

五大连池火山蒙古栎和紫椴径向生长对气候变化的响应

谢立红^{1,2},黄庆阳^{1,2},曹宏杰^{1,2},杨帆^{1,2},王继丰^{1,2},倪红伟^{2,3*}

(1. 黑龙江省科学院 自然与生态研究所,黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 湿地与生态保育国家地方联合工程实验室,黑龙江 哈尔滨 150040;
3. 黑龙江省林业科学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:研究不同气候因子利用策略的蒙古栎和紫椴径向生长与气候变化的关系,进而为气候变暖后,该区域火山森林生态系统管理和利用提供基础数据。以蒙古栎和紫椴为研究对象,采用树木年代学方法分析了蒙古栎和紫椴径向生长对气候变化的响应,揭示蒙古栎和紫椴径向生长-气候的关系对气温突变的响应差异。结果表明:1)五大连池火山6—7月的月平均最高气温和干燥指数与蒙古栎和紫椴年轮指数均呈显著负相关($P<0.05$),这表明同一区域树木生长-气候关系具有一定的相似性,也表明6—7月的月平均最高气温和干燥指数是该地区蒙古栎和紫椴径向生长的主要限制因子。2)蒙古栎和紫椴年轮指数在突变增温(1981年)前后与气候的响应关系呈现明显的变化,气温明显变暖后与气候的响应更加敏感;突变增温后,南北坡向蒙古栎和紫椴树木生长-气候响应差异显著,南坡蒙古栎径向生长的趋势与温度升高的趋势相同,而北坡紫椴径向生长则呈现出随着温度升高而降低的现象。升温造成的干旱胁迫可能是2树种生长响应差异及北坡紫椴出现生长对温度变化响应的“分离现象”的重要原因。如果未来增温趋势持续或者加重,紫椴的生长可能会因干旱胁迫加剧而衰退,蒙古栎生长增长的趋势快速下降或也出现生长对温度变化响应的“分离现象”。
关键词:五大连池火山;蒙古栎;紫椴;径向生长;气候响应

中图分类号:S792 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2021)03-0001-09

Response of Radial Growth for *Quercus mongolica* and *Tilia amurensis* in Wudalianchi Volcano, China to Climate Changes

XIE Li-hong^{1,2}, HAUNG Qing-yang^{1,2}, GAO Hong-jie^{1,2}, YANG Fan^{1,2}, WANG Ji-feng^{1,2}, NI Hong-wei^{2,3*}

(1. Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Wetlands and Ecological Conservation, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
3. Heilongjiang Academy of Forestry, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: *Quercus mongolica* and *Tilia amurensis* are the main broad-leaved tree species occurring on the southern and northern slopes of Wudalianchi volcano. The study of the relationship between the radial growth of broad-leaved tree species with utilization strategies of different climatic factors and climate changes can provide basic data for the management and utilization of the volcanic forest ecosystem under climate warming. In this work, *Q. mongolica* and *T. amurensis* were used as research objects to analyze the response of radial growth to climate change using dendrochronology, to reveal the difference in response two species. The results showed that 1) the tree-ring width indexes of two species were significantly and negatively correlated with the monthly mean maximum temperature (MMMT) and dryness index during

收稿日期:2020-06-29 修回日期:2020-09-09
基金项目:国家自然科学基金:五大连池火山熔岩台地森林凋落物主要营养元素沉积特性研究(31770497);黑龙江省院所基本应用技术研究专项:五大连池火山森林群落年龄结构动态及驱动力分析、五大连池火山蒙古栎种群结构与动态的研究(ZN-BZ2018ZR05, ZNBZ2020ZR04);黑龙江省科学院杰出青年项目:五大连池火山熔岩台地森林凋落物分解特性研究(CXJQ2018ZR03)。
作者简介:谢立红,硕士,副研究员。研究方向:生态学。E-mail:xielihong903@163.com
*通信作者:倪红伟,研究员,博士生导师。研究方向:生态学。E-mail:nihongwei2000@163.com

June to July ($P < 0.05$), indicating that the tree growth-climate relationship in the same region had a certain similarity. Meanwhile, the MMT and dryness index during June to July were the main limiting factors for the radial growth of the two species. 2) The response between climate and tree-ring width indexes showed obvious changes before and after the abrupt warming (1981), and the response became more sensitive after significant warming. The growth-climate response on the southern and northern slopes varied significantly after the abrupt warming. The radial growth of *Q. mongolica* had a consistent trend with the increasing temperature on the southern slope, however, the radial growth of *T. amurensis* decreased with the increasing temperature on the northern slope. Drought stress caused by warming was likely to cause difference in the growth response of the two species. And the drought stress may be an important reason for the “separation phenomenon” of *T. amurensis* growth in response to temperature changes on the northern slope. The growth of *T. amurensis* may decline with increased drought stress if warming trends persist or worsen in the future. In addition, the growth trend of *Q. mongolica* will decline rapidly, or the growth of *Q. mongolica* will also show the “separation phenomenon” in response to temperature changes.

Key words: Wudalianchi volcano; *Quercus mongolica*; *Tilia amurensis*; radial growth; climate response

树木年轮对气候变化的响应是年轮生态学研究的重要内容之一^[1]。树木年轮的形成与变异,是树木径向生长的一个重要特征,它受环境因子和树木本身的遗传因子共同影响^[2],并且树木年轮宽度可反映树木在外界环境影响下的生长情况^[3]。通过树木年轮的变化,我们可以掌握树木历年的生长情况,重建当地历年的气候因子,预测未来气候变化的规律,探索出气候变化对生态系统的影响。所以,采用树木年轮资料,了解气候与环境的变化,已经成为掌握历史气候环境演变数据的一个主要途径^[4],从而利于人们预测未来气候变化的情况,探知气候变化对生态系统的影响,以便于应对全球变化^[5]。

