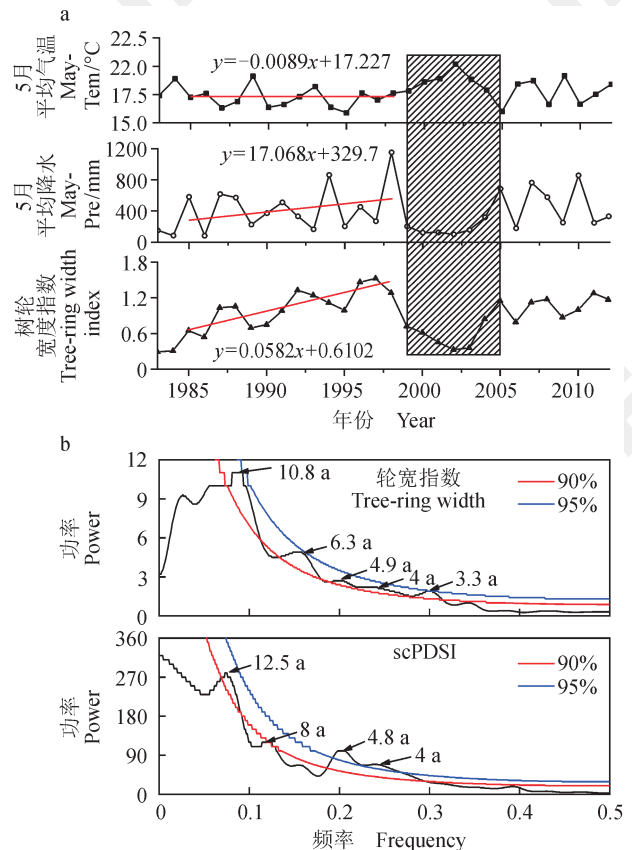


图5 树轮宽度指数与当年5月温度、降水年际变化的比较 (a), 与 scPDSI 周期变化的比较 (b)

Fig.5 Compared the tree-ring width index and interannual temperature and precipitation in May of the same year (a), and scPDSI with periodic changes (b)

根据 V-S 模型模拟出的参数, 不同树种对环境因子的响应不同, 例如与秦岭太白红杉得到的参数 (陈兰等, 2017) ($W_{\min}=0.04$, $W_{\text{optl}}=0.17$) 相比, 本研究中树木生长的最低土壤湿度和最适土壤湿度下限较低, 这可能是由于半湿润地区与半干旱地区降水不同, 辽西丘陵地区树木生长受水分胁迫, 需要充分水源保证树木生长, 对土壤水分的利用率高于秦岭区域; 不同地区的同一树种对环境因子的响应也不同, 例如与贺兰山油松参数 (Vaganov and Shishov, 2015) ($T_{\min}=5$, $T_{\text{optl}}=20$) 相比, 辽西油松生长的最低温度和最适宜生长温度下限较高, 贺兰山油松部分采样点为生长在岩石缝隙的孤树, 接收到的光照和热量较多, 能在温度较低的情况下生长, 而本文中油松生长在人工种植林中, 树间存在竞争关系, 生长环境、光照条件较差, 需要较高的温度才能开始生长。热量资源对林业生产十分重要, 很多研究都强调温度对木质部的显著影响 (Deslauriers et al,

2008; Ziaco and Biondi, 2016), 气候变暖导致热量条件和生长期发生变化, 从而促使各物种对其变化产生相应的响应机制。由模拟结果(图 4c)可知, 辽西人工林油松生长速率的差异体现在温度和土壤湿度上, 生长开始和结束时间均会受到温度的影响, 而树木形成层开始形成后, 土壤湿度对树木的形成会有很大的限制作用。由于辽西丘陵区水热配置不平衡, 导致树木在生长期前期的温度与土壤湿度交互影响临界点前后, 平均生长速率出现短暂的峰值, 之后平均生长速率逐渐减小, 在生长期末期又会出现低于前期的小峰值, 就植物的碳效应而言, 尽早开始生长可能比将光合作用延长到秋季更利于生长(Rossi et al, 2006)。

