

DOI: 10.5846/stxb201910212210

李宗善, 陈维梁, 韦景树, 买尔当·克依木, 张育新, 张霜, 王晓春. 北京东灵山辽东栎林树木生长对气候要素的响应特征. 生态学报, 2021, 41(1): 27-37.

Li Z S, Chen W L, Wei J S, Maierdang K Y M, Zhang Y X, Zhang S, Wang X C. Tree-ring growth responses of Liaodong Oak (*Quercus wutaishanica*) to climate in the Beijing Dongling Mountain of China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 27-37.

北京东灵山辽东栎林树木生长对气候要素的响应特征

李宗善^{1,2}, 陈维梁^{1,2}, 韦景树¹, 买尔当·克依木¹, 张育新^{1,*}, 张霜¹, 王晓春³

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040

摘要: 根据北京东灵山辽东栎 (*Quercus wutaishanica*) 的年轮宽度资料, 分析了该地区树木生长在 1951—2010 年时段对气候要素的响应特征。相关分析表明, 夏季干旱胁迫是限制东灵山辽东栎树木生长的最为重要的气候要素, 主要体现在与夏季 (7—9 月) 温度的负相关关系和夏季降雨 (7 月) 的正相关关系, 另外春季 (5 月) 温度对树木生长也有一定的限制性影响; 年表与生长季节干旱指数普遍呈正相关关系, 进一步证实了干旱胁迫对树木生长的限制性作用。滑动相关分析表明, 年表与夏季温度负相关关系及与夏季降雨的正相关关系在近期趋于增强, 这表明夏季干旱胁迫对树木生长影响作用有不断加强的趋势。辽东栎林是北京东灵山温带落叶阔叶林的优势群落, 在暖干化气候不断发展背景下, 辽东栎林生长的干旱胁迫效应将更加突出, 对北京东灵山地区森林的生产力及固碳能力产生负面影响。

关键词: 树木年轮; 气候响应; 干旱胁迫; 北京东灵山

Tree-ring growth responses of Liaodong Oak (*Quercus wutaishanica*) to climate in the Beijing Dongling Mountain of China

LI Zongshan^{1,2}, CHEN Weiliang^{1,2}, WEI Jingshu¹, MAIERDANG Keyimu¹, ZHANG Yuxin^{1,*}, ZHANG Shuang¹, WANG Xiaochun³

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Forestry, Northeast Forestry University, 26 Hexing Road, Harbin 150040, China

Abstract: Based on tree-ring width data of *Quercus wutaishanica* forest in Beijing Dongling Mountain, we detected response sensitivity of radial growth to local climate variables during the overlap period (1951—2010) between tree ring and climate data. Correlation analysis indicated that yearly growth was strongly correlated with summer temperature (from July to September) and precipitation (July), indicating summer drought stress was the major constraint for tree growth. Tree radial growth was also positively correlated with growing season (from April to October) Palmer Drought Severity Index (PDSI), further confirming high sensitivity of tree growth to moisture condition. Additionally, climate condition in spring had a partial influence on tree growth, representing the significantly negative correlation with May temperature. Moving correlation analysis revealed that the relationship between tree rings and summer temperature (negative) and precipitation (positive) has become strengthened in the recent years. This predominantly show that the influence of summer drought stress on radial growth becomes more evident recently. Climate change models predict higher temperatures and increasing drought stress in

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501602); 国家自然科学基金 (31971481)

收稿日期: 2019-10-21; 修订日期: 2020-06-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yxzhang@cees.ac.cn

the study area. The elevated dry climate will increasingly threaten *Q. wutaishanica* forest growth, allowing a downward trend in Net Primary Production (NPP), and the weakened ability of terrestrial carbon sink of local forests should be expected.

Key Words: tree growth; climate response; drought stress; Beijing Dongling Mountain

森林是陆地生态系统重要类型,森林生物量和生产力分别占陆地生态系统的 45% 和 50%,森林生态系统可以固定人类排放到大气中的二氧化碳总量的 25%,是地球上重要碳汇^[1-2]。森林生长对极端干旱气候响应也是非常敏感的,2000—2009 年是器测观测以来最热的十年,期间发生的区域干旱事件导致全球森林净初级生产力(NPP)出现明显下降,下降速率达每年 5.5 亿吨碳,且生产力下降最为明显的区域出现在热带亚马逊、印度尼西亚和非洲地区^[3];2003 年欧洲热浪导致区域植被 NPP 下降 30%,相当于植被减少 5 亿吨碳固定量,使欧洲地区从碳汇变成碳源^[4]。已有大量研究表明,气候变暖引发的区域尺度干旱胁迫,已使得世界许多地区出现了森林生长衰退和树木死亡现象,严重削弱了森林生态系统固碳能力^[5-6]。

华北地区属于暖温带半干旱半湿润季风气候区,降雨时空分布不均匀,年际间变化波动大,极端干旱年份发生频率也较高;20 世纪 80 年代至今,华北地区降雨呈不断减少趋势,气候整体上呈现暖干化的趋势^[7]。从器测 1951—2013 年时段,华北地区年总降雨量呈波动下降趋势,时段内线性减少趋势约为 10%^[7];从年轮和石笋重建的降雨波动历史来看,华北地区从 20 世纪中期开始的干旱时期在过去数百年尺度上也是较为明显的^[8-9]。在 2001—2014 年时段,华北地区大部分区域植被覆盖度指数 NDVI 和植被 NPP 与干旱指数呈显著正相关关系,且以生长季夏季的相关程度最高,可见干旱气候胁迫已经成为华北地区植被生长最为重要的限制性因素^[10-11]。

辽东栎是壳斗科栎属的落叶树种,是我国暖温带阔叶落叶林的主要优势种之一,在北京东灵山地区辽东栎林是分布最广的林型,是该地区的地带性植被,对暖温带落叶阔叶林的外貌、结构、动态及物种组成都有重要作用。目前对东灵山辽东栎群落区系组成^[12]、植物多样性特征^[13]、群落结构^[14]、空间分布、植物功能性状^[15]、群落动态和功能^[16]都已经有了大量报道,然而关于辽东栎林的树木年轮学研究在东灵山地区还未引起人们足够的重视。本文基于北京东灵山辽东栎林的树木年轮宽度材料,分析了辽东栎树木生长对干旱胁迫气候的响应特征,为在全球变暖背景下该地区暖温带落叶阔叶林的可持续保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京东灵山位于北京市西郊的门头沟区(115°26'E—115°30'E, 40°00'N—40°03'N),与河北省毗邻,距市区约 100 km,东灵山为小五台山余脉,属太行山系(图 1)。海拔高度多在 1000 m 以上,最高峰为 2303 m^[13]。地质构造上位于华北陆台中部的燕山沉降带,地貌以山地侵蚀结构类型为主,地势陡峭,河流下切严重。地带性土壤类型为肥沃褐色土和棕色森林土^[14]。该地区属于暖温带半湿润大陆季风气候,寒冷期长,积温低,冻土期长,生长季短,年均 5—10℃,无霜期约 195 d,年降雨量为 500—650 mm,多集中于夏季,春旱严重。植被为暖温带落叶阔叶林,辽东栎为该区的地带性植被,主要分布在海拔 800—1700 m 范围,但由于人类活动的影响,辽东栎在海拔 1000 m 以下已不多见。本区植