森林生态系统的结构和功能受气候变化影响显著^[6],气候变暖后,森林生态系统的响应研究备受关注。五大连池完好的内陆单成因火山地貌,原生而完整的植被演替过程,且地处大小兴安岭和松嫩平原植被交错区,是探知火山干扰对生物多样性系统发育和植被演替等众多科学问题的极好试验地^[7]。山地森林生态系统对气候变化反映比较敏感^[4],这为研究树木生长对气候变化的时空响应提供了极佳条件^[8]。乔木是森林生态系统的基础,探知本地区乔木优势树种的径向生长对气候变化的响应,便于掌握当地森林生态系统的响应机制。近年来,国内学者对东北阔叶树种的研究主要有李腾等^[9]研究东北南部蒙古栎径向生长对气候变化的响应;苏金娟等^[10]研究张广才岭北部三大硬阔树木生长-气候关系的时空变异;韩金生等^[11]研究小兴安岭蒙古栎和黄菠萝径向生长对气候变化的响应,然而国内学者对五大连池火山森林生态系统优势树种的径向生长对气候变化的响应研究尚未有报道,开展这方面的探究可以拓宽人们对于森林生态系统对气候变化响

应机制的探知渠道。蒙古栎(*Quercus mongolica*)与紫椴(*Tilia amurensis*)分别作为五大连池火山南坡和北坡的优势乔木树种,他们对气候因子利用的策略不同,近 40 a 暖干化现象非常明显^[12],研究不同坡向主要阔叶树种的径向生长与气候关系,可以为理解和预测气候变暖对阔叶森林生态系统的影响奠定基础。因此,本研究以蒙古栎和紫椴为对象,计算近 50 a 来突变增温的分界点,以期揭示蒙古栎和紫椴径向生长对气候变化的响应,探讨蒙古栎和紫椴径向生长-气候因子的关系对气温突变的响应差异,进而为气候变暖背景下该区域火山森林生态系统的管理及利用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取五大连池自然保护区(126°00′—126°45′E, 48°30′—48°50′N)的 4 座老期火山(东焦得布山、小孤山、尾山和南格拉球山)(图 1,表 1)。五大连池火山群位于黑龙江省黑河市西南部,地处小兴安岭南麓与松嫩平原的过渡地带,是我国第一个以火山自然环境及生态系统为保护对象的自然保护区^[13]。研究区属温带大陆性季风气候,夏季温暖短促,冬季严寒漫长,温度与降水四季变化明显。年平均气温为-0.5℃,1 月份最冷均温-23.78℃,7 月份最热均温 21.21℃,年平均降水量 476.33 mm,降水主要集中在 6—8 月,约占全年降水量的 63.93%以上(图 2)。研究区的主要森林植被类型为温带落叶阔叶混交林,主要包括蒙古栎林和落叶阔叶林等。乔木优势树种南坡为蒙古栎和黑桦(*Betula davurica*),北坡为紫椴和色木槭(*Acer mono*)等。研究区分布有暗棕壤性火山灰土和黑土性火山灰土^[14]。

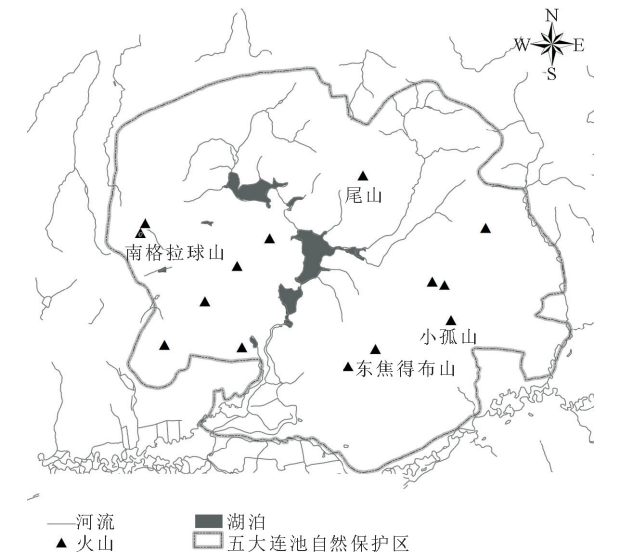


图 1 研究区位置示意
Fig. 1 Location of research area

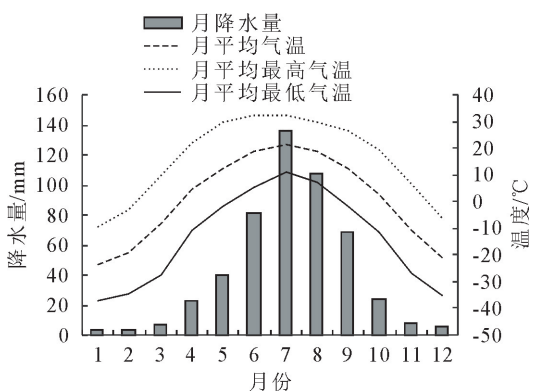


图 2 五大连池 1967—2018 年的月平均气温和月降水量
Fig. 2 Mean monthly temperature and precipitation during period from 1967 to 2018 in Wudalianchi

1.2 样品采集及年表建立

2018 年 10 中旬,在 4 座火山的南坡和北坡的山顶,按照树木年代学方法,随机选取位于林冠上

表 1 五大连池火山蒙古栎和紫椴采样点信息

Table 1 Sampling site information for *Quercus mongolica* and *Tilia amurensis* in Wudalianchi volcanoes

物种	采样点	经纬度	海拔/m	坡度	土层厚度/cm	郁闭度
蒙古栎	东焦得布山南坡	48°39'08",126°17'16"	531.9	35°~40°	35~40	0.6
	小孤山南坡	48°40'37",126°22'30"	453.5	37°~42°	45~50	0.6
	尾山南坡	48°47'20",126°15'52"	511.0	30°~35°	35~40	0.6
	南格拉球山南坡	48°44'06",126°00'25"	596.9	45°~50°	30~35	0.5
紫椴	东焦得布山北坡	48°39'18",126°17'07"	532.0	40°~45°	55~60	0.5
	小孤山北坡	48°40'48",126°22'28"	450.0	45°~50°	40~45	0.5
	尾山北坡	48°47'30",126°15'51"	516.0	40°~45°	50~55	0.5
	南格拉球山北坡	48°44'23",126°00'10"	584.0	45°~50°	50~55	0.5

