

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230025

# 暖温带北缘 3 种栎树径向生长对气候要素的响应差异及预测

王奇<sup>1</sup>, 孙婧依<sup>1</sup>, 刘建锋<sup>1\*</sup>, 常二梅<sup>1</sup>, 冯健<sup>2</sup>, 张晓放<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 辽宁省林业科学研究院, 辽宁沈阳 110032; 3. 辽宁省大连市林业科学研究所, 辽宁大连 116014)

**摘要:** [目的] 比较同一气候区不同栎类树种生长对气候要素的响应差异, 特别是在分布边缘不同树种的种内种间差别。[方法] 利用树木年轮学方法, 分析了我国暖温带北缘 3 种优势落叶栎树 (蒙古栎、栓皮栎和麻栎) 径向生长对气候要素的响应差异; 同时利用混合线性效应模型构建了 3 个树种径向生长与气候的关系, 并基于未来气候情景 (RCP2.6 和 RCP8.5) 预测了其未来生长趋势。[结果] 同一地区栎类树种年表具有较高的相似性, 而不同地区间差异较大; 在径向生长对气候响应方面, 同一地区的不同栎类树种和不同地区同一栎类树种也存在一定差别。其中北京地区的 3 种栎类树种的径向生长与当年 6 月气温呈负相关关系, 但在辽宁仙人洞地区却与气温无显著相关关系; 北京地区的麻栎、河北地区的蒙古栎、辽宁大黑山地区的栓皮栎的径向生长均受降水条件限制。模型预测显示, 至本世纪末, 北京地区和辽宁大黑山地区栎类树种的径向生长呈现下降趋势; 而辽宁仙人洞地区栎类树种径向生长呈增加趋势。[结论] 我国暖温带北缘不同地区的栎类树种对气候要素的响应存在显著差别, 主要为取样地区的气候所支配, 下一步尚需结合林分及立地因子, 来厘清各类环境要素的相对贡献度。

**关键词:** 气候变化; 树木年轮; 栎类树种; 径向生长

**中图分类号:** S718.43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2023)03-0062-09

气候是影响全球植物分布的关键驱动因素。随着全球气候变化的不断加剧, 植物的生长及其分布范围, 特别是在其分布边缘将受到更大的影响<sup>[1]</sup>。有研究发现, 相对于植物分布范围的变化, 植物的生长对气候变化更加敏感<sup>[2]</sup>。因此, 探索不同植物生长动态对气候变化的敏感性, 可为预测未来植物分布动态提供重要参考。森林是陆地生态系统碳汇的主体<sup>[3]</sup>, 研究某一区域森林树种的生长动态及其对气候变化的响应差异, 有助于理解气候变化背景下森林组成、结构及碳汇功能的变化动态, 为适应性经营管理措施的制定提供科学依据。

已有研究表明, 树种分布北缘的群体生长主要受低温影响<sup>[4-6]</sup>, 但在其分布南缘则受到高温导致

的干旱缺水的限制<sup>[1, 7]</sup>。这些研究大多基于阿尔卑斯山脉以北的高纬度地区<sup>[8]</sup>或以南的地中海地区<sup>[9-10]</sup>。然而, 在暖温带气候区 (如暖温带湿润-半干旱地区), 树种的生长是否存在上述现象尚缺乏研究。此外, 不同分布范围的树种的生长可能会对气候变化做出不同的响应。如 Huang<sup>[11]</sup> 研究加拿大东部的 4 种北方树种时发现, 毛白杨 (*Populus tomentosa* Carr.) 的径向生长主要受水分条件的影响, 而白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 的生长受 1 月的温度和生长季降水影响, 云杉 (*Picea asperata* Mast.) 和班克松 (*Pinus banksiana* Lamb.) 的径向生长则与当年冬季和春季或整个生长季的温度呈正相关关系。然而,

收稿日期: 2023-01-16 修回日期: 2023-02-22

基金项目: 中央级公益性科研院所基本业务专项重点项目 (CAFYBB2022ZA001); 国家自然科学基金面上项目 (42071065)

\* 通讯作者: 刘建锋, 博士, 研究员。主要研究方向: 植被地理与全球变化。Email: LiuJf@caf.ac.cn

Tardif 等<sup>[12]</sup>发现,白栎 (*Quercus alba* L.) 和红栎 (*Q. rubra* L.) 的生长在其北部范围内对气候的响应并没有显著差异。因此,不同树种在分布范围边缘对气候的生长反应是复杂的,目前尚缺乏对同域分布但处于不同树种各自不同分布边缘的群体对气候变化响应的比较研究。气候暖化背景下森林的响应与适应是当前生态学研究的重要方向,一方面,气候变暖可以加速土壤有机质的分解速率,从而增加植物对土壤矿物质营养的吸收,特别是对最常见的限制性营养素 N 的吸收<sup>[11]</sup>;另一方面,温室气体特别是大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升,加上环境温度的升高,提高了植物光合同化物质的生产和水分利用效率,从而增加树木生物量的积累。有研究发现,气候暖化可能导致北半球温带树种在其分布北缘呈现增长趋势<sup>[5, 8, 13]</sup>。然而,在我国暖温带树种分布的边缘群体是否会有类似趋势尚缺乏研究。

