

长白山北坡沿海拔梯度岳桦径向生长对气候的响应*

王晓明 赵秀海** 高露双 姜庆彪

(北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室 北京 100083)

摘要 为了解树轮生长与气候间的关系是否受到海拔因素的影响,运用树木年代学方法,研究了长白山北坡沿海拔梯度岳桦径向生长与气候因素间的关系.响应分析结果显示,岳桦在其低海拔林线处(1 700 m a.s.l.)径向生长与当年1月月平均温度负相关,与上年9月月总降水量正相关($P < 0.05$).在中海拔森林内部(1 850 m a.s.l.)径向生长与上年6月、7月月平均温度负相关($P < 0.05$),与降水之间的响应关系不明显.高海拔林线处(2 000 m a.s.l.)岳桦径向生长与上年7月月平均温度负相关,与上年9月月平均温度正相关,与当年3月温度负相关,与当年7月温度呈正相关($P < 0.05$),此外,与当年6月降水量呈正相关($P < 0.05$).因此,随海拔梯度升高,岳桦年表中包含的气候信息量增加,岳桦径向生长对气候的敏感性增强.图4 表1 参54

关键词 海拔;温度;降水;年轮;岳桦;长白山

CLC Q948.112 (23)

Climatic Response of *Betula ermanii* Tree-ring Growth Along an Altitudinal Gradient on the Northern Slope of the Changbai Mountains*

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

(Key Laboratory for Forest Resources & Ecosystem Processes of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to explore climate-growth relationships at different elevations, tree-ring width chronologies of *Betula ermanii* were developed from three sampling sites on the northern slope of the Changbai Mountains, northeastern China. Monthly mean temperature and monthly total precipitation were used for the analysis. The study found more climatic signals revealed by statistical characteristics of the tree-ring chronologies in higher elevations. Response function analysis indicated that on the lower tree-line site (1 700 m a.s.l.), radial growth of *Betula ermanii* was negatively correlated with temperature of January, but positively correlated with precipitation of previous September ($P < 0.05$). On the mid-elevation interior forest site (1 850 m a.s.l.), growth of *Betula ermanii* responded negatively to temperature of previous June and July ($P < 0.05$). On the upper tree-line site (2 000 m a.s.l.), tree-ring growth of *Betula ermanii* was negatively correlated with temperature of March and previous July, but positively correlated with that of June and previous September ($P < 0.05$). Besides, on upper tree line, growth of *Betula ermanii* benefited from high level of precipitation during current June. Our results suggested that along the altitudinal gradient, *Betula ermanii* tree-ring growth responds differently to local climatic conditions. In general, the climatic sensitivity of *Betula ermanii* chronologies increases with the elevation. Fig 4, Tab 1, Ref 54

Keywords elevation; temperature; precipitation; tree ring; *Betula ermanii*; Changbai Mountains

CLC Q948.112 (23)

气候变化影响着高海拔与高纬度地区树种的分布、种群结构和生长动态^[1-3].借助于树木年代学的原理和方法,在亚高山或高山森林地带开展了许多针对树木生长与气候间关系的研究.但其中大部分是在林线处开展的,目的是最大程度地体现树木生长过程中所记录的气候信号^[4-5].然而正因为如此,林线处树木生长与气候因子间的关系可能无法从整个种群尺度上反映树木生长与气候间的关系^[6].在山地生态系统

中,树木种群分布往往沿海拔梯度,其径向生长除了受到气候因素的影响之外,由海拔梯度差异引起的环境变化也有可能对树木生长产生影响.越来越多的研究表明,树木生长与气候之间的关系随海拔梯度变化而会发生变化^[4, 7-13].一般而言,低海拔处树木径向生长与降水因素的关系更密切,而随海拔上升,转而与温度因素的相关性更强^[9-11, 13].然而,Chen等(2011)的研究表明,沿海拔梯度树木生长与气候间的关系并未表现出明显的趋势性^[14].一些在中亚和青藏高原东南部针对针叶树种的研究表明,树木生长与气候间的关系与海拔梯度的变化无关^[15-17].因此,需要沿海拔梯度开展更多研究,以更为全面、深入地了解气候因素对种群生长动态的影响.

岳桦(*Betula ermanii*)是一种广泛分布于我国东北长白山的阔叶树种,并在当地森林生态系统中具有重要意义.在亚高山针叶林分布区之上,岳桦形成了垂直梯度超过300 m

收稿日期 Received: 2013-01-30 接受日期 Accepted: 2013-03-21

*国家林业公益性行业科研专项(200904022, 201004002)和国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAC01B03)资助 Supported by the Special Research Program for Forestry Welfare of China (Nos. 200904022 and 201004002) and the 12th Five-year National Science and Technology Plan of China (No. 2012BAC01B03)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: bfuz@163.com)

