

长白山落叶松与鱼鳞云杉生长-气候关系的种间差异

王守乐^{1,2} 王晓雨³ 盖学瑞⁴ 代力民⁵ 周旺明⁵ 周莉⁵ 于大炮^{5*}

(¹中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³浙江农林大学暨阳学院, 杭州 311300; ⁴沈阳师范大学旅游管理学院, 沈阳 110034; ⁵中国科学院沈阳应用生态研究所森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016)

摘要 为阐明不同树种间树木径向生长对气候变化的响应及其时间稳定性, 本研究以长白山北坡高海拔处(1600~1750 m)落叶松和鱼鳞云杉为研究对象, 运用年轮年代学方法探究树木径向生长与气候的关系。结果表明: 研究区落叶松生长与当年6月最高气温呈显著正相关, 与当年6月降水呈负相关; 鱼鳞云杉与当年5月最高温度呈显著正相关。冗余分析进一步表明, 落叶松生长主要受夏季温度的影响, 鱼鳞云杉生长主要受春季温度的制约。在1959—2014年, 落叶松生长-夏季温度关系相对稳定; 对于鱼鳞云杉, 自1986年以来其与春季温度的相关性减弱, 可能由于最高温度降低导致树木生长减慢。本研究结果可以为预测气候变化情景下长白山针叶树种生长的响应趋势提供数据支持和理论参考。

关键词 径向生长; 落叶松; 鱼鳞云杉; 气候变化; 长白山

Interspecific difference of relationship between radial growth and climate factor for *Larix olgensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* in Changbai Mountain, Northeast China. WANG Shou-le^{1,2}, WANG Xiao-yu³, GAI Xue-rui⁴, DAI Li-min⁵, ZHOU Wang-ming⁵, ZHOU Li⁵, YU Da-pao^{5*} (¹Xinjiang Institute of Ecology and Geography Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Jiyang College of Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China; ⁴School of Tourism and Hospitality Management, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China; ⁵Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China).

Abstract: To clarify the responses of radial growth of different tree species to climate change and its stability, we explored the relationships between radial growth and climate factors of larch (*Larix olgensis*) and spruce (*Picea jezoensis* var. *komarovii*) distributed at high altitude (1600–1750 m) on the northern slope of Changbai Mountain, using the chronological method. The results showed that the growth of larch was significantly positively correlated with the maximum temperature in June and negatively correlated with the precipitation in June. The radial growth of spruce was significantly positively correlated with the maximum temperature in May. Results from redundancy analysis showed that larch growth was mainly affected by summer temperature, while spruce growth was significantly restricted by spring temperature. During 1959–2014, the relationship between larch growth and summer temperature was relatively stable. For spruce, the correlation between radial growth and spring temperatures had gradually weakened since 1986, mainly due to the growth slowdown because of decreased maximum air temperature. Our results provide theoretical references for predicting the growth response of conifers at Changbai Mountain region in the context of climate change.

Key words: radial growth; *Larix olgensis*; *Picea jezoensis* var. *komarovii*; climate change; Changbai Mountain.

树木年轮具有定年准确、连续性强以及记录的气候信息丰富等特点,树木年轮学已成为分析气候变化-树木生长关系的重要手段之一^[1-2].复杂的环境条件使树木生长-气候关系并非一致.受树种内部遗传因素的影响,同一生境下不同树木生长对气候的响应也存在差异.例如,长白山鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *komarovii*)主要受5月温度影响,红松(*Pinus koraiensis*)生长与6、7月温度相关^[3-4].这种结果不仅与微生境以及去趋势方法有关,更多可能是与树木生长的种间差异有关^[5].气候变化会直接作用于树木生理过程,影响树木的生长趋势,越来越多的研究发现,某些树种径向生长-气候因子关系表现出“分异现象”,即在气候变暖后其生长对气候的敏感性下降或生长减缓^[6-9],然而形成机制并没有达到共识,这为预测植被动态带来了不确定性.开展树木年轮学研究,分析气候变化下树木生长特征及其与气候关系的时空变化规律,对于深入了解生态系统的植被组成变化具有重要的指导作用.