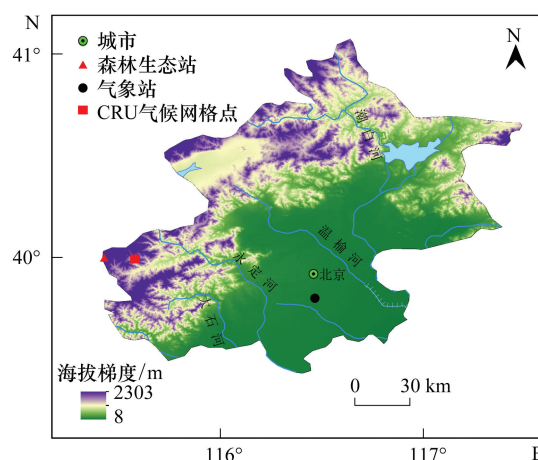


图 1 北京东灵山树木年轮采样点和气象站分布图

Fig.1 Location map of tree-ring sample site and meteorological station in Beijing Dongling Mountain of China

物区系丰富,共计 127 科、476 属、997 种,其重要来源是第三纪植物区系后裔,温带成为最为突出^[12]。

1.2 年轮样品采集及处理

本文所用辽东栎树轮资料是 2011 年 9 月在北京东灵山东南坡采集的,采样地点(115.43°E, 40°N)在北京森林生态定位生态站东南方向约 3 km,采样点海拔高度为 1400 m。选择辽东栎林分布典型、受人为活动干扰较少的地段采集年轮样品;为获得较长的树木年轮样本,在树轮样品采集点选择年龄较老的树木个体获取样本。样芯采集通常在胸高部位,在垂直于山坡方向上用生长锥钻取树轮样本。取到的样芯放置在塑料样管内,并在样管上用油性笔标注代码。本研究每棵树采集一根树轮样芯,最终获得 78 根年轮样芯。

样品预处理基本按照 Stokes 和 Smiley^[17]的方法进行。首先将样品放置于平坦处晾干,然后将其粘在特制的木槽中;将粘牢的样芯依次用颗粒由粗到细(280—800 目)的砂纸进行打磨。

1.3 树轮年表构建

样本经预处理后,用骨架示意图进行交叉定年^[18],然后使用 LINTAB5.0 年轮分析仪对树木年轮宽度逐年进行测量,该测量系统精度可达 0.01 mm。利用 COFECHA 程序^[19]对定年和测量结果进行了检验,保证定年与测量的准确性。对于那些效果较差、与主序列之间的相关系数达不到 99%置信区的样芯予以剔除,最终 66 根辽东栎树芯用于年表的构建。

经过交叉定年的年轮序列,用 ARSTAN 程序^[20]进行去趋势和标准化,这一过程消除了树木生长中与年龄增长相关联的生长趋势及部分树木之间的非一致性扰动,排除了其中的非气候信号。首先对每个年轮宽度序列进行负指数曲线拟合,以去除与树木年龄有关的生长趋势;如果不成功,则用任意斜率的线性回归进行直线拟合,并以取树轮宽序列和与其对应的生长趋势拟合曲线的比值,对所得到的去趋势年轮序列进行双韧性平均处理,合成了平均值为 1、无量纲的树轮宽度标准年表。

1.4 气象资料

北京东灵山的中国科学院北京森林生态系统定位研究站(Beijing forest ecosystem research station, BFERS)距离采样点最近(约 5 km),但是该生态站气象数据时间较短且不连续,因而无法与年轮数据进行相关分析。鉴于此,本研究的气象数据选取离采样地点最近的北京气象站(国家标准气象台站,海拔 313 m, 115.47°E, 39.8°N),其位于采样点东部约 80 km。气候资料气象数据由国家气象局(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供,区间为 1951—2010 年,气候要素包括月平均气温(TMP)、月平均最高气温(TMX)、月平均最低气温(TMN)、月降雨量(PRE)。考虑到地面气象站点与采样地点的海拔一定差异,且具有一定距离,为了能够较好反映出研究地点气候特征,本研究选取了与采样点临近(约 10 km)的 CRU 网格化气候格点数据,以期与地面气象站数据进行比对。CRU 气候格点数据从 CRU TS v. 3.22 全球气候数据库(<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrv/>)^[21]下载,时间跨度为 1951—2010 年,精度为 0.5 度(约为 25 km),共下载 4 个气候指标,平均温度、最高温度和最低温度,降雨量和 PDSI 干旱指数。

1.5 数据分析

采用相关分析统计树轮生长对于气候要素的响应,考虑到前一年气候状况对当年树木生长的影响^[18],所用气候资料的时间跨度为前一年 7 月到当年 10 月,气候要素包括月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降雨量、PDSI 干旱指数。为了能够显示树木生长与气候关系特征在时间轴上变化特征,又进一步统计了年表与气候数据的滑动相关分析,滑动窗口设定为 30 a。以上固定时间段的相关分析及滑动相关分析均用 DENDROCLIM2002 程序实现^[22],相关统计显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 研究结果

2.1 研究区气候变化特征

因地面气象站距离采样点较远,海拔也有一定差异,为验证气象站数据的可靠性,对气象站数据与 CRU 网格点数据进行了校对分析(图 2),结果表明气象站年际温度和年总降雨量与对应的 CRU 温度($R^2 = 0.94$,

$P < 0.01$) 和降雨 ($R^2 = 0.61$, $P < 0.01$) 数据均具有显著相关关系。利用两者之间的回归关系。利用气象站与 CRU 数据间的回归关系, 建立预测 CRU 年际温度 ($Y = 0.79X - 2.14$) 和年总降雨量 ($Y = 0.47X + 205.15$) 的线性模型, 发现 CRU 数据与预测序列具有较好的吻合度, 这说明气象站数据具有较好的空间代表性, 可以反映研究区的气候变化特征。

