

# 长白山突变型林线岳桦对气候变化的响应

王晓东, 刘惠清\*

(东北师范大学城市与环境学院, 吉林 长春 130024)

**摘 要:** 在长白山北坡局地突变型林线内选取 10 个样方, 采用实测法测量岳桦两种生活型(灌木状和乔木状)的树高、径级, 采用年轮法测定岳桦的树龄, 计算分析长白山北坡 2 000 m 处 48 a(1953—2000 年)的积温变化。对获得的数据采用回归模型、小波分析、相关分析建立树高、径级与积温变化的关系。结果显示: 对应长白山 48 年来积温变化的几个高温期(1960 年代初、1980 年代、1990 年代后期), 岳桦树高生长对气候变化有显著响应。灌木状岳桦在径级 1~7、7~13、13~19 和 >19 cm 阶段树高生长分为适应期、弱胁迫期和胁迫期。乔木状岳桦在径级 13 cm 和 5 cm 出现增长受限和适宜生长两个拐点。高温期对应岳桦树高的快速生长, 岳桦树高增长的年际变化是对气温变化的积极响应。

**关键词:** 突变型林线; 树高; 数学模型; 气候变化

**中图分类号:** Q948. 11

**文献标识码:** A

山地郁闭林到树种线之间的过渡带称为高山林线<sup>[1-2]</sup>, 处于高寒严酷气候胁迫的临界状态<sup>[3-4]</sup>, 对气候变化最敏感<sup>[5-6]</sup>。其树高、径级生长受外界条件变化的影响大, 胸径的加粗与树高的增长也必然存在内在联系<sup>[7]</sup>。以往对林线高大乔木胸径与树高的研究<sup>[8-10]</sup>多是从方法论的角度建立树高和径级之间的关系<sup>[11]</sup>, 如依据海拔变化建立岳桦径级与高度的关系<sup>[12]</sup>, 根据林龄分级建立高度与径级的关系<sup>[13]</sup>, 通过树高与胸径的统计分析描述高山林线太白红杉林的长势<sup>[14]</sup>, 采用数学模型拟和树高-径级与冷杉种群的动态<sup>[15]</sup>, 依据树高与胸径采用数学模型预测全球气候变化情景下的植被与林线动态<sup>[16]</sup>等。总体看, 从林线乔木树高与径级的关系探讨林线变化对全球气候响应的研究较少, 尤其是对突变型林线的研究不够深入。本文以长白山北坡突变型林线的灌木状和乔木状岳桦为研究对象, 探讨岳桦树高与径级生长对气温变化的响应方式<sup>[17]</sup>, 为长白山林线对气候变化的响应提供例证, 为林线动态与

气候变化关系的研究提供一种新的思路。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

长白山北坡林线的海拔为 1 900 ~ 2 000 m, 局部地区可升至 2 100 m<sup>[18]</sup>。林线生境风大寒冷, 不适于其他树种生长, 遂使岳桦成为优势种, 少见其他树种<sup>[19]</sup>。

研究区位于长白山北坡林缘带的局部山丘, 地理位置为 42°03'28" ~ 42°03'30"N, 128°04'5" ~ 128°04'15"E, 山丘上的树种为岳桦, 研究区为突变型林线<sup>[20]</sup>。

### 1.2 研究方法

为适应林线恶劣的生长条件, 岳桦采取两种生长对策: 灌木状与乔木状。两种生长对策对气候变化响应的方式不同, 为全面把握岳桦种群拓展与环境变化的关系, 本文将岳桦分为灌木状与乔木状分

收稿日期(Received date): 2011-03-15; 改回日期(Accepted): 2011-07-22。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(40871005)。[National Natural Science Foundation of China (No. 40871005).]

作者简介(Biography): 王晓东(1971-), 男(汉族), 辽宁盘锦人, 博士生, 主要从事综合自然地理学的研究。[Wang Xiaodong (1971-), male, Born in Panjin Liaoning Province, Ph. D. candidate, mainly engaged in physical geography.] E-mail: wangxd219@nenu.edu.cn

\* 通讯作者(Correspondent author): 刘惠清(1949-), 女(汉族), 吉林长春人, 教授, 博士生导师。[Liu Huiqing (1949-), female, born in Changchun, Jilin province, Professor.] E-mail: liuhq595@nenu.edu.cn