层、生长健康的大树,一般周边树木较少,没有周边树木和人类活动对其影响。利用生长锥(5.15 mm)在胸高约 1.3 m 的位置钻取树木年轮样芯。火山生境条件较差,为减少对树木的损害,每棵树采集 1 个样芯,将所取样芯置于塑料管中,并标记编号。每座山每个树种采集 10~15 棵树,4 座山总计采集了 100 棵树[南坡蒙古栎 52 棵,平均胸径为 18.71±2.83 cm(标准差 SD);北坡紫椴 48 棵,平均胸径为 25.48±8.84 cm(标准差 SD)]100 个树芯标本。依据树木年轮学试验样本预处理的方法,对样品按程序整理^[15],进行交叉定年并用精度为 0.001 mm 轮宽量测仪(Lintab™6,Germany)进行宽度测量。运用 COFECHA 程序(version XP 2007)对宽度测量和交叉定年的结果进行检验,根据检验,删掉与总体样本序列的相关性较低的样芯。气候对树木生长的影响能够通过树木年轮的宽度变化反映出来,但研究时,应删掉树龄等遗传因素的干扰,才能正确掌握树木生长受年际间气候因子的差异的影响情况^[16],本研究采用年轮指数来剔除遗传因子的影响。运用 ARSTAN 程序以负指数函数或线性函数拟合的方

法去趋势^[17],进而得到差值年表(图 3)。年轮指数计算公式^[18]:

$$I_{(t)} = d_{(t)} / D_{(t)}$$
 (1)

式中, $I_{(t)}$ 为年轮指数; $d_{(t)}$ 为实际测量的年轮宽度; $D_{(t)}$ 为预计生长的年轮宽度。

通过此方法建立的树轮差值年表,较多的高频信息和较少的低频信息被保留^[19]。因为差值年表可以削弱树轮宽度后期异常波动现象对长时间序列分析的影响,而且与气候因子的相关性高,因此本研究利用差值年表来开展研究^[20]。平均敏感度(mean sensitivity,MS)可以表达树木年轮对环境变化敏感的程度^[4],树木对气候变化响应的敏感度与数值正相关。蒙古栎和紫椴年表的平均敏感度分别为 0.227 和 0.221,说明年表质量较好^[21]。2 个年表样本解释量(expressed population signal,EPS)分别为 0.964 和 0.886,均>0.85,第 1 主成分所占方差量(variation in first eigenvector/%)分别为 48.02 和 33.79(表 2)。因此,年表中包含一定的气候信息,适用于气候因子的响应分析。

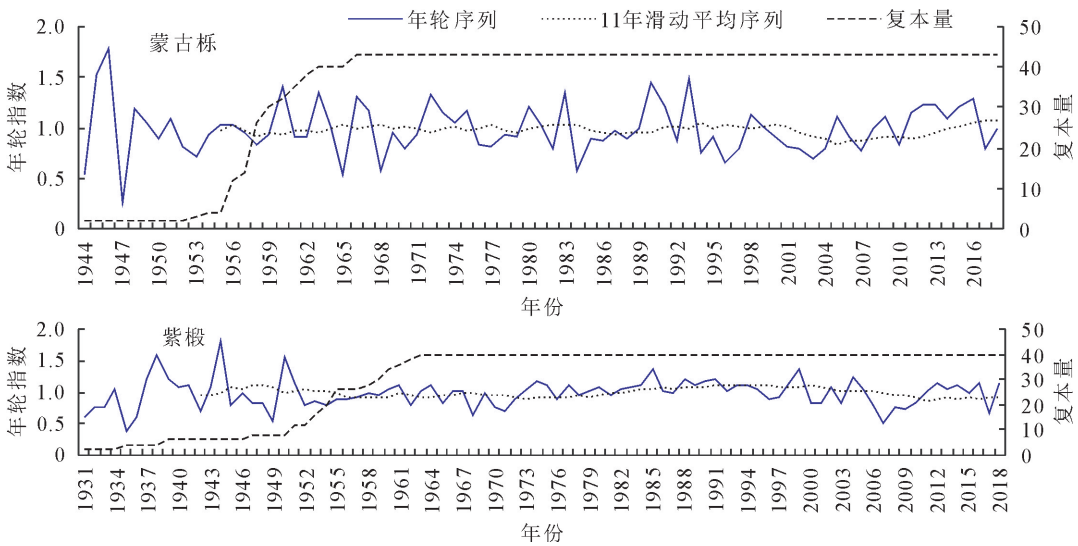


图3 五大连池火山蒙古栎和紫椴的差值年表

Fig. 3 The residual chronologies of *Q. mongolica* and *T. amurensis* in Wudalianchi volcanoes

表2 五大连池火山蒙古栎和紫椴差值年表的统计特征值

Table 2 Statistics characters for residual chronologies of *Q. mongolica* and *T. amurensis* in Wudalianchi volcanoes

特征	蒙古栎	紫椴
样本量(芯/树)	43/43	40/40
平均敏感度 MS	0.227	0.221
标准差 SD	0.254	0.325
树木间平均相关系数 R	0.450	0.280
信噪比(SNR)	27.030	7.772
样本解释量(EPS)	0.964	0.886
第一主成分所占方差量/%	48.020	33.79
序列长度	1 944~2 018	1 931~2 018

1.3 气象数据

1967—2018 年的气象数据来源于黑龙江省气象局五大连池市气象站(50655 站点),本研究采用月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、年平均气温、月降水量和年降水量。

1.4 数据分析

通过 Mann-Kendall 检验对气象数据 1967—2018 年的年均气温进行突变检验,明确当地气温突变可能发生的年份,UF 统计量值<0 时表明气候因子呈下降的趋势,>0 时表明气候因子呈上升的趋势,统计量 UF 和 UB 在置信区间的交接点即为气候因子的突变点^[22]。而生态气候指标则利用了生态学上常用的温暖指数(warmth index, W_i)、寒冷指数(coldness index, C_i)、湿润指数(humidity index, H_i)和干燥指数(drought index, I_i)^[23-24],计算公式如下:

