

长白山北坡林线处岳桦年轮年表 及其与气候的关系*

王晓明 赵秀海** 高露双 姜庆彪

(北京林业大学林学院 北京 100083)

摘要 运用相关函数及响应分析等树木年轮气候学方法,研究了长白山北坡林线处岳桦(*Betula ermanii*)径向生长及其与气候的关系.结果表明,林线处岳桦年轮宽度年表具有较强的气候敏感性.其径向生长与上年7月和当年3月的温度显著负相关($P < 0.05$),与上年9月和当年7月的温度显著正相关;同时与上年6月降水量显著正相关.与季节性气候因子的响应分析表明,岳桦径向生长与当年春季(1~3月)和当年生长季前(4、5月)的平均温度呈显著负相关,与当年生长季前的平均最高温度显著正相关,与降水量的相关关系不显著.利用多元逐步回归方法模拟了岳桦年轮宽度指数与气候因子间的关系,并据此预测在温度和降水增加的背景下,林线处岳桦径向生长将降低14.8%.图3 表3 参51

关键词 气候变化; 树木年轮学; 林线; 岳桦; 径向生长; 长白山

CLC Q948.112 (23)

Relationship Between Climate and Tree-ring Chronology of *Betula ermanii* on Tree-line in North Slope of the Changbai Mountains*

WANG Xiaoming, ZHAO Xiuhai**, GAO Lushuang & JIANG Qingbiao

(Faculty of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract The tree-ring width chronologies were developed in north slope of the Changbai Mountains to analyze the *Betula ermanii* radial growth-climate relationships through dendrochronological methods including correlation and response analysis. The results showed that the radial growth of *Betula ermanii* exhibited a significantly negative correlation with monthly temperature of both previous July and current March ($P < 0.05$), a significantly positive correlation with monthly temperature of previous September and current July, and a significantly positive correlation with monthly total precipitation of previous June. Besides, the analysis of response to seasonally climatic factors showed that the tree-ring growth of *B. ermanii* had a significantly negative correlation with mean temperature of current spring (January to March), a significantly negative correlation with mean temperature of the period before current growth season (April and May), and a significantly positive correlation with mean maximum temperature of the period before current growth season. But it showed no significant correlation with seasonally precipitation. Furthermore, the regression model between tree-ring width index and climatic factors was established via multiple stepwise regression analysis and run under the scenario of climate warming. The results showed that the radial growth of *B. ermanii* on tree-line zone would decline by 14.8%. Fig 3, Tab 3, Ref 51

Keywords climatic change; dendrochronology; tree-line; *Betula ermanii*; radial growth; Changbai Mountains

CLC Q948.112 (23)

收稿日期: 2011-10-21 接受日期: 2011-12-08

*国家林业公益性行业科研专项 (Nos. 20100400204, 200904022) 资助 Supported by the Public Welfare Special Fund of China for Forestry Scientific Research (Nos. 20100400204, 200904022)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: zhaoxh@bifu.edu.cn)

自上世纪90年代以来,全球变暖已经成为最引人注目的环境问题之一。高山林线作为郁闭森林和高山苔原带之间的生态过渡区,长期处于极端环境条件下,对各种持续的或突发的环境变化具有较高的敏感性^[1-4],因此,全球性和区域性气候变暖必然在这一生态界面上有所反应。以年轮的形成和变异为主要特征的树木径向生长,除了自身生理机制的影响外,还受到气候条件的制约^[5]。树木年轮学的相关研究发现,林线处树木径向生长和气候因子间的关系往往最为密切,因此在气候变化背景下,高山林线树木的气候响应具有重要的生态学意义,引起了广泛关注。

借助于树木年代学的方法和手段,国内外在海拔林线处开展了大量研究,包括林线处树木生长对气候变化的响应,并实现了对林线附近气候变化史的重建^[6-11]。目前,国内在高山林线处开展的树轮年代学研究方兴未艾。在天山、长白山、阿尼玛卿山、祁连山等地区,提取了林线处落叶松(*Larix sibirica*)、祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)等树种的年轮序列,分析了其与气候因子的响应关系并对一些气候因子进行了重建^[12-15]。但这些研究多集中于西北较干旱地区,且主要针对针叶树种。

在我国东北部长白山地区,岳桦(*Betula ermanii*)作为一种阔叶树种,广泛分布于针叶林带和高山苔原带之间的过渡带,在海拔1 800~2 000 m左右形成了林线,是研究气候变化的理想对象,但针对岳桦林线的年轮气候学研究尚不多见。王晓春通过敏感度对比,发现岳桦的平均敏感度要比云冷杉高,且其年轮指数的变化趋势与气候变暖非常一致^[16],表明气候变暖已经在林线处岳桦个体生长中得到响应。Yu等通过对岳桦林线的研究发现,区别于垂直梯度上其他邻近区域,岳桦对生长季以外温度表现出较高的敏感性,且认为自1980年以来的年平均温度的上升在岳桦生长中并未得到体现^[17]。在东北亚地区,据Takahashi等对日本中部Norikura山林线处岳桦年轮宽度的研究显示,生长季(6~8月)的温度与其径向生长正相关^[18]。鉴于针对岳桦林线的研究相对有限,而其结论在某种程度上相去甚远,所以需要更多相关研究来进一步探明林线处岳桦和气候之间的关系。为此,我们对长白山北坡林线处岳桦的年轮序列进行了研究,分析了各气候因子与岳桦年轮宽度指数的相关性,得出了林线处岳桦径向生长的限制性气候因子,并在此基础上预测气候变化背景下岳桦林线的发展趋势。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样地概况