的分布区,并且在将近海拔2 100 m处形成了分布上限,为研究树轮生长与气候变化提供了理想的材料^[18]。然而,针对沿海拔梯度岳桦的树轮气候学研究并不多见,且其中绝大部分是在岳桦分布上限开展的,且结论差异性较大。Yu等(2007)在长白山北坡约海拔1 950 m处的岳桦林线研究表明,岳桦径向生长与降水的关系非常密切,与上年冬季及当年生长季内多个月份的降水量均呈正相关,而与温度的关系相对较弱,仅与上年10月月平均温度呈正相关^[11]。在东北亚地区,Takahashi等(2005)对日本中部Norikura山林线(约2 400 m a.s.l.)处岳桦的研究表明,当年生长季(6-8月)温度与其径向生长正相关,且上年12月和当年1月温度与生长负相关,同时与当年生长季内降水负相关^[19]。Takahashi等(2003)针对岳桦分布下限(海拔约1 600 m)处的研究表明,分布下限处岳桦径向生长与当年3月、8月降水量正相关,与当年8月温度负相关^[20]。

因此,我们在我国东北长白山北坡岳桦垂直分布区内采集了岳桦树芯样本并建立了年表,分析了不同海拔岳桦径向生长对气候的响应关系,以期了解岳桦径向生长与气候因素间的关系是否受到海拔因素的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

在长白山北坡(41°31'-42°28'N, 127°9'-128°55'E),岳桦种群在垂直梯度上的分布区约为海拔1 700-2 000 m。在岳桦分布下限处,其与鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、冷杉(*Abies nephrolepis*)等针叶树种形成岳桦-云冷杉交错区,在交错区以上岳桦分布几乎为纯林,伴生有少量长白落叶松[*Larix olgensis* (A. Henry)],在海拔约2 000 m处,岳桦分布达到上限,并与高山苔原带形成林线交错区。在长白山北坡岳桦分布区,气候以冬季寒冷漫长、夏季短暂湿润为主要特征。年平均温度为-8.6~-5.2℃。月平均最高温度和最低温度分别出现在6月和1月。年降水量700-1 500 mm。一年中无霜期约为65-70 d。

1.2 样本采集与处理

沿长白山北坡岳桦垂直分布区共建立3个采样点:于2009年9月在高海拔林线(2 000 m a.s.l., High)处建立采样点,于2010年9月在低海拔林线(1 700 m a.s.l., Low)、中海拔纯林地带(1 850 m a.s.l., Mid)分别建立采样点。在各采样点内,选择20-25棵岳桦优势木记录其胸径(1.3 m处)、树高并进行采样。利用生长锥,在每株样树胸径处钻取2枚树芯样本。在实验室内,对所有样芯进行晾干、固定、打磨等预处理后,利用LinTab5树轮宽度测量仪在0.001 mm的精度下测量各树芯年轮序列的宽度值。由于木材生长特性和较为恶劣的生长环境,岳桦年轮序列边界往往较为模糊,常见由轮界状薄壁组织构成的颜色偏淡、隐约可见的年轮界限,这为年轮宽度的测定和交叉定年都带来了一定困难。因此,在这一过程中,需要格外仔细地测量和查验测定的准确性。利用COFECHA程序^[21]对交叉定年的质量进行检验,剔除因心腐或生长异常而与主序列相关性很低的年轮序列。COFECHA结果(表1)显示,由低到高3个海拔梯度上缺轮数百分比均较低,分别为0.805%、0.111%和0.197%,各序列间相关系数均较高,分别为0.597、0.629和0.719,满足树木年代学对于交叉定年质量的要求。

为去除与树龄相关的生长趋势和由非气候环境因素造成的低频波动,采用样条函数(Cubic smoothing spline, SPL)进行滑动去趋势。样条函数能够为非典型采样环境中的年轮序列提供订正^[22]。长白山地区为半湿润环境,影响树轮生长的因子较为复杂,使其生长过程中产生非气候影响的低频振荡,利用样条函数可以有效去除这类影响。为确定合适的样条函数步长,一般选择树轮宽度序列公共区间的一半以上(精确到10年),以照顾到大多数样本的实际长度^[22]。本研究公共区间为1930-2008共78年,故采用40年为样条函数步长。去趋势这一过程利用ASTAN程序^[23]实现,最终建立各海拔梯度上岳桦的年轮宽度差值年表(Residual chronology, RES)并对公共区间(1930-2008)进行年表统计值的分析。

1.3 数据分析

本研究采用长白山天池气象站(42°01'N, 128°05'E, 2 623 m a.s.l.) 1959-2009年的月平均温度(Mean monthly temperature, T_m)和月总降水量(Total monthly precipitation, P_m) (图1)。该气象站与本研究中岳桦分布区水平距离约为2 700 m,是距研究区最近的气象站。利用Kendall方法检查了气候数据序列是否存在突变点^[24],用Double-mass方法检查了序列的非随机变化^[25],结果表明,该站气候数据不存在突变点,可以用来代表该区域自然气候变化。