栎类是我国面积和蓄积最大的树种组<sup>[14]</sup>,在木材生产、固碳增汇、土壤保持、水源涵养及生物多样性维持等方面发挥着重要的功能。在栎类树种中,栓皮栎 (*Q. variabilis* Bl.)、麻栎 (*Q. acutissima* Carruth.) 和蒙古栎 (*Q. mongolica* Fisch.) 是我国分布最广、数量最多的 3 种落叶阔叶树种,其范围分别为 (19°~42°N、97°~140°E)、(19°~42°N、97°~140°E) 和 (34°~53°N、112°~134°E),也是我国暖温带森林的主要成分。我国暖温带北缘

是栓皮栎和麻栎天然分布的北缘,蒙古栎分布的南缘。有研究表明,该区域气候暖干化的趋势明显<sup>[15]</sup>。因此,本研究以生长在暖温带北缘的栓皮栎、麻栎、蒙古栎为研究对象,通过树木年轮学方法,分析径向生长与气候因子的关系;同时,考虑未来气候变化情景 (RCP2.6; RCP8.5),对该区域栎类树种的未来生长展开预测,以期为本区域制定应对气候变化的森林管理对策提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

在我国暖温带北缘 (华北地区北部和东北地区南部) 选择栎树树种分布的 6 个典型样点,分别为西部的北京市昌平、密云、怀柔和河北省棋盘山地区;东部的辽宁省大黑山和仙人洞地区 (图 1)。研究区域属典型暖温带季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。但 3 个地区的水热条件存在明显差异,如东部辽宁地区温暖湿润,降水量丰富,年平均气温为 10.2 °C,年降水量 644.7 mm;其中仙人洞和大黑山年内降水季节性也存在一定差异,如仙人洞降水集中在 5—7 月,大黑山降水集中在 6—8 月。西部的北京地区气温较高,雨水相对较少,年平均气温为 9.8 °C,年降水量 490.3 mm;河北棋盘山地区气候干燥寒冷,雨量相对最少;年平均气温仅为 2.3 °C,年降水量 415.1 mm (图 2)。

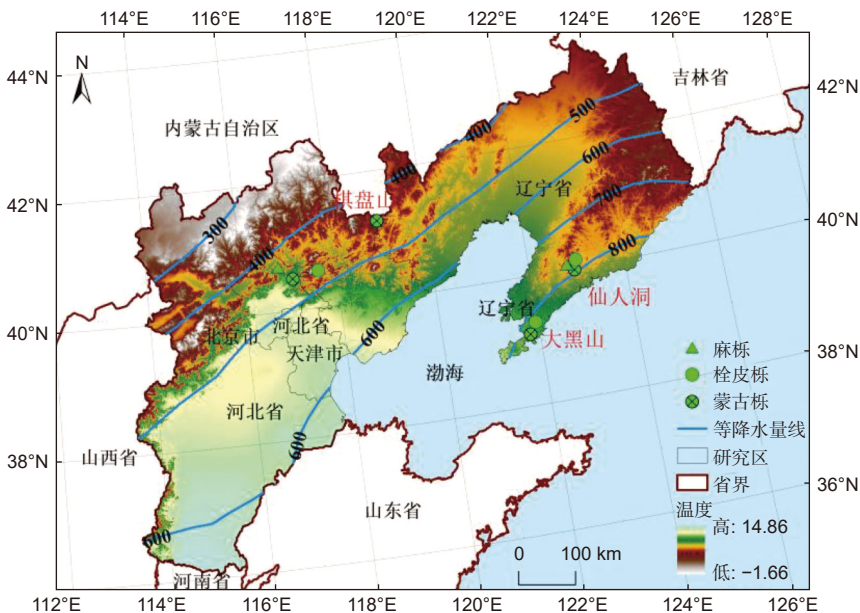


图 1 研究区域采样点分布位置

Fig. 1 Location of sampling sites in the study area

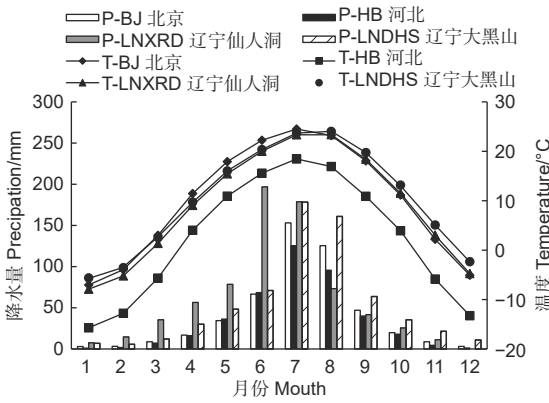


图 2 研究区月平均降水量和月均温 (1930—2018 年)  
Fig. 2 Monthly mean precipitation and monthly mean temperature in the study area (1930—2018)