长白山为我国东北地区最高的山体,其植被分布垂直带十分明显,是进行树木年轮学研究的理想区域.目前,针对树木生长对气候变化的响应已做大量研究并取得可观成果,如长白山气候重建、鱼鳞云杉和红松等针叶树种生长-气候关系的海拔差异等^[3,6,10-11].但是,有关同一生境下树木生长对气候响应的种间差异研究并不多见,季节性气候对树木生长的影响及其动态关系也鲜有报道^[12].鱼鳞云杉和落叶松(*Larix olgensis*)是长白山地区主要针叶树种,两树种均对气候因子敏感性较高,多被应用于树木年轮学研究^[12-13].因此,本研究分析长白山北坡高海拔处落叶松和鱼鳞云杉的径向生长与气候的关系,探讨两种树木生长-气候关系的差异及其时间稳定性,一方面可以丰富该地区树木年代学研究,另一方面为预测长白山森林群落中种群动态变化及分布格局提供依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于长白山自然保护区北坡(41°31′—42°28′ N, 127°9′—128°55′ E).海拔在750~2000 m,长白山北坡形成3个森林分布带:阔叶红松林、暗针叶林和岳桦林,其中,鱼鳞云杉为暗针叶林(海拔1100~1700 m)中的优势树种,落叶松是长白山广泛分布的稳域性乔木种类.该区属于受季风影响的温带大陆性气候,冬季寒冷漫长,夏季短暂且温暖多雨

(图1).年总降水量随海拔的升高而增加,山下(海拔740 m)为600~800 mm,山顶(海拔2691 m)达到1340 mm.山下年均温约2.8℃,山顶年均温只有-7.3℃左右.

1.2 样本采集

2015年9月,在长白山北坡海拔1600~1750 m处采集生长在林冠层的鱼鳞云杉和落叶松.使用生长锥在胸高处(距地面1.3 m)沿相反方向每棵树钻取树芯2个,并进行编号标记.采样点鱼鳞云杉和落叶松不少于30棵,满足样本量要求.

1.3 建立年表

采集到的落叶松和鱼鳞云杉树芯经晾干、固定、打磨等预处理后,经目视交叉定年,然后通过LinTab年轮分析仪器在0.001 mm水平上测量树轮宽度.由于采样时间为2015年9月,因此年轮宽度完整的最后一年定为2014年.为保证测量和定年的准确性,用COFECHA程序进行测量和交叉定年结果检验,剔除问题较大的样本,最后落叶松和鱼鳞云杉分别保留32/60和32/62株/芯.

通过ARSTAN程序以保守的负指数曲线以及斜率为负的线性回归拟合去掉树木本身遗传和干扰竞争产生的生长趋势,再使用双重平均法合成标准年表(STD),又以时间序列的自回归模型在去趋势基础上进行拟合,进行再次标准化.对剔除了与树龄相关的生长趋势和每株树所特有的低频波动的差值序列,以同样的方法合成差值年表(RES).因为RES气候敏感度等统计学特征优于STD(表1),所以本研究利用RES进行树木生长-气候关系分析.

由于在建立年表的过程中会消除掉一些有关树

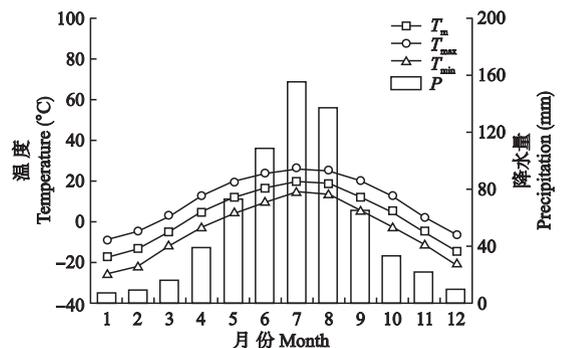


图1 二道气象站1958—2014年月平均温度、最高温度、最低温度和降水量的变化

Fig.1 Change of monthly mean temperature, maximum temperature, minimum temperature and total precipitation at Erdao Meteorological Station in 1958–2014.

T_m : 月平均气温 Monthly mean temperature; T_{max} : 最高温度 Maximum temperature; T_{min} : 最低温度 Minimum temperature; P: 降水量 Precipitation.

表 1 落叶松和鱼鳞云杉年表的统计学特征与公共区间分析
Table 1 Statistical characters of chronologies of *Larix olgensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* and common intervals analysis

项目 Item	落叶松 <i>Larix olgensis</i>		鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i> var. <i>komarovii</i>	
	样本量 (株/芯) Sample size (plant/core)	32/60		32/62
年轮宽度 Annual ring width (mm)	0.690		1.169	
公共区间 Common intervals	1858—2014		1888—2014	
年表类型 Chronology type	STD	RES	STD	RES
标准差 Standard deviation	0.261	0.215	0.402	0.121
平均敏感度 Mean sensitivity	0.201	0.259	0.124	0.139
一阶自相关 Autocorrelation order 1	0.535	-0.064	0.885	0.043
树与树间相关系数 Correlation coefficient among trees	0.309	0.315	0.230	0.341
信噪比 Signal-noise ratio	34.18	40.27	15.49	26.90
样本总体代表性 Express popu- lation signal	0.972	0.976	0.939	0.964
第一主成分所占方差量 Vari- ance in first eigenvector (%)	45.4	48.4	28.4	36.0

STD: 标准年表 Standard chronology; RES: 差值年表 Residual chronology.