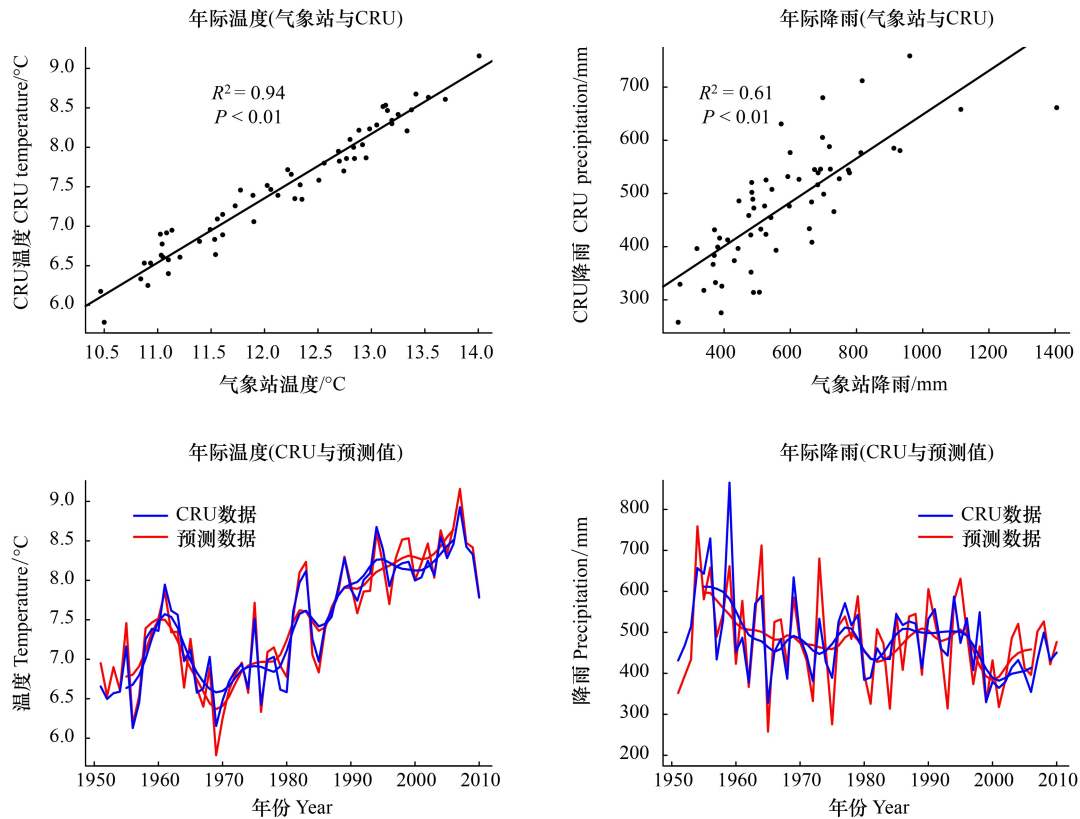


图2 北京气象站和英国气候研究所(CRU)网格点气候数据校对(1951—2010)

Fig.2 The calibration of climate data between Beijing Meteorological Station and CRU grid during 1951—2010 period

从气象站过去 60 a (1951—2010) 气候数据来看(图 3), 研究区气候总体上向暖干化趋势发展, 平均温度 (TMP) 呈显著上升趋势, 每 10 年上升 0.41°C , 其中最低温度 (TMN, 每 10 年上升 0.52°C) 上升速率明显高于最高温度 (TMX, 每 10 年上升 0.2°C), 而降雨量 (PRE) 和相对湿度 (RH) 则呈不断下降趋势, 每 10 年分别下降 44.32 mm 和 14.8%。研究区附近的 CRU 网格点的气候数据变化趋势与气象站点数据具有一致规律, 不同温度指标均有线性上升的趋势, 而降雨量和 PDSI 干旱指数则有不断下降的趋势, 气候暖干化特征非常明显。

2.2 树轮年表统计特征

本研究构建的辽东栎树轮宽度标准年表序列(简称年表)时间长度为 85 a (1926—2010 年)(图 4), 年表的起始年份(1926 年)的最低复本量为 5 根样芯, 构成该年表 66 根样芯的平均长度为 67 a, 其中, 超过 60 a 的年轮序列有 44 条, 超过 80 a 的年轮序列有 10 条, 所以该年表可较可靠地记录东灵山地区过去数十年的树木年际径向生长的波动特征。

年表的统计量特征可以反映树木生长的一些基本特征以及树轮年表所含不同频率信息量的多少(表 1)。结果表明, 不同树木年轮样本间具有较好的相关性(样芯间相关系数 $R_{\text{bar}} = 0.623$, $P < 0.01$), 表明不同样芯之间的轮宽变化有很好的一致性。各年表的一阶自相关系数为 0.236, 说明树木前一年的生长状况对当年生长的影响较小^[18]。年表的平均敏感度 (MS) 数值为 0.322, 这说明了树轮资料具有较强的高频波动信号。年表