## 1.2 年轮样品采集与处理

于 2018 年 8—9 月展开野外取样工作。在每

个样点, 选择人为干扰较小且栓皮栎、麻栎和蒙古栎为优势树种的林分, 建立  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  的临时样地, 选择每个样地的冠层优势个体, 按照标准树木年代学方法<sup>[16]</sup>进行采样。对于每棵样树, 使用  $5.15\text{ mm}$  树木生长锥在  $1.3\text{ m}$  处按十字交叉取 2 个树芯, 并记录胸径 (离地面  $1.3\text{ m}$ ) 以及样地基本信息 (纬度、经度、海拔、坡度、坡向等) (表 1)。将样品储存在定制塑料吸管中, 风干后用白胶安装木芯样品, 用 200 目至 1 000 目砂纸逐级打磨, 直到年轮边界清晰可判读, 然后用扫描仪 (中晶 i800plus) 扫描成 TIF 格式图片 (分辨率  $1\ 200\text{ dpi}$ ), 再用 WinDENDRO (Regent Instruments, Canada) 测量 (精度  $0.001\text{ mm}$ )。所有轮宽序列通过目视检查和 COFECHA 进行交叉定年验证<sup>[17]</sup>, 最后共获得 329 个样芯 (表 1)。

表 1 样地信息及年表特征

Table 1 Sample plot information and chronological characteristics

项目 Items	北京地区 Beijing			辽宁大黑山地区 Liaoning Dahei mountain (DHS)		河北棋盘山 Hebei Qipan mountain(QPS)	辽宁仙人洞地区 Liaoning Xianrendong (XRD)		
	MY-ML	PG-SPL	HR-MGL	DHS-ML	DHS-SPL	QPS-MGL	XRD-SPL	XRD-ML	XRD-MGL
样地 Site	MY-ML	PG-SPL	HR-MGL	DHS-ML	DHS-SPL	QPS-MGL	XRD-SPL	XRD-ML	XRD-MGL
纬度 Latitude(°)	40.256 3	40.492 5	40.971 0	39.107 5	39.107 5	42.267 1	39.979 1	39.979 1	39.979 1
经度 Longitude(°)	117.159 5	117.069 9	116.484 9	121.806 6	121.806 6	117.586 8	122.939 4	122.939 4	122.939 4
海拔 Altitude/m	294.4	288.6	1 022.5	199.4	168.5	1 458.9	234.7	234.8	615.5
样芯数量 Number of cores	40	35	40	18	48	27	39	30	52
年表长度 Chronology length	1931—2018	1978—2018	1943—2018	1950—2018	1950—2018	1939—2018	1944—2018	1943—2018	1948—2018
信噪比 Signal-to-noise ratio	6.087	8.099	2.547	2.883	7.522	9.566	3.759	7.028	3.688
总体代表性 Agreement with population chron (EPS)	0.859	0.893	0.671	0.792	0.883	0.905	0.798	0.875	0.787

## 1.3 气候数据

过去时期 (1930—2018) 的气候数据来自 Climate Research Unit (CRU TS 4.05) 地表逐月气候格点数据集 (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>, 网格距为  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ )。根据样地经纬度进行提取, 气候要素包括月均气温、月降水量和月尺度帕默尔干旱指数 (PDSI)。未来时期 (2018—2100) 的气候数据来自亚太地区历史和未来气候数据集 ClimateAP v2.30 (<https://asiapacific.forestry.ubc.ca/research-approaches/climate-modeling/>)。本研究选择了 2 种未来温室气体排放情景, 即 CanESM2-RCP2.6 和 CanESM2-RCP 8.5。未来气候要素包括年平均温度 (MAT)、年降

水量 (MAP)、Hargreaves 参考蒸发散 (EREF) 和哈格里夫斯气候水分亏缺 (CMD)。

## 1.4 统计分析

由于当年的气象因子会影响树木次年或后几年的径向生长, 存在一定的“滞后效应”, 本研究用上年 6 月至当年 9 月的气象数据与当年的轮宽指数 (RWI) 进行相关分析。为了确定研究区域栎类树种生长趋势是否趋同或趋异, 根据 RWI 进行了主成分分析 (PCA) 和聚类分析。未来气候变化下的树木径向生长预测使用线性混合效应模型 (LMM)。以上分析均利用 R 软件 (V4.1.3) 完成, 使用 R 中树轮气候分析程序包“treeclim”(V 2.0.5.1) 中的“dcc”函数来进行树轮年表与气候要素的相关性分析<sup>[18]</sup>,

使用“corrplot”(V 0.92) 程序包绘制上述分析的相关关系图;使用“vegan”(V2.6-4) 包来进行主成分分析,使用“factoextra”(V1.0.7) 包来进行聚类分析,使用“lme4”(V1.1-31) 包进行混合效应模型的拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区气候状况及年表特征

根据 1930 年至 2018 年的气候数据 (图 3), 研究区域各样点的年平均温度增幅为  $0.015\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年平均温度由高到低依次为辽宁仙人洞 ( $8.76\sim 11.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、辽宁大黑山 ( $7.41\sim 11.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、北京 ( $8.38\sim 11.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、河北棋盘山 ( $0.60\sim 4.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。

年总降水量由高到低依次为辽宁大黑山 ( $466.32\sim 1\ 147.03\text{ mm}$ )、辽宁仙人洞 ( $378.41\sim 1\ 008.51\text{ mm}$ )、北京 ( $243.77\sim 735.82\text{ mm}$ )、河北棋盘山 ( $293.74\sim 579.22\text{ mm}$ )。年降水量在 1950 年至 2018 年明显有下降趋势,降幅由高至低依次为辽宁仙人洞、辽宁大黑山、北京、河北棋盘山。