别研究。2008-07 和 09 采用样方调查法在研究区内沿突变型林线边缘自低而高每间隔 10 m 设置样方 10 个(图 1),样方的大小为 10 m×10 m,用 GPS 测定样方的经纬度和海拔、用坡度仪测定坡度(表 1),调查内容为样地内灌木状和乔木状岳桦的胸径和树高。树高≤2 m 的岳桦用直接测量法(带刻度的标杆)测定高度,树高>2 m 的岳桦用全站仪测量,测量精度为 0.1 m(表 2,表 3)。

在每一样方内选择典型岳桦个体(涵盖到每一

径级)做树轮分析(共 70 棵)(表 2,3),测定方法采用树芯和树盘两种方式:径级大于 3 cm、取树芯,剔除低质量后共得到 73 个;找到一些风折与冻害而死的小树取树盘,共取 24 个。树芯的取样方法是在距地表 0.3 m 的树干处取两个树芯;树盘亦是在距地表 0.3 m 的树干处取;径级小于 1 cm、树高小于 1 m 直接在基部取样。取得的树芯和树盘经干燥打磨后在仪器(LA-S 型植物年轮分析系统:2 亿像素)上交义定年,获取年轮数据。

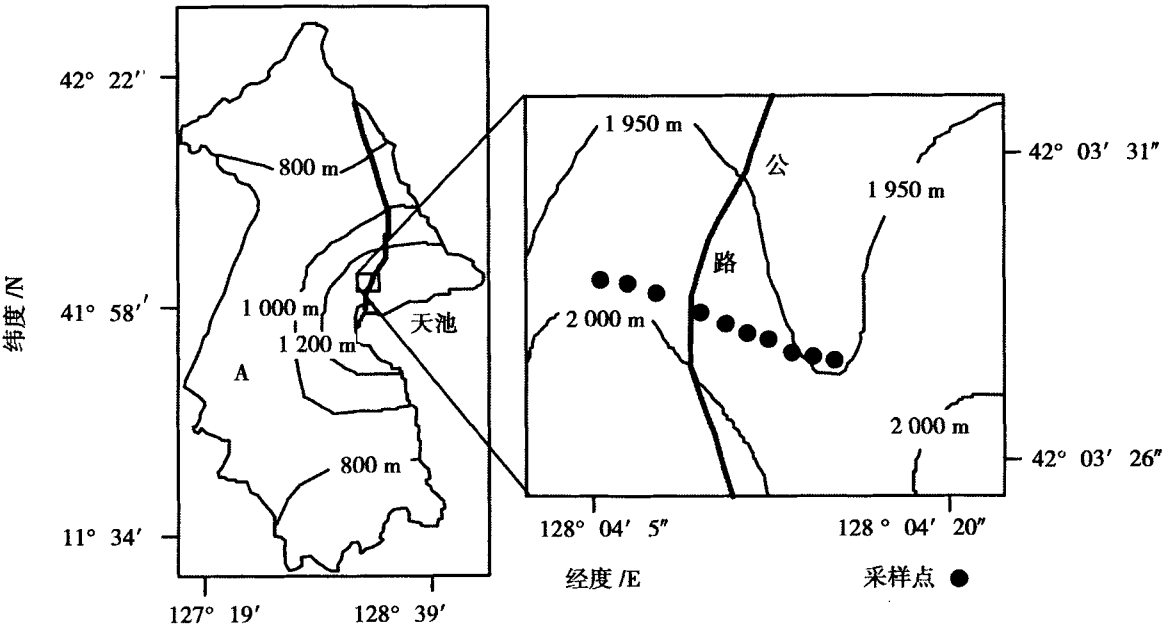


图 1 长白山北坡郁闭型林线采样点位置图

注:A 为长白山自然保护区

Fig. 1 Sampling position of close treeline of northern slope Changbai Mountains

表 1 样方的位置及环境特征

Table 1 location and environment in plots

样方编号	经度/E	纬度/N	平均海拔/m	坡度/°	选择棵数
样方 1	128.070 7	42.057 7	1 940	18	7
样方 2	128.070 4	42.057 8	1 948	19	9
样方 3	128.070 1	42.057 9	1 953	11	5
样方 4	128.069 8	42.058 0	1 959	21	6
样方 5	128.069 6	42.0581	1962	19	7
样方 6	128.069 3	42.058 2	1 968	18	10
样方 7	128.069 0	42.058 3	1972	14	6
样方 8	128.068 5	42.058 4	1 980	18	7
样方 9	128.068 3	42.058 5	1 984	20	6
样方 10	128.068 1	42.058 6	1 990	19	7

