

文章编号: 1008-2786-(2009)6-703-09

# 大兴安岭北部大白山高山林线动态与气候变化的关系

常锦峰<sup>1</sup>, 王襄平<sup>1, 2\*</sup>, 张新平<sup>1</sup>, 林鑫<sup>1</sup>

(1. 北京大学生态学系、北京大学地表过程与分析模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 高山林线植被对气候变化十分敏感, 已成为全球变化研究的热点。研究了大兴安岭北部大白山高山林线的树木生长和群落更新动态及其与气候变化、火干扰等因素的关系。结果表明, 林线树木的生长对气候变化十分敏感, 但其敏感性随着海拔的降低而减弱; 在高海拔, 林线树木的径向生长与上年生长季后期(8月)降水负相关, 而与上年初秋(9月)温度正相关, 这些限制作用随着海拔的降低而逐渐消失; 与此相反, 低海拔树木生长与当年冬末春初(3月)的温度负相关, 但随着海拔上升这种限制作用消失。分析结果还表明, 本地区的群落更新主要受火干扰驱动, 而与气候变化没有显著关系。不同树种在火灾后更新的时间存在差异, 这种差异又因海拔的不同而异, 反映出不同树种的更新策略及对环境变化适应能力的差异。大兴安岭北部的高山林线在树木生长对气候变化的敏感性、与气候因子的关系及群落更新动态等方面均与干旱区林线有明显的差异, 这些差异与气候条件、树种、更新驱动力等方面的不同有密切的关系。

**关键词:** 高山林线; 树轮年代学; 气候变化; 群落更新; 大兴安岭北部; 火干扰

中图分类号: Q948

文献标识码: A

林线植被生长在树木生态适应的极限环境, 由于其特殊的结构、功能及对气候变化的高度敏感性, 高山林线已经成为全球变化研究的热点区域之一<sup>[1]</sup>。这些研究主要通过两个方面, 即树木径向生长和群落动态, 来分析林线植被对气候变化的响应<sup>[2, 3]</sup>。目前的研究多集中在树木年轮分析上, 利用树轮资料分辨率高、与环境因子关系密切等特点研究树木生长与气候变化的关系<sup>[4, 5]</sup>。然而, 一些研究认为仅靠年轮气候学分析并不能全面揭示生态系统的变化机理<sup>[6]</sup>, 而林线群落动态(如物种组成和更新动态)也可作为环境变化的良好指示器<sup>[3, 7]</sup>。

我国对高山林线动态的研究主要集中于中西部干旱区、半干旱区<sup>[2, 3, 8, 9]</sup>, 东北地区的研究所集中在东部的长白山、大秃顶子<sup>[4, 10, 11]</sup>。大兴安岭北部属于半湿润区, 是我国重要的森林分布区, 这里的森

林上限在组成、结构上独具特色<sup>[12]</sup>。该区域处于我国纬度最高的地区, 气候变暖的趋势十分明显<sup>[13]</sup>, 而树木生长对气温变化的响应也以高纬度地区尤为明显<sup>[14]</sup>。一些研究表明, 云杉属、松属林线的更新动态与气候变化有着密切的关系<sup>[3, 15, 16]</sup>。而在大兴安岭北部, 一般认为火干扰是森林更新的主要驱动因素<sup>[17]</sup>, 该区域林线的更新动态是否受气候变化的影响, 目前尚未见有相关报道。本文对大白山的高山林线动态进行了研究, 以分析高纬度、半湿润地区林线的树木生长、群落更新动态与气候变化、火干扰等环境因素的关系。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

收稿日期(Received date): 2009-03-05; 改回日期(Accepted): 2009-06-15。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(编号: 40638039)“我国山地植物物种多样性的分布格局及其形成机制。”[Key project of NSFC (#40638039) “Patterns and mechanisms of plant species diversity in China's mountains”.]

作者简介(Biography): 常锦峰(1984-), 男, 广西桂林人, 在读硕士研究生, 研究方向为植被生态学。[Chang Jinfeng(1984-), male, born in Guilin, presently a candidate for M. Sc Degree major in plant ecology.] Tel: 010-62765578 E-mail: changjinfeng@pku.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): 王襄平[Wang Xiaping] E-mail: wangxiaping@bjlu.edu.cn

大白山 (51° 37' N, 123° 31' E, 海拔 1 500 m) 位于呼中自然保护区南部, 为大兴安岭北部的最高峰。这一地区年平均气温 - 4.3 °C, 绝对最低气温 - 47.4 °C, 绝对最高气温 32 °C, 年平均降水量为 497.7 mm。该区域属欧亚大陆北方林的南缘, 植被垂直分布如下<sup>[12]</sup>: > 1 350 m, 亚高山矮曲林带, 基本由偃松 (*Pinus pumila*) 组成; 1 200~ 1 350 m, 山地寒温性针叶疏林带, 主要由兴安落叶松 (*Larix gmelini*) 构成郁闭度 0.4 左右的疏林, 为本区域的森林上限; 1 200 m 以下为山地寒温性针叶林带, 以兴安落叶松林为主。大白山虽然山体下部曾遭受过采伐, 但上部由于坡度较大, 干扰较少, 尤其是林线附近, 原生植被保存相对完好。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 调查取样

本文中林线指由兴安落叶松疏林构成的森林上限<sup>[12]</sup>。于 2006 年夏季在大白山北坡林线附近沿海拔梯度设置一条样带, 跨越偃松矮曲林、落叶松疏林和典型落叶松林三个垂直带。沿着样带按 50 m 的海拔间隔布设样地, 共调查样地 5 块, 样地大小 30 m × 20 m。将每块样地分成 6 个 10 m × 10 m 的小样方, 对样地中胸径 (DBH) > 3 cm 的所有树木测定胸径, 并测定全部或 1/2 以上个体的树高, 样地基本情况见表 1。同时, 记录样地中所有更新幼树 (苗) 的基径、树高, 并通过数轮生枝和芽鳞痕的方法来确定其树龄<sup>[3]</sup>。