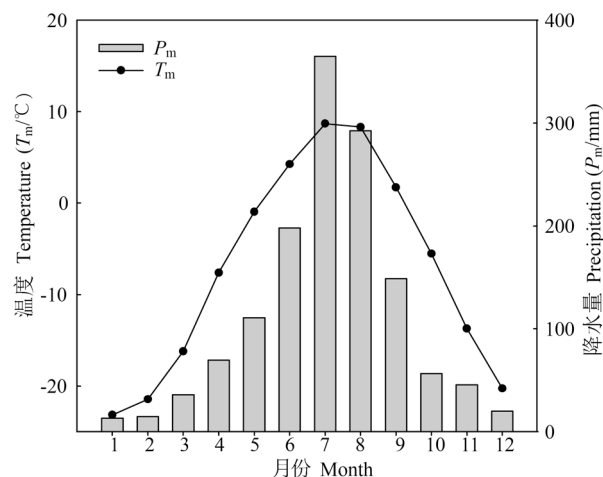


图1 长白山天池气象站1959-2009年间月平均温度和月总降水量
Fig. 1 Monthly total precipitation and mean temperature at Tianchi Meteorological Station in the Changbai Mountains (1959-2009)

利用Dendro2002程序^[26]在0.05显著性水平上对岳桦年表与逐月气候因子进行响应分析(Response function analysis, RF)。响应分析首先通过主成分分析去除逐月气候因子间的自相关,再与年轮资料进行逐步回归,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^[4]。在长白山地区,岳桦生长季为每年6-9月,且由于树木生长对气候的响应存在一定滞后性,故选择上年6月到当年9月共16个月的气候指标进行响应分析。

2 结果与分析

2.1 不同海拔年表统计特征

3个海拔梯度上岳桦差值年表统计特征见表1。随海拔

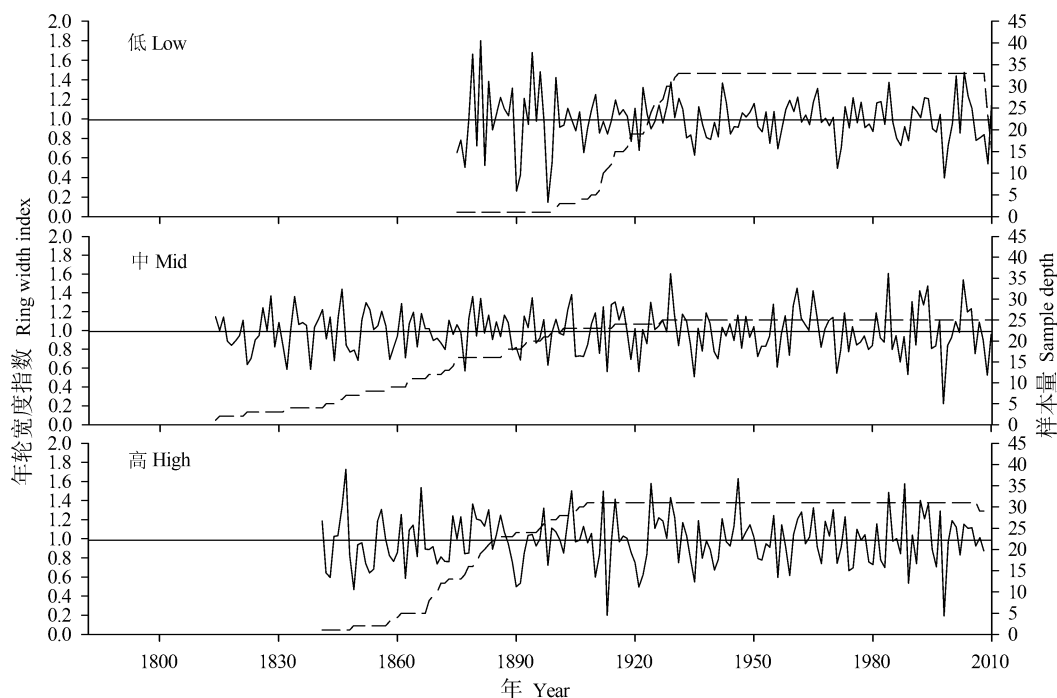


图2 不同海拔岳桦年轮宽度差值年表及样本量

Fig. 2 Tree-ring width residual chronologies of *Betula ermanii* with sample depth (number of cores)

实线代表年轮宽度指数序列, 虚线代表样本量 Solid lines represent the tree-ring width indices; dotted lines represent the sample depth

梯度上升, 岳桦平均年轮宽度值明显减小. 样本总体代表性 (Express population signal, EPS) 衡量了年表能在何种程度上代表该树种的生长趋势^[27]. 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各海拔梯度上岳桦年轮生长的特征. 平均敏感度 (Mean sensitivity, MS) 记录了树轮宽度的逐年变化情况^[28], 信噪比 (Signal-to-noise ratio, SNR) 的大小反映了其所承载的气候信息的多寡. 树间平均相关系数 (RBar) 显示了样本年轮生长的一致性^[29]. 本研究中, 这些年表统计值均较高, 表明年表中环境信息含量较大, 能够较好地反映环境因子对树木生长的影响.