长白山北坡林线海拔为1 900~2 000 m左右^[19],局部地区至2 100 m以上^[20],林线以上为高山苔原带。该区域气候特点为冬季大风严寒,夏季湿润。年平均温度为-2.3~-3.8 ℃,7月

平均温度为11~13 ℃。年降水量为1 000~1 100 mm。无霜期约为65~70 d,积雪时间长。因环境恶劣,不适于很多树种生长,使岳桦成为优势种^[21],并伴有少量落叶松^[22]。林线土壤是以火山灰和砾石为母质的山地生草森林土,土壤发育较弱^[23]。本研究采样点位于长白山北坡岳桦苔原交错带海拔1 996 m处(42°03'N, 128°04'E),几乎为岳桦纯林,是典型的林线地段。

1.2 样品采集与处理

在2009年秋季进行了岳桦树芯样本的采集工作。在长白山北坡海拔1 996 m的林线处,建立4块20 m×20 m的样方。在每个样方内挑选5棵岳桦成树并在各树胸径(1.3 m)处钻取两枚树芯。这些岳桦成树的胸径范围为13.5~20.3 cm,树高为4.3~5.8 m。共采集到来自20棵树的40枚样芯。在实验室内,将所有样本进行晾干、固定、打磨等预处理后,利用LinTab5树轮宽度量测仪在0.01 mm精度下测量各树芯的树轮宽度。

1.3 年表的建立

利用COFECHA程序^[24]进行对所有序列的交叉定年,结果有个别序列因为心腐或年轮间的界限太过模糊无法准确定年被剔除,最终有来自18棵树的31个样本用以建立年表。通过ARSTANwin程序^[25]以步长为40的样条函数(Cubic smoothing spline, SPL)进行拟合,去掉与树龄相关的生长趋势和树木之间因竞争造成的低频波动,然后利用样本原始序列值和其拟合生长曲线值之商进行订正使其标准化,最终得到了标准年表(STD)和差值年表(RES),并对各年表在1907~2006年进行公共区间分析,得到了平均敏感度(Mean sensitivity, MS)、信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)、样本总体代表性(Expressed population signal, EPS)等统计指标。

1.4 气候数据

本文采用长白山天池气象站(42°01'N, 128°05'E; 2 600 m a.s.l.) 1959~2009年的气候数据(图1),该气象站与本研究样地水平距离约为2 500 m,是距本研究样地最近的气象站。逐月性气候数据包括月平均温度(Mean monthly temperature, T_m)、月平均最高温度(Mean monthly maximum temperature, T_{max})、月平均最低温度(Mean monthly minimum temperature, T_{min})和月总降水量(Total monthly precipitation, P_m)。采用Kendall方法^[26]检查了气候数据序列是否存在突变点,用Double-mass方法^[27]检查了序列的非随机变化,结果表明,该站气候数据不存在突变点,因此可以用来代表自然气候变化。在此基础上,利用逐月性气候因子整合成季节性气候因子,包括:上年生长季(上年6~9月)、上年冬季(上年10~12月)、当年春季(当年1~3月)、当年生长季前(当年4、5月)以及当年生长季(当年6~9月)的平均温度、平均最高温度、平均最低温度和降水量。

1.5 林线处岳桦径向生长与气候因子间的关系

利用Dendro2002程序^[28]在0.05显著性水平上对林线处岳

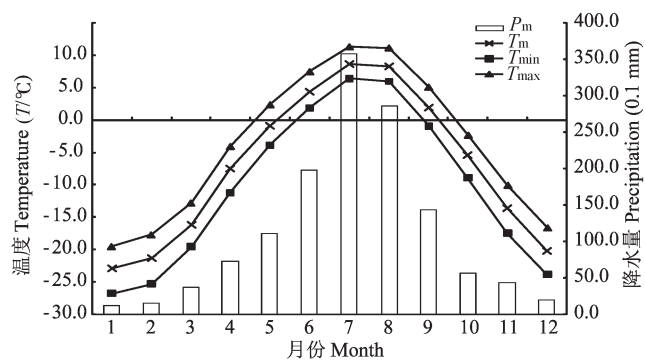


图1 长白山天池气象站气候数据

Fig. 1 Meteorological data from the Tianchi Meteorology Station

桦年轮宽度指数与逐月气候因子分别进行相关分析和响应分析. 相关分析利用相关函数计算树轮资料与气候要素之间简单的相关系数, 简单易解释, 但由于各气候因子间往往具有较大的自相关性, 所以容易使相关分析的结果不能真正反应气候要素与树木径向生长之间的关系^[29]. 因此, 本文进一步进行了响应分析, 它首先通过主成分分析以去除逐月气候因子间的自相关, 再与年轮资料做逐步回归, 然后将各主分量的回归系数转换回对应原始气候资料的回归系数, 并以回归系数的大小和正负表示树木生长对气候要素的响应关系^[30-31]. 由于长白山地区岳桦生长季为每年6~9月, 且树木生长对气候响应存在一定的滞后性, 故选择上年6月到当年9月共16个月的气候指标进行相关分析及响应分析.