在每个样地中选取较大个体 20~ 30 株, 利用生长锥取样, 每个个体于胸径处钻取至少两个树芯。由于样地中白桦所占比例较低 (见表 1), 且个体较小, 因此, 本研究只对兴安落叶松取树芯。

为了研究群落的年龄结构, 在每个样地中分树种 (落叶松和白桦) 钻取树木基部树芯以测定树龄。对每个树种, 按 5 cm 的胸径级, 每个径级选取 3 棵树各钻取两个树木基部树芯, 用以建立胸径 - 树龄关系<sup>[3]</sup>。

### 1.2.2 年表制作

树轮样品按照 Stokes 等<sup>[18]</sup> 的标准处理方法经干燥、固定、打磨后, 采用骨架示意图方法进行交叉定年<sup>[19]</sup>, 之后用德国 Frank Rinn 公司的 LNTAB 树轮宽度量测仪和 TSA P 软件测量树轮宽度, 量测精度为 0.01 mm。其后利用 COFECHA 程序<sup>[20]</sup> 对交叉定年和轮宽测量结果进行检验。

树轮宽度年表的建立利用 ARSTAN 程序<sup>[21]</sup> 完

成。采用 40 a 步长样条函数拟合, 以去除树木自身遗传因素产生的生长趋势和树木之间竞争导致的抑制和释放等生长趋势, 得到 3 种年表 (标准、差值和自回归年表)。经比较, 差值年表统计特征明显好于其他两个年表, 与东北地区同类研究的结果一致<sup>[4, 11]</sup>。因此, 最终采用差值年表来进行树木生长和气候关系的分析。该年表的优点在于保留的高频振荡信息较多。

### 1.2.3 更新动态分析

利用树木基部钻取的树芯经交叉定年后测得树龄, 为每个样地分别建立不同树种的胸径 - 年龄关系 (样本数在 10~ 29 间)。经比较, 幂函数拟合胸径 - 年龄关系效果较其他函数形式 (线性、对数) 要好 (所有的关系  $R^2 > 0.8$ )。利用这些胸径 - 年龄关系推算出各样地中其他树木的年龄, 结合野外所测定的更新幼树 (苗) 的年龄, 得到每个样地不同树种的年龄结构。然后, 用树木年龄反推其更新年代 (如树龄为 27~ 36 a 为 1970~ 1979 年更新, 从而得到不同年代的更新数量 (即更新动态)。这也是林线更新动态中常用的研究方法<sup>[3, 15]</sup>。

### 1.2.4 气候数据

气候数据采用与大白山最接近的大兴安岭气象站 (50° 24' N, 124° 07' E, 370 m) 1968~ 2004 年的气象记录。考虑到上一年气候对当年树木生长可能产生影响<sup>[5, 22]</sup>, 所选气候变量包括上一年 6 月至当年 8 月的月降水量、月平均温度。根据对林线附近气候的推算 (详见后文), 上年 6 月前和当年 8 月后的气候指标没有生物学意义 (月均温 < 5 °C), 被排除在分析之外<sup>[3, 11]</sup>。另外, 还分析了其他指标如各季节的平均温度、降水等, 由于结果相似故不列出。树轮生长和气候变化的关系, 通过轮宽指数和各种气候指标的相关分析进行研究<sup>[2, 3]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 大白山林线附近的群落特征

大白山 1300 m 以上为偃松矮曲林, 其中零星散生有兴安落叶松和白桦 (*Betula papyrifera*)。林线位于 1 300 m 左右, 约 1 200~ 1 300 m 间为兴安落叶松疏林, 郁闭度 0.4 左右, 林下由偃松构成 2~ 3 m 高的灌木层。1 200 m 以下为典型山地寒温性针叶林, 郁闭度在 0.6 以上, 主要由兴安落叶松组成, 而混交白桦的比例相对较高。不同海拔样地的物种组

成和群落结构指标见表 1。随着海拔降低, 林分树高和胸高断面面积显著上升, 这种变化格局与其他湿润区海拔梯度上的研究一致<sup>[23, 24]</sup>。

## 2.2 林线和区域的气候特征

根据大兴安岭北部温度、降水模型<sup>[24]</sup>, 计算得到大白山林线处的气候指标(图 1): 最热月平均温度为 10.2°C, 温暖指数为 9.9°C·月。其中, 最热月平均温度与许多研究认为的林线气候指标 10°C 一致, 而温暖指数较公认的 15°C·月为低<sup>[25, 26]</sup>。据实地观察, 大白山的林线距山顶还有约 150~200 m 的海拔差距。综合这两点可以认为, 大兴安岭北部虽然没有高大的山体, 但由于纬度较高, 具备气候林线存在的气候条件, 一些学者更认为该地区还有高山冻原分布<sup>[27]</sup>。

由大兴安岭气象站的气候记录(图 2)可见, 近 40 a 该地区年均温和年降水量虽然年际波动较大, 但总体呈显著升高趋势(年均温:  $P < 0.001$ ; 年降水:  $P = 0.047$ )。其中年均温平均升高约 2°C, 表明该地区近几十年气候变暖的趋势明显。

## 2.3 树轮年表特征

由大白山多样地的树轮差值年表可以看出(图 3), 不同海拔的年表波动趋势基本一致, 但高海拔年表的波动幅度明显大于低海拔年表(这种差异在

近几十年尤为明显), 这说明林线处树木生长对环境变化更为敏感<sup>[28]</sup>。

年表的统计特征也证实了这一点。表 2 表明, 林线处年表的主要统计指标均优于低海拔年表。随海拔的增加, 平均敏感度和标准差上升, 说明树木生长对气候变化的敏感性增加; 样本间的相关系数升高则表明不同树木对环境变化响应的一致性增强。第一主分量所占的方差量、信噪比和样本的总体代表性随海拔增加而上升, 也表明高海拔树轮年表包含的环境信息量更大, 树木生长受环境因子的限制作用更强<sup>[9]</sup>。