4 结论

以辽宁西部半干旱区的人工林油松为研究对象, 建立了长度为 30 a 的树轮宽度年表, 采用树轮气候学方法分析了人工林油松径向生长对气象要素及生长期其他参数的响应, 同时利用 V-S 模型模拟了人工林油松的生理过程并取得了较好的应用结果, 该模型能够很好地反映不同时段人工林油松的限制性生长因子, 得到如下结论: (1) 油松标准宽度年表与上年 7 月、9 月及当年 5 月的气温呈负相关, 相关系数为 -0.457 、 -0.426 、 -0.471 ($p < 0.05$), 与当年 5 月的降水量呈正相关, 相关系数为 0.52 ($p < 0.05$), 因此树木的径向生长受到当年 5 月温度和降水的影响; 年表与 scPDSI 相关性高, 并表现出相近的周期变化, 说明干旱胁迫是油松生长对气候响应的主要原因; (2) 在不同阈值温度下, 辽西人工林油松径向生长与生长期活动积温和持续天数呈负相关, 由高温引起的水分蒸发是影响其径向生长的关键因子。最低温 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 阈值下对树木生长期影响大, 年表与其初日位序、积温、持续天数的相关系数分别达到 0.663 、 -0.619 、 -0.732 ($p < 0.01$); (3) 通过 V-S 模型模拟出辽西油松的生长对春季的 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和秋季的 $9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 较敏感, 生长期为 4 月至 10 月, 生长速率的变化受温度和土壤湿度变化的影响。随着全球温度的逐渐升高, 春季温度的初日时间提早和秋季的终日时间延迟导致生长期增长, 生长期内的活动积温也增加, 受水分胁迫的人工林油松有生长不佳的风险, 尽管该区树轮宽度年表与气候要素的相关系数达不到气候重建的标准, 但对认识未

来全球变暖背景下辽西地区人工林油松对气候的响应具有重要意义, 能为营林造林的关键步骤提供参考。

参考文献

- 包光, 刘娜, 刘禹. 2015. 秦岭中、西部地区温度变化的树木年轮记录[J]. *地球环境学报*, 6(3): 154–160. [Bao G, Liu N, Liu Y. 2015. Temperature variability referred from tree rings in central and western Qinling Mountains, China [J]. *Journal of Earth Environment*, 6(3): 154–160.]
- 包光, 刘禹, 刘娜, 等. 2013a. 蒙古高原东部和南部气候要素变化特征及其生态环境影响分析[J]. *地球环境学报*, 4(5): 1444–1449, 1460. [Bao G, Liu Y, Liu N, et al. 2013a. Characteristics of climate changes during the instrumental period in the eastern and southern Mongolian Plateau and their ecological-environmental effects [J]. *Journal of Earth Environment*, 4(5): 1444–1449, 1460.]
- 包光, 刘禹, 刘娜. 2013b. 内蒙古呼伦贝尔地区伊敏河过去 135 年以来年径流总量的树轮重建[J]. *科学通报*, 58(12): 1147–1157. [Bao G, Liu Y, Liu N. 2013b. A tree-ring-based reconstruction of the Yimin River annual runoff in the Hulun Buir region, Inner Mongolia, for the past 135 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(12): 1147–1157.]
- 包光. 2014. 海拉尔樟子松年轮生长与北大西洋涛动 / 北极涛动的联系[J]. *宝鸡文理学院学报 (自然科学版)*, 34(2): 39–45. [Bao G. 2014. Relationships between tree-ring growth of Hailar pine and the North Atlantic Oscillation / Arctic Oscillation [J]. *Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition)*, 34(2): 39–45.]
- 陈兰, 李书恒, 侯丽, 等. 2017. 基于 Vaganov-Shashkin 模型的太白红杉径向生长对气候要素的响应[J]. *应用生态学报*, 28(8): 2470–2480. [Chen L, Li S H, Hou L, et al. 2017. Response of *Larix chinensis* radial growth to climatic factors based on the Vaganov-Shashkin model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28(8): 2470–2480.]
- 丁一汇, 王绍武, 郑景云, 等. 2013. 中国气候[M]. 北京: 科学出版社: 404–406. [Ding Y H, Wang S W, Zheng J Y, et al. 2013. Climate in China [M]. Beijing: Science Press: 404–406.]
- 封晓辉. 2011. 气候变化对中国马尾松径向生长的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院. [Feng X H. 2011. The effect of climate change on radial growth of Masson pine in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry.]
- 高淑新, 陈鹏心, 侯婉婷. 2017. 辽宁中西部气候干旱周