2 结果与分析

2.1 林线处岳桦年表基本统计特征的分析

林线处岳桦的标准年表及差值年表的统计特征及公共区间分析结果见表1.

标准年表和差值年表的统计特征以及对公共区间(1840~2008)的分析结果表明, 各年表样本总体代表性均超过了90%, 因此均能够很好地反映该地带特定年龄组树木年轮的基本特征. 另外两个年表的第一主成分方差解释量均超

过了50%, 进一步表明岳桦年表适合于进行年轮气候学的分析. 树间相关系数为0.5左右, 说明各单株间的年轮生长较为一致. 平均敏感度度量了相邻年轮之间的轮宽变化情况, 主要反映气候的短期变化和高频变化, 一般认为平均敏感度超过0.3时即为较高^[32], 本文中两个年表的平均敏感度均接近0.3, 其中差值年表的平均敏感度更高. 一阶自相关系数的大小, 反应了上年气候状况对当年轮宽生长影响的强弱, 差值年表的一阶自相关系数明显较标准年表的小, 即差值年表中“滞后效应”有所降低, 年表信噪比的大小反映了其所承载的气候信息的多寡, 差值年表的信噪高于标准年表, 说明差值年表中含有更多的气候信息量. 综合来看, 林线处岳桦差值年表在平均敏感度、信噪比等指标上均表现出了更多优势. 图2为林线处岳桦标准年表与差值年表的平均年轮宽度曲线.

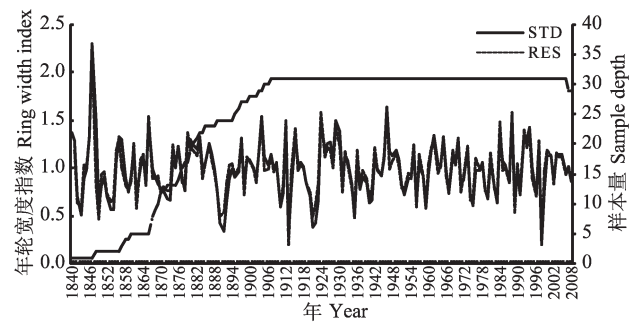


图2 长白山北坡林线处岳桦标准年表(STD)及差值年表(RES)

Fig. 2 The standardized and residual tree-ring width chronologies of *B. ermanii* in the tree-line region in north slope of the Changbai Mountains

2.2 林线处岳桦径向生长与气候因子的关系

以林线处岳桦的差值年表代表其径向生长, 分析其与气候因子间的联系. 由于长白山地区岳桦生长季为每年6~9月, 且由于滞后效应的影响, 故选择上年6月至当年9月共16个月的月平均温度、月平均最高温度、月平均最低温度以及月平均降水量进行相关分析及响应分析.

表1 林线处岳桦年表的统计特征及公共区间分析

Table 1 Statistical character and common interval analysis of *B. ermanii* chronologies in the tree-line region

年表类型 Chronology type	标准年表 Standard chronology	差值年表 Residual chronology
样树数/样芯数 Number of trees/radii		18/31
平均序列长度 Mean length of series (years)		131.3
平均年轮宽度 Mean ring width (mm)		0.55
标准差 Standard deviation	0.289	0.2739
平均敏感度 Mean sensitivity	0.2779	0.2996
一阶自相关系数 Autocorrelation order 1	0.2864	0.009
公共区间 Common interval		1907~2006
树间相关系数 Correlation between trees	0.496	0.53
信噪比 Signal-to-noise ratio	18.727	21.41
第一主成分方差解释量 Variance in first principal component (P/%)	52.39	55.43
样本总体代表性 Expressing population signal	0.949	0.955

表2 林线处岳桦差值年表与月份气候因子的相关关系

Table 2 Correlation coefficient between *B. ermanii* residual chronologies in the tree-line region and monthly meteorological data