研究表明, 树木生长对气候变化的敏感性随海拔发生变化, 但变化趋势在不同区域差异很大。在湿润区, 一般发现高海拔树木生长对气候变化更为敏感, 如对东北东部长白山、大秃顶子的研究<sup>[4, 10]</sup>。本文的结果与这些湿润区的研究一致。然而在干旱区(如天山、祁连山)很多研究却发现, 随着海拔升高生长的敏感性降低<sup>[9, 28, 29]</sup>。这种区域差异实际上反映了树木生长限制因子的差异。在湿润区, 随着海拔升高而下降的温度构成生长的主导限制因子, 因而敏感性随着海拔上升而增加。在干旱区, 水分是生长的主要限制因子, 而随着海拔增加水分条件逐步改善<sup>[30]</sup>, 因此低海拔树木生长对气候波动更为敏感。

表 1 大白山不同海拔样地的群落特征

Table 1 Community structure for the plots along the altitudinal gradient of Mt Daba i

样地 Plot 编号	群落类型 Community type	海拔 Altitude (m)	相对胸高断面面积 Relative basal area (%)			林分密度 Stem density (株 /hm <sup>2</sup> )
			落叶松 <i>L. gmelini</i>	白桦 <i>B. platyphlla</i>	偃松 <i>P. pumila</i>	
DBS1	偃松矮曲林	1 400	-	-	-	2 325
DBS2	落叶松疏林	1 300	47.6	22.6	29.9	4 467
DBS3	落叶松疏林	1 250	72.1	22.2	5.7	2 967
DBS4	典型落叶松林	1 200	57.6	26.4	15.4	4 300
DBS5	典型落叶松林	1 150	47.1	39.2	3.7	5 200

样地 Plot 编号	平均胸径 Mean DBH (cm)	最大胸径 Max DBH (cm)	平均树高 Mean height (m)	最大树高 Max height (m)	总胸高断面面积 Basal area (m <sup>2</sup> /hm <sup>2</sup> )
DBS2	6.0	20.4	4.7	12.5	16.0
DBS3	6.7	37.1	5.3	13.3	14.7
DBS4	7.1	34.5	7.1	16.8	25.8
DBS5	7.0	30.9	7.2	21.6	29.4

注: DBS1 样地未测胸径。

Note: The DBS1 plot was located in *P. pumila* knumhozk and thus DBH were not recorded.

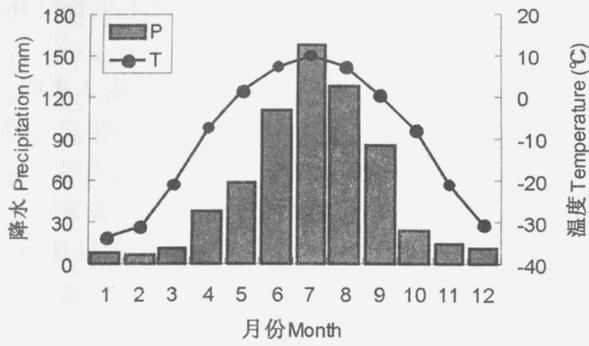


图1 大白山高山林线处的气候特征(P:月降水量;T:月均温)  
Fig. 1 Monthly temperature (T) and precipitation (P) at the timber line of Mt. Dabai

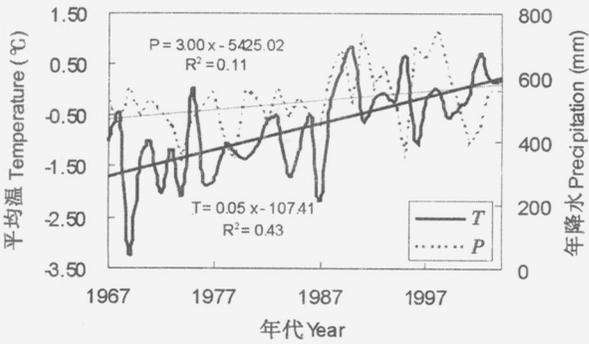
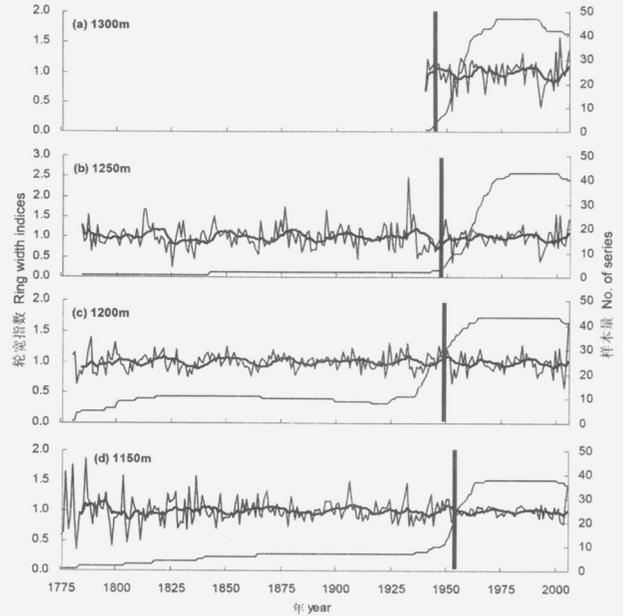


图2 研究区近 40 a 气候变化趋势(T:年均温,P:年降水量)  
Fig. 2 Changes in mean annual temperature (T) and precipitation (P) in the north Mt. Daxingan region during the last 40 years



注:粗线为十年滑动平均曲线;粗竖线条是子样本强度 > 0.85 的样本数起点,表示年表在该样本数之后是可靠的。

Note: The bold curves are 10-year moving average curves. The vertical bar indicate the starting point of the sample size, above which the SSS (Subsample signal strength) are greater than 0.85, and it represents that the chronology is reliable when the sample size surpass the point.