温暖指数 $W_i = \sum(t_i - 5)$ (2)

寒冷指数 $C_i = \sum(5 - t_n)$ (3)

湿润指数 $H_i = P_i / W_i$ (4)

干燥指数 $I_i = W_i / \log(P_i)$ $i = 1, 2, \dots, n$ (5)
式中, i 为年代序列中的某年; t_i 为平均温度 5℃ 以上第 i 个月的平均温度; t_n 为平均温度 5℃ 以下第 n 个月的平均温度; P_i 为某年降水量值; i 为平均温度 >5℃ 或 <5℃ 月数。

运用 SPSS20.0 计算树轮年表间及树轮年表与气候因子的 Pearson($\alpha = 0.05$)相关系数,探知树木径向生长对气候因子的响应。由于上一年气候因子可能影响当年树木径向生长^[25],因此本研究相关分析选取的气候因子为上年 5 月到当年 9 月。

2 结果与分析

2.1 气候变化及蒙古栎和紫椴径向生长特点

对五大连池市气象站 1967—2018 年的年均气温进行 Mann-Kendall 检验,结果为 1975 年后 $UF > 0$,表明五大连池近 52 a 平均气温呈增加趋势,且 1981 年为研究区年均气温升高的突变点(图 4)。1967—1981 年多年平均年均温为 0.0℃,1982—2018 年多年平均年均温为 1.0℃,多年平均年均温较突变前升高了 1.0℃。1967—1981 年多年平均年降水量为 468.73 mm,1982—2018 年多年平均年降水量为 525.64 mm,增温突变后的多年平均降水量大于突变前,但多年平均降水量呈下降趋势(图 6)。研究期间,研究区温暖指数呈显著上升趋势,寒冷指数呈下降趋势,干燥指数呈显著上升趋势,且湿润指数呈下降趋势(图 5)。由此可见,研究区的气候向暖干趋势发展。

对气温突变前后蒙古栎和紫椴的生长变化分析表明,1981 年前蒙古栎和紫椴的年轮指数均呈上升的变化趋势,1981 年后蒙古栎的年轮指数以 0.026

• (10 a)⁻¹ 速率呈上升的变化趋势,而紫椴的年轮指数以 0.053 • (10 a)⁻¹ 速率呈显著下降的变化趋势(图 6)。蒙古栎和紫椴年表间为极显著正相关性($r=0.371^{**}, \alpha=0.01$)。