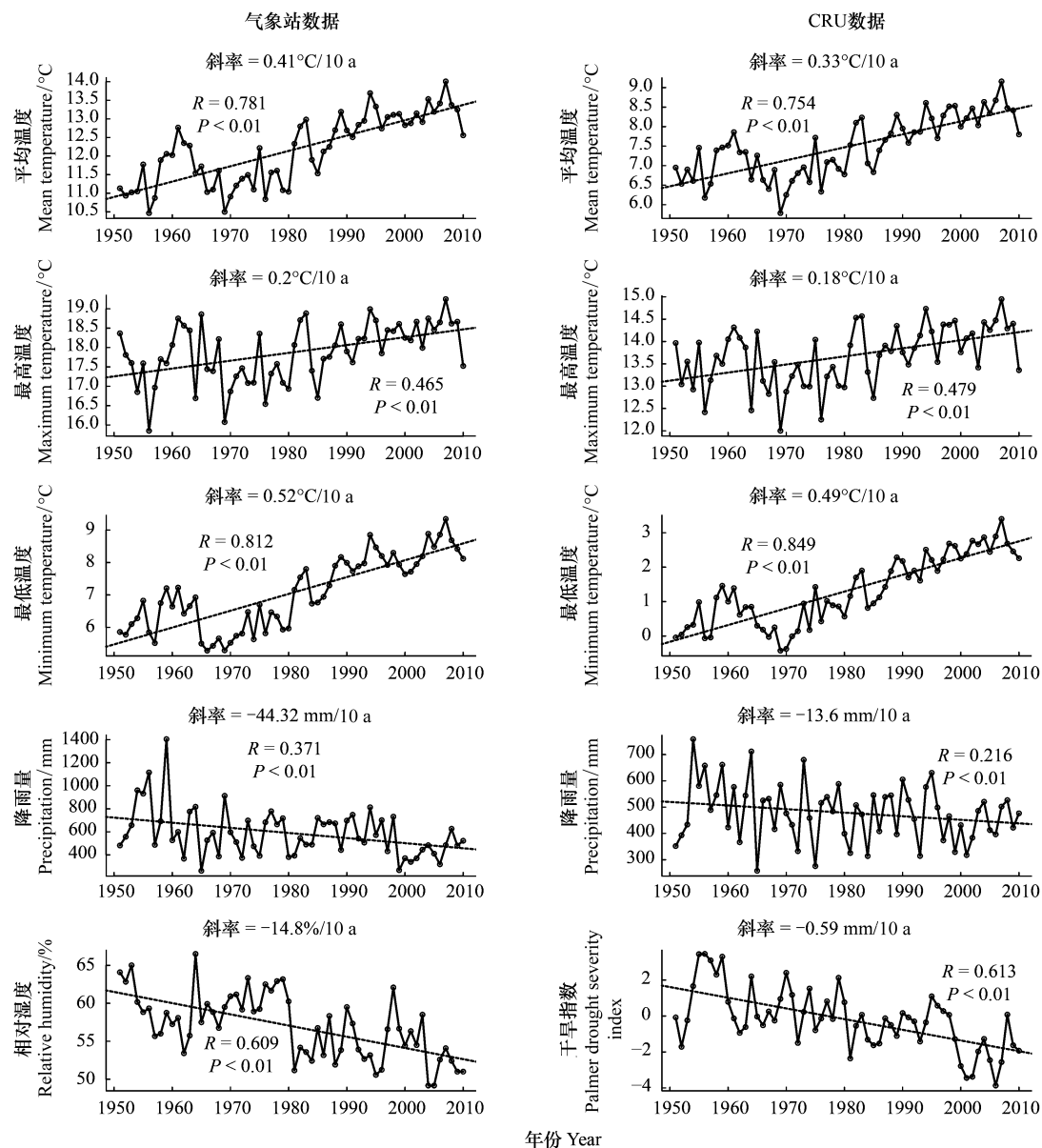


图3 北京东灵山气象站及 CRU 格点气候数据波动趋势

Fig.3 Climatic changing trend of the meteorological station and CRU grid near tree-ring site of Beijing Dongling Mountain of China

表 1 北京东灵山树轮采样点概况、标准年表主要特征参数及共同区间分析结果

Table 1 Site information, chronology statistics and results of common interval span analysis of standard tree-ring chronology from the Dongling Mountain of Beijing, China

类型 Type	地点 Location	海拔 Elevation/m	时间段 Time length	样芯数 Number of cores	SD	MS	AR1	Rbt ^a	SNR ^a	EPS ^a	VFE ^a
年轮样点 Tree ring	115.43°E, 40°N	1200	1926—2010	66	0.229	0.235	0.236	0.623	30.919	0.969	0.424
气象站 Meteorological station	115.47°E, 39.8°N	313	1951—2018	—	—	—	—	—	—	—	—
CRU 格点 CRU grid	115°E, 39.5°N	—	1901—2018	—	—	—	—	—	—	—	—

SD:标准差 Standard deviation;MS:平均敏感度 Mean sensitivity;AR1:一阶自相关 First-order autocorrelation;Rbar:样芯间相关系数 Mean inter-series correlations; SNR 信噪比 Signal-to-noise ratio;EPS 群体表达信号 Expressed population signal;VFE:第一特征向量解释量 Explained variance in first eigenvector;a 表示系数在样芯间共同区间(1957—2009)计算

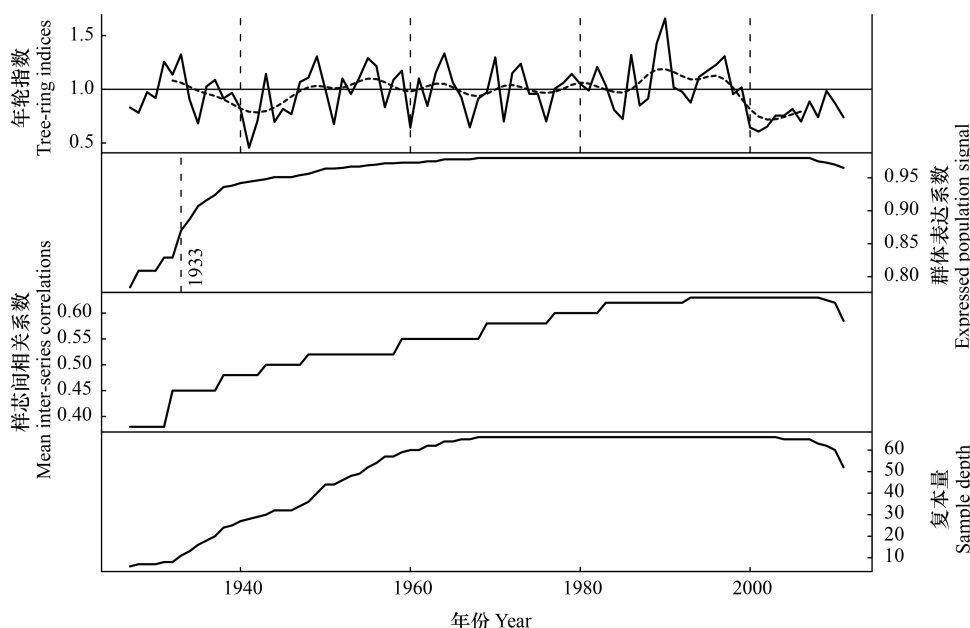


图4 北京东灵山辽东栎树轮标准年表

Fig.4 Standard tree-ring chronology of *Quercus wutaishanica* forest in Beijing Dongling Mountain of China

群体表达信号(EPS)和样芯间相关系数(Rbar)数值是通过30年滑动窗口计算,垂直虚线表示EPS达到阈值(0.85)的年份(1933年,11根样芯)

的信噪比(SNR)和第一主成分解释方差量(VFE)数值分别为30.919和42.4%,均达到了较高的水平;年表具有较高的样本群体表达信号(EPS),数值为0.969,这说明了本调查采集样本量所含的信号是能代表总体特征的^[23]。以上年表各种统计特征表明了样本之间的树轮宽度变化有很好的一致性,记录了可靠区域气候信息,所以本次调查所用的树轮资料适于进行年轮气候学分析。