木生长的重要信息,而胸高断面积增量(BAI)在一定程度上能够反映树木生长变化,因此本研究利用BAI来估测气候变化下落叶松和鱼鳞云杉的生长趋势,计算公式如下:

$$BAI = \pi(R_n^2 - R_{n-1}^2)$$

式中: R 表示树木半径; n 表示半径形成年份。

1.4 气候资料

长白山北坡气象站主要有3个:二道气象站、长白山定位站、天池气象站。由于天池气象站自1982年以来无夏季气候数据,长白山定位站气候数据时

间序列较短,因此气候资料取自二道气象站(42°43' N, 128°12' E, 海拔591 m),数据来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。其中,所用气候资料为月平均气温(T_m)、最高温度(T_{max})、最低温度(T_{min})和月降水量(P)。采用Double-mass方法^[14-15]对气候资料进行均一性检验,结果表明月温度与降水无随机突变和不均匀分布。为分析季节性气候-生长的关系,根据月平均温度将12个月份划分为:冬季(11月至次年3月)、春季(4—5月)、夏季(6—8月)和秋季(9—10月)。

1.5 数据处理

本研究利用SPSS 19.0、R 3.5.1和DendeoClim 2002软件,分析鱼鳞云杉和落叶松年轮宽度与气候因子的关系,通过窗口为25年进行滑动相关分析,探讨两树种树木生长与气候的动态关系。

2 结果与分析

2.1 年表统计学特征

分布在长白山高海拔处的落叶松和鱼鳞云杉年表共同区间统计特征表明,落叶松年表的平均敏感度为0.26,鱼鳞云杉为0.14,说明落叶松对本地区环境变化更敏感(表1)。两个取样点年轮序列间的平均相关系数在0.3以上,说明各单株间年轮的径向生长较为一致,主要由于受相似环境因子影响所致。同时,两个年表的信噪比、样本总体代表性以及第一主成分所解释的方差量相对较高,进而证实了高海拔处落叶松和鱼鳞云杉均适合于年轮气候学研究。由图2

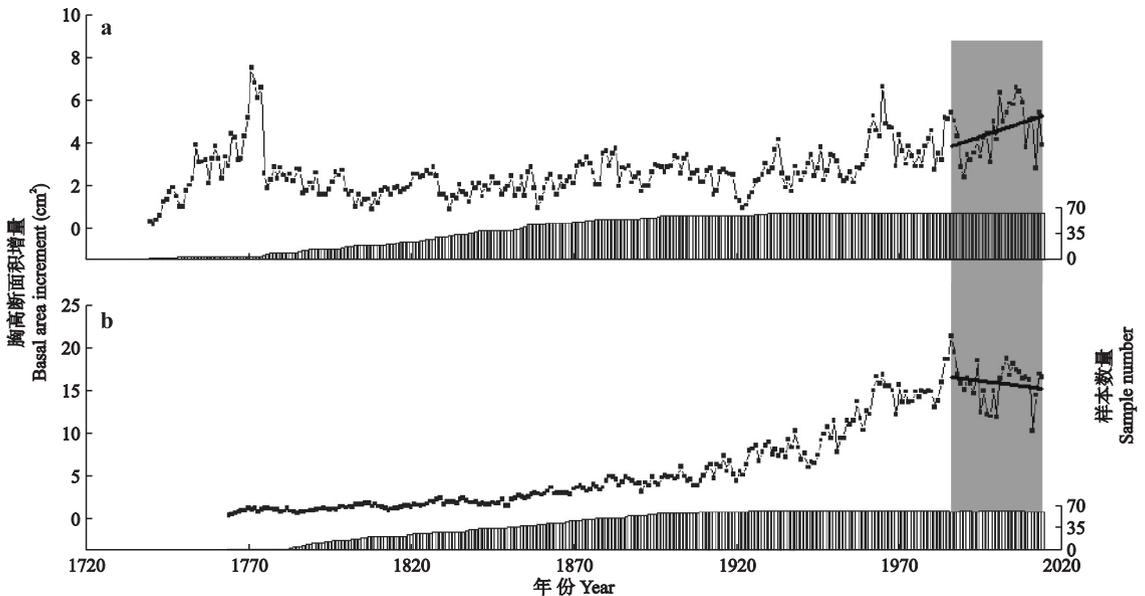


图 2 落叶松(a)和鱼鳞云杉(b)年轮的胸高断面积增量(BAI)序列

Fig. 2 Basal area increment (BAI) sequence of tree-ring for *Larix olgensis* (a) and *Picea jezoensis* var. *komarovii* (b).