图3 大白山不同海拔样地的轮宽指数(差值年表)和样本量  
Fig. 3 The residual chronology and number of series for plots at different elevation on Mt. Dabai

表 2 大白山不同海拔样地差值年表统计特征及共同区间分析

Table 2 Summary statistics for residual chronology at different elevation on Mt. Dabai

样地 Pbt	海拔 Altitude (m)	序列长度 Chronology length (yr)	样本数(树芯/ 株数) Number of cores/trees	平均敏感度 Mean sensitivity	标准差 Standard deviation	一阶自相关系数 Autocorrelation order 1	
DBS2	1 300	66	47/21	0.254	0.221	0.005	
DBS3	1 250	222	43/17	0.268	0.270	0.125	
DBS4	1 200	228	46/24	0.148	0.142	0.079	
DBS5	1 150	231	38/20	0.200	0.199	-0.009	
样地 Pbt	共同区间 Common inter- val time span	平均相关系数 Mean correlations			信噪比 Signal-to- noise ratio	总体代表性 Express popul ation signal	第一主成分 所占方差量 PCA1 (%)
		R1	R2	R3			
DBS2	1963~2005年	0.562	0.557	0.690	21.353	0.955	58.3
DBS3	1970~2005年	0.540	0.529	0.769	17.960	0.947	56.5
DBS4	1964~2005年	0.319	0.309	0.617	8.956	0.900	36.3
DBS5	1963~2005年	0.227	0.214	0.615	5.434	0.845	28.0

注: R1 样本间平均相关系数; R2 不同树木之间; R3, 同一树木不同样本之间。

Note Abbreviations R1, R2 and R3, respectively mean correlations among all radii between trees and within trees. PCA1, variance in the first principal component

已有干旱区的研究发现, 森林上限树木生长主要受低温的限制, 而森林下限则主要受水分限制<sup>[31]</sup>。这进一步说明, 上述湿润区和干旱区之间树木生长敏感性与海拔关系的差异, 与水分和温度随海拔的变化密切相关。

### 2.4 林线树木径向生长与气候变化的关系

不同海拔年表的轮宽指数与不同月份气候指标的相关性见表 3 图 4 给出了其中显著的相关关系。可以看出, 气候因子和树木生长的关系存在明显的海拔差异:

气候对林线处树木生长的影响表现出明显的“滞后效应”<sup>[22]</sup>, 即轮宽指数与上年 9 月的温度显著正相关, 而与上年 8 月的降水负相关, 其中又以后者的限制作用更强(相关系数较高)。这种限制作用随海拔的降低逐渐减弱, 在低海拔的两块样地中没有显著关系(图 4)。

大白山林线附近仅 6~8 月的月均温 > 5 °C (图 1), 8 月为生长季末期, 而 9 月为初秋(月均温接近 0 °C)。同时, 林线处年降水量达 650 mm 并集中在 6~8 月(占全年的 60%), 生长季的水分供应充足(图 1)。落叶松是强阳性树种, 喜光、耐寒、耐旱<sup>[12]</sup>, 8 月过多的降水会导致太阳辐射减弱、土

壤水分过多, 从而影响光合作用<sup>[29]</sup>。图 4 中, 上年 8 月的降水与树木生长的负相关关系在低海拔消失, 与随着海拔降低降水减少的趋势一致, 也支持这一生理机制。对天山东部森林上限的西伯利亚落叶松的研究发现, 生长季降水与当年生长显著负相关<sup>[29]</sup>。而在大兴安岭北部, 8 月树干形成层细胞的分裂与生长已经基本完成, 进入光合产物积累的阶段<sup>[32]</sup>。因此, 8 月降水过多主要减少供来年生长的营养物质的储备, 而对当年的树木生长影响并不大。与落叶松不同的是, 对云杉属的研究则常发现树木生长与上一年生长季后期的降水量成正相关<sup>[28, 33]</sup>。这种差异可能与云杉为阴生树种, 对水分的要求较落叶松明显要高有关<sup>[34]</sup>。

初秋季节(9 月)树木处于养分回流和储藏的阶段, 温暖的天气可以增加对前一个生长季光合产物的储存以供来年生长使用<sup>[35]</sup>。因而高海拔的树木生长与上一年初秋温度呈显著正相关关系(图 4), 这一结果与长白山林线的研究一致<sup>[11]</sup>。而在低海拔由于本身温度较高, 上年 9 月的温度不构成限制因子, 因而这种相关关系随着海拔降低逐渐消失(图 4)。

其次, 低海拔样地的树木生长与当年 3 月气温

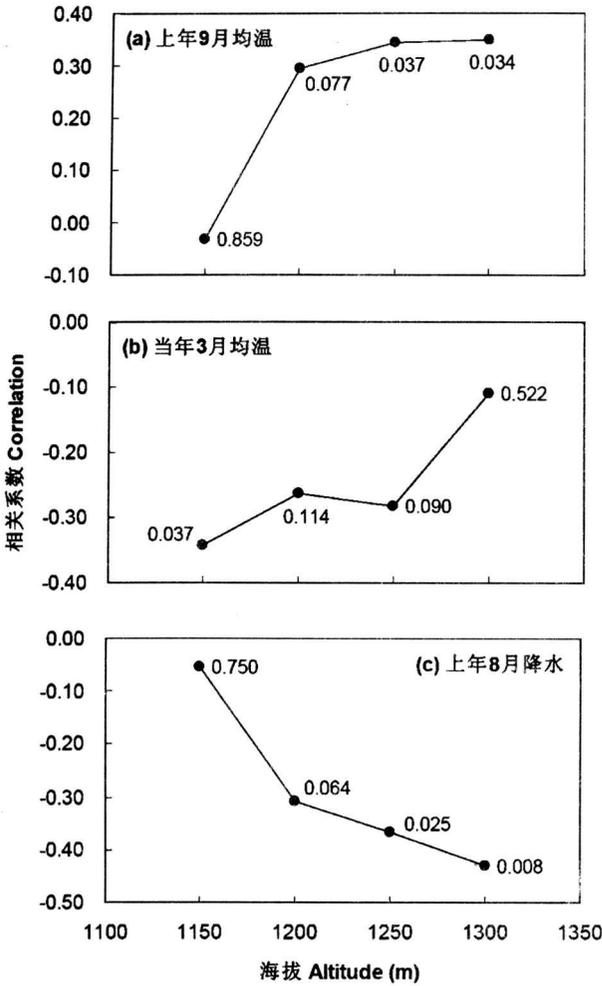
表 3 大白山不同海拔样地轮宽指数与单月气候因子的相关系数

Table 3 Correlations between ring-width indices and monthly climatic indices for plots at different elevation on Mt. Dabai