2.3 树木生长对气候的响应特征

与气象数据分析结果表明(图5),年表主要与当年夏季温度(7—9月)温度保持负相关关系,其中以平均温度($R = -0.271 \sim -0.341, P < 0.05$)和最高温度($R = -0.263 \sim -0.33, P < 0.05$)相关性最为明显,与最低温度的相关性较弱,仅与夏季7月份($R = -0.312, P < 0.05$)有显著负相关关系;年表与去年夏季温度也有较为明显的负相关关系,只是相关程度与当年夏季温度相比略低。另外,当年春季5月份温度对树木生长也有一定影响作用,主要体现在与平均和最高温度的负相关关系上($R = -0.24 \sim -0.259, P < 0.05$)。年表与当年夏季7月份降雨量($R = 0.311, P < 0.05$)和相对湿度($R = 0.307, P < 0.05$)则有较为明显的正相关关系,另外年表与去年夏季的降雨和相对湿度也有较强的正相关关系。

年表与CRU网格点气候数据的相关性结果与器测数据具有较好的一致性(图5),与夏季(7—9月)温度主要体现出负相关关系,与夏季(7月)降雨主要体现出正相关关系。另外,年表与PDSI干旱指数则普遍保持正相关关系,其中年表与夏季(7—9月)月份PDSI的相关性($R = 0.302 \sim 0.315, P < 0.05$)最为显著。

2.4 树木生长对气候响应的滑动相关分析

从年表与气候要素的滑动相关分析结果来看(图6),年表与夏季(7—9月)温度在时间轴上一致维持较为稳定的负相关关系,且在最近负相关性有逐渐加强的趋势;年表与夏季6月份温度的相关性在2000年前后,由正相关关系转变为负相关关系。年表与夏季8月和秋季9月降雨在时间轴上基本维持正相关关系,且这种正相关关系在最近趋于加强;年表与相对湿度和PDSI干旱指数的滑动相关分析结果较为相似,均由2000年之前的负相关关系,转为2000年之后正相关关系。

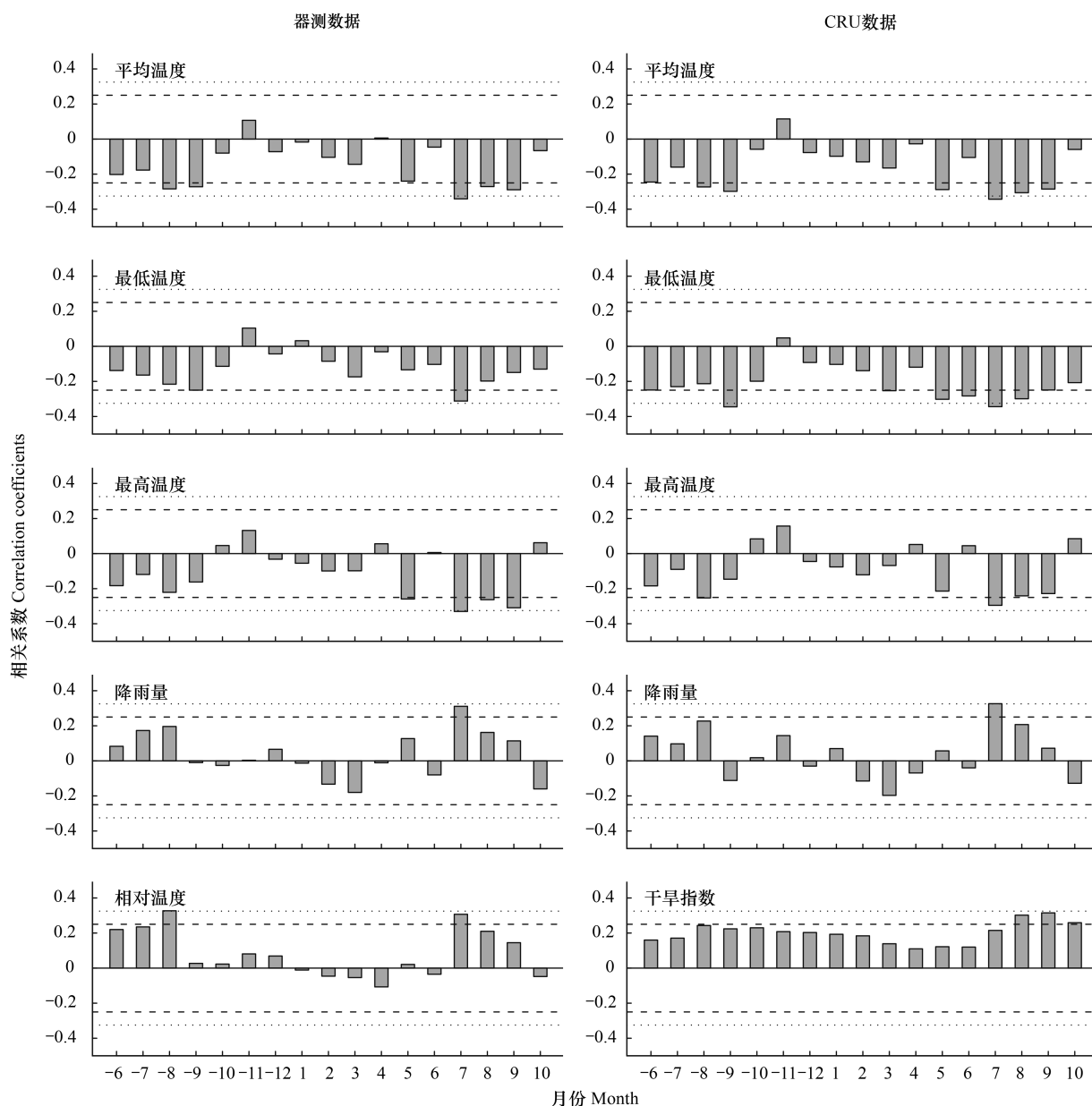


图5 北京东灵山辽东栎树轮年表与器测和 CRU 格点气候要素相关分析

Fig.5 Correlation analysis of instrumental and CRU climate data with tree-ring chronology of *Quercus wutaishanica* forest in Beijing Dongling Mountain of China