- 期及降水满足程度研究[J]. *湖北农业科学*, 56(22): 4289–4294. [Gao S X, Chen P X, Hou W T. 2017. Research on climatic drought cycle and precipitation satisfaction degree of Liaoning Midwest area [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 56(22): 4289–4294.]
- 郭滨德, 王晓春, 张远东. 2019. 阈值温度和积温对川西高原林线岷江冷杉径向生长的影响[J]. *生态学报*, 39(3): 895–904. [Guo B D, Wang X C, Zhang Y D. 2019. Effects of accumulated and threshold temperatures on the radial growth of *Abies faxoniana* in the alpine timberline, Western Sichuan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(3): 895–904.]
- 侯鑫源, 史江峰, 李玲玲, 等. 2015. 湖北神农架巴山冷杉径向生长对气候的响应[J]. *应用生态学报*, 26(3): 689–696. [Hou X Y, Shi J F, Li L L, et al. 2015. Growth response of *Abies fargesii* to climate in Shennongjia Mount of Hubei Province, southeastern China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26(3): 689–696.]
- 贾飞飞, 孙翠洋, 孙红月, 等. 2019. 昌岭山两个优势树种径向生长对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 39(17): 6332–6340. [Jia F F, Sun C Y, Sun H Y, et al. 2019. Responses of radial growth of two dominant tree species to climate change on Changling Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(17): 6332–6340.]
- 梁非凡, 朱清科, 王露露, 等. 2015. 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)*, 43(5): 33–41. [Liang F F, Zhu Q K, Wang L L, et al. 2015. Influence of climate factors on radial growth of *Pinus tabulaeformis* in loess area of Northern Shaanxi [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 43(5): 33–41.]
- 梁慧敏, 魏江生, 贺敏, 等. 2019. 大兴安岭南段华北落叶松人工林径向生长对气候变化的响应[J]. *温带林业研究*, 2(3): 31–36, 62. [Liang H M, Wei J S, He M, et al. 2019. Response of radial growth of *Larix principis-rupprechtii* plantation to climate change in southern part of Great Xing'an Mountains [J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2(3): 31–36, 62.]
- 彭俊杰, 何兴元, 陈振举, 等. 2012. 华北地区油松林生态系统对气候变化和CO₂浓度升高的响应——基于BIOME-BGC模型和树木年轮的模拟[J]. *应用生态学报*, 23(7): 1733–1742. [Peng J J, He X Y, Chen Z J, et al. 2012. Responses of *Pinus tabulaeformis* forest ecosystem in North China to climate change and elevated CO₂: a simulation based on BIOME-BGC model and tree-ring data [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(7): 1733–1742.]
- 吴传钧, 刘昌明, 吴履平. 1999. 世纪之交的中国地理学[M]. 北京: 人民教育出版社: 12–25. [Wu C J, Liu C M, Wu L P. 1999. Chinese geography at the turn of the century [M]. Beijing: People's Education Press: 12–25.]
- 徐静, 郭滨德, 孙洪志. 2016. 帽儿山地区不同种源樟子松树轮对气候因子的响应[J]. *林业科学研究*, 29(4): 581–586. [Xu J, Guo B D, Sun H Z. 2016. Tree ring response of Scots pine provenances to climate factors at Mao'ershan, northeastern China [J]. *Forest Research*, 29(4): 581–586.]
- 袁玉江, 邵雪梅, 魏文寿, 等. 2005. 乌鲁木齐河山区树木年轮-积温关系及≥5.7℃积温的重建[J]. *生态学报*, 25(4): 756–762. [Yuan Y J, Shao X M, Wei W S, et al. 2005. On the relationship between tree-ring and cumulative temperature in mountainous area of Urumqi River and reconstruction of ≥5.7℃ cumulative temperature [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 25(4): 756–762.]
- 张芬, 陈巧涓, 苏佳佳, 等. 2017. 树轮记录的西北季风边缘区干旱变化[J]. *冰川冻土*, 39(2): 245–251. [Zhang F, Chen Q M, Su J J, et al. 2017. Tree-ring recorded of the drought variability in the northwest monsoon marginal, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 39(2): 245–251.]
- 宗艳伟, 宗英飞. 2013. 辽宁西部地区冻土深度特征变化[J]. *宁夏农林科技*, 54(3): 56–58. [Zong Y W, Zong Y F. 2013. Frozen soil depth change characteristics of the western region of Liaoning [J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 54(3): 56–58.]
- Begum S, Nakaba S, Oribe Y, et al. 2010. Cambial sensitivity to rising temperatures by natural condition and artificial heating from late winter to early spring in the evergreen conifer *Cryptomeria japonica* [J]. *Trees*, 24(1): 43–52.
- Boulouf Lugo J, Deslauriers A, Rossi S. 2012. Duration of xylogenesis in black spruce lengthened between 1950 and 2010 [J]. *Annals of Botany*, 110(6): 1099–1108.
- Chen Z J, Li J B, Fang K Y, et al. 2012. Seasonal dynamics of vegetation over the past 100 years inferred from tree rings and climate in Hulunbeier steppe, northern China [J]. *Journal of Arid Environments*, 83: 86–93.