样地 Plot	DBS5	DBS4	DBS3	DBS2	DBS5	DBS4	DBS3	DBS2
海拔 (m)	1 150	1 200	1 250	1 300	1 150	1 200	1 250	1 300
月 Month	轮宽指数与月均温的相关系数				轮宽指数与月降水的相关系数			
P6	- 0.123	- 0.237	- 0.132	- 0.034	0.013	0.261	0.274	0.137
P7	- 0.152	- 0.187	- 0.042	0.050	0.005	0.211	0.119	0.067
P8	- 0.228	0.050	0.026	0.121	- 0.054	- 0.308	- 0.367*	- 0.430*
P9	- 0.030	0.294	0.345*	0.349*	0.226	0.153	- 0.159	- 0.142
P10	0.184	- 0.074	- 0.109	- 0.175	- 0.207	- 0.138	- 0.146	- 0.169
P11	- 0.122	- 0.105	- 0.127	- 0.118	0.017	0.078	- 0.082	- 0.079
P12	0.036	- 0.225	- 0.041	- 0.109	- 0.163	- 0.126	- 0.216	- 0.192
1	- 0.023	- 0.027	- 0.126	- 0.115	- 0.264	- 0.058	- 0.131	- 0.020
2	- 0.323	- 0.168	- 0.265	- 0.311	0.043	0.033	0.005	- 0.045
3	- 0.344*	- 0.264	- 0.283	- 0.109	0.204	0.195	- 0.011	0.024
4	- 0.263	- 0.090	- 0.049	0.035	- 0.073	0.045	0.007	0.043
5	- 0.214	0.079	- 0.069	- 0.062	0.069	0.030	0.075	0.019
6	- 0.030	0.101	- 0.102	- 0.003	- 0.226	- 0.328*	- 0.106	- 0.170
7	- 0.285	- 0.040	0.039	- 0.049	- 0.112	- 0.075	0.147	0.043
8	- 0.036	- 0.085	0.102	0.067	0.232	- 0.012	- 0.056	- 0.087

(\* P < 0.05 \*\* P < 0.01), P6~ P12表示上一年的气候指标。

P6~ P12 were climatic indices of the previous year.



注: (a)与上年9月均温的相关关系, (b)与当年3月均温的相关关系, (c)与上年8月降水的相关关系。其余月份气候指标与四个样地的轮宽指数基本上没有显著相关性 ( $P > 0.05$  附录 1)。

Note (a) September temperature of the previous year (b) March temperature of the current year (c) August precipitation of the previous year For the correlations of other climatic indices see Appendix 1

图 4 大白山不同海拔样地轮宽指数与单月气候因子的相关系数 (数据点旁标注的数字为 P 值)

Fig. 4 Change of correlations between ring-width indices and monthly climatic indices along the altitudinal gradient on Mt. Daba, with the P values also reported

显著负相关 (图 4)。这一结果与王丽丽等<sup>[32]</sup>对漠河兴安落叶松的研究, 以及邵雪梅和吴祥定<sup>[4]</sup>对长白山林线附近的长白落叶松的研究一致。冬末早春较低的温度可有效抑制树木的呼吸, 减少树木所储存养分的消耗, 从而有利于生长季的径向生长<sup>[36]</sup>。本研究中, 高海拔处由于温度本身就较低而使得该限制作用不再显著, 这种垂直变化格局也支持上述生理机制 (图 4)。

除了上述关系之外, DBS4号样地的轮宽指数还与当年6月的降水负相关 (附录 1)。但该关系已接近不显著 ( $P = 0.047$ ), 且沿着海拔梯度没有一致的变化特征, 因而不在此进行分析。

### 2.5 林线群落更新动态及其与环境因素的关系

各样地不同树种的年龄结构见图 5。除了低海拔样地 (DBS4 DBS5)有少量年龄很大的落叶松个体外, 大多数落叶松是在 20 世纪 40~70 年代更新起来的。其中林线样地的更新高峰 (本文中的更新高峰指图 5 频率曲线的峰值所对应的更新年代。例如, 图五的左图 DBS2 频率曲线的峰值 50% 对应的是 19 世纪 40 年代) 在 1940 年代, 最低海拔的 5 号样地则在 1960 年代; 中海拔的两个样地都有两个更新高峰, 2 号样地分别为 1950 年代和 1970 年代, 而 3 号样地分别为 1960 年代和 1980 年代。由图 5 可以看出, 落叶松的第一个更新高峰从林线至低海拔逐步向后推移。与此相似, 白桦个体也集中在 20 世纪 40~60 年代更新。但与落叶松相反的是, 高海拔白桦的更新高峰晚于低海拔。从林线至 5 号样地, 白桦更新的高峰期分别为: 1960 年代、1950~1960 年代、1950 年代和 1940 年代。即所有的样地均在 1940~1950 年代开始第一个更新高峰, 只不过在林线处落叶松首先更新, 而在低海拔则为白桦首先更新。

不同海拔样地均在 1940~1950 年代集中更新, 表明更新是一次严重干扰的结果。该地区 1965 年才建立林业局, 此前人烟稀少、原始森林广布。大白山至今仍离居民点很远, 且居民点周围就是茫茫林海, 在 1940~1950 年代对林线附近树木进行皆伐的可能性基本可排除, 而应是自然干扰所导致。