虚线和点线表示相关分析的 95% ($P < 0.05$) 和 99% ($P < 0.01$) 显著性水平线

3 讨论

树轮年表与气象站和 CRU 网格点气候数据相关分析均表明(图 5), 树木径向生长与夏季(7—9 月)温度指标基本上呈负相关关系, 而与夏季(7 月)降雨和夏季(8—9 月)PDSI 干旱指数则基本上呈正相关关系, 这表明夏季水分胁迫条件是限制北京东灵山地区辽东栎树木生长的主要限制性因素。水分条件对树木生长的限制作用在我国西北地区均可得到验证, 如在山东蒙山地区黑松(*Pinus thunbergii*) 径向生长变化发现与当年 4—9 月降水量呈显著正相关, 当年 5—7 月高温对黑松径向生长变化产生显著抑制^[24]; 陕西华山地区华山松(*Pinus armandii*) 对初夏 4—9 月的水分条件响应最为敏感^[25], 而春季至初夏的干旱条件则是内蒙古中部的油

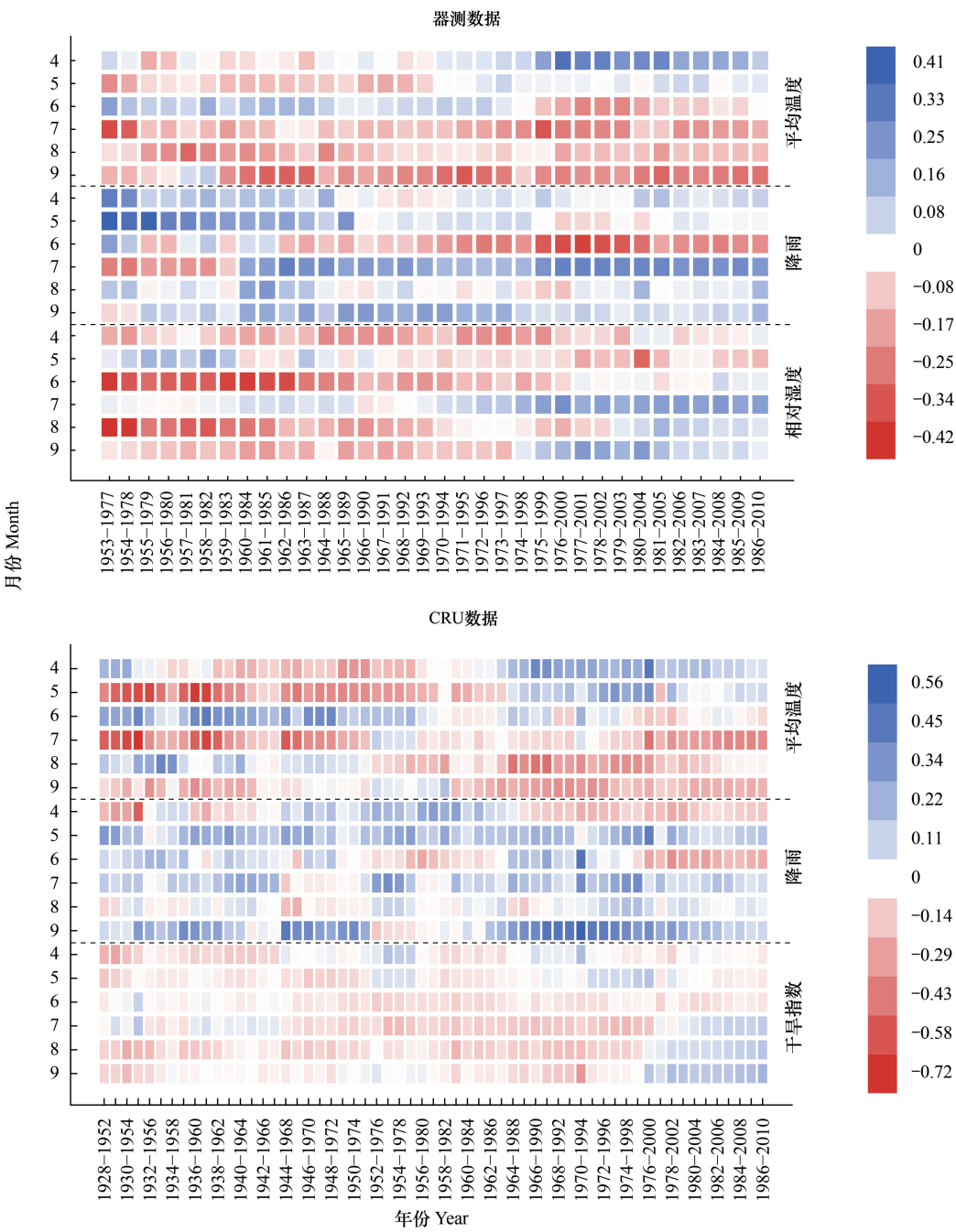


图 6 北京东灵山辽东栎树轮年表与器测和 CRU 格点气候要素滑动相关分析

Fig.6 Moving correlation analysis of instrumental and CRU climate data with tree-ring chronology of *Quercus wutaishanica* forest in Beijing Dongling Mountain of China

滑动相关分析窗口设置为 25 a,滑动分析在时间轴上采用由后向前滑动分析

松(*Pinus tabulaeformis*)径向生长主要限制性气候因子^[26]。正因为我国西北地区树木生长受水分条件限制性较为突出,该地区树木年轮材料也常用来重建该地区过去数百年来季节或年际尺度降雨和干旱的历史波动特征^[27-30]。基于 2001—2014 年区间植被遥感数据,华北地区的植被指数 NDVI 和植被生产力 NPP 在大部分地区与干旱指数呈正相关,且在夏季干旱指数相关程度最高,表明夏季干旱是影响植被生长状况的重要影响因素^[11],这与本文的研究结果相吻合。

夏季处于树木生长最为旺盛的时段,夏季水热条件一般对树木生长起着重要的作用,夏季温度过高会造成树木蒸腾作用加强,并加快土壤蒸发失水量,土壤水分有效性显著下降,直接导致树木光合作用能力下降,导致树木生长减速^[31-32];另外,夏季夜间较高温度条件还会使得树木的呼吸作用加强,会大量消耗树木白天合成的营养物种,从而对树木生长起到抑制性作用^[33]。夏季降雨偏少则直接降低土壤湿度,夏季高温和低降雨量引发的干旱胁迫会显著降低树木的光合作用能力,从而导致窄轮出现^[34]。树木生长还与春季5月份温度呈一定负相关关系,春季5月份温度已经达到较高水平,但是同期的降雨量往往是偏少的,高温增强土壤蒸发和植被蒸腾失水能力,土壤湿度下降,树木根系得不到充足的水分而不利于树木生长^[35-36]。