月份 Month	月平均温度 Mean monthly temperature		月平均最低温度 Mean monthly minimum temperature		月平均最高温度 Mean monthly maximum temperature		月总降水量 Total monthly precipitation	
	相关系数 Correlation value	响应系数 Response value	相关系数 Correlation value	响应系数 Response value	相关系数 Correlation value	响应系数 Response value	相关系数 Correlation value	响应系数 Response value
6	-0.2439*	-0.0975	-0.2944*	-0.2109	-0.1895	-0.1309	0.3570*	0.3283*
7	-0.3279*	-0.2815*	-0.2859*	-0.2468*	-0.3451*	-0.2948*	0.1258	0.1064
8	-0.1891	-0.0694	-0.0872	-0.0723	-0.2441	-0.1372	-0.0988	-0.0637
9	0.3221*	0.2325*	0.3352*	0.3540*	0.3015*	0.1733	0.0359	0.0893
10	0.0254	-0.0418	0.1219	0.0835	-0.0029	-0.0790	-0.0339	0.0228
11	0.0445	0.0455	0.0561	0.1225	0.0824	0.0993	0.1639	0.1150
12	-0.1446	-0.1053	-0.2158*	-0.1195	-0.1369	-0.0444	0.1033	0.0968
1	-0.1976	-0.0923	-0.1061	-0.0149	-0.2104	-0.0913	0.1037	0.0586
2	-0.3026*	-0.0953	-0.2320*	-0.1101	-0.2655	-0.0378	-0.0124	-0.0164
3	-0.3997*	-0.2387*	-0.4160*	-0.3335*	-0.3756*	-0.2049	0.0072	-0.0690
4	-0.2112	-0.0734	-0.1163	-0.0512	-0.2272	-0.0599	-0.1877	-0.1228
5	-0.2537	-0.1662	-0.0243	0.0191	-0.3080*	-0.1427	0.2115	0.1904
6	0.1147	0.1091	0.1070	0.1197	0.1129	0.0758	-0.2310	-0.1907
7	0.3250*	0.2888*	0.2201	0.1910	0.3602*	0.2973*	-0.2452	-0.2068
8	0.0625	0.0150	0.0813	0.0113	0.0178	-0.0026	-0.0142	-0.1167
9	-0.1812	-0.1405	-0.1358	-0.1225	-0.2078	-0.2235	0.1334	0.0621

* $P < 0.05$

相关分析(表2)表明,岳桦径向生长与逐月温度因子间存在着比较广泛的相关关系.岳桦径向生长与上年6月、7月及当年2月、3月月平均温度显著负相关,与上年9月及当年7月月平均温度显著正相关;与上年6月、7月、12月和当年2月、3月月平均最低温度显著负相关,与上年9月月平均最低温度显著正相关;与上年7月、当年3月、5月月平均最高温度显著负相关,与上年9月及当年7月月平均最高温度显著正相关;此外,还与上年6月月总降水量显著正相关.响应分析结果表明,林线处岳桦径向生长与上年7月、当年3月的月平均温度和月平均最低温度呈显著负相关,与上年9月和当年7月的月平均温度显著正相关,与上年9月月平均最低温度显著正相关;此外,林线处岳桦径向生长还与上年7月月平均最高温度显著负相关,与当年7月月平均最高温度显著正相关;同时与上年6月月总降水量显著正相关.

综合来看,上年7月温度较低和当年7月温度较高时均有助于岳桦径向生长.7月正是岳桦生长最旺盛的时期,此时的高温能有效促进光合作用的开展,从而促进岳桦生长,因此当年7月高温可以促进岳桦生长,但当上年7月温度过高时,旺盛的生长大量消耗树体营养物质,从而使这些营养物质的累积减少,进而影响来年径向生长.而上年9月较高的月平均温度和月平均最低温度,以及当年3月较低的月平均温度和月平均最低温度均能有助于岳桦的生长,这是因为上年生长季末期(9月)较高的温度,促进岳桦树体内有机物的合成与累积,为树木越冬提供有力保障,进而促进来年树木的生长.

当年3月的低温能够抑制树体的呼吸作用,降低树体的呼吸消耗,同时若早春温度过高,树液开始流动,若温度骤降,则可能导致树体受到冻害,3月低温则能够避免这种情况的出现,有效地保护树体,使生长季到来时树体能立刻投入生长,从而促进生长.岳桦生长正响应于上年6月降水量,这是因为在生长刚刚开始6月,充足的降水能够促进光合作用的开展,进而促进岳桦径向生长.

而岳桦径向生长与季节性气候因子的响应分析(表3)表明,其径向生长与当年春季和当年生长季前的平均温度显著负相关,而与当年生长季前的平均最高温度显著正相关,与季节性的平均最低温度及降水量的关系均不显著.当年春季和当年生长季前平均温度的降低,能够防止过高的春季温度使树体呼吸作用过于强烈,降低呼吸消耗,从而有助于岳桦径向生长.而当年生长季前平均最高温度的升高,即这段时期内日间正午后温度的升高,可以有效促进林地积雪融化,促进树体萌动,为当年生长的开展做好准备.