点线代表BAI序列,粗线代表自1986年BAI线性拟合,柱状代表样本量 The dot and line represented BAI sequence, the thick line represented the fit for BAI, and the column represented sample numbers.

表2 落叶松和鱼鳞云杉年表与气候因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between chronologies of *Larix olgensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* with climate factors

月份 Month	落叶松 <i>Larix olgensis</i>				鱼鳞云杉 <i>Picea jezoensis</i> var. <i>komarovii</i>			
	T_m	T_{max}	T_{min}	P	T_m	T_{max}	T_{min}	P
p11	-0.226	-0.154	-0.196	0.052	-0.253	-0.157	-0.248	0.172
p12	-0.180	-0.114	-0.191	0.039	-0.280*	-0.190	-0.322*	-0.182
c1	-0.038	-0.059	-0.061	-0.030	-0.162	-0.150	-0.194	0.055
c2	-0.095	-0.174	-0.069	0.013	-0.225	-0.213	-0.210	0.064
c3	-0.417**	-0.445**	-0.343**	0.107	-0.368**	-0.286*	-0.391**	0.122
c4	-0.418**	-0.355**	-0.334*	-0.129	0.007	0.097	-0.148	-0.169
c5	0.079	0.019	0.032	0.025	0.219	0.311*	-0.063	-0.041
c6	0.381**	0.510**	0.008	-0.425**	0.074	0.226	-0.139	-0.065
c7	0.084	0.126	-0.016	0.068	0.013	0.003	0.055	0.032
c8	0.193	0.105	0.170	0.130	-0.016	0.006	-0.029	-0.018
c9	0.018	0.103	-0.022	-0.066	0.043	0.062	0.054	0.037
c10	-0.078	0.031	-0.139	-0.193	-0.268*	-0.074	-0.329*	0.005

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. p11, p12 表示上一年 11、12 月, c1~c10 表示当年 1—10 月 p11, p12 represented November and December in previous year; c1~c10 represented January to October in current year. T_m : 月平均气温 Monthly mean temperature; T_{max} : 最高温度 Maximum temperature; T_{min} : 最低温度 Minimum temperature; P : 降水量 Precipitation.

可以看出,落叶松年生长量不断波动,在 1986 年之后有增加趋势,而鱼鳞云杉在 1986 年之前不断增加,在 1986 年之后其年生长量有降低趋势。

2.2 径向生长与气候因子的相关关系

由表 2 可以看出,落叶松年表序列与当年 3 和 4 月平均温度、最低温度、最高温度以及 6 月降水呈显著负相关,与当年 6 月均温、最高温度呈显著正相关;鱼鳞云杉年轮指数与上一年 12 月、当年 3 月平均温度和最低温度呈显著负相关,与当年 5 月最高温度呈显著正相关。

为进一步区别落叶松和鱼鳞云杉与气候因子的关系,利用其差值年表与季节性气候进行冗余分析(RDA)。从图 3 可以看出,在 16 个季节性气候变量中,鱼鳞云杉和落叶松年表均与冬季温度呈较强的负相关关系,与季节性降水的相关性不显著。鱼鳞云杉年表与春季最高温度表现出较高的正相关性,而落叶松主要与夏季最高温度呈显著正相关。

2.3 树木生长与季节性气候的动态关系

最高温度对鱼鳞云杉和落叶松生长的影响最明显,为更好地理解气候变化与树木生长的关系,本研究以季节性最高温度为例,利用滑动相关分析气候变暖下长白山地区落叶松和鱼鳞云杉生长与气候关系的稳定性。由图 4 可以看出,鱼鳞云杉和落叶松年表序列与冬季最高温度的滑动相关性均呈较高的负相关;两树种生长与春季、夏季温度的关系存在明显差异:1959—2014 年间,落叶松年表与夏季最高温度的关系相对稳定,呈显著正相关,但春季和秋季温度对其生长的影响不明显;鱼鳞云杉生长主要与春

季最高温度有关,但其相关性不稳定,在 1986 之前

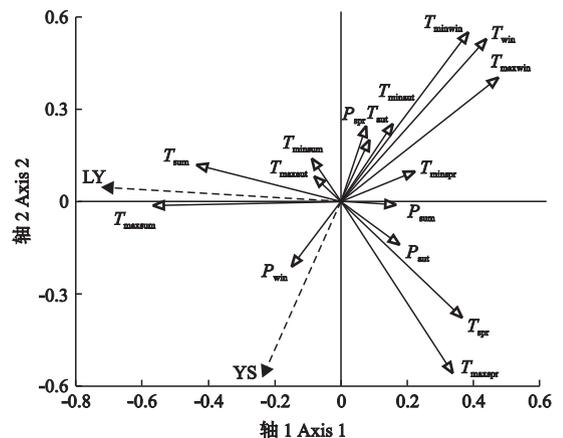


图3 落叶松和鱼鳞云杉年表与季节性气候因子的冗余分析(1959—2014年)

Fig.3 Redundancy analysis (RDA) between the chronologies of *Larix olgensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* (1959–2014) with seasonal climatic factors (1959–2014).