许多资料显示, 火干扰是大兴安岭北部森林更新的主要驱动因素, 因为这里枯落物层厚、不易分解, 经火烧后种子才能接触土壤<sup>[17]</sup>。图 5 中不同海拔样地均集中在 1940~1950 年代开始更新, 这可能暗示着当地曾在 1940 年代发生过一次较大的火灾。样地中有少量落叶松老树的存在, 与落叶松大个体耐火能力强能在火灾后存活, 而白桦等树种耐火能力很弱的特性一致<sup>[17]</sup>。结合大兴安岭北部地区自然火干扰较为频繁的事实<sup>[37]</sup>, 这次自然干扰为火灾的可能性很大。如果这种火灾属实, 本研究所得到的年龄结构则表明落叶松和白桦在火灾后更新的时间存在差异, 这种差异又因海拔的不同而不同。白桦具有极强的火后恢复能力, 种子传播和萌蘖繁殖

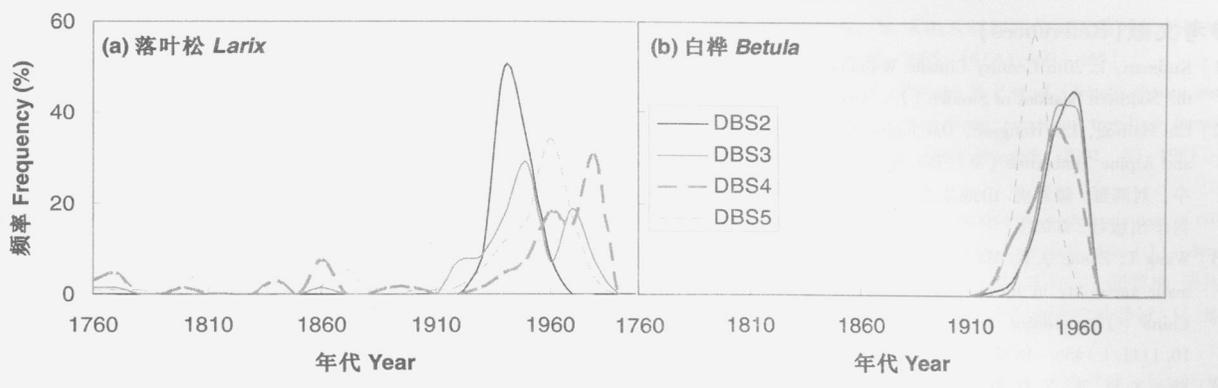


图 5 大白山不同海拔样地不同树种的更新动态 (以每 10 a 更新株数占总株数的百分比表示)

Fig. 5 Species-specific age structures for plots at different elevations on Mt. Dabai expressed as the percentage of individuals regenerated in each decades

能力都很强,可迅速占据火烧迹地,而落叶松更新速度则相对较慢<sup>[17]</sup>。因此,在较低海拔白桦的更新一般早于落叶松(见图 5)。在高海拔,关于落叶松和白桦在火后更新能力的差异,目前还少见有报道。本研究中林线附近落叶松更新早于白桦,说明白桦幼苗难以适应林线处高寒、强风、贫瘠的环境。这与白桦无法在林线占据优势,而落叶松则是高纬度内陆广泛分布的林线优势种的事实一致<sup>[38]</sup>。图 5 还表明,落叶松成林后在一定程度上改善了小生境,从而使少量白桦能在林线处更新。

对云杉属林线的研究表明,根据胸径-年龄关系重建的更新动态与气候变化有着密切的关系<sup>[3,15]</sup>。然而,本研究中各样地更新数量自 1970 年代(DBS4样地为 1980 年代)以来迅速下降,与该区域温度、降水增加的趋势相反(见图 2),即气候变化对大兴安岭北部林线的更新并无明显影响。这种差异与不同树种的更新策略不同有关:云杉主要依赖于冠下更新,而兴安落叶松的更新主要靠火干扰驱动。Cullen *et al.* 对新西兰 *Nothofagus* 林线的研究<sup>[39]</sup>也发现,由于该树种更新依赖于自然干扰,气候变暖对林线更新没有影响,也未能发现林线位置上移的迹象。因此,根据胸径-年龄关系重建更新动态<sup>[3,15]</sup>、监测林线的更新动态和林线海拔变化<sup>[16]</sup>等方法虽然在某些地区的林线研究中很有效,但可能并不适于反映干扰驱动更新型的林线(如落叶松、*Nothofagus*)对气候变化的响应。考虑到兴安落叶松是欧亚大陆高纬度内陆主要的林线树种,在全球变化研究中有着重要的意义,需要研究其它方法来有效分析其群落动态和气候变化的关系。

### 3 结论

本文通过对大兴安岭北部大白山的研究,分析了林线树木径向生长、群落更新动态与气候变化、火干扰的关系。研究结果表明:

1. 大兴安岭北部林线的树木生长对气候变化十分敏感,但敏感性随着海拔的降低而减弱。这种垂直格局与干旱区相反,而与湿润区的研究一致。

2. 气候因子对树木生长的影响表现出明显的海拔差异,而且不同气候因子的垂直变化格局不同。在高海拔气候因子的影响表现出典型的“滞后效应”:林线树木的径向生长与上年生长季后期(8月)降水负相关,而与上年初秋(9月)温度正相关。这些限制作用随着海拔的降低而逐渐消失。与此相反,低海拔树木生长与当年冬末春初(3月)的温度负相关,但随着海拔上升这种限制作用消失。

3. 在大兴安岭北部,根据胸径-年龄关系重建的群落更新动态主要反映了火干扰的影响,而与气候变化没有显著关系。不同树种在火灾后更新的时间存在差异,这种差异又因海拔的不同而异,反映出不同树种的更新策略及对极端环境适应能力的差异。

4. 大兴安岭北部林线在树木生长对气候变化的敏感性、与气候因子的关系及群落更新动态等方面均与干旱区林线有明显的差异。这些差异与气候条件、树种、更新驱动力等方面的不同有密切的关系。