2.3 林线处岳桦径向生长与气候因子之间关系的模拟

相关及响应分析结果显示,林线处岳桦径向生长与多个逐月性及季节性气候因子关系密切,因此通过建立多元回归模型来进一步描述其径向生长与气候要素之间的关系.采用多元逐步回归方法得到1960~1989年岳桦年轮宽度指数与气候因子的回归方程为:

$$RWI = -2.811 - 0.07T_{\max-cs} + 0.118T_{\max-c7} - 0.047T_{m-c3} + 0.001P_{m-c8} + 0.037T_{\max-pl1} + 0.007P_{m-pl2} - 0.021T_{\min-pl2}$$
 (模型 $R^2 = 0.840$, $P = 0.000$)

表3 林线处岳桦差值年表与季节性气候因子的相关关系

Table 3 Correlation coefficient between *B. ermanii* residual chronologies in the tree-line region and seasonally meteorological data

季节 Season	平均温度 Mean seasonally temperature		平均最低温度 Mean seasonally minimum temperature		平均最高温度 Mean seasonally maximum temperature		降水量 Seasonally precipitation	
	相关系数 Correlation value	响应系数 Response value	相关系数 Correlation value	响应系数 Response value	相关系数 Correlation value	响应系数 Response value	相关系数 Correlation value	响应系数 Response value
上年生长季 Previous growth season	-0.131	-0.021	0.004	-0.021	-0.147	-0.031	0.205	0.052
上年冬季 Previous winter	-0.063	-0.017	0.182	0.089	0.151	0.088	0.176	0.104
当年春季 Current spring	-0.421*	-0.118*	0.094	0.009	0.092	-0.018	-0.018	-0.02
当年生长季前 Before growth season	-0.275	-0.166*	0.14	0.139	0.344*	0.197*	-0.134	-0.11
当年生长季 Current growth season	0.088	0.06	-0.081	-0.054	-0.157	-0.036	0.177	0.03

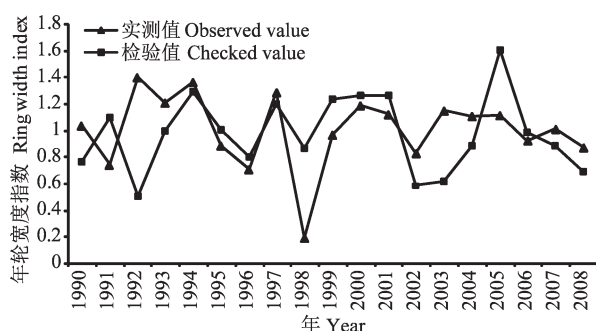
* $P < 0.05$ 

图3 长白山北坡林线处岳桦年轮宽度指数的时间序列分析
Fig. 3 Time series analysis of *B. ermanii* tree-ring width index in the tree-line region in north slope of the Changbai Mountains

式中, RWI表示岳桦年轮宽度指数, $T_{\max-cs}$ 表示当年春季月平均最高温度, $T_{\max-c7}$ 和 $T_{\max-p11}$ 分别表示当年7月和上年11月的月平均最高温度, T_{m-c3} 为当年3月月平均温度, P_{m-c8} 和 P_{m-p12} 分别为当年8月和上年12月月总降水量, $T_{\min-p12}$ 为上年12月月平均最低温度。

利用天池气象站1990~2008年的相应气候数据代入方程,模拟了这段时期岳桦的轮宽指数,并与真实值进行了独立样本 t 检验(图3),结果显示, $t = 0.272$, $d_f = 36$, $P = 0.787$,表明检验值与真实值之间无显著差异,可以认为该回归方程较好地拟合年轮宽度指数与气候因子之间的关系,因此可以用于预测气候变化背景下林线处岳桦径向生长情况。根据大气环流模型(GCMs)的预测^[33-35],在气候变暖的趋势下,我国大陆温度年均将增加2℃或4℃,降水量将增加20%。考虑到东北地区气温增幅可能更明显^[36],故本文采用气温增加4℃,降水增加20%这一预测,并假定各月温度和降水的增加均相同。将温度和降水的增量代入各回归模型,结果表明林线处岳桦径向生长将降低14.8%。

3 讨论

3.1 年表统计特征

本研究中林线处岳桦年表的平均敏感度、信噪比均具

有较高的统计值。于大炮等针对长白山北坡岳桦林线年表的研究同样显示了这一特点^[17]。Koichi等的研究也表明与较低海拔处(1 600 m a.s.l.)岳桦相比,林线处(2 400 m a.s.l.)岳桦其年表的平均敏感度和信噪比均较高^[18]。而根据于大炮等人的研究,岳桦林线的气候敏感性甚至高于几乎同一研究区域内的落叶松^[37]。这显示了林线处岳桦对气候变化具有较强的敏感性,其年表中可能包含较强的气候信号。此外林线处岳桦年表还显示出了较高的树间相关系数、第一主成分方差解释量以及样本总体代表性等,岳桦年表所体现出的这些统计量上的优势,反映了林线处岳桦用于分析气候关系时能够产生可靠的结果。这是由林线特殊的生长环境所造成的。岳桦在高海拔处几乎为纯林,林分郁闭度较小,仅为0.4~0.6^[38],林冠层开阔,作为一种强阳性树种,岳桦个体处于阳光直射下,岳桦个体之间不会因争夺空间或光照而产生激烈的竞争,故林线处岳桦对外界气候条件反应的敏感度较强。