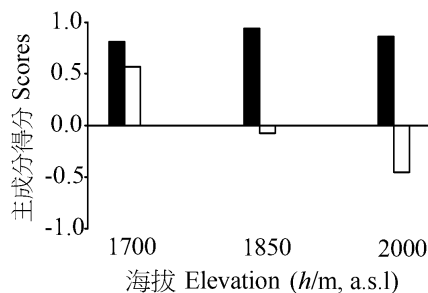


图3 不同海拔岳桦差值年表主成分分析

Fig. 3 Principle component scores for the residual chronologies of *Betula ermanii* at different altitudinal sites

黑色柱体代表第一主成分, 白色柱体代表第二主成分
Black bars represent the first principal components; white bars represent the second principal components

2.2 不同海拔年表相关性和主成分分析

岳桦差值年表如图2所示. 相关分析表明3个年表之间均存在显著相关性 ($P < 0.05$), 其中低海拔年表与中、高海拔年表的相关系数分别为0.671、0.473; 中海拔和高海拔年表

间相关系数为0.765, 说明3个海拔梯度上岳桦年轮生长较为一致. 对3个年表在公共区间 (1930-2008) 内进行主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA), 结果显示第一主成分方差解释量为76.017%, 反映了影响该研究区岳桦生长的主导因子存在较强的一致性, 以往研究指出树轮宽度序列的第一主成分往往为气候因子^[30], 第二主成分方差解释量为17.783%, 对于沿海拔梯度的树轮研究而言, 仅次于气候因素的影响因子很可能是海拔梯度的变化^[30]. 图3显示3个年表第一主成分的变化差异较小, 而随海拔梯度的变化, 第二主成分呈阶梯状变化, 且在低海拔年表和高海拔年表中差异比较大.

表1 岳桦3个差值年表统计特征

Table 1 Summary statistics for the three *Betula ermanii* residual chronologies

样点号 Site code	低 Low	中 Mid	高 High
海拔 Elevation (h/m, a.s.l.)	1700	1850	2000
样芯量/样树量 Cores/trees	33/22	25/16	31/18
胸径 DBH (D/cm)	13.300	15.100	12.500
年表长度 Chronology length	1874-2010	1809-2010	1840-2008
平均序列长度 Mean length of series (t/a)	94	144	131
缺轮百分比 Missing rings (P/%)	0.805	0.111	0.197
序列间相关系数 Series intercorrelation	0.597	0.629	0.719
平均年轮宽度 Mean ring width (b/mm)	1.063	0.743	0.550
平均敏感度 Mean sensitivity (MS)	0.296	0.276	0.300
信噪比 Signal-to-noise ratio (SNR)	19.080	17.163	19.860
样本总体代表性 Express population signal (EPS)	0.950	0.945	0.952
树间平均相关系数 RBar	0.366	0.407	0.511
第一主成分方差解释量 PC1 (r/%)	39.640	43.660	53.760

2.3 沿海拔梯度岳桦径向生长与气候因子的关系

3个海拔梯度上岳桦差值年表与气候因子之间的响应

关系如图4所示。低海拔林线处岳桦径向生长与当年1月月平均温度负相关,与上年9月总降水量正相关($P<0.05$)。中海拔处岳桦径向生长与上年6月、7月月平均温度负相关($P<0.05$),与降水之间的相关关系不明显。高海拔林线处岳桦径向生长与上年7月月平均温度负相关($P<0.05$),与上年9月月平均温度正相关,与当年3月温度负相关,与当年7月温度呈正相关,此外,与当年6月降水量呈正相关($P<0.05$)。

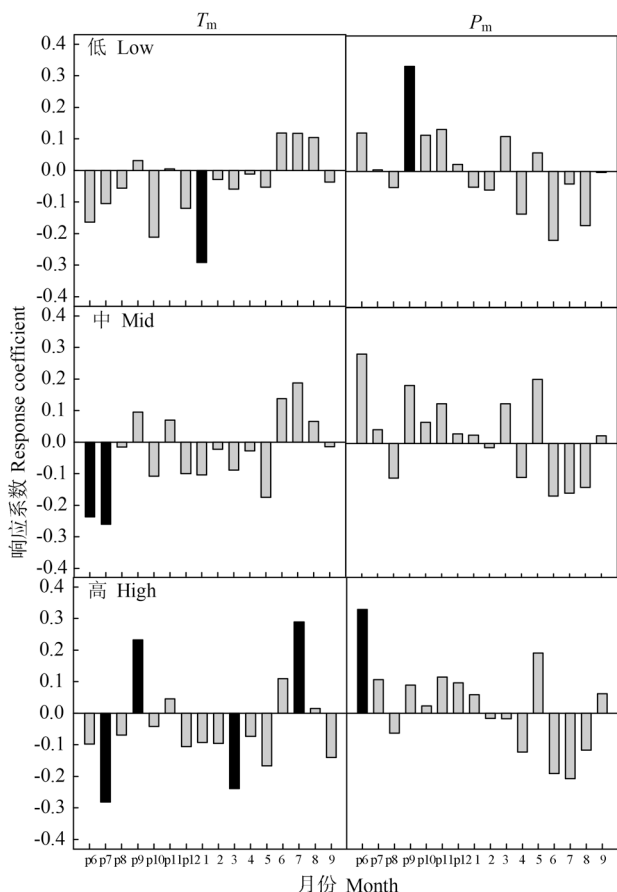


图4 不同海拔岳桦差值年表与月平均温度(T_m)和月总降水量(P_m)的响应关系

Fig. 4 Response coefficients of residual chronologies of *Betula ermanii* at different altitudinal sites with monthly mean temperature (T_m) and monthly precipitation (P_m)