为更好保留年表的低频气候信息,本研究构建了标准化年表,最终建立 9 个年表 (表 1, 图 4)。由表 1 可知,在 3 个树种中,北京怀柔地区麻栎年表最长 (1931—2018),北京栓皮栎年表最短 (1978—2018)。栓皮栎的样本总体代表性最大,北京、河北地区树木年表相对于辽宁地区有更

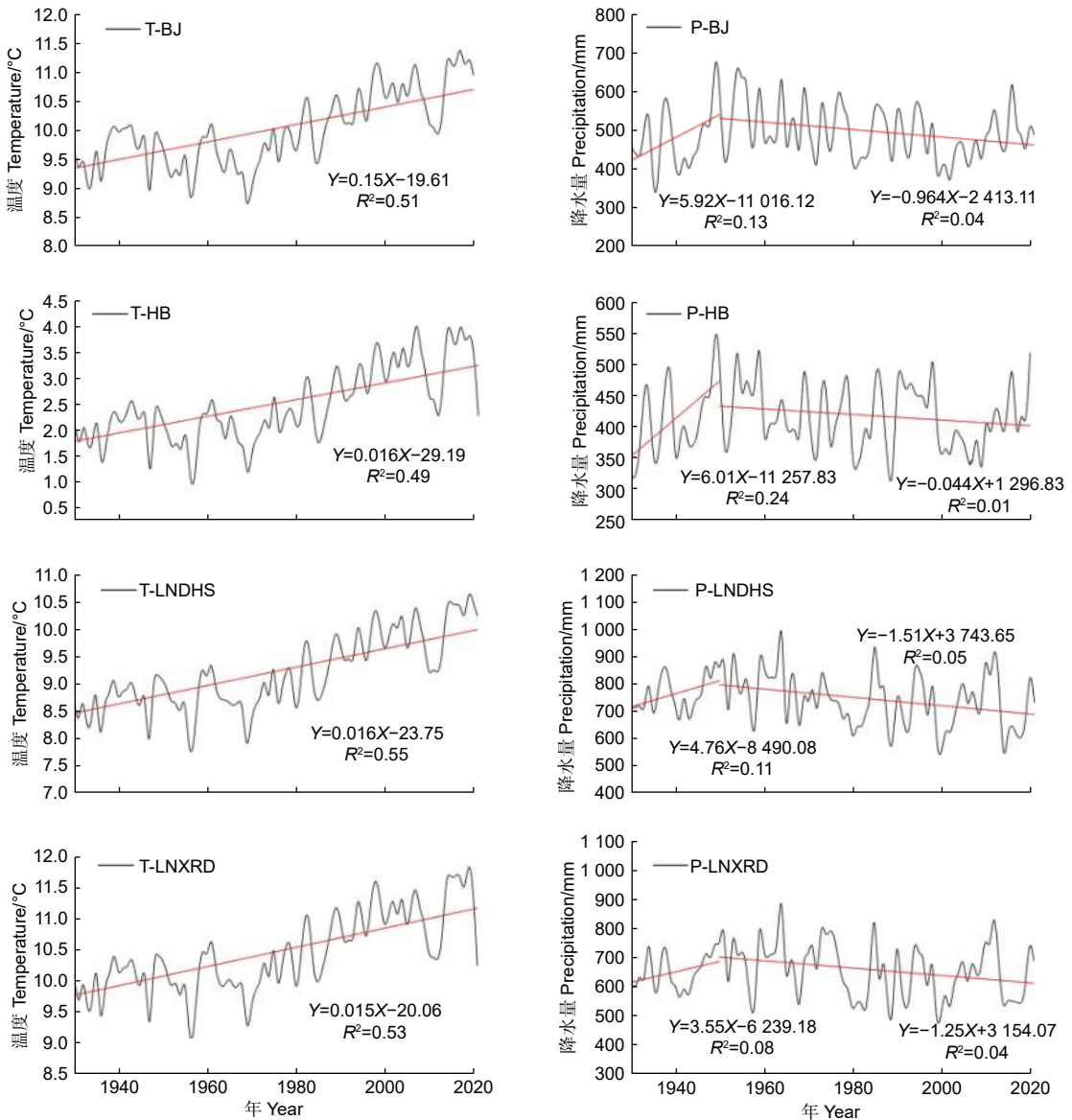


图 3 基于 CRU 格点数据的研究区气候特征

Fig. 3 Climatic characteristics of the study sites based on CRU gridded data

高的样本总体代表性。

## 2.2 树轮宽度指数的主成分分析及聚类分析

不同地区栎类树种年表 PCA 显示, 第一主成分 (PC1) 的方差累积贡献率为 38.56%; 第二主成分贡献率为 14.43%。可以看出, 不同栎树的 RWI 在同一地区具有更高的相似性。除河北棋盘山地区蒙古栎生长与其他地区差异较大外, 北京地区栓皮栎、麻栎、蒙古栎生长相似, 辽宁仙人洞地区麻栎、栓皮栎生长相似, 大黑山地区麻栎、栓皮栎和仙人洞地区蒙古栎生长相似 (图 5A)。聚类分析结果进一步验证了 PCA 分析的结果, 如辽宁大黑山地区栎类树种为一类, 辽宁仙人洞地区和北京地区栎类树种聚为一类, 而棋盘山地区栎类树种则单独为一类 (图 5B)。