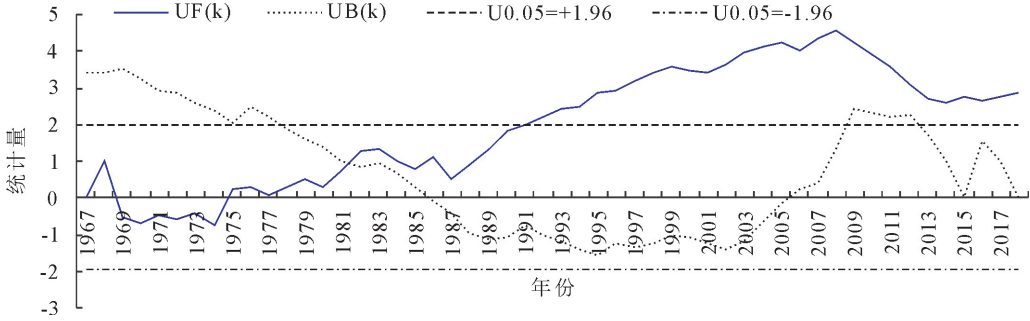


图 4 五大连池年平均气温 Mann-Kendall 统计量曲线

Fig. 4 Mann-Kendall statistics graph of annual mean temperature in Wudalianchi

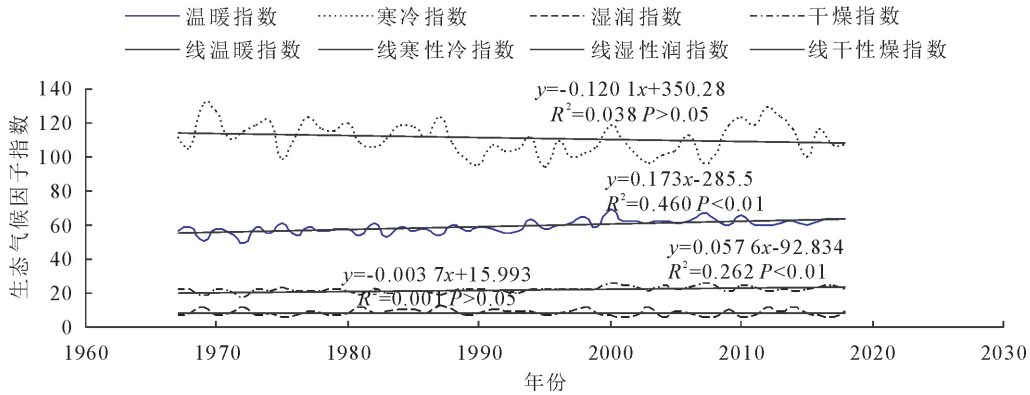


图 5 五大连池 4 种生态气候指标曲线

Fig. 5 Changes of four eco-climate indicators in Wudalianchi

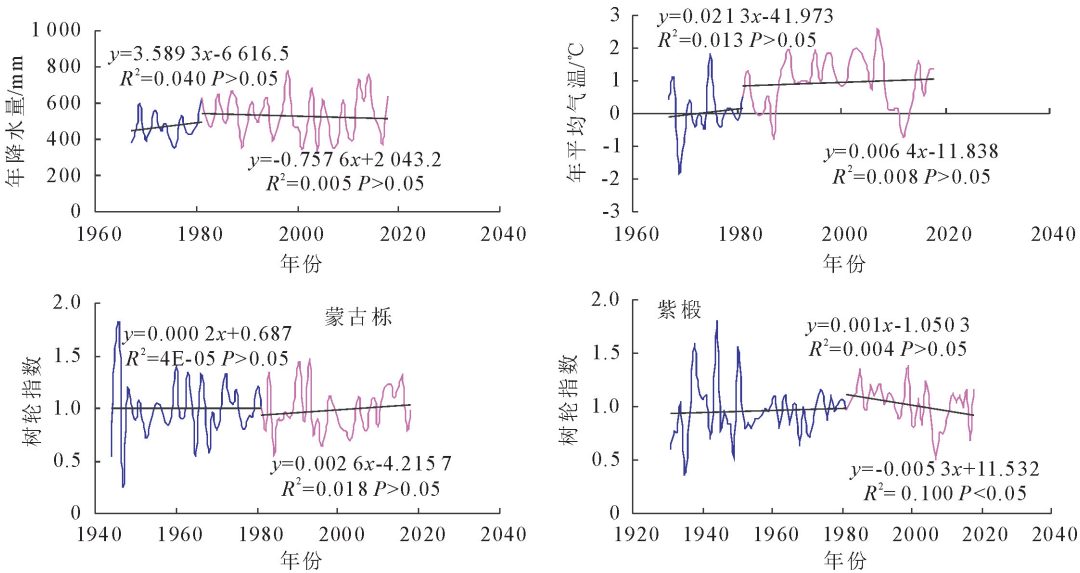


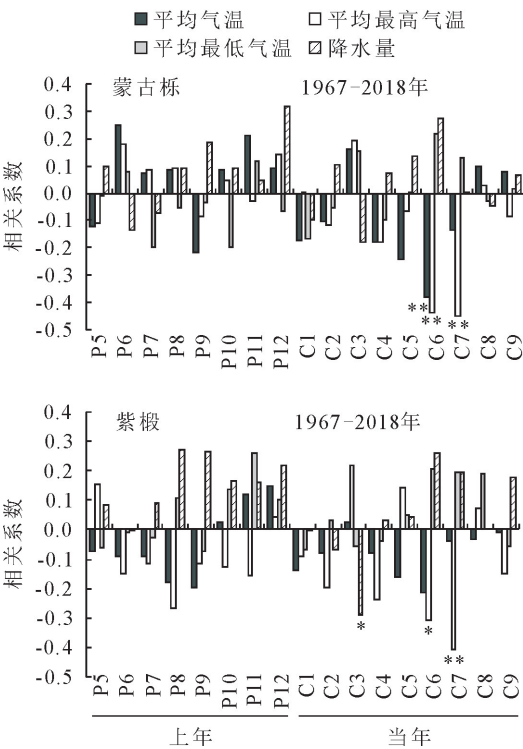
图 6 研究区突变增温前后年降水量、年平均气温及年轮指数的变化

Fig. 6 Changes in annual precipitation, mean annual temperature and tree-ring index before and after abrupt warming

2.2 蒙古栎和紫椴年轮指数对气候的响应

图 7 结果表明,蒙古栎年轮指数与当年 6 月的平均气温呈极显著负相关($r=-0.384^{**}, \alpha=0.01$),与当年 6 月和 7 月平均最高气温呈极显著负相关($r=-0.435^{**}, r=-0.447^{**}$),与上一年 12

月降水量呈显著正相关($r=0.321^{*}, \alpha=0.05$),与当年生长季 4—6 月降水量呈正相关关系,但未达到显著水平,与干燥指数呈显著负相关($r=-0.308^{*}$)(表 3)。因此蒙古栎的生长受当年 6—7 月最高气温和上年 12 月降水共同影响,且受高温的



注：* 表示显著相关，** 表示极显著相关，下同。

图 7 五大连池火山蒙古栎和紫椴年轮指数与气候因子的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients between tree-ring index of *Q. mongolica* and *T. amurensis* and climate factors in Wudalianchi volcano

表 3 五大连池火山蒙古栎和紫椴年轮指数与气候生态因子相关系数

Table 3 Correlation coefficients between tree-ring index of *Q. mongolica* and *T. amurensis* and eco-climate indicators in Wudalianchi volcano

	年降水量	年均温	温暖指数	寒冷指数	湿润指数	干燥指数
蒙古栎	0.163	-0.112	-0.264	0.025	0.232	-0.308*
紫椴	0.304*	-0.083	-0.202	0.018	0.327*	-0.323*

影响较突出。

紫椴年轮指数与当年 6 月平均最高气温呈显著负相关($r=-0.309^*$),与当年 7 月平均最高气温呈极显著负相关($r=-0.405^{**}$),与当年 3 月降水量呈显著负相关($r=-0.292^*$),与当年生长季的 4—7 月降水量呈正相关关系,但未达到显著水平,与年降水量呈显著正相关($r=0.304^*$),与干燥指数呈显著负相关($r=-0.323^*$)(表 3)。因此紫椴的生长受当年 6—7 月最高气温、当年 3 月降水及年降水量共同影响。

2.3 突变增温前后蒙古栎和紫椴径向生长对气候的响应差异

蒙古栎年轮指数在气温突变前与当年 7 月平均

最高气温呈极显著负相关($r=-0.709^{**}$),与当年 6 月平均最低气温呈显著正相关($r=0.606^*$);在气温突变后与当年 6 月平均气温呈极显著负相关($r=-0.448^{**}$),与当年 6 月平均最高气温呈极显著负相关($r=-0.500^{**}$),与当年 7 月平均最高气温呈显著负相关($r=-0.365^*$),与上年 12 月降水量呈显著正相关($r=0.378^*$)(图 8)。增温突变前后年轮指数与当年生长季 7—8 月降水量的相关性有明显变化,从突变前的正相关($r=0.106$ 和 $r=0.051$)变为突变后的负相关($r=-0.019$ 和 $r=-0.092$)。蒙古栎年轮指数在气温突变前与研究区的年降水量、年均温和湿润指数呈正相关,与温暖指数、寒冷指数和干燥指数呈负相关,但均未达到显著水平;在增温突变后与研究区的温暖指数和干燥指数均呈显著负相关($r=-0.330^*$ 和 $r=-0.358^*$)(表 4)。由此可见,增温突变后气温和降水对蒙古栎径向生长的影响作用明显增强。