- Cook E R, Kairiukstis L A. 1990. Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Deslauriers A, Rossi S, Anfodillo T, et al. 2008. Cambial phenology, wood formation and temperature thresholds in two contrasting years at high altitude in southern Italy [J]. *Tree Physiology*, 28(6): 863–871.
- Elliott K J, Miniati C F, Pederson N, et al. 2015. Forest tree growth response to hydroclimate variability in the southern Appalachians [J]. *Global Change Biology*, 21(12): 4627–4641.
- Evans M N, Reichert B K, Kaplan A, et al. 2006. A forward modeling approach to paleoclimatic interpretation of tree-ring data [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G3). DOI: 10.1029/2006JG000166.
- FAO. 2010. Global forest resources assessment 2010: main report [R]. FAO Forestry Paper 163, Rome: FAO.
- Fritts H C. 2001. Tree rings and climate [M]. Caldwell: Blackburn Press.
- Holmes R L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 44(3): 69–75.
- Jian S Q, Wu Z N, Hu C H. 2019. Estimation of water use of *Pinus tabulaeformis* Carr. in Loess Plateau of northwest China [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 67(3): 271–279.
- Li X X, Liang E Y, Gričar J, et al. 2017. Critical minimum temperature limits xylogenesis and maintains treelines on the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Science Bulletin*, 62(11): 804–812.
- Liang E Y, Eckstein D, Liu H Y. 2008. Climate-growth relationships of relict *Pinus tabulaeformis* at the northern limit of its natural distribution in northern China [J]. *Journal of Vegetation Science*, 19(3): 393–406.
- Liu N, Bao G, Liu Y, et al. 2019. Two centuries-long streamflow reconstruction inferred from tree rings for the middle reaches of the Weihe River in central China [J]. *Forests*, 10(3). DOI: 10.3390/f10030208.
- Liu Y, Wang Y C, Li Q, et al. 2015. A tree-ring-based June–September mean relative humidity reconstruction since 1837 from the Yiwulü Mountain region, China [J]. *International Journal of Climatology*, 35(7): 1301–1308.
- Monteith J L. 1981. Climatic variation and the growth of crops [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107(454): 749–774.
- Parnesan C, Yohe G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, 421(6918): 37–42.]
- Ren P, Rossi S, Gričar J, et al. 2015. Is precipitation a trigger for the onset of xylogenesis in *Juniperus przewalskii* on the north-eastern Tibetan Plateau? [J]. *Annals of Botany*, 115(4): 629–639.
- Root T L, Price J T, Hall K R, et al. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants [J]. *Nature*, 421(6918): 57–60.
- Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, et al. 2006. Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length [J]. *New Phytologist*, 170(2): 301–310.
- Rossi S, Deslauriers A, Gričar J, et al. 2008. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 17(6): 696–707.
- Wang Y C, Liu Y. 2017. Reconstruction of March–June precipitation from tree rings in central Liaoning, China [J]. *Climate Dynamics*, 49(9/10): 3111–3121.
- Zhang L X, Zhou T J. 2015. Drought over East Asia: a review [J]. *Journal of Climate*, 28(8): 3375–3399.
- Zhang X J, Liu Y, Song H M, et al. 2017. Interannual variability of PDSI from tree-ring widths for the past 278 years in Baotou, China [J]. *Trees*, 31(5): 1531–1541.
- Ziaco E, Biondi F. 2016. Tree growth, cambial phenology, and wood anatomy of limber pine at a Great Basin (USA) mountain observatory [J]. *Trees*, 30(5): 1507–1521.