黑色表示相关性达到显著水平($P<0.05$),横坐标中p表示上年
Black bars indicate significant correlations ($P<0.05$). p in the x axis stands for previous year

3 结论与讨论

本研究中,岳桦年轮宽度值随海拔升高而降低,这种现象常见于沿海拔梯度年轮生长的研究^[10, 31-33]中。主要原因在于,随海拔梯度上升,树木年轮生长所受到的限制因子增多,比如低温、大风、土壤贫瘠以及生长期缩短等^[3, 33]。

大量研究表明,树木年轮生长不仅受到当年环境因子的影响,也与上年环境因子有关^[14, 27, 34]。本研究结果也表明了这一点。中海拔(1 850 m a.s.l.)处岳桦生长仅与上年生长季中6、7月温度呈负相关,高海拔林线(2 000 m a.s.l.)处岳桦生长也受到上年7月和9月温度的影响,其中与上年7月温度负相关,与上年9月温度正相关。Di Filippo等(2007)在欧洲

东部山区沿海拔梯度开展的研究表明,欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica* L.)径向生长与上年7月温度呈负相关^[33],于大炮等(2005)在长白山北坡海拔1 200 m处针对长白落叶松的研究也发现,其径向生长与上年6月、9月的温度负相关^[35]。但对树木生长负响应于上年生长季温度这一现象未能给出合理的解释^[33, 35-36]。本研究中,低海拔和中海拔处岳桦年轮生长与上年生长季温度负相关亦缺乏合理的解释。而高海拔林线处(2 000 m a.s.l.),岳桦生长与上年9月温度正相关。上年9月是上年生长季末期,此时较高的温度能够有助于树体内有机物的合成与积累,为树体越冬提供保障,同时为下一年的生长做好准备,因此有利于岳桦生长。

在低海拔林线和高海拔林线处,岳桦生长分别与当年1月和3月温度负相关。1月和3月为岳桦树体休眠期,岳桦生长与休眠期温度负相关,其原因可能有两方面。首先,冬季温度偏高能够加剧树体呼吸作用和蒸腾作用,而由于呼吸和蒸腾所消耗的碳水化合物无法通过光合作用得到补偿,所以对树体生长不利^[37]。其二,早春时温度较高可能会促进光合与呼吸作用,而此时树体根系尚未完全萌动,不能够有效地从土壤中吸收水分,而造成树体脱水与有机物的分解丧失^[38]。树木生长与休眠期温度负相关的现象在一些开展于欧洲高海拔处挪威云杉[*Picea abies* (L.) Karst.]和长松(*Pinus cembra* L.)等的树轮气候学研究中也有所体现^[27, 37-39]。

高海拔林线处岳桦径向生长还与当年7月温度正相关。许多研究表明,在高海拔和高纬度地区,夏季高温对树轮生长有明显的促进作用^[14, 40-41]。Dawadi等(2013)发现在青藏高原海拔3 700m以上林线处糙皮桦(*Betula utilis* D. Don)径向生长也与当年夏季(6-8月)温度正相关^[42]。光合作用速率受到温度因素的影响,而生长季内温度较高能够促进光合作用,有利于树体有机物的供给,进而促进树木生长^[43]。同时,形成层细胞分裂速率在较高温度时会加快,也有利于树木径向生长^[44]。而高海拔林线处桦树表现出的与夏季温度的密切相关性,提示了桦树作为重建过去夏季温度变化的理想材料的可能性。

中海拔岳桦年轮生长与降水之间的关系不明显。而对于低海拔林线和高海拔林线处岳桦而言,其年轮生长分别与上年生长季初期(6月)和末期(9月)的降水量正相关。夏季较高的降水量能够缓解由于高温导致的干旱胁迫^[20],从而有助于岳桦生长。

许多研究表明,树轮生长与气候之间的关系受到海拔因素的影响^[16, 37, 45-46]。本研究结果也体现出了这一特点。高海拔林线处岳桦年表与更多气候因子体现出了相关性,而随海拔降低,岳桦年表与气候因子之间的相关性也减弱,在低海拔林线处,岳桦年表仅与当年1月温度及上年9月降水表现出相关性,而在高海拔林线处,岳桦年表与上年生长季、休眠期以及当年生长季内的气候因子均表现出了相关性。这在一定程度上表明,随海拔梯度增高,气候因子对岳桦生长的控制作用增强。Ettinger等(2011)的研究也表明,气候因子决定了太平洋西北针叶树种的海拔分布上限,而对其分布下限的作用相对有限^[47]。在本研究中,海拔分布下限岳桦年表的平均年龄为94年,低于另外两个海拔岳桦年表年龄,尽管包括本研究在内的绝大多数树轮气候学研究是基于年龄对年表无影响的假设下进行的,但这种假设的可靠性本身遭到了一定的质疑^[48-50]。一些研究认为,年龄较大的年表具有较高的