年表向量与气候向量同向代表二者具有较强的正相关性,反向代表具有较强的负相关性,垂直代表不相关,向量越长代表气候因子作用越强 Vectors pointing in nearly the same direction represented a high positive correlation between chronology and climate factor, while in opposite direction represented a high negative correlation, and in vertical direction represented a weak correlation. The longer the vector was, the more important the climate parameter. LY: 落叶松 *Larix olgensis*; YS: 鱼鳞云杉 *Picea jezoensis* var. *komarovii*. T_{win} 、 T_{spr} 、 T_{sum} 、 T_{aut} 分别为冬季、春季、夏季、秋季的平均温度 T_{win} 、 T_{spr} 、 T_{sum} 、 T_{aut} indicated the temperature in winter, spring, summer and autumn, respectively; T_{maxwin} 、 T_{maxspr} 、 T_{maxsum} 、 T_{maxaut} 分别为冬季、春季、夏季、秋季的最高温度 T_{maxwin} 、 T_{maxspr} 、 T_{maxsum} 、 T_{maxaut} indicated the maximum temperature in winter, spring, summer and autumn, respectively; T_{minwin} 、 T_{minspr} 、 T_{minsum} 、 T_{minaut} 分别为冬季、春季、夏季、秋季的最低温度 T_{minwin} 、 T_{minspr} 、 T_{minsum} 、 T_{minaut} indicated the minimum temperature in winter, spring, summer and autumn, respectively; P_{win} 、 P_{spr} 、 P_{sum} 、 P_{aut} 分别代表为冬季、春季、夏季、秋季的降水 P_{win} 、 P_{spr} 、 P_{sum} 、 P_{aut} indicated the precipitation in winter, spring, summer and autumn, respectively.

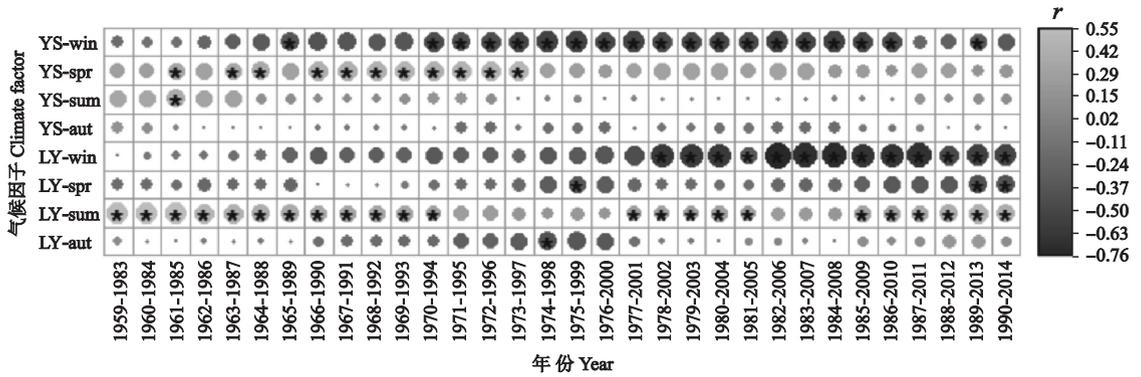


图4 落叶松和鱼鳞云杉年表与季节最高温度的滑动相关系数

Fig.4 Moving correlation coefficient between chronologies of *Larix olgensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* with seasonal maximum temperature.

LY-win, LY-spr, LY-sum, LY-aut 分别为落叶松年表与冬季、春季、夏季、秋季最高温度的相关系数 LY-win, LY-spr, LY-sum, LY-aut indicated the correlation coefficients between chronology of *Larix olgensis* with maximum temperature in winter, spring, summer and autumn, respectively; YS-win, YS-spr, YS-sum, YS-aut 分别为鱼鳞云杉年表与冬季、春季、夏季、秋季最高温度的相关系数 YS-win, YS-spr, YS-sum, YS-aut indicated the correlation coefficients between chronology of *Picea jezoensis* var. *komarovii* with maximum temperature in winter, spring, summer and autumn, respectively. r : 相关系数 Correlation coefficient. * $P < 0.05$.