紫椴年轮指数在气温突变前与上年 10 月平均气温和平均最低气温均呈显著负相关($r=-0.624^*$, $r=-0.548^*$),与当年 4 月平均最高气温呈显著负相关($r=-0.552^*$),与上年 11—12 月降水量均呈显著正相关($r=0.645^*$, $r=0.541^*$),与当年 6 月降水量呈显著正相关($r=0.575^*$);在气温突变后与上年 9 月平均气温呈极显著负相关($r=-0.432^{**}$),与上年 8 月平均最高气温呈显著负相关($r=-0.346^*$),与当年 7 月平均最高气温呈显著负相关($r=-0.380^*$),与上年 10 月平均最低气温呈显著正相关($r=0.360^*$),与上年 8 月降水量呈极显著正相关($r=0.471^{**}$),与当年 3 月降水量呈极显著负相关($r=-0.460^{**}$)(图 8)。增温突变前后年轮指数与当年生长季的 7—9 月平均气温和 8—9 月降水量的相关性都有明显变化,与 7—9 月平均气温从突变前的正相关($r=0.131$, $r=0.289$ 和 $r=0.401$)变为突变后的负相关($r=-0.116$, $r=-0.270$ 和 $r=-0.194$),而与 8—9 月降水量从突变前的负相关($r=-0.067$ 和 $r=-0.472$)变为突变后的正相关($r=0.054$ 和 $r=0.304$)。紫椴年轮指数在气温突变前与研究区的年降水量、温暖指数、寒冷指数和湿润指数呈正相关,与年均温和干燥指数呈负相关,但均未达到显著水平;在增温突变后与研究区的温暖指数和干燥指数均呈极显著负相关($r=-0.426^{**}$ 和 $r=-0.505^{**}$),与湿润指数呈显著正相关($r=0.378^*$)(表 4)。由此可见,增温突变后气温和降水对紫椴径向生长的影响作用明显增强。

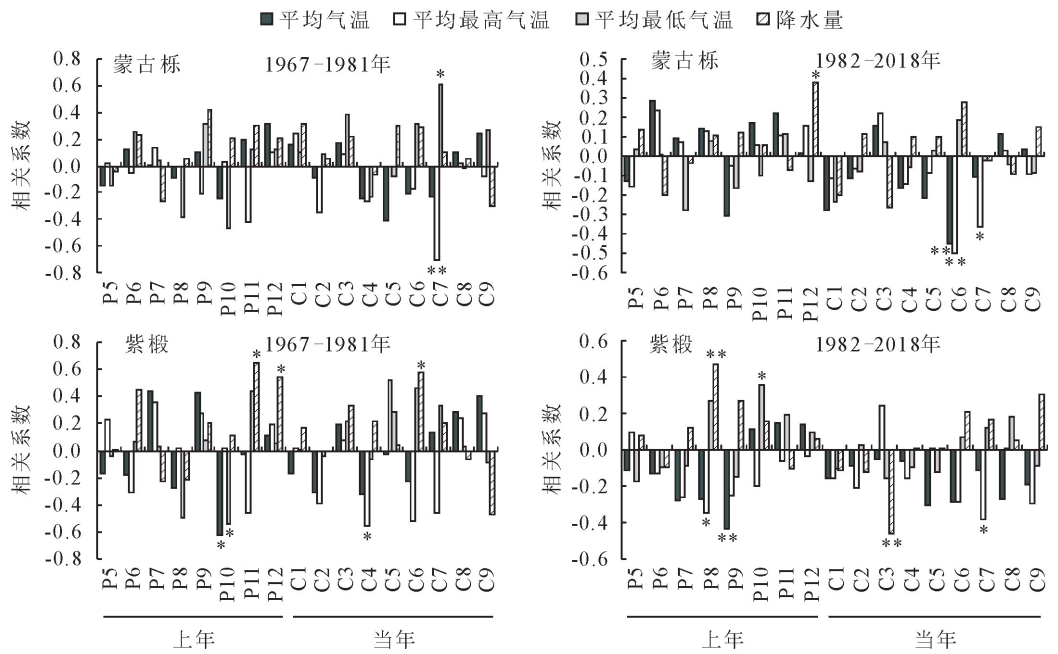


图 8 五大连池火山突变增温前后蒙古栎和紫椴年轮指数与气候因子的相关系数

Fig. 8 Correlation coefficients between tree-ring index of *Q. mongolica* and *T. amurensis* and climate factors before and after abrupt warming in Wudalianchi volcano

表 4 五大连池火山突变增温前后蒙古栎和紫椴年轮指数与气候生态因子相关系数

Table 4 Correlation coefficients between tree-ring index of *Q. mongolica* and *T. amurensis* and eco-climate indicators before and after abrupt warming in Wudalianchi volcano

	年份	年降水量	年均温	温暖指数	寒冷指数	湿润指数	干燥指数
蒙古栎	1967—1981	0.155	0.031	−0.224	−0.100	0.219	−0.220
	1982—2018	0.173	−0.181	−0.330 *	0.065	0.237	−0.358 *
紫椴	1967—1981	0.162	−0.147	0.070	0.219	0.118	−0.012
	1982—2018	0.311	−0.174	−0.426 **	0.022	0.378 *	−0.505 **

3 结论与讨论

3.1 结论

五大连池火山南北坡向不同气候策略的树木生长-气候关系具有一定的相似性,6—7 月的月平均最高温和干燥指数是影响五大连池火山蒙古栎和紫椴生长的共同气候关键因素。

突变增温后,南北坡向蒙古栎和紫椴树木生长-气候响应差异显著,南坡蒙古栎径向生长的趋势与温度升高的趋势相一致,而北坡紫椴径向生长的趋势则出现随着温度升高而下降。升温造成的干旱胁迫可能是南北坡向上 2 树种生长-气候响应差异显著及北坡紫椴出现生长对温度变化响应的“分离现象”的重要原因。

目前,升温可能并未超过南坡蒙古栎生长的临界温度,对其生长表现出一定的促进作用同时,但本研究发现温度升高导致蒙古栎对气候的响应更加敏感。如果未来增温趋势持续或者加重,北坡紫椴的生长可能会因干旱胁迫加剧而衰退,南坡蒙古栎生