气候敏感性,并且这种敏感性是由于树高变化引起的.年龄较大的树木,一般而言树高较高,这样会增加树体的水分运输压力,从而使树木对外界气候环境的变化显得尤为敏感^[51].然而,本研究中,高海拔林线处岳桦树高并无明显的增加,相反,由于强风、降雪等不利的环境因素,树形上反而更加矮小并多分蘖,而海拔较低处岳桦树形更为高大.样地调查表明高海拔林线处岳桦平均树高约为4.3 m,而中海拔和低海拔样地内岳桦平均树高分别约为9.3和12.0 m.所以岳桦各年表对气候的敏感度不同的原因可能是由于海拔差异造成的.有研究显示,随海拔高度的降低,林分内部非生物环境的压力减小,而树种内和种间的相互作用逐渐增强^[47, 52].在海拔较低处,岳桦与周围针叶树种的竞争加剧,故其对气候的敏感性降低. Ettinger等(2011)的研究表明,在分布下限,针叶树种生长受到生物因素的强烈限制^[47].目前,本研究并未具体涉及到生物因素的作用,在未来的研究中会对生物因素对岳桦生长的限制作用给予更多的关注.

一些研究认为,在高海拔林线处,树木生长主要受到温度的控制,而与降水的相关性较弱^[47, 53-54],因为随海拔升高,温度逐渐降低,而降水量通常会增加,所以使温度成为限制树木生长的主要气候因子.然而,本研究中,高海拔林线处岳桦生长与上年6月降水量正相关. Takahashi等(2005)针对日本白桦(*Betula platyphylla* var. *japonica*)海拔分布上限的研究表明,其径向生长与当年8月降水量呈正相关^[19]. Yu等(2007)针对长白山北坡接近其分布上限(约1 950 m a.s.l.)处岳桦的研究也表明其径向生长与当年生长季内6月和9月的降水量呈正相关,并指出这可能与岳桦高海拔林线处独特的土壤理化性质有关^[11].该处土层薄,火山浮石含量高,保水能力较低,且高海拔林线处林冠层开阔(林冠覆盖率约为40%),这进一步加剧了土壤水分蒸发散失.此外,岳桦是需水量较大的树种.在这些原因的综合作用下,高海拔林线处岳桦生长与降水量也表现出明显的相关关系.

综上所述,本研究中岳桦径向生长与气候间的关系受到海拔因素的影响.随海拔梯度升高,岳桦年表中包含的气候信息量增加,岳桦径向生长更多地受到气候因素的控制.这可能是由于海拔较低处森林内部物质环境较为温和,加之来自于周围树体的竞争、干扰等作用降低了岳桦对气候的响应,而随海拔上升,周围非生物性环境压力增大,导致高海拔处岳桦生长对气候变化更加敏感.

参考文献 [References]