注:选择棵数是指在各个样方内用于做树轮分析的树木。

表 2 样方内灌丛状岳桦树高均值调查结果

Table 2 The field survey data for shrub *Betula Ermanii* height on quadrats

胸径/cm	样方编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<1			0.600			0.400	0.500			
1	1.759	2.000	1.646	1.684	1.800	1.000		2.000		
2	2.225		2.391	2.143	2.600	2.689	3.000	2.000		2.200
3	2.000	2.200	2.567	3.200	3.200	3.200	2.900	4.000	3.000	3.000
4		2.867	2.500	2.933	2.900		3.250		3.800	
5	3.720		2.867	3.800	4.000	7.000	4.880			
6	3.200	3.075	5.800		3.500		5.500		5.300	
7	4.600		6.900				6.000			6.100
8			5.479	4.825	4.000	5.400	6.000			6.000
9	5.600		4.800				6.800		5.600	
10	5.600		6.280	5.640	5.500	5.750	6.720			
11						6.000				
12	6.033		7.533			6.000	7.375			
13	6.000					3.875	7.000		7.000	7.000
15						7.000	7.500		7.500	7.300
16	5.800		8.000	6.800	6.200	7.300				
17	7.000	7.000		6.200						
18			7.550							
19				5.600						
20						7.000				
21						7.200				
22						7.000				
23		7.200								

表 3 样方内乔木状岳桦树高均值调查结果

Table 3 The field survey data for single tree *Betula Ermanii* height on quadrats

胸径/cm	样方编号						
	1	2	3	4	5	6	7
< 0.5	<0.600					< 0.500	
< 1				1.500			
1				2.000			
2		1.800		2.600			
3							3.500
4				3.600			
5							5.500
6			3.300	3.400			
8				4.600			5.000
10				5.100			7.200
13							7.000
14							7.000
16		6.800					8.000
20						7.000	

注:编号为 7 的样方设在路边;8、9、10 内没有乔木状岳桦。

1.3 数据分析方法

采用国际通用的 SPSS13.0 统计软件对原始数据进行相应处理。首先,采用一元回归数学模型、K-S 与 T 检验分析径级与树高之间的增长关系;其次,利用小波分析、趋势分析揭示林线处气温变化特点;再次,利用年轮数据,建立树高、径级与年代的对对应关系;最后,采用多元相关分析法认识灌木状和乔木状岳桦树高生长与气温变化的关系,阐述林线处岳桦对气候变化的响应方式。

2 结果与分析

2.1 灌木状岳桦树高 - 径级的关系

2.1.1 统计数据

将样方内的灌木状岳桦按径级大小统计树高的均值,标准差,最大值和最小值、偏度和峰度(表 4)。

表 4 灌木状岳桦高度统计表  
Table 4 Statistics of shrub *Betula Ermanii* height on quadrats

胸径/cm	高度均值/m	标准差	最大值/m	最小值 /m	偏度	峰度
<1	1.059	2.243	2.000	0.200	0.399	1.905
1	1.716	0.172	2.000	1.000	-0.678	3.667
2	2.421	0.629	4.000	1.000	1.003	1.713
3	2.830	0.500	4.000	2.000	0.070	-0.067
4	2.929	0.446	4.000	2.300	0.351	-0.171
5	4.211	1.334	7.000	2.600	0.780	0.050
6	3.978	1.282	6.000	2.400	0.758	-0.997
7	5.800	1.158	7.000	4.600	-0.193	-2.972
8	5.341	0.833	7.600	4.000	1.275	2.202
9	5.733	1.007	6.800	4.800	0.586	
0.141	10	5.923	0.711	7.200	4.300	0.322
11	6.000	0.000	6.000	6.000		
12	6.736	0.823	8.000	5.800	0.198	-1.486
13	4.750	1.943	7.000	3.000	0.107	-3.028
15	7.333	0.577	8.000	7.000	1.732	
-0.507	16	6.662	0.744	8.000	5.800	0.953
17	6.733	0.462	7.000	6.200	-1.732	
18	7.550	0.332	8.000	7.300	1.096	-0.050
19	5.600	0.000	5.600	5.600		
20	7.600	0.520	7.900	7.000	-1.732	
21	7.200	0.000	7.200	7.200		
22	7.000	0.000	7.000	7.000		
23	7.200	0.000	7.200	7.200		