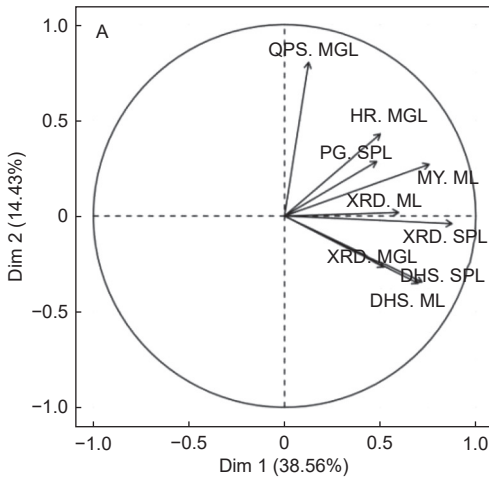


图 5 基于轮宽指数 (RWI) 的主成分分析 (A) 和聚类分析 (B)

Fig. 5 Principal component analysis (A) and cluster analysis (B) based on the Rings width index (RWI)

## 2.3 树轮宽度对气候的响应

各树种对主要气候变量的相关分析如图 6 所示。在本研究区域的西部 (华北地区北部), 北京地区栓皮栎和麻栎的 RWI 与冬季 (上年 12 月) 温度呈负相关关系; 而北京地区和河北棋盘山地区的蒙古栎的 RWI 则分别与上年 12 月和当年 2 月温度表现出正相关关系; 华北北部的 3 种栎类树种均与夏季 (5—7 月) 温度呈负相关关系。北京地区栓皮栎和麻栎的 RWI 对逐月降水量的敏感性 (正相关关系) 要高于本地区的蒙古栎, 河北棋盘山蒙古栎的 RWI 与月降水量也表现出较高的敏感性, 且全年均呈显著正相关关系。北京地区的蒙古栎 RWI 与冬季 PDSI (上年 11 月至当年 1 月) 呈现负相关关系, 北京地区的栓皮栎、麻栎及河北棋盘

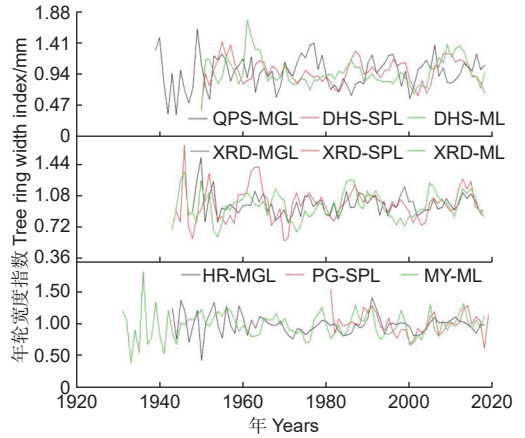
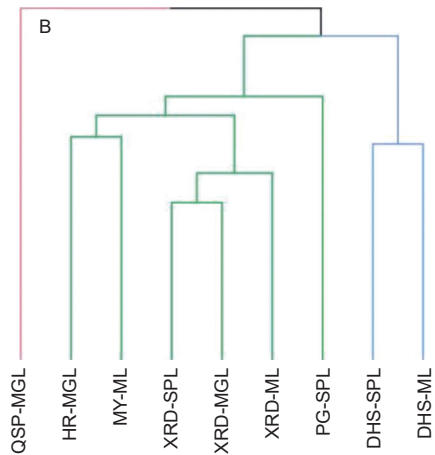


图 4 研究区 3 种栎类树种轮宽指数

Fig. 4 Ring width index of three *Quercus* species in the study area



山的蒙古栎 RWI 与 PDSI 多表现出正相关关系。

在研究区东部 (东北地区南部), 辽宁大黑山地区的栓皮栎和麻栎的 RWI 较之仙人洞地区 3 个栎类树种对春季 (当年 2—4 月) 温度的敏感性更高, 均表现为显著的负相关关系, 而仙人洞地区的栎类树种则与春季温度无显著相关关系; 但上年 11—12 月温度对仙人洞地区栓皮栎 RWI 的正相关显著。东北地区南部的所有栎类树种对各月降水量均不敏感, 但与干旱指数 PDSI 多表现为正相关关系。

## 2.4 不同地区栎类树种生长预测

基于 CanESM2-RCP2.6 和 CanESM2RCP8.5 两种气候变化情景, 通过构建混合效应模型, 对不同地区栎类树种生长的模拟预测时发现 (图 7), 在 RCP2.6 情景下, 研究区域的栎类树种生长状况