均呈显著正相关, 1986 年之后其相关性减弱。

3 讨 论

3.1 落叶松与鱼鳞云杉统计学特征差异

通过对长白山高海拔处落叶松与鱼鳞云杉的年表统计学特征分析发现, 较高的信噪比、样本总体代表性、平均敏感度均表明这两种针叶树种适合树木年代学研究, 含有丰富的环境信息。落叶松平均敏感度显著高于鱼鳞云杉, 说明落叶松对气候更敏感; 落叶松第一主成分所占方差解释量较高, 说明该树种树木年轮包含更多的气候信息, 这与以往的研究结果一致^[3, 16]。这可能与采样点周围环境有关, 高海拔处落叶松林(1700 m)树种单一、林分郁闭度低, 而鱼鳞云杉(1600 m)林分郁闭度高、生长受其他树种竞争的干扰, 进而削弱其对外界条件的响应。鱼鳞云杉年轮宽度显著高于落叶松(表1), 且自1986年以来落叶松与鱼鳞云杉生长量 BAI 变化趋势不同(图2), 表明同一生境下树木生长存在种间差异, 说明落叶松与鱼鳞云杉径向生长对气候变化的响应有显著差异, 主要与树木内部遗传因素有关^[17]。

3.2 落叶松与鱼鳞云杉径向生长-气候关系差异

落叶松和鱼鳞云杉径向生长与当年3月温度呈显著负相关, 说明同一区域树木生长-气候关系具有一定的相似性。主要由于当年3月平均气温在 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 处于冬末春初, 气温升高导致树木呼吸作用增强, 不利于体内物质积累。鱼鳞云杉径向生长主要与5月温度有关, 与降水的关系不显著, 说明5月是鱼鳞云杉生长的关键月份。5月升温有利于植物光合

作用, 促进树木形成层活动, 形成宽轮, 并增强根系对土壤养分的吸收, 为植物的正常生长提供物质储备^[18]。落叶松生长主要与6月温度呈显著正相关, 表明落叶松和鱼鳞云杉对气候因子的响应迥异, 同时说明树木生长与气候因子的关系具有一定的种群特性^[19-20]。此外, 落叶松与6月降水呈显著负相关, 可能由于高海拔处降水较多, 一定程度上影响光照时间, 导致太阳有效辐射减少, 植物净光合速率降低^[21]。而于大炮等^[13]发现, 落叶松生长与9月降水呈显著正相关, 而在本研究中没有体现出来, 这可能与微环境、去趋势方法等有关^[22], 另外, 其选择的采样点海拔也高于本研究。

夏季温度升高能够有效促进落叶松生长, 这与以往国内外研究结果类似^[23-24]。夏季温度对鱼鳞云杉的作用并不明显, 而鱼鳞云杉生长与春季温度显著相关(图3), 表明并不是所有树种径向生长都主要受夏季气温的影响^[25]。李广起等^[7]“鱼鳞云杉生长与夏季温度呈显著正相关”的结果与本研究不一致, 可能与季节划分方法有关。冗余分析结果与相关函数可互相验证同一区域落叶松与鱼鳞云杉径向生长对气候响应的差异性。

3.3 落叶松与鱼鳞云杉径向生长-气候的稳定性

1959—2014年间, 落叶松生长与夏季最高温度的关系比较稳定, 体现出夏季温度升高对高海拔落叶松生长起到促进作用, 这也印证了相关函数结果(表2)。但是, 随着气候变暖, 鱼鳞云杉径向生长-气候的关系并不稳定, 1985年其相关性由显著相关转变为不相关, 说明鱼鳞云杉生长对气候的敏感性有