2.1.2 树高均值与径级

将树高均值与对应的胸径数据输入 spss 软件, 建立一元回归模型, 拟和度较好 (Sig 值低) 的数学模型为

$$Y = 2.6330 + 0.2376X \quad (Sig = 0.000 < 0.01, Rsq = 0.787) \quad (1)$$

$$Y = 1 / (1/U + 0.3862 * 0.9458X) \quad (Sig = 0.000 < 0.01, Rsq = 0.716) \quad (2)$$

式中 Y 是树高 (m), X 是径级 (cm)

拟和结果基本反映岳桦树高的生长过程: 径级加粗, 树高增长 (Sig = 0.000 < 0.01, K = 0.2376 > 0), 但不能用一条直线 (Rsq = 0.787, 异常值较多 (7 个)) 或通用的 logistic 曲线 (Rsq = 0.716) 拟和, 它们都不能完整地反映岳桦树高增长与环境变化的信息。按照“环境在失稳-振荡-突变时期植被变化速度加快”<sup>[21]</sup> 这一结论, 这两个模型都不能反映岳桦树高增长对外界气温波动的响应。

为进一步探寻树高的增长规律, 用灌木状岳桦胸径与对应树高的数据进行小波分析 (图 2)。从图 2 可见, 随着径级的加粗, 树高呈非线性增长, 径级为 7、13 和 19 cm 时, 树高生长有明显突变, 生长过程为波动性增长。

根据小波分析中径级的三个突变点, 可将灌木状岳桦树高的生长分为四个阶段。将每一阶段的径级与对应的树高均值代入 spss 软件, 提取拟和度较高的数学模型 (表 5)。

拟和结果显示: 第一阶段模型拟和效果好 (Sig < 0.01), 表明在岳桦生长的初期, 外部环境适宜, 岳桦基本是按自身规律生长; 第二阶段, 所有模型拟和效果下降 (Sig. > 0.01), 显现外部环境对岳桦生长有弱的胁迫; 第三、四阶段, 出现高度偏离自身生长规律的现象, 用生长或 logistic 曲线无法拟和, 最小的 Sig 值拟和模型呈抛物线型, 表明后两个阶段外部环境波动大, 对岳桦生长胁迫加剧。

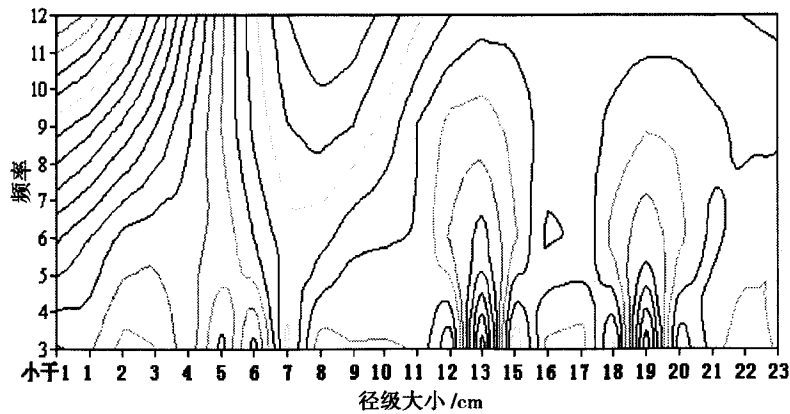


图 2 灌木状岳桦径级-高度均值小波分析图

Fig.2 Wavelet analysis of shrubby *Betula Ermanii* diameter-height mean

表 5 灌木状岳桦树高均值(因变量)与径级(自变量)的数学模型

Table 5 Mathematical models of height means of shrubby *Betula Ermanii* (dependent variable) and diameter-class (independent variable)

数学模型	参数	第一阶段 (≤7 cm)	第二阶段 (>7 ~ ≤13 cm)	第三阶段 (>13 ~ ≤19 cm)	第四阶段 (>19 cm)
直线	b0	1.439 8	1.439 8	5.878 4	10.261 1
	b1	0.455 5	0.455 5	0.072 2	-0.141 1
	Sig	0.000 0	0.014 0	0.788 0	0.282 0
增长曲线	Rsqr	0.929 0	0.900 0	0.045 0	0.516 0
b0	0.457 8	1.270 3			
	b1	0.171 3	0.051 1		
	Sig	0.000 0	0.011 0		
	Rsqr	0.942 0	0.912 0		
logistic 曲线	b0	0.632 7	0.280 8		
	b1	0.842 6	0.950 3		
	Sig	0.000 0	0.011 0		
	Rsqr	0.942 0	0.912 0		
二次曲线	b0			106.724 1	79.411 1
	b1			-12.208 1	-6.591 1
	b2			0.372 1	0.151 1
	Sig			0.000 0	0.103 0
	Rsqr			1.000 0	0.103 0