3.2 径向生长与气候因子的关系

林线处岳桦径向生长对逐月气候因子的相关性比较一致,主要是与上年9月和当年7月的温度显著正相关,即夏季温度在很大程度上决定了岳桦的径向生长,这与以往针对其他树种展开的研究结论^[7, 37, 39]相似。夏季低温之所以制约了高海拔树木的径向生长,是因为树木的光合作用主要受温度调控,生长季内的低温减少了高山和亚高山地区植物的光合产量,加之树木的生长季在林线或高海拔处可能会偏短,夏季特别是生长末期(9月)的高温有助于延长生长时期。同时岳桦年轮生长与上年7月温度显著负相关,于大炮等对落叶松林线的研究也显示了其与上年6月温度的显著负相关性^[37]。岳桦年轮生长与上年生长季内温度的这种相关关系可能表明温度因素在生长季内各月对岳桦生长所发挥的所用不尽相同,比如在7月时可能高温会促进岳桦当年的生长,但9月时高温则主要有助于树体内有机物的积累,为下一年的生长做好准备。本研究中林线处岳桦径向生长显示出与夏季温度具有显著相关性,而Yu等对长白山北坡海拔1950 m处岳桦的研究显示,其径向生长并未体现出与夏季温度的显著相关性^[17]。这

种对温度相关性的差异可能是由岳桦本身生理活动状况和环境的差异共同引起的. 研究表明在长白山北坡从海拔1 900 m上升到2 000 m时, 岳桦树体内生理抗性逐渐下降, 岳桦受到的生理胁迫加重^[40]. 而Yu等的研究开展于海拔1 950 m处, 低于本研究中采样带的海拔高度(1 996 m a.s.l.), 故本研究中岳桦受到的生理胁迫可能更加严重, 导致岳桦需要在生长季内(6~9月)积累更多的有机物, 而7月和9月的较高温度正有利于光合作用的开展, 进而促进有机物的积累. 同时, 相关研究也表明, 与海拔1 950 m处相比, 在长白山北坡海拔2 000 m处的岳桦-苔原过渡带内岳桦种群面临的竞争更加激烈^[41]. 因此激烈的竞争和岳桦自身生理活性的下降, 使海拔2 000 m处的岳桦需要通过光合作用获取更多有机物.

林线处岳桦生长显著负相关于当年3月月平均温度和月平均最低温度, 同时与当年春季平均温度显著负相关. 这与以往一些研究的结论不尽相同. Wang等对雪岭云杉(*Schrenk spruce*)的研究表明, 温暖的2月能够促进其生长, 因为2月温度较高时可促进积雪的消融, 增加土壤中水分含量^[42]. 袁玉江等在天山地区的研究也表明树木径向生长与冬季温度正相关^[43]. 之所以结论有所不同, 可能是由于树种差异以及地区性气候差异造成的. 在长白山高海拔区域, 树木生长季从6月才开始, 3月时气候仍处于十分寒冷的春季. 这时若温度异常偏高, 不但树木呼吸作用加剧, 过多的消耗树体内的有机物, 而且有可能造成树体的提前萌动, 这种情况下若温度骤降, 树体会受到冻害, 于其生长极为不利. 但同时岳桦生长与生长季前最高温度显著正相关, 这表明在这段时期内, 岳桦既需要较高的日间温度促使积雪融化, 促使树体的萌动, 同时又不能使平均温度或者平均最低温度都升高, 使树体呼吸作用过于强烈. 而与季节性气候因子的响应分析表明, 岳桦径向生长与当年生长季的温度不相关, 这说明可能岳桦对温度的需求并不是贯穿整个生长季的, 再结合其与逐月气候因子的响应分析结果来看, 很可能7月是其生长的关键时期, 这时需要较高的温度.

同时, 响应分析表明林线处岳桦生长与温度的关系较强, 而与降水关系较弱, 仅表现为与上年6月的降水量显著正相关. 长白山区降水量较大, 且高海拔处降水更加丰沛, 这使降水不会成为岳桦生长中的主要限制因素. 但随海拔升高温度逐渐降低, 因而温度是高海拔处岳桦生长的主要限制因子. 而许多研究均表明温度是高海拔树木生长的限制因子^[44-49].

3.3 全球变暖背景下岳桦林线动态

本研究中, 岳桦生长并未显示出会随温度的升高和降水量的增大而增加. Wang等与Camarero等的研究同样表明相似

的情况, 即在全球变暖背景下预估的气温升高并不会必然引起海拔上林线的攀升^[42, 50-51]. 这是由于温度并不是影响林线树木生长动态的唯一气候要素, 且本研究中岳桦对月份和季节性气候因子具有不同的响应特征, 因此全球变暖对岳桦生长的影响是比较复杂的, 不可过于简单地得出关于岳桦林线进退的结论, 还需要对生长与气候响应模式作进一步的研究.