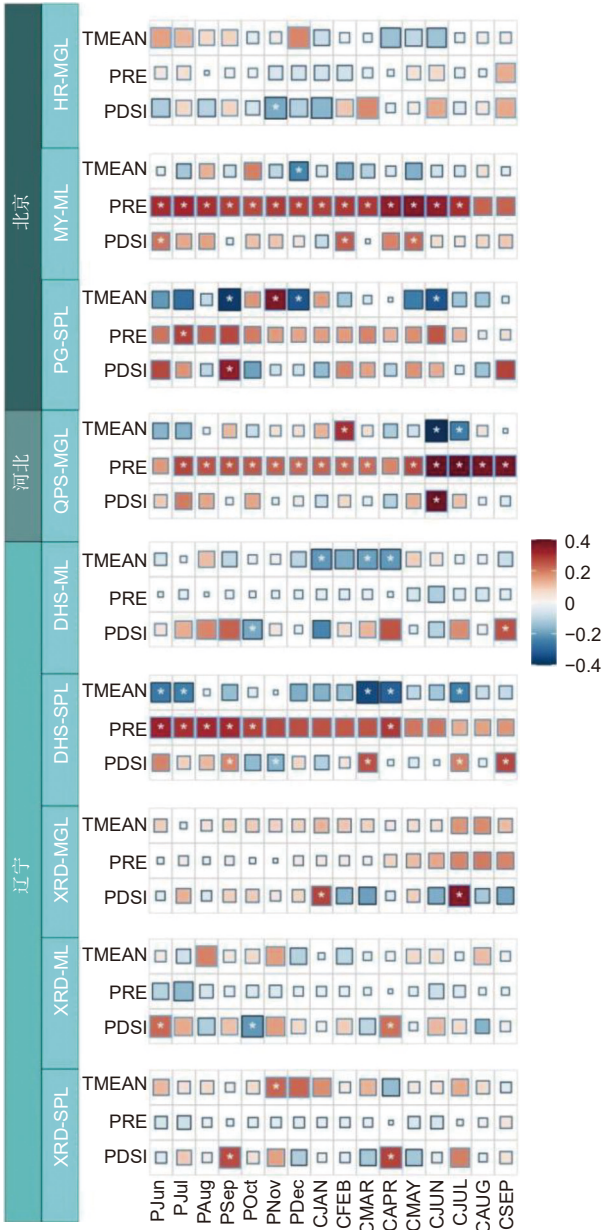


图6 年轮宽度年表与主要气候因子的响应关系

Fig. 6 Response relationship between annual ring width chronology and main climate factors

较为稳定;而在RCP8.5预测情景下,仅北京地区栎类树种生长状况较为稳定,辽宁地区栎类树种在2050年左右开始出现较大变化,其中仙人洞地区栎类树种径向生长加快,但大黑山地区的径向生长开始逐渐减弱。

### 3 讨论

识别森林群落中不同树种生长对气候响应的差异,是评价气候变化下森林动态变化的重要前提。本研究研究了我国暖温带北缘栓皮栎、麻栎、蒙古

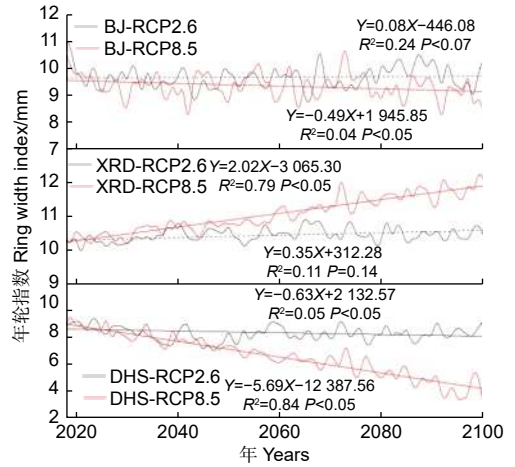


图7 基于RCP2.6和RCP8.5情景的气候数据的气候数据的2018—2100年树木生长指数预测值

Fig. 7 Prediction value of tree growth index for 2018—2100 based on climate data of RCP2.6 and RCP8.5 scenarios

栎径向生长对气候的响应差异,发现生长在同一地区的不同树种存在较高的相似性,但在不同地区差别较大。这与王兆鹏<sup>[19]</sup>对福建柏(*Fokienia hodginsii* Dunn.)、铁杉(*Tsuga chinensis* Franch.)、冷杉(*Abies beshanzuensis* Mast.)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)的研究结果相一致。如罗霄山南部4个针叶树种的径向生长与单月和季节性气候因子的相关结果大致相同;气温发生突变后,4个树种树轮宽度指数的变化趋势也相似<sup>[19]</sup>。聚类分析中,河北棋盘山栎树(蒙古栎)年表与其他区域差异较大,被最先单独分离出来,可能的原因是由于河北棋盘山地区纬度较高,年降水量、年均温明显低于其他地区。

整体上,相对于蒙古栎,栓皮栎、麻栎对温度和降水具有更高的敏感性。本研究结果显示,北京地区栓皮栎和麻栎的RWI与冬季(上年12月)温度呈显著负相关关系;而北京地区和河北棋盘山地区的蒙古栎的RWI则分别与上年12月和当年2月温度表现出显著的正相关关系。可以认为,华北地区冬季增温会导致该地区的栓皮栎和麻栎生长下降,而蒙古栎生长增加;但夏季温度的升高会导致整个区域栎类树种生长的下降。华北北部的3个栎类树种均与夏季(5—7月)温度呈负相关关系,这可能是由于夏季高温会诱导植物叶片气孔关闭,进而导致光合同化物质生产的下降<sup>[20-21]</sup>。在华北地区,同域分布的栓皮栎北缘群体和蒙古栎南缘群体的生长与当年冬春降水存在正相关<sup>[8]</sup>,表明生