树轮年表与气候要素相关分析结果还表明(图5),树轮年表还与去年夏季的气候条件具有一定相关特征,体现为与去年夏季温度(8—9月)的负相关关系,以及与去年夏季降雨(8月)和相对湿度(8月)的正相关关系,这说明夏季气候条件对树木生长影响具有一定的时滞效应^[32]。夏季高温少雨的气候条件会显著增加树木的蒸腾和呼吸作用,导致土壤中水分和养分含量下降,势必大量消耗树干储存水分及营养物质来满足树木生理代谢需要,导致冬季生长休眠时期储存的水分及营养物质下降,直接影响树木第二年春季的正常生长^[37-38]。

气象站数据表明,北京地区在过去60年间(1951—2010年)年平均气温由10.8℃上升至13.2℃,每10年上升0.41℃,是世界气温平均上升速率(每10年上升约0.2℃)的2倍,也要明显高于中国地区气温上升速率(每10年上升约0.3℃)^[39-40]。北京地区则年降雨量则由780 mm下降至530 mm,降雨量每十年下降幅度为5.64%,有研究表明华北地区年总降雨量在1951—2013年时段呈波动下降趋势,降雨量每10年下降幅度约为1.97%^[7],可见北京地区降雨量下降幅度要明显大于华北地区平均水平。北京地区气候有明显暖干化趋势,水分匮乏导致的干旱胁迫条件将成为限制该区域植被生长的重要环境因子^[7, 9, 25]。滑动相关分析表明,年表与夏季温度的负相关性和夏季降雨及PDSI干旱指数的正相关性在2010年以后明显加强,这主要是因为研究区干旱化程度在2010年以后明显加剧的结果(图6)。从气象站数据来看,研究区年降雨量从1951—1999年时段的628 mm下降到2000—2010年时段的426 mm,下降幅度达32.3%;干旱指数PDSI则从1951—1999年时段的0.298下降到2000—2010年时段的-2.2,气候向干旱化发展趋势明显^[25]。干旱化气候条件已导致树木生长在2000年以来出现明显抑制,树轮指数从1951—1999年时段的1.046下降到2000—2010年时段的0.762,下降幅度达23.7%,表明北京东灵山辽东栎径向生长受干旱胁迫影响在2000年后有强化趋势。

辽东栎木材解剖结构属于环孔材,早材导管较大,导管直径最大在200—300 μm左右,是普通散孔材树种导管直径(50—60 μm)的4—5倍,具有较高的导水效率和蒸腾能力^[41],辽东栎林在生长季的林分总蒸腾耗水量可到200 mm左右,是人工山杨林和刺槐林林分蒸腾量的3.5倍和1.5倍左右^[42-43]。然而,辽东栎较大的导管直径,使其在负水势条件下导管腔容易产生塌陷,引起木质部空穴化和栓塞,从而产生水分传导障碍(Hydraulic failure),导致树木生长出现抑制^[44];与散孔材树种相比,辽东栎木质部导管密度较小、导管连接度低,在低水势条件下形成栓塞的导管,水分很难通过相邻导管或相邻导管壁纹孔进行水分运输,从而加重了栓塞对树木生长的影响作用^[45]。另外,辽东栎树木木质部栓塞脆弱曲线呈“r”形,意味着当水势降低到某一阈值时,其木质部的导水能力急剧下降,木质部导管很快发生栓塞,木质部50%导水率损失的压力值(P50)仅仅约为0.5 MPa^[46-47]。由此可知,辽东栎对干旱胁迫承受能力较弱,在暖干化气候不断发展条件下,木质部栓塞发生可能性大幅上升,从而导致水力传导障碍,限制树木生长和发育,这可能是树木生长与夏季干旱胁迫关系随时间逐渐趋于加强的重要原因。

4 结论

全球气候变暖导致的干旱胁迫已对区域尺度森林生长产生了深远影响,森林生长对干旱胁迫的敏感性程度明显上升,而对温度响应敏感性出现下降趋势,导致受世界范围受水分条件影响和控制的森林面积明显扩大^[47-48],干旱胁迫已导致很多区域出现森林生长衰退和树木死亡问题,干旱胁迫对森林生长的负面影响在很

大程度上抵消了气候变暖和二氧化碳浓度上升对森林生长的正面效应^[49]。基于树木年轮宽度资料,本研究发现北京东灵山辽东栎森林生长主要受干旱胁迫条件影响,而且干旱胁迫对树木生长的控制作用随时间有逐渐加强的趋势。已有研究表明东灵山辽东栎种群密度在 1991—2002 年时段出现明显下降趋势^[16],本研究显示辽东栎树轮年表在 1990—2010 年期间处于明显生长下降时期;若未来气候继续向暖干化方向发展,北京东灵山地区森林生长受干旱胁迫影响将进一步加剧,从而对该地区森林植被生产力和固碳潜力产生明显负面影响。

参考文献 (References):

- [1] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [2] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [3] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329(5994): 940-943.
- [4] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogée J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, De Noblet N, Friend A D, Friedlingstein P, Grünwald T, Heinesch B, Keronen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival J M, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Seufert G, Soussana J F, Sanz M J, Schulze E D, Vesala T, Valentini R. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 2005, 437(7058): 529-533.
- [5] Anderegg W R L, Kane J M, Anderegg L D L. Consequences of widespread tree Mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 30-36.
- [6] Williams A P, Allen C D, Macalady A K, Griffin D, Woodhouse C A, Meko D M, Swetnam T W, Rauscher S A, Seager R, Grissino-Mayer H D, Dean J S, Cook E R, Gangodagamage C, Cai M, McDowell N G. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 292-297.
- [7] 王涛. 近 400 年我国北方地区降水重建与多尺度变化规律研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [8] Yi L, Yu H J, Xu X Y, Yao J, Su Q, Ge J Y. Exploratory precipitation in north-central China during the past four centuries. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(1): 223-229.
- [9] Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, Chen F H, Wang Y J, Yang X L, Liu J, Tan M, Wang X F, Liu J H, An C L, Dai Z B, Zhou J, Zhang D Z, Jia J H, Jin L Y, Johnson K R. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science*, 2008, 322(5903): 940-942.
- [10] 任培贵. 黄土高原区不同时间尺度干旱演变及其对植被的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- [11] 杨思遥, 孟丹, 李小娟, 吴新玲. 华北地区 2001—2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应. *生态学报*, 2018, 38(3): 1028-1039.
- [12] 马克平, 高贤明, 于顺利. 东灵山地区植物区系的基本特征与若干山区植物区系的关系. *植物研究*, 1995, 15(4): 501-515.
- [13] 张育新, 马克明, 祁建, 冯云, 张洁瑜. 北京东灵山海拔梯度上辽东栎种群结构和空间分布. *生态学报*, 2009, 29(6): 2789-2796.
- [14] 张育新, 马克明, 祁建, 冯云, 张洁瑜. 北京东灵山辽东栎林植物物种多样性的多尺度分析. *生态学报*, 2009, 29(5): 2179-2185.
- [15] 祁建, 马克明, 张育新. 北京东灵山不同坡位辽东栎(*Quercus liaotungensis*)叶属性的比较. *生态学报*, 2008, 28(1): 122-128.
- [16] 侯继华, 黄建辉, 马克平. 东灵山辽东栎林主要树种种群 11 年动态变化. *植物生态学报*, 2004, 28(5): 609-615.
- [17] Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Chicago: The University of Chicago Press, 1968.
- [18] Fritts H C. *Tree Rings and Climate*. New York: Academic Press, 1976.
- [19] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78.
- [20] Cook E, Kairiukstis L. *Methods of Dendrochronology*. New York: Springer, 1990.
- [21] Harris I, Jones P D, Osborn T J, Lister D H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations- the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 623-642.
- [22] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(3): 303-311.
- [23] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(2): 201-213.
- [24] 陈峰, 喻树龙, 袁玉江. 暖温带幼林树轮宽度气候变化响应分析——以山东蒙山黑松树轮气候研究为例. *西部林业科学*, 2014, 43(6): 57-65.
- [25] 刘洪滨, 邵雪梅, 黄磊. 中国陕西关中及周边地区近 500 年来初夏干燥指数序列的重建. *第四纪研究*, 2002, 22(3): 220-229.
- [26] Liu Y, Zhang X J, Song H M, Cai Q F, Li Q, Zhao B Y, Liu H, Mei R C. Tree-ring-width-based PDSI reconstruction for central Inner Mongolia, China over the past 333 years. *Climate Dynamics*, 2017, 48(3/4): 867-879.
- [27] Cai Q F, Liu Y, Liu H, Ren J L. Reconstruction of drought variability in North China and its association with sea surface temperature in the joining area of Asia and Indian-Pacific Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 417: 554-560.