致谢:感谢北京大学生态学系方精云教授、刘鸿雁教授、郭允允在实验室工作和论文写作中给予的指导和帮助;感谢谭琨参与野外调查工作。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Kullman, L. 20th Century Climatic Warming and Tree-line Rise in the Southern Scandes of Sweden [ J ]. *Ambio*, 2001, 30: 72~80
- [ 2 ] 崔海亭, 刘鸿雁, 戴君虎. 山地生态学及高山林线研究 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2005
- [ 3 ] Wang T, Zhang Q, B Ma K. P. Tree line dynamics in relation to climatic variability in the central Tianshan Mountains, northwestern China [ J ]. *Global Ecology and Biogeography*, 2006. DOI: 10.1111/j.1466-1822x.2006.00233.x
- [ 4 ] Shao X.M, Wu X. D. Reconstruction of climate change on Changbai Mountain, Northeast China using tree-ring data [ J ]. *Quaternary Sciences*, 1997, 17: 76~85 [ 邵雪梅, 吴祥定. 利用树轮数据重建中国东北长白山气候变化 [ J ]. 第四纪研究, 1997, 17: 76~85 ]
- [ 5 ] Wang Ting, Yu Dan, Li Jiangfeng *et al*. Advances in research on the relationship between climatic change and tree-ring width [ J ]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27: 23~33 [ 王婷, 于丹, 李江风, 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: 23~33 ]
- [ 6 ] Moiseev, P. Effect of climatic changes on radial increment and age structure formation in high-mountain larch forests of the Kuznetsk Ala Tau [ J ]. *Russian Journal of Ecology*, 2002, 33: 7~13 [ translated from *Ekologiya*, 2002 ( 1 ): 10~17 ]
- [ 7 ] Kullman, L. Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973-2005: implications for tree line theory and climate change ecology [ J ]. *Journal of Ecology*, 2007, 95: 41~52
- [ 8 ] Liu Hongyan, Cao Yanli, Tian Jun *et al*. Vegetation landscape of the alpine timberline on Mt Wutai, Shanxi province [ J ]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27: 263~269 [ 刘鸿雁, 曹艳丽, 田军, 等. 山西五台山高山林线的植被景观 [ J ]. 植物生态学报, 2003, 27: 263~269 ]
- [ 9 ] Gou Xiaohua, Chen Fahu, Yang Meixue *et al*. Analysis of the tree-ring width chronology of Qilian Mountains at different elevation [ J ]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24( 1 ): 172~176 [ 勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, 等. 祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化 [ J ]. 生态学报, 2004, 24( 1 ): 172~176 ]
- [ 10 ] Wang Xiaochun, Zhou Xiaofeng, Li Shujuan *et al*. The effect of climate warming on the structure characteristic of the timberline in Laotudingzi Mountain [ J ]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24: 2412~2421 [ 王晓春, 周晓峰, 李淑娟, 等. 气候变暖对老秃顶子林线结构特征的影响 [ J ]. 生态学报, 2004, 24: 2412~2421 ]
- [ 11 ] Yu D, Wang G. G, Dai L, *et al*. Dendroclimatic analysis of *Betula emani* forests at their upper limit of distribution in Changbai Mountain, Northeast China [ J ]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240: 105~113
- [ 12 ] Zhou YL, *et al*. Vegetation Geography in Northeast China [ M ]. Beijing: Science Press, 1997 [ 周以良, 等. 中国东北植被地理 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1997 ]
- [ 13 ] Serreze M. C, Walsh J. E, Liu F. S. C, *et al*. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment [ J ]. *Climatic Change*, 2000, 46: 159~207
- [ 14 ] Wang L, Payette S, Béguin Y. 1300-year tree-ring width and density series based on living, dead and subfossil black spruce at tree-line in subarctic Quebec [ J ]. *The Holocene*, 2001, 11: 333~341
- [ 15 ] Sævič J.M, Macdonald G. M. Recent White Spruce dynamics at the subarctic alpine treeline of Northern-Western Canada [ J ]. *Journal of Ecology*, 1995, 83: 873~885
- [ 16 ] Kullman, L. Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973-2005: implications for tree line theory and climate change ecology [ J ]. *Journal of Ecology*, 2007, 95: 41~52
- [ 17 ] Xu Huacheng. Forest in Great Hing'an Mountains of China [ M ]. Beijing: Science Press, 1998 [ 徐化成. 中国大兴安岭森林 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1998 ]
- [ 18 ] Stokes M. A, Smiley T. L. An Introduction to Tree Ring Dating [ M ]. Chicago: The University of Chicago Press, 1968
- [ 19 ] Shao X.M, Fang X.Q, Liu H.B, *et al*. Dating the 1000-year-old Qilian Juniper in Mountains along the Eastern Margin of the Qaidam Basin [ J ]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58( 1 ): 90~100 [ 邵雪梅, 方修琦, 刘洪滨, 等. 柴达木东缘山地千年祁连圆柏年轮定年分析 [ J ]. 地理学报, 2003, 58( 1 ): 90~100 ]
- [ 20 ] Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [ J ]. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 3: 69~75
- [ 21 ] Cook E.R, Holmes R. L. Users manual for ARSTAN: Laboratory of Tree-Ring Research [ M ]. Tucson: University of Arizona, 1986
- [ 22 ] Li Jiangfeng, Yuan Yujia, You Xiyao. The Study on Tree-Ring Hydrology and Its Applications [ M ]. Beijing: Science Press, 2000 [ 李江风, 袁玉江, 由希尧. 树木年轮水文学研究与应用 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2000 ]
- [ 23 ] Aiba S. I, Kitayama K. Structure, composition and species diversity in an altitude-substrate matrix of rain forest tree communities on Mount Kinabalu, Borneo [ J ]. *Plant Ecology*, 1999, 140: 139~157
- [ 24 ] Wang X.P, Fang J.Y, Tang Z.Y, *et al*. Climatic control of primary forest structure and DBH-height allometry in Northeast China [ J ]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234: 264~274
- [ 25 ] Fang J.Y, Yoda K. Climate and vegetation in China ( IV ) Distribution of tree species along the thermal gradient [ J ]. *Ecological Research*, 1990, 5: 291~302
- [ 26 ] Wang Xiangping, Zhang Ling, Fang Jingyun. Geographical differences in alpine timberline and its climatic interpretation in China [ J ]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59: 871~879 [ 王襄平, 张玲, 方精云. 中国高山林线的分布高度与气候的关系 [ J ]. 地理学报, 2004, 59: 871~879 ]
- [ 27 ] Zou Chunjing, Xu Wenduo. Key problems in ecological research on vegetations in Northeast China [ J ]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15: 1711~1721 [ 邹春静, 徐文铎. 中国东北植被生态学研究的焦点问题 [ J ]. 应用生态学报, 2004, 15: 1711~1721 ]
- [ 28 ] Wang T, Ren H. B, Ma K. P. Climatic signals in tree ring of *Picea schrenkiana* along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China [ J ]. *Trees*, 2005, 19: 735~741
- [ 29 ] Peng Jianfeng, Gou Xiaohua, Chen Fahu *et al*. The responses of growth ring width variations of *Larix sibirica* Ledeb to climatic change in eastern Tianshan Mountains [ J ]. *Acta Ecologica Sinica*,