长均受到降水的限制<sup>[11]</sup>。北京地区麻栎和河北棋盘山地区蒙古栎 RWI 与全年降水呈显著正相关, 辽宁大黑山栓皮栎 RWI 与当年 4 月降水及上年 6—10 月降水呈显著正相关, 表明北京地区麻栎、河北棋盘山地区蒙古栎、辽宁大黑山地区栓皮栎生长均受到降水制约。可以认为, 不同区域树木生长的限制因子有所不同, 但在同一区域, 不同树种生长的限制因素也存在差异。如本研究发现北京地区麻栎与河北地区蒙古栎受干旱制约, 但在辽宁仙人洞地区 3 种栎树均与降水、温度无明显相关, 表明该地区水热条件较为适宜栎类树种生长。有研究表明, 较低的水分可利用性是干旱、半干旱地区森林生态系统发育和林木生长受到限制的主要原因<sup>[3, 22-23]</sup>。相对于华北北部, 虽然东北南部的辽宁大黑山地区降水更丰沛, 但该地区栓皮栎 RWI 与降水却表现出正相关关系, 这与 Bimal 对红椿 (*Toona ciliata* Roem.) 的研究结果一致<sup>[24]</sup>。这可能与降水的季节性差异有关, 比如大黑山地区降水主要集中在 6—9 月, 生长季前期降水较少, 水热的不同步限制了树木的初生生长。

为了对未来树木生长作出评估, 本研究采用了 IPCC 第五份评估报告 4 个温室气体浓度情景中的最理想的 RCP2.6 情景和最极端的 RCP8.5 情景下的气候数据进行预测, 分别表示到 2100 年辐射强度为  $2.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $8.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。RCP2.6 情景下, 北京-河北地区增温  $2.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 降水量增加  $156.35 \text{ mm}$ ; 辽宁仙人洞地区增温  $2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 降水量增加  $117.22 \text{ mm}$ ; 辽宁大黑山地区增温  $2.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 降水量增加  $175.54 \text{ mm}$ 。RCP8.5 情景下, 北京-河北地区增温  $6.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 降水量增加  $341.38 \text{ mm}$ ; 辽宁仙人洞地区增温  $5.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 降水量增加  $318.74 \text{ mm}$ ; 辽宁大黑山地区增温  $5.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 降水量增加  $385.45 \text{ mm}$ 。根据模型预测, 截至本世纪末, 北京、辽宁大黑山地区栎类树种生长量将会持续减少, 特别是在 RCP8.5 情景下, 栎类树种生长下降愈加明显。这与李宗善<sup>[15]</sup>对北京东灵山辽东栎 (*Q. wutaishanica*) 的预测一致。可能的解释是, 北京地区处于半干旱地区, 气候变暖导致蒸散量增加, 树木的可利用水分降低, 水分限制愈加严重<sup>[25]</sup>。辽宁仙人洞地区栎类树种径向增长预计会增加, 可能的原因是辽宁仙人洞地区有适宜的温度和相对丰沛的降水, RWI 与气候因子的相关性分析中, 显著相关的气候因子均为正相关, 因此降水量

和气温的增加导致了树木的加速生长。然而, 树木生长适宜温度的上限是多少, 超过适宜温度对树木的限制作用、立地条件及林分结构等因素也应该进行考虑。

## 4 结论

本研究利用年轮生态学研究了我国暖温带北缘 3 个栎类树种对气候要素的响应差异, 发现同一地区的栎类树种生长对气候响应相似; 不同区域的同一栎树的生长对气候响应存在差别, 可以认为在北京、河北地区, 水分和低温是制约栎类树种生长的主要因素。模型预测还发现, 至本世纪末, 北京、辽宁大黑山地区栎类树种的生长可能发生衰退, 而辽宁仙人洞地区栎类树种的生长则表现出增加趋势。然而, 除气候要素外, 树木生长还受到立地条件、林分结构与树木年龄等因素及各类因子间交互作用的影响, 下一步需要结合更多环境因子展开更深入的研究, 以提高模拟预测的可靠性。

## 参考文献:

- [1] STEINKAMP J, HICKLER T. Is drought - induced forest die-back globally increasing?[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(1): 31-43.
- [2] CHAGNON C, WOTHERSPOON A R, ACHIM A. Deciphering the black spruce response to climate variation across eastern Canada using a meta-analysis approach[J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 520(15): 120375.
- [3] KANNENBERG S A, NOVICK K A, ALEXANDER M R, et al. Linking drought legacy effects across scales: From leaves to tree rings to ecosystems[J]. *Glob Chang Biol*, 2019, 25(9): 2978-2992.
- [4] BABST F, POULTER B, TROUET V, et al. Site - and species - specific responses of forest growth to climate across the European continent[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 706-717.
- [5] GAO W Q, LIU J F, XUE Z M, et al. Geographical patterns and drivers of growth dynamics of *Q. variabilis*[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 429: 256-266.
- [6] SÁNCHEZ - SALGUERO R, CAMARERO J J, GUTIÉRREZ E, et al. Assessing forest vulnerability to climate warming using a process - based model of tree growth: Bad prospects for rear - edges[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(7): 2705-2719.
- [7] SÁNCHEZ-SALGUERO R, CAMARERO J J, HEVIA A, et al. What drives growth of Scots pine in continental Mediterranean climates: drought, low temperatures or both?[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 206: 151-162.