References

- Peter DPC. Plant species dominance at a grassland-shrubland ecotone: an individual-based gap dynamics model of herbaceous and woody species. *Ecol Modell*, 2002, **152**: 5~32
- MacDonald GM, Szeicz JM, Clarieoates J. Response of the central Canadian treeline to recent climatic changes. *Ann Assoc Am Geograph*, 1998, **88**: 183~208
- Theurillat JP, Guisan A. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. *Climate Change*, 2001, **50**: 77~109
- Becker A, Bugmann H. Global change and mountain regions: The mountain research initiative. IGBP Report 49, GTOS Report 28, IHDP Report 13, 2001
- Kang YX (康永祥), Liu JH (刘婧辉), Sun FF (孙菲菲), Dai SF (代栓发), He XJ (何小军). Response of tree ringwidth of *Larix chinensis* in the region of alpine timberline in Taibai Mountain to climate change. *J Northeast Univ* (东北林业大学学报), 2010, **38** (8): 11~13, 44
- Urbinati C, Carrer M, Anfodillo T. Dendroecology at the timberline: Growth dynamics and climatic factors. *Dendronatura*, 1996, **17**: 1, 41~50
- D'Arrigo RD, Jacoby GC. Secular trends in high northern latitude temperature reconstructions based on tree rings. *Climatic Change*, 1993, **25**: 2, 163~277
- Jacoby GC, D'Arrigo RD, Davaajamts T. Mongolian tree rings and 20th-century warming. *Science*, 1996, **273**: 5276, 771~773
- Lavoie C, Payette S. Black spruce growth forms as a record of a changing winter environment at treeline, Quebec, Canada. *Arctic & Alpine Res* 1992, **24**: 1, 40~49
- Dwyer JP, Cutter BE, Wetteroff JJ. A dendrochronological study of black and scarlet oak decline in the Missouri Ozarks. *For Ecol & Manage*, 1995, **75**: 1-3, 69~75
- Tessier L, Nola P, Serre BF. Deciduous Quercus in the Mediterranean region: Tree-ring/climate relationships. *New Phytol* 1994, **126**: 2, 355~367
- Peng JF (彭剑峰), Gou XH (勾晓华), Chen FH (陈发虎), Liu PX (刘普幸), Zhang YX (张永香), Zhang Y (张永), Tian QH (田沁华).

- The characteristics of tree-ring width of *Sabina przewalskii* Kom for different elevations in the A'nyemaqên Mountains. *J Glaciol & Geocryol* (冰川冻土), 2006, **28** (5): 713~721
- 13 Peng JF (彭剑峰), Gou XH (勾晓华), Chen FH (陈发虎), Liu PX (刘普幸), Zhang Y (张永), Fang KY (方克艳). Characteristics of ring-width chronologies of *Picea crassifolia* and their responses to climate at different elevations in the Anyemaqen Mountains. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2007, **27** (8): 3268~3276
 - 14 Peng JF (彭剑峰), Gou XH (勾晓华), Chen FH (陈发虎), Li JB (李晋), Liu PX (刘普幸), Tian QH (田沁花), Zhang Y (张永), Zhang YX (张永香). The responses of growth ring width variations of *Larix sibirica* Ledeb to climatic change in eastern Tianshan Mountains. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2006, **26** (8): 2723~2731
 - 15 Gou XH (勾晓华), Chen FH (陈发虎), Yang MX (杨梅学), Peng JF (彭剑峰), Qiang WY (强维亚), Chen T (陈拓). Analysis of the tree-ring width chronology of Qilian Mountains at different elevation. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2004, **24** (1): 172~176
 - 16 Wang XC (王晓春). Response of subalpine timberline in northeast China to global climate change. Harbin, China: Northeast Forestry University (哈尔滨: 东北林业大学), 2003
 - 17 Yu DP, Gu HY, Wang JD, Wang QL, Dai LM. Relationship of climate change and tree ring of *Betula ermanii* tree line forest in Changbai Mountain. *J For Res*, 2005, **16** (3): 187~192
 - 18 Koichi T, Yohei T, Koh Y. Climatic factors affecting the tree-ring width of *Betula ermanii* at the timberline on Mount Norikura, central Japan. *Ecol Res*, 2005, **20**: 445~451
 - 19 Wang PJ (王培娟), Xie DH (谢东辉), Zhang JH (张佳华), Zhu QJ (朱启疆). Sensitivity analysis for primary factors of the forest net primary productivity in Changbaishan Natural Reserve based on process model. *Geograph Res* (地理研究), 2008, **27** (2): 323~331
 - 20 Wang XC (王晓春), Han SJ (韩世杰), Zou CJ (邹春静), Zhou XC (周晓峰). Geostatistical analysis of the pattern of *Betula ermanii* population in Changbai Mountain. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2002, **13** (7): 781~784
 - 21 Shi PL (石培礼), Li WH (李文华). Boundary form effects of timberline ecotone on colonization of woody plants and timberline dynamics in Changbai Mountain. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2000, **20** (4): 573~580
 - 22 Chen DK, Wang XF. Alpine and sub-alpine vegetation in Changbai Mountain. *Res For Ecosyst*, 1985, **5**: 49~56
 - 23 Bai JH, Gui BS, Deng W, Wang QG, Ding QY. Plant Pb contents in elevation zones of the Changbai Mountain Nature Reserve, China. *Pedosphere*, 2007, **17** (2): 229~234
 - 24 Holmes RL. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull*, 1983, **43**: 69~75
 - 25 Cook ER, Holmes RL. Users Manual for ARSTAN: Laboratory of Tree-ring Research. Tucson, America: University of Arizona, 1986
 - 26 Kendall MG. Rank Correlation Methods. 4th ed. London, England: Griffin, 1970. 125~130
 - 27 Kohler MA. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments. *Bull Am Meteorol Soc*, 1949, **82**: 96~97
 - 28 Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Comput & Geosci*, 2004, **30** (3): 303~311
 - 29 Blasing TJ, Solomon AM, Duvick DN. Response functions revisited. *Tree-Ring Bull*, 1984, **44**: 1~15
 - 30 Fritts HC. Tree Rings and Climate. London, England: Academic Press, 1976. 257~300
 - 31 Fritts HC, Wu XD. A comparison between response-function analysis and other regression techniques. *Tree-ring Bull*, 1986, **46**: 31~46
 - 32 Savva Y, Oleksyn J, Reich PB, Tjoelker MG, Vaganov EA, Modrzyński J. Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees*, 2006, **20**: 735~746
 - 33 Kroon HD, Schieving F. Resource allocation patterns as a function of clonal morphology: A general model applied to a foraging clonal plant. *Ecology*, 1991, **79**: 519~530
 - 34 Liu YC (刘延春), Yu ZL (于振良), Li SX (李世学), Wu BH (吴榜华). The preliminary study on the effect of the northeast China forest under the climate change. *Jilin For Univ* (吉林林学院学报), 1997, **13** (2): 63~69
 - 35 Niu JM (牛建明). Impacts prediction of climate change on distribution and production of grassland in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sin* (草地学报), 2001, **9** (4): 277~282
 - 36 Wang J (王冀), Jing ZH (江志红), Ding YG (丁裕国), Zhang JL (张金玲), Zhang X (张霞). Multi-model ensemble prediction of extreme temperature indices in China. *Resour Sci* (资源科学), 2008, **30** (7): 1084~1092
 - 37 Yu DP (于大炮), Wang SZ (王顺忠), Tang LN (唐丽娜), Dai LM (代力), Wang QL (王庆礼), Wang SX (王绍先). Relationship between tree-ring chronology of *Larix olgensis* in Changbai Mountains and the climate change. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2005, **16** (1): 14~20