- 2006, 26(8): 2723~2731 [彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 天山东部西伯利亚落叶松树轮生长对气候要素的响应分析 [J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2723~2731]
- [30] Wang T, Liang Y, Ren H, *et al*. Age structure of *Picea schrenkiana* forest along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains northwest China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 267~274
- [31] Block J Treter U. The limiting factors at the upper and lower forest limits in the mountain-woodland steppe of Northwest Mongolia [A]. International Conference Tree Rings and People, 2001
- [32] Wang Lili, Shao Xumei, Huang Lei, *et al*. Tree-ring characteristics of *Larix Gmelini* and *Pinus Sylvestris* Var *Mongolica* and their response to climate in Mongolia [J]. *Acta Phytocologia Sinica*, 2005, 380~385 [王丽丽, 邵雪梅, 黄磊, 等. 黑龙江漠河兴安落叶松与樟子松树轮生长特性及其对气候的响应 [J]. 植物生态学报, 2005, 380~385]
- [33] Guo Yuyun, Liu Hongyan, Ren Ji, *et al*. Responses of tree growth to vertical climate gradient in the middle section of the Tianshan mountains [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27: 322~311 [郭允允, 刘鸿雁, 任佳, 等. 天山中段树木生长对气候垂直梯度的响应 [J]. 第四纪研究, 2007, 27: 322~311]
- [34] Peng Jianfeng, Gou Xiaohua, Chen Fahu, *et al*. Climatic records of tree-ring width in *Picea schrenkiana* Fisch and *Larix sibirica* Ledeb [J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4): 460~465 [彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 天山云杉和西伯利亚落叶松的树轮气候记录 [J]. 生态环境, 2005, 14(4): 460~465]
- [35] Cullen L. E., Palmer J. G., Duncan R. P. *et al*. Climate change and tree-ring relationships of *Nothofagus menziesii* tree-line forests [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31: 1981~1991
- [36] Wu Xiangding, Shao Xumei. A preliminary study on impact of climate change on tree growth using tree-ring width data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51: 92~101 [吴祥定, 邵雪梅. 采用树轮宽度资料分析气候变化对树木生长量影响的尝试 [J]. 地理学报, 1996, 51: 92~101]
- [37] Xu Huacheng, Li Zhandong, Qiu Yang. Fire disturbance history in virgin forest in northern region of Daxing'anling Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17: 337~343 [徐化成, 李湛东, 邱扬. 大兴安岭北部地区原始林火干扰历史的研究 [J]. 生态学报, 1997, 17: 337~343]
- [38] Jobbgy E. G., Jackson R. B. Global controls of forest line elevation in the northern and southern hemispheres [J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2000, 9: 253~268
- [39] Cullen L. E., Stewart G. H., Duncan R. P., Palmer J. G. Disturbance and climate warming influences on New Zealand *Nothofagus* Tree-Line Population Dynamics [J]. *The Journal of Ecology*, 2001, 89: 1061~1071

## Alpine Timberline Dynamics in Relation to Climatic Variability in the Northern Daxing'an Mountains

CHANG Jinfeng<sup>1</sup>, WANG Xiangping<sup>1,2</sup>, ZHANG Xinping<sup>1</sup>, LI N Xin<sup>1</sup>

(1 Department of Ecology and Key Laboratory for Earth Surface Processes of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China;

2 The Key Laboratory of Silviculture and Conservation of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract** Alpine timberline is very sensitive to climatic change and has become a focus in global change research. In this study, we developed tree-ring chronologies and age structures for timberline forests in the northern Daxing'an Mountains to examine timberline dynamics in relation to climatic variability. Our results showed that 1) The statistical characters of the chronologies suggested that the sensitivity of tree growth to environmental changes increased with increasing altitude. 2) The correlations between tree-ring width and climatic records showed remarkable altitudinal differences. Tree radial growth was mainly limited by previous August precipitation and previous September temperature at high-elevation sites; however, the importance of these climatic factors decreased with decreasing altitude. In contrast, tree growth was mainly limited by current March temperature at low-elevation sites. 3) The age structures for the timberline forests suggested that fire disturbance, instead of climatic factors, was the major driver for tree recruitment in the study region. The recruitment patterns differed with tree species and elevation, suggesting the differences in regeneration strategy and cold tolerance for different tree species. 4) The timberline dynamic in the study region showed clear differences from that of arid regions in several respects, which may be related to differences in climatic conditions, tree species and recruitment drives.

**Key words** alpine timberline; dendrochronology; climatic change; community recruitment; the north Daxing'an Mountains; fire disturbance