- Kullman L. Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes [J]. *J Ecol*, 2002, **90**: 68-77
- Camarero JJ, Gutiérrez E. Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees [J]. *Climatic Change*, 2004, **63**: 181-200
- Liang E, Wang Y, Xu Y, Liu B, Shao X. Growth variation in *Abies georgei* var. *smithii* along altitudinal gradients in the Sygera Mountains, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Trees*, 2010, **24**: 363-373
- Fritts HC. Tree Rings and Climate [M]. New York: Academic Press, 1976
- Begon M, Townsend CR, Harper JL. Ecology: From Individuals to Ecosystems [M]. 4th ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2006
- Wilmking M, Juday GP, Barber VA, Zald HJS. Recent climate warming forces contrasting growth responses of white spruce at treeline in Alaska through temperature thresholds [J]. *Global Change Biol*, 2004, **10**: 1724-1736
- Fritts HC, Smith DG, Cardis JW, Budelsky CA. Tree-ring characteristics along a vegetation gradient in northern Arizona [J]. *Ecology*, 1965, **46**: 394-401
- Kienast F, Schweingruber FH, Bräker OU, Schär E. Tree-ring studies on conifers along gradients and the potential of single-year analyses [J]. *Can J For Res*, 1987, **17**: 683-696
- Zhang QB, Hebda RJ. Variation in radial growth patterns of *Pseudotsuga menziesii* on the central coast of British Columbia, Canada [J]. *Can J For Res*, 2004, **34**: 1946-1954
- Wang T, Ren H, Ma K. Climatic signals in tree ring of *Picea schrenkiana* along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China [J]. *Trees-Struct Funct*, 2005, **19**: 736-742
- Yu D, Wang GG, Dai L, Wang Q. Dendroclimatic analysis of *Betula ermanii* forests at their upper limit of distribution in Changbai Mountain, Northeast China [J]. *For Ecol Manage*, 2007, **240**: 105-113
- Peng J, Gou X, Chen F, Li J, Liu P, Zhang Y. Altitudinal variability of climate-tree growth relationships along a consistent slope of Anyemaqen Mountains, northeastern Tibetan Plateau [J]. *Dendrochronologia*, 2008, **26**: 87-96
- Carrer M, Nola P, Motta R, Urbinati C. Contrasting tree-ring growth to climate responses of *Abies alba* toward the southern limit of its distribution area [J]. *Oikos*, 2010, **119**: 1515-1525
- Chen L, Wu S, Pan T. Variability of climate-growth relationships along an elevation gradient in the Changbai Mountain, northeastern China [J]. *Trees*, 2011, **25**: 1133-1139
- 梁尔源, 邵雪梅, 胡玉熹, 林金星. 内蒙古草原沙地白柽年轮生长指数的变异内蒙古草原沙地白柽年轮生长指数的变异[J]. 植物生态学报, 2001, **25**: 190-194 [Liang EY, Shao XM, Hu YX, Lin JX. Variation in tree ring growth indices of *Picea meyeri* from the sandy land in the steppe of Inner Mongolia [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2001, **25**: 190-194]
- Liu LS, Shao XM, Liang EY. Climate signals from tree ring chronologies of the upper and lower treelines in the Dulan Region of the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *J Integr Plant Biol*, 2006, **48**: 278-285
- Esper J, Frank D, Wilson R, Büntgen U, Treydte K [J]. Uniform growth trends among central Asian low- and high-elevation juniper tree sites [J]. *Trees - Struct Funct*, 2007, **21**: 141-150
- 吴栋栋, 周永斌, 于大炮, 戴冠华. 不同海拔长白山岳桦的生理变化[J]. 生态学报, 2009, **29**: 2279-2285 [Wu DD, Zhou YB, Yu DP, Dai GH. Physiological response of *Betula ermanii* at different altitudes in Changbai Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**: 2279-2285]
- Takahashi K, Tokumitsu Y, Yasue K. Climatic factors affecting the tree-ring width of *Betula ermanii* at the timberline on Mount Norikura, central Japan [J]. *Ecol Res*, 2005, **20**: 445-451
- Takahashi K, Azuma H, Yasue K. Effects of climate on the radial growth of tree species in the upper and lower distribution limits of an altitudinal ecotone on Mount Norikura, central Japan [J]. *Ecol Res*, 2003, **18**: 549-558
- Holmes RL. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bull*, 1983, **43**: 69-78
- 秦莉, 袁玉江, 史玉光, 张同文, 喻树龙, 陈峰, 范子昂, 尚华明. 样条函数步长变化对树轮宽度年表与气候相关性的影响初探[J]. 中国沙漠, 2012, **32**: 175-180 [Qin L, Yuan YJ, Shi YG, Zhang TW, Yu SL, Chen