长增长的趋势快速下降或也出现生长对温度变化响应的“分离现象”。

3.2 讨论

3.2.1 南北坡向不同气候策略的树种生长对气候响应模式 南坡的蒙古栎和北坡的紫椴径向生长与当年生长季 6 月的月平均最高气温呈极显著和显著负相关,与当年生长季 7 月的月平均最高气温均呈极显著负相关,与当年 3 月降水量均呈负相关,且紫椴呈显著负相关;与上年 12 月降水量均呈正相关,且蒙古栎呈显著正相关,与研究区干燥指数均呈显著负相关,说明同一区域南北坡向不同气候策略的树木生长-气候关系具有一定的相似性。在半湿润地区,高温可以加快植物蒸腾和土壤水分蒸发,加剧干旱胁迫,从而抑制树木生长^[26]。蒙古栎在生长季初期,代谢旺盛,需水量较高,如果此时温度过高会加剧蒸发,导致土壤水分亏缺,影响植株养分的吸收、运输及有机物积累,制约细胞活力及分裂速度,致使树木形成窄轮^[9]。6—7 月正处于五大连池火山蒙古栎和紫椴生长旺季,树木生长需要较多水分,

此时较高的温度会提高土壤水分蒸发量使土壤水分不足,降低蒙古栎和紫椴叶片的净光合速率,影响蒙古栎和紫椴的光合性能,导致树木内部养分配积减少,致使树木形成窄轮。因此,6—7 月的月平均最高温和干燥指数是影响五大连池火山蒙古栎和紫椴生长的共同气候关键因素。树木径向生长除了受当年生长季温度和降水影响外,上年生长季末期和非生长季的温度和降水条件也会通过影响树木代谢活动、改变植物体内营养物质和水分储存情况,对来年的树木生长产生“滞后效应”^[27-29]。上年 12 月是五大连池火山一年中最冷时期的开始,一般降雪增多容易导致土壤温度降低趋缓,有利于保护根系,从而影响树木生长。蒙古栎主要生长在山体的南坡,生长季 6 月平均最高气温增高会加速土壤水分蒸发量使土壤水分不足更严重,抑制树木径向生长,导致蒙古栎径向生长受高温的影响较显著。紫椴主要生长在山体的北坡,3 月降水量增多会使春季低温时间增长,缩短生长季的同时抑制树木生长,导致树木形成窄轮。因此,在五大连池火山区,主要生长在南坡的蒙古栎和主要生长在北坡的紫椴,生理习性差异可能是导致 2 树种生长-气候响应不同的主要原因。

3.2.2 突变增温对南坡蒙古栎和北坡紫椴径向生长的影响 蒙古栎和紫椴年轮指数在突变增温(1981 年)前后与气候的响应关系呈现明显的变化,气温明显变暖后蒙古栎和紫椴年轮指数与气候的响应更加敏感。蒙古栎因其耐贫瘠、耐干旱等优势特性及较强的生态适应性成为南、东南或西南的斜坡和陡坡或山脊等立地条件很差的优势树种^[30]。在五大连池火山蒙古栎主要生长在南坡的干旱生境下,升温触发暖干旱现象,高温会提高植物蒸腾作用及土壤或空气中的水分蒸发,进一步加剧干旱生境下植物的干旱胁迫,抑制植物生长,而上年 12 月降水增多能缓解下一年的干旱,从而表现出径向生长与当年 6 月平均最高温和月平均气温及干燥指数均呈极显著的负相关,与当年 7 月平均最高气温和温暖指数均呈显著负相关的关系,而与上年 12 月降水量呈显著正相关。也说明了随着温度升高,这种由干旱胁迫造成的水分亏缺对南坡蒙古栎生长的限制作用越来越强。有研究表明,升温造成的干旱会导致森林生产力下降^[31]。紫椴主要分布在五大连池火山北坡,上年生长季末期升温后使树木代谢活动增强、消耗植物体内营养物质和水分,而上年生长季末期降水量增多抑制升温的同时有利于植物体内营养物质和水分储存,但持续变暖加剧干旱胁迫,温度对紫椴径向生长的负效应则会越来越凸显,对来年的树木生长产生的“滞后效应”明显增强,从而表

现出径向生长与上年 8 月平均最高气温呈显著负相关和与上年 9 月平均气温、温暖指数和干燥指数均呈极显著负相关,而与上年 8 月降水量呈极显著正相关和与湿润指数呈显著正相关的关系。紫椴最适于在半阴坡生长^[32],3 月降水量增多会导致由于生长季前低温时间增多而缩短树木的生长期,从而表现出与当年 3 月降水量呈极显著负相关。7 月是五大连池火山紫椴生长季最旺的月份,升温后的月平均最高气温超出其耐受温度或进一步加剧干旱胁迫,同时升温后干燥指数上升的“暖干化”现象导致 6 月降水的正效应减弱,因此温度对北坡紫椴径向生长的抑制作用则会越来越凸显,致使紫椴径向生长与温度变化出现“分离现象”。

致谢:感谢中国科学院植物研究所张齐兵研究员、东北林业大学王晓春教授和瑞士森林、景观、雪研究所 Paolo Cherubini 研究员对树木年轮学的大力帮助!

参考文献:

[1] LAMARCHE V C,GRAYBILL D A,FRITTS H C,*et al.* Increasing atmospheric carbon dioxide: tree ring evidence for growth enhancement in natural vegetation[J]. *Science*,1984,225:1019-1021.

[2] 于大炮,周莉,代力民,等. 树木年轮分析在全球变化研究中的应用[J]. *生态学杂志*,2003,22(6):91-96.

[3] 吴泽民,黄成林,马青山. 黄山松年轮生长和气候的关系[J]. *应用生态学报*,1999,10(2):147-150.

[4] FRITTS H C. *Tree Rings and Climate*[M]. New York: Academic Press,1976.

[5] 王婷,于丹,李江凤,等. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展[J]. *植物生态学报*,2003,27(1):23-33.

[6] VAN MANTGEM P J,STEPHENSON N L,BYRNE J C,*et al.* Widespread increase of tree mortality rates in the western United States[J]. *Science*,2009,323:521-524.