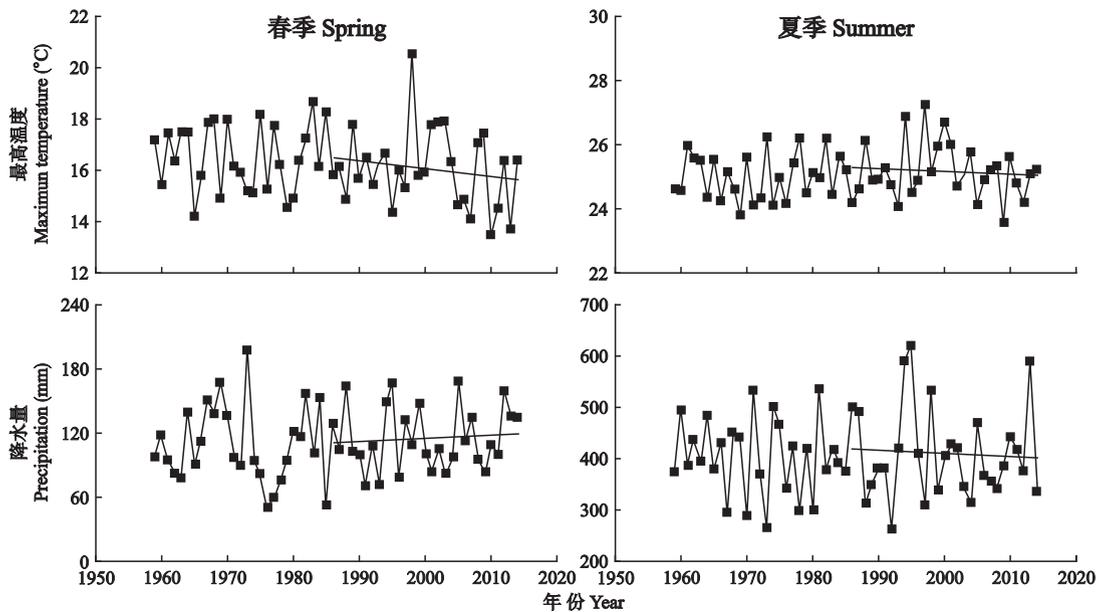


图5 春季与夏季的最高温度、降水的变化

Fig.5 Variation of maximum temperature and precipitation in spring and summer.

点线代表季节性气候,直线代表自1986年季节性气候的线性拟合 The dot and line represented seasonal climatic factors, and the line represented the fit for seasonal climate.

所降低。自1985年,春季最高温度表现出降低趋势(图5),与其生长量BAI减少相对应(图2),最高温度降低可能会影响树木体内的新陈代谢,减弱对土壤养分的吸收能力和运输效率。1986—2014年,鱼鳞云杉年表-春季相关性与最高温度的相关系数为0.475($P=0.054$),说明最高温度降低可能是鱼鳞云杉生长-春季温度关系变化的重要原因。树木生长的驱动机制十分复杂,多数研究认为,在气候寒冷、树木生长受低温限制的区域,气温升高导致土壤水分散失加快(暖干化加剧导致水分亏缺),致使树木因受到干旱胁迫而生长减缓^[26-28],进而树木生长对气候的敏感度发生变化。以往研究发现,长白山低海拔至高海拔,鱼鳞云杉生长与降水的关系由显著负相关到不相关,似乎说明降水限制因素增强^[7]。但是,立地条件因子也应考虑^[29-30],长白山高海拔处降水较为丰富,气候变暖引起的水分变化是否超出树木生长水分亏缺的临界点,是需要推敲的重要问题之一。因此,树木生长-气候关系“分异问题”产生原因还需要进一步分析和探讨。

参考文献

- [1] Hasenauer H, Nemani RR, Schadauer K, et al. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *Forest Ecology and Management*, 1999, **122**: 209-219
- [2] Colenutt ME, Luckman BH. Dendrochronological inves-

- igation of *Larix lyallii* at Larch Valley, Alberta. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, **21**: 1222-1233
- [3] Chen L (陈力), Wu S-H (吴绍洪), Dai E-F (戴尔阜). Analysis of the tree-ring width chronologies of *Pinus koraiensis* and *Larix olgensis* on Changbai Mountains, Northeast China. *Geographical Research (地理研究)*, 2011, **30**(6): 1147-1155 (in Chinese)
- [4] Yu DP, Liu JQ, Lewis BJ, et al. Spatial variation and temporal instability in the climate-growth relationship of Korean pine in the Changbai Mountain region of Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2013, **300**: 96-105
- [5] Babst F, Poulter B, Trouet V, et al. Site- and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, **22**: 706-717
- [6] Yu DP, Wang GG, Dai LM, et al. Dendroclimatic analysis of *Betula ermanii* forests at their upper limit of distribution in Changbai Mountain, Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2007, **240**: 105-113
- [7] Li G-Q (李广起), Bai F (白帆), Sang W-G (桑卫国). Different responses of radial growth to climate warming in *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* at their upper elevational limits in Changbai Mountain, China. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2011, **35**(5): 500-511 (in Chinese)
- [8] van der Maaten-Theunissen M, Kahle HP, van der Maaten E. Drought sensitivity of Norway spruce is higher than that of silver fir along an altitudinal gradient in southwestern Germany. *Annals of Forest Science*, 2013, **70**: 185-193
- [9] Franceschini T, Bontemps JD, Perez V, et al. Divergence in latewood density response of Norway spruce to temperature is not resolved by enlarged sets of climatic