- [28] Chen F, Yuan Y J, Wen W S, Yu S L, Fan Z A, Zhang R B, Zhang T W, Shang H M. Tree-ring-based reconstruction of precipitation in the Changling Mountains, China, since A.D.1691. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(4): 765-774.
- [29] Liu Y, Cai W J, Sun C F, Song H M, Cobb K M, Li J P, Leavitt S W, Wu L X, Cai Q F, Liu R S, Ng B, Cherubini P, Büntgen U, Song Y, Wang G J, Lei Y, Yan L B, Li Q, Ma Y Y, Fang C X, Sun J Y, Li X X, Chen D L, Linderholm H W. Anthropogenic aerosols cause recent pronounced weakening of Asian Summer Monsoon relative to last four centuries. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(10): 5469-5479.
- [30] Mei R C, Song H M, Liu Y, Payomrat P, Cai Q F, Sun C F, Fang C X. Tree-ring width-based precipitation reconstruction in Zhaogaoguan, China since 1805 AD. *Quaternary International*, 2019, 510: 44-51.
- [31] 常永兴, 陈振举, 张先亮, 白学平, 赵学鹏, 李俊霞, 陆旭. 气候变暖下大兴安岭落叶松径向生长对温度的响应. *植物生态学报*, 2017, 41(3): 279-289.
- [32] 王婷, 于丹, 李江凤, 马克平. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 23-33.
- [33] Cherubini P, Schweingruber F H, Forster T. Morphology and ecological significance of intra-annual radial cracks in living conifers. *Trees*, 1997, 11(4): 216-222.
- [34] 韦景树, 李宗善, 焦磊, 陈维梁, 伍星, 王晓春, 王帅. 黄土高原羊圈沟小流域人工物种和自然物种径向生长对气候变化的响应差异. *生态学报*, 2018, 38(22): 8040-8050.
- [35] Fritts H C. Growth-rings of trees: their correlation with climate. *Science*, 1966, 154(3752): 973-979.
- [36] Oberhuber W, Stumböck M, Kofler W. Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness. *Trees*, 1998, 13(1): 19-27.
- [37] Bräuning A. Dendroclimatological potential of drought-sensitive tree stands in southern Tibet for the reconstruction of monsoonal activity. *IAWA Journal*, 1999, 20(3): 325-338.
- [38] Mäkinen H, Nöjd P, Mielikäinen K. Climatic signal in annual growth variation in damaged and healthy stands of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] in southern Finland. *Trees*, 2001, 15(3): 177-185.
- [39] Wang S W, Zhu J H, Cai J N. Interdecadal variability of temperature and precipitation in china since 1880. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(3): 307-313.
- [40] Hansen J, Sato M, Ruedy R, Lo K, Lea D W, Medina-Elizade M. Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(39): 14288-14293.
- [41] Badel E, Ewers F W, Cochard H, Telewski F W. Acclimation of mechanical and hydraulic functions in trees: impact of the thigmomorphogenetic process. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 266.
- [42] 隋旭红, 张建军, 文万荣. 晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究. *生态学报*, 2011, 31(16): 4791-4798.
- [43] 王翼龙. 黄土高原半干旱区两典型林分主要树种光合耗水特性及影响因素研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
- [44] Hacke U G, Sperry J S, Wheeler J K, Castro L. Scaling of angiosperm xylem structure with safety and efficiency. *Tree Physiology*, 2006, 26(6): 689-701.
- [45] Hacke U G, Jansen S. Embolism resistance of three boreal conifer species varies with pit structure. *New Phytologist*, 2009, 182(3): 675-686.
- [46] 李荣, 党维, 蔡靖, 张硕新, 姜在民. 6个耐旱树种木质部结构与栓塞脆弱性的关系. *植物生态学报*, 2016, 40(3): 255-263.
- [47] Choat B, Jansen S, Brodribb T J, Cochard H, Delzon S, Bhaskar R, Bucci S J, Feild T S, Gleason S M, Hacke U G, Jacobsen A L, Lens F, Maherali H, Martínez-Vilalta J, Mayr S, Mencuccini M, Mitchell P J, Nardini A, Pittermann J, Pratt R B, Sperry J S, Westoby M, Wright I J, Zanne A E. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 2012, 491(7426): 752-755.
- [48] 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.
- [49] Piao S L, Nan H J, Huntingford C, Ciais P, Friedlingstein P, Sitch S, Peng S S, Ahlström A, Canadell J G, Cong N, Levis S, Levy P E, Liu L L, Lomas M R, Mao J F, Myneni R B, Peylin P, Poulter B, Shi X Y, Yin G D, Viovy N, Wang T, Wang X H, Zaehle S, Zeng N, Zeng Z Z, Chen A P. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. *Nature Communications*, 2014, 5: 5018.