[7] 周志强,徐丽娇,张玉红,等. 黑龙江五大连池的生态价值分析[J]. *生物多样性*,2011,19(1):63-70.

ZHOU Z Q,XU L J,ZHANG Y H,*et al.* An analysis of the ecological value of Wudalianchi, Heilongjiang Province, China [J]. *Biodiversity Science*,2011,19(1):63-70. (in Chinese)

[8] 王晓春,周晓峰,孙志虎. 高山林线与气候变化关系研究进展[J]. *生态学杂志*,2005,24(3):301-305.

WANG X C,ZHOU X F,SUN Z H. Research advances in the relationship between alpine timberline and climate change[J]. *Chinese Journal of Ecology*,2005,24(3):301-305. (in Chinese)

[9] 李腾,何兴元,陈振举. 东北南部蒙古栎径向生长对气候变化的响应—以千山为例[J]. *应用生态学报*,2014,25(7):1841-1848.

LI T,HE X Y,CHEN Z J. Tree-ring growth responses of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) to climate change in southern northeast: a case study in Qianshan mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2014,25(7):1841-1848.

(in Chinese)

[10] 苏金娟,王晓春. 张广才岭北部三大硬阔树木生长-气候关系的时空变异[J]. 生态学报,2017,37(5):1484-1495.
SU J J, WANG X C. Spatio-temporal variations in climate-growth relationships of three hardwood tree species across the north Zhangguangcai Mountains, northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1484-1495. (in Chinese)

[11] 韩金生,赵慧颖,朱良军,等. 小兴安岭蒙古栎和黄菠萝径向生长对气候变化的响应比较[J]. 应用生态学报,2019,30(7):2218-2230.
HAN J S, ZHAO H Y, ZHU L J, *et al.* Comparing the responses of radial growth between *Quercus mongolica* and *Phellodendron amurense* to climate change in Xiaoxing'an Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019,30(7):2218-2230. (in Chinese)

[12] 胡琦,潘学标,张丹,等. 东北地区不同时间尺度下气温和无霜期的变化特征[J]. 中国农业气象,2015,36(1):1-8.

[13] 刘艳华,王洪兴,石秋生,等. 五大连池火山群野生植物资源调查研究与应用[J]. 中国园艺文摘 2011(3):59-63.

[14] 张树民,陈黎明,邢润贵,等. 五大连池火山区土壤和植被分布与特征[J]. 国土与自然资源研究,2005(1):86-88.

[15] 河海. 使用 WinDENDRO 测量树轮宽度及交叉定年方法[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2005,22(4):39-44.

[16] 刘淑明,马龙第,孙丙寅,等. 油松年轮生长与秦岭北坡气候的初步研究[J]. 西北林学院学报,1997,12(2):37-41.
LIU S M, MA L D, SUN B Y, *et al.* Correlation between ring growth of *Pinus tabulaeformis* and the climate of north-facing Slope of the Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University,1997,12(2):37-41. (in Chinese)

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

[18] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京:中国气象出版社,1990:127-128.

[19] 邵雪梅,吴祥定. 华山树木年轮年表的建立[J]. 地理学报,1994,49(2):174-181.

[20] 孙毓,王丽丽,陈津,等. 中国落叶松属树木年轮生长特性及其对气候变化的响应[J]. 中国科学:地球科学,2010,40(5):645-653.
SUN Y, WANG L L, CHEN J, *et al.* Growth characteristics and response to climate change of *Larix* Miller tree-ring in China[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2010,40(5):645-653. (in Chinese)

[21] SMITH K T. An organismal view of dendrochronology[J]. Dendrochronologia,2008,26:185-193.

[22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京:中国气象出版社,2007:69-70.

[23] 徐文铎. 吉良的热盆指数及其在中国植被中的应用[J]. 生态学杂志,1985(3):35-39.

[24] 孟猛,倪健,张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J]. 植物生态学报,2004,28(6):853-861.
MENG M, NI J, ZHANG Z G. Aridity index and its applications in geo-ecological study[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004,28(6):853-861. (in Chinese)

[25] FRITTS H C. Relationships of ring widths in arid-site conifers to variations in monthly temperature and precipitation[J]. Ecological Monographs,1974,44 (4):411-440.

[26] 张先亮,崔明星,马艳军,等. 大兴安岭库都尔地区兴安落叶松年轮宽度年表及其与气候变化的关系[J]. 应用生态学报,2010,21(10):2501-2507.

[27] 周子建,江源,董满宇,等. 长白山北坡不同海拔红松径向生长-气候因子关系对气候变化的响应[J]. 生态学报,2018,38(13):1-9.
ZHOU Z J, JIANG Y, DONG M Y, *et al.* Response of the relationship between radial growth and climatic factors to climate change along an altitudinal gradient on the northern slope of Changbai Mountain, northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(13):1-9. (in Chinese)

[28] 陈列,高露双,张赞,等. 长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系[J]. 生态学报,2013,33(4):1285-1291.
CHEN L, GAO L S, ZHANG Y, *et al.* Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(4):1285-1291. (in Chinese)

[29] 刘忠玲,吕跃东,姚颖. 不同林分密度原始红松林枯落物和土壤的持水特性[J]. 森林工程,2020,36(5):8-15.
LIU Z L, LV Y D, YAO Y. Water-holding characteristics of litter and soil of original korean pine forests stands with different densities[J]. Forest Engineering,2020,36(5):8-15. (in Chinese)

[30] 于洋,王海燕,雷相东,等. 东北过伐林区蒙古栎天然林土壤有机碳研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(2):57-62.
YU Y, WANG H Y, LEI X D, *et al.* Soil organic carbon in over-logged forest stands of *Quercus mongolica* in northeastern China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011,26(2):57-62. (in Chinese)

[31] CLARK D A, PIPER S C, KEELING C D, *et al.* Tropical rain forest tree growth and atmospheric carbon dynamics linked to interannual temperature variation during 1984-2000[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2003,100:5852-5857.

[32] 赵刚,邹学忠,吴月亮,等. 紫椴适生立地条件研究[J]. 辽宁林业科技,2005(1):7-9.