- [8] GAO W Q, NI Y Y, XUE Z M, *et al.* Population structure and regeneration dynamics of *Q. variabilis* along latitudinal and longitudinal gradients[J]. *Ecosphere*, 2017, 8(4): e01737.
- [9] CAMARERO J J, GAZOL A, SANGÜESA - BARREDA G, *et al.* To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(1): 44-57.
- [10] ARZAC A, GARCIA-CERVIGON A I, VICENTE-SERRANO S M, *et al.* Phenological shifts in climatic response of secondary growth allow *Juniperus sabina* L. to cope with altitudinal and temporal climate variability[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 217: 35-45.
- [11] HUANG J, TARDIF J C, BERGERON Y, *et al.* Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 711-731.
- [12] TARDIF J, CONCIATORI F, NANTEL P, *et al.* Radial growth and climate responses of white oak (*Q. alba*) and northern red oak (*Q. rubra*) at the northern distribution limit of white oak in Quebec, Canada[J]. *Journal of Biogeography*, 2006, 33(9): 1657-69.
- [13] GOLDBLUM D. The geography of white oak's (*Q. alba* L.) response to climatic variables in North America and speculation on its sensitivity to climate change across its range[J]. *Dendrochronologia*, 2010, 28(2): 73-83.
- [14] 国家林业局. 中国森林资源报告 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [15] 李宗善, 陈维梁, 韦景树, 等. 北京东灵山辽东栎林树木生长对气候要素的响应特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 27-37.
- [16] FRITTS H C. *Tree Rings and Climate*. [M] London: Academic Press, 1976
- [17] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bull.*1983.43: 69-75.
- [18] ZANG C, BIONDI F. Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships[J]. *Ecography*, 2015, 38(4): 431-436.
- [19] 王兆鹏. 罗霄山南部四种针叶树种多种树木年轮参数气候响应及气候重建研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2022.
- [20] BARBER V A, JUDAY G P, FINNEY B P. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress[J]. *Nature*, 2000, 405(6787): 668-673.
- [21] JIAO L, JIANG Y, ZHANG W, *et al.* Assessing the stability of radial growth responses to climate change by two dominant conifer trees species in the Tianshan Mountains, northwest China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 433: 667-677.
- [22] CORREA - DÍAZ A, SILVA L C R, HORWATH W R, *et al.* From trees to ecosystems: spatiotemporal scaling of climatic impacts on Montane Landscapes using dendrochronological, isotopic, and remotely sensed data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2020, 34(3): e2019GB006325.
- [23] DU F K, QI M, ZHANG Y Y, *et al.* Asymmetric character displacement in mixed oak stands[J]. *New Phytol*, 2022, 236(3): 1212-1224.
- [24] SHARMA B, FAN Z-X, PANTHI S, *et al.* Warming induced tree-growth decline of *Toona ciliata* in (sub-) tropical southwestern China[J]. *Dendrochronologia*, 2022, 73: 125954.
- [25] 都彦廷. 大兴安岭地区树轮宽度对气候变化的响应及NDVI重建研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2021.



# Differences in the Response of Radial Growth of Three *Quercus* Species to Climatic Elements at the Northern Edge of the Warm Temperate Zone and Prediction

WANG Qi<sup>1</sup>, SUN Jing-yi<sup>1</sup>, LIU Jian-feng<sup>1</sup>, CHANG Er-me<sup>1</sup>, FENG Jian<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-fang<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. Liaoning Academy of Forestry Sciences, Shenyang 110032, Liaoning, China; 3. Dalian Institute of Forestry Science, Liaoning Province, Dalian 116014, Liaoning, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study was to compare the differences of growth responses of different *Quercus* species to climatic factors in the same climatic region, and pay special attention to the intra- and inter- species differences at the margins of tree species distribution. [Methods] The response of radial growth of three dominant deciduous *Quercus* species (*Quercus mongolica*, *Q. variabilis* and *Q. acutissima*) to climatic factors in the northern margin of warm temperate zone in China was analyzed by dendrochronological method. At the same time, the relationship between radial growth and climate of three tree species was constructed by using mixed linear effect model, and their future growth trends were predicted based on future climate scenarios (RCP2.6 and RCP8.5). [Results] Chronology of *Quercus* species in the same area presented high similarity, but there were large differences among different areas. In terms of the response of radial growth to climate, the chronology of different *Quercus* species in the same region and the same *Quercus* species in different regions are also different. The radial growth of three *Quercus* species in Beijing was negatively correlated with the current June temperature, but there was no significant correlation with the temperature in Xianrendong (Liaoning Province). The radial growth of *Q. acutissima* in Beijing, *Q. mongolica* in Hebei and *Q. variabilis* in Dahei Mountain (Liaoning Province) were all limited by precipitation. The modeling results showed that by the end of this century, the radial growth of *Quercus* species in Beijing and Dahei Mountain would show a decreasing trend, while that in Xianrendong (Liaoning Province) an increasing trend. [Conclusion] There are significant differences in the growth responses of *Quercus* species to climate factors in different areas of the northern margin of warm temperate zone in China, which are mainly dominated by the climate features of sampling regions. In the next step, it should be necessary to clarify the relative contribution of various environmental factors (e.g., stand features and site factors) to radial growth of *Quercus* species.

**Keywords:** climate change; tree-ring; *Quercus* spp.; radial growth

(责任编辑: 彭南轩)