- 38 Zhou YB (周永斌), Wu DD (吴栋栋), Yu DP (于大炮), Sui CY (隋琛莹). Variations of nonstructural carbohydrate content in *Betula ermanii* at different elevations of Changbai Mountain, China. *Chin J Plant Ecol* (植物生态学报), 2009, **33** (1): 118~124
- 39 DeLucia EH, Smith WK. Air and soil temperature limitations on photosynthesis in Engelmann spruce during summer. *Can J For Res*, 1987, **17**: 527~533
- 40 Wu DD (吴栋栋), Zhou YB (周永斌), Yu DP (于大炮), Dai GH (戴冠华). Physiological response of *Betula ermanii* at different altitudes in Changbai Mountain. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2009, **29** (5): 2279~2285
- 41 Zou CJ (邹春静), Han SJ (韩世杰), Zhou YM (周玉梅), Wang XC (王晓春), Chen YL (陈永亮). Study on ecological characteristics of *Betula ermanii* population in ecotone. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2001, **7** (1): 1~6
- 42 Wang T, Zhang QB, Ma KP. Treeline dynamics in relation to climatic variability in the central Tianshan Mountains, northwestern China. *Global Ecol Biogeogr*, 2006, **15**: 406~415
- 43 Yuan YJ (袁玉江), Li JF (李江凤). Reconstruction and analysis of 450 years winter temperature series in the Ūrūmqi river source of Tianshan Mountains. *J Glaciol & Geocryol* (冰川冻土), 1999, **21**: 64~70
- 44 Kienast F, Schweingruber FH, Bräker OU, Schär E. Tree-ring studies on conifers along gradients and the potential of single-year analyses. *Can J For Res*, 1987, **17**: 687~696
- 45 Zhang QB, Hebda RJ. Variation in radial growth patterns of *Pseudotsuga menziesii* on the central coast of British Columbia. Canada. *Can J For Res*, 2004, **34**: 1946~1954
- 46 Lo YH, Blanco JA, Seely B, Welham C, Kimmins JP. Relationships between climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada. *For Ecol & Manage*, 2010, **259**: 932~942
- 47 Ettl GJ, Peterson DL. Growth response of subalpine fir (*Abies lasiocarpa*) to climate in the Olympic Mountains, Washington, DC, USA. *Global Change Biol*, 1995, **1**: 213~230
- 48 Buckley BM, Cook ER, Peterson MJ, Barbetti M. A changing temperature response with elevation for *Lagarostrobos franklinii* in Tasmania, Australia. *Climate Change*, 1997, **36**: 477~498
- 49 Peterson DW, Peterson DL, Ettl GJ. Growth responses of subalpine fir to climatic variability in the Pacific Northwest. *Can J For Res*, 2002, **32**: 1503~1517
- 50 Camarero JJ, Gutiérrez E. Structure and recent recruitment at alpine forest-pasture ecotones in the Spanish central Pyrenees. *Ecoscience*, 1999, **6**: 451~464
- 51 Camarero JJ, Gutiérrez E. Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic Change*, 2004, **63**: 181~200