- F, Fan ZA, Shang HM. Effect of spline function step size on relationship between tree-ring width chronology and climate [J]. *J Desert Res*, 2012, **32**: 175-180]
- 23 Cook ER. A time series analysis approach to tree ring standardization [D]. Arizona: University of Arizona, 1985
 - 24 Kendall MG. Rank Correlation Methods [M]. 4th ed. London: Griffin, 1970. 125-130
 - 25 Kohler MA. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1949, **82**: 96-97
 - 26 Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies [J]. *Comput Geosci*, 2004, **30**: 303-311
 - 27 Wigley TML, Briffa KR, Jones PD. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology [J]. *J Appl Meteorol Clim*, 1984, **23**: 201-213
 - 28 Savva Y, Oleksyn J, Reich P, Tjoelker M, Vaganov E, Modrzynski J. Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland [J]. *Trees-Struct Funct*, 2006, **20**: 735-746
 - 29 Cook ER, Kairiukstis LA. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences [J]. Dordrecht: Kluwer, 1990
 - 30 杨涛, 勾小华, 史玉光, 张同文. 青藏高原东北部树轮海拔梯度研究的散点图分析应用[J]. 冰川冻土, 2010, **32**: 429-437 [Yang T, Gou XH, Li YJ, Peng JF. Scatter plot and linear regression applied in the tree-ring elevation gradient analysis in Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *J Glaciol Geocryol*, 2010, **32**: 429-437]
 - 31 Splechtina BE, Dobryns J, Klinka K. Tree-ring characteristics of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt.) in relation to elevation and climatic fluctuations [J]. *Ann For Sci*, 2000, **57**: 89-100
 - 32 Gou X, Chen F, Yang M, Li J, Peng J, Jin L. Climatic response of thick leaf spruce (*Picea crassifolia*) tree-ring width at different elevations over Qilian Mountains, northwestern China [J]. *J Arid Environ*, 2005, **61**: 513-524
 - 33 Di Filippo A, Biondi F, Čufar K, De Luis M, Grabner M, Maugeri M, Presutti Saba E, Schirone B, Piovesan G. Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network [J]. *J Biogeogr*, 2007, **34**: 1873-1892
 - 34 Rolland C. Tree-ring and climate relationships for *Abies alba* in the internal Alps [J]. *Tree-Ring Bull*, 1993, **53**: 1-11
 - 35 于大炮, 王顺忠, 唐丽娜, 代力, 王庆礼, 王绍先. 长白山北坡落叶松年轮年表及其与气候变化的关系[J]. 应用生态学报, 2005, **16** (1): 14-20 [Yu DP, Wang SZ, Tang LN, Dai LM, Wang QL, Wang SX. Relationship between tree-ring chronology of *Larix olgensis* in Changbai Mountains and the climate change [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16** (1): 14-20]
 - 36 Cullen LE, Palmer JG, Duncan RP, Stewart GH. Climate change and tree-ring relationships of *Nothofagus menziesii* tree-line forests [J]. *Can J For Res*, 2001, **31**: 1981-1991
 - 37 Mäkinen H, Nöjd P, Kahle H-P, Neumann U, Tveite B, Mielikäinen K, Röhle H, Spiecker H. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **171**: 243-259
 - 38 Carrer M, Anfodillo T, Urbinati C, Carraro V. High-altitude forest sensitivity to global warming: results from long-term and short-term analyses in the eastern Italian Alps [M]. In: Beniston M, Innes J eds. The Impacts of Climate Variability on Forests. Berlin/Heidelberg: Springer, 1998
 - 39 Oberhuber W, Kofler W, Pfeifer K, Seeber A, Gruber A, Wieser G. Long-term changes in tree-ring-climate relationships at Mt. Patscherkofel (Tyrol, Austria) since the mid-1980s [J]. *Trees-Struct Funct*, 2008, **22**: 31-40
 - 40 Gostev M, Wiles G, D'arrigo R, Jacoby G, Khomentovsky P. Early summer temperatures since 1670 A.D. for Central Kamchatka reconstructed based on a Siberian larch tree-ring width chronology [J]. *Can J For Res*, 1996, **26**: 2048-2052
 - 41 Barber VA, Juday GP, Finney BP, Wilmking M. Reconstruction of summer temperatures in interior Alaska from tree-ring proxies: evidence for changing synoptic climate regimes [J]. *Climatic Change*, 2004, **63**: 91-120
 - 42 Dawadi B, Liang E, Tian L, Devkota LP, Yao T. Pre-monsoon precipitation signal in tree rings of timberline *Betula utilis* in the central Himalayas [J]. *Quatern Int*, 2013, **283**: 72-77
 - 43 Delucia EH, Smith WK. Air and soil temperature limitations on photosynthesis in Engelmann spruce during summer [J]. *Can J For Res*, 1987, **17**: 527-533
 - 44 Takahashi K, Okuhara I, Tokumitsu Y, Yasue K. Responses to climate by tree-ring widths and maximum latewood densities of two *Abies* species at upper and lower altitudinal distribution limits in central Japan [J]. *Trees*, 2011, **25**: 745-753
 - 45 Linderholm HW, Solberg B, Lindholm M. Tree-ring records from central Fennoscandia: the relationship between tree growth and climate along a west-east transect [J]. *Holocene*, 2003, **13**: 887-895
 - 46 Tardif J, Camarero JJ, Ribas M, Gutierrez E. Spatio temporal variability in tree growth in the Central Pyrenees: climatic and site influences [J]. *Ecol Monogr*, 2003, **73**: 241-257
 - 47 Ettinger AK, Ford KR, Hillerislambers J. Climate determines upper, but not lower, altitudinal range limits of Pacific Northwest conifers [J]. *Ecology*, 2011, **92**: 1323-1331
 - 48 Szeicz JM, Macdonald GM. Age-dependent tree-ring growth responses of subarctic white spruce to climate [J]. *Can J For Res*, 1994, **24**: 120-132
 - 49 Rozas V. Dendrochronology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in an old-growth pollarded woodland in northern Spain: tree-ring growth responses to climate [J]. *Ann For Sci*, 2005, **62**: 209-218
 - 50 Vieira J, Campelo F, Nabais C. Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate [J]. *Trees-Struct Funct*, 2009, **23**: 257-265
 - 51 Carrer M, Urbinati C. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra* [J]. *Ecology*, 2004, **85**: 730-740
 - 52 Leonelli G, Pelfini M, Battipaglia G, Cherubini P. Site-aspect influence on climate sensitivity over time of a high-altitude *Pinus cembra* tree-ring network [J]. *Climatic Change*, 2009, **96**: 185-201
 - 53 Büntgen U, Frank DC, Kaczka RJ, Verstege A, Zwijacz-Kozica T, Esper J. Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia [J]. *Tree Physiol*, 2007, **27**: 689-702
 - 54 Körner C, Paulsen J. A world-wide study of high altitude treeline temperatures [J]. *J Biogeogr*, 2004, **31**: 713-732