- predictors and their non-linearities. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **180**: 132–141
- [10] Wang H, Shao XM, Jiang Y, *et al.* The impacts of climate change on the radial growth of *Pinus koraiensis* along elevations of Changbai Mountain in northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 2013, **289**: 333–340
- [11] Shao X-M (邵雪梅), Wu X-D (吴祥定). Reconstruction of climate change on Changbai Mountain, Northeast China using tree-ring data. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 1997, **3**(1): 76–85 (in Chinese)
- [12] Gao L-S (高露双), Wang X-M (王晓明), Zhao X-H (赵秀海). Response of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate in the transition zone of Changbai Mountain, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(1): 27–34 (in Chinese)
- [13] Yu D-P (于大炮), Wang S-Z (王顺忠), Tang L-N (唐立娜), *et al.* Relationship between tree-ring chronology of *Larix olgensis* in Changbai Mountains and the climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(1): 14–20 (in Chinese)
- [14] Kendall MG. Rank Correlation Methods. London: Griffin, 1970
- [15] Kolher MA. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 1949, **82**: 96–97
- [16] Chen L (陈力), Yin Y-H (尹云鹤), Zhao D-S (赵东升), *et al.* Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(6): 1568–1574 (in Chinese)
- [17] Fkiri S, Guibal F, Fady B, *et al.* Tree-rings to climate relationships in nineteen provenances of four black pines sub-species (*Pinus nigra* Arn.) growing in a common garden from Northwest Tunisia. *Dendrochronologia*, 2018, **50**: 44–51
- [18] He MH, Shishov V, Kaparova N, *et al.* Process-based modeling of tree-ring formation and its relationships with climate on the Tibetan Plateau. *Dendrochronologia*, 2017, **42**: 31–41
- [19] Zhang WT, Jiang Y, Wang MC, *et al.* Topography- and species-dependent climatic responses in radial growth of *Picea meyeri* and *Larix principis-rupprechtii* in the Luyashan Mountains of North-Central China. *Forests*, 2015, **6**: 116–132
- [20] Davi H, Dufrene E, Francois C, *et al.* Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **141**: 35–56
- [21] Gai XR, Wang SL, Zhou L, *et al.* Spatiotemporal evidence of tree-growth resilience to climate variations for Yezo spruce (*Picea jezoensis* var. *komarovii*) on Changbai Mountain, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0802-7>
- [22] Leonelli G, Pelfini M, Battipaglia G, *et al.* Site-aspect influence on climate sensitivity over time of a high-altitude *Pinus cembra* tree-ring network. *Climatic Change*, 2009, **96**: 185–201
- [23] Chen ZJ, Zhang XL, He XY, *et al.* Extension of summer (June–August) temperature records for northern Inner Mongolia (1715–2008), China using tree rings. *Quaternary International*, 2013, **283**: 21–29
- [24] Kharuk VI, Ranson KJ, Petrov IA, *et al.* Larch (*Larix dahurica* Turcz) growth response to climate change in the Siberian permafrost zone. *Regional Environmental Change*, 2019, **19**: 233–243
- [25] Dulamsuren C, Khishigjargal M, Leuschner C, *et al.* Response of tree-ring width to climate warming and selective logging in larch forests of the Mongolian Altai. *Journal of Plant Ecology*, 2014, **7**: 24–38
- [26] Walker X, Johnstone JF. Widespread negative correlations between black spruce growth and temperature across topographic moisture gradients in the boreal forest. *Environmental Research Letters*, 2014, **9**, doi: 10.1088/1748-9326/9/6/064016
- [27] Zhu LJ, Cooper DJ, Yang JW, *et al.* Rapid warming induces the contrasting growth of Yezo spruce (*Picea jezoensis* var. *microsperma*) at two elevation gradient sites of Northeast China. *Dendrochronologia*, 2018, **50**: 52–63
- [28] Sanchez-Salguero R, Camarero JJ, Gutierrez E, *et al.* Climate warming alters age-dependent growth sensitivity to temperature in Eurasian alpine treelines. *Forests*, 2018, **9**, 688
- [29] Wang XC, Zhang MH, Ji Y, *et al.* Temperature signals in tree-ring width and divergent growth of Korean pine response to recent climate warming in northeast Asia. *Trees: Structure and Function*, 2017, **31**: 415–427
- [30] Camarero JJ, Sanchez-Salguero R, Sanguesa-Barreda G, *et al.* Tree species from contrasting hydrological niches show divergent growth and water-use efficiency. *Dendrochronologia*, 2018, **52**: 87–95

作者简介 王守乐,男,1990年生,博士研究生.主要从事树木年轮年代学与盐碱地改良研究. E-mail: wangshoule123321@sina.com

责任编辑 杨弘