注:Sig<0.01,模型通过检验。

从多条拟和线看,高度随径级的增加是先快后慢(1~4 阶段的斜率值分别为 0.4555 = 0.4555 > 0.0722 > -0.1411)。反映林线生境发生了一系列变化:先期环境恶劣,限制径级与树高增长;近期环境趋好,径级与树高生长趋于正常。

2.1.3 树高标准差、极差与径级

将统计的径级与对应树高的标准差、极差输入

spss 软件进行回归分析,提取拟和度最好的模型

$$Y_1 = 0.2984 + 0.1317X - 0.0067X^2 \quad (Sig = 0.003 < 0.01, Rsq = 0.44) \quad (3)$$

$$Y_2 = 1.7096 + 0.2263X - 0.0143X^2 \quad (Sig = 0.001 < 0.01, Rsq = 0.50) \quad (4)$$

$Y_1$  与  $Y_2$  分别是标准差和极差,  $X$  为径级 (cm), 模型均为开口向下的曲线, 中间值大, 两边值小, 对

称轴分别为 10 cm 和 8 cm, 剩余标准差(S) 分别是 0.388 8 和 1.005 4, 以拟和值加减一个 S 为取值区间, 第一个模型的异常值有 5、6、11、13(偏差分别是 0.544 7、0.434 9、-0.936 4、1.064 7), 第二个模型的异常值亦为 5、6、11、13(偏差分别是 1.916 4、1.047 4、-2.468 6、1.765 2)。

拟和结果大致反映岳桦树高的生长过程, 即在岳桦无性繁殖成功后, 母体及环境条件可保证树高增长时, 岳桦以相同的速度增高(标准差、极差小); 当生长到一定阶段(胸径 8 cm 与 10 cm), 种间竞争加剧与环境条件变差, 树高增长发生分异(标准差、极差大); 后期, 受自身生长规律和环境变化的双重影响, 树高增长放缓, 竞争中的弱者树高增长趋近竞争中的优胜者, 树高趋于一致(标准差、极差小)。

树高增长过程中, 同样存在异常值( $Rsq = 0.44、0.5$ ): 径级为 5、6 cm 时标准差变大, 外界条件发生变化, 不利于岳桦生长, 强势和弱势岳桦生长速度产生分异; 径级为 11、13 cm 时受种间竞争和环境波动的共同影响, 标准差突然放大。

2.1.4 树高偏度和峰度与径级

将统计的径级与对应树高的偏度和峰度值输入 spss 软件进行回归分析, 取拟和度最好的模型

$$Y_1 = -0.1082 + 0.1947X - 0.0114X^2 \quad (Sig = 0.178 > 0.01, Rsq = 0.206) \quad (5)$$

$$Y_2 = 2.5542 - 0.6179X + 0.024X^2 \quad (Sig =$$

$$0.036 > 0.01, Rsq = 0.453) \quad (6)$$

$Y_1$  与  $Y_2$  分别表示偏度和峰度,  $X$  是径级(cm), 根据检验值可见, 即使是拟合度最好的模型也无法通过, 偏差出现在大径级上。反映在大径级水平, 岳桦的生长环境更趋恶化, 出现偏离自身生长规律的树高变化。

2.2 乔木状岳桦高度与径级的关系

2.2.1 统计数据

将样方内的乔木状岳桦按径级统计树高的均值, 标准差, 最大值、最小值、偏度和峰度(表 6)。

2.2.2 树高均值与径级

将高度均值与对应的胸径值输入 spss 软件进行一元回归分析, 提取拟和度较好的数学模型

$$Y = 2.0883 + 0.3107X \quad (Sig = 0.000 < 0.01, Rsq = 0.850) \quad (7)$$

$$Y = e^{(0.7199 + 0.0824X)} \quad (Sig = 0.000 < 0.01, Rsq = 0.718) \quad (8)$$

$$Y = 1/(1/U + 0.4868 * 0.9209^X) \quad (Sig = 0.000 < 0.01, Rsq = 0.718) \quad (9)$$

$$Y = 1.3599 + 0.6204X - 0.0169X^2 \quad (Sig = 0.000 < 0.01, Rsq = 0.925) \quad (10)$$

对称轴 18.355 1; 式中  $Y$  为树度(m),  $X$  为径级(cm)。

以拟和值加减一个 S 为取值区间, 直线模型( $S = 0.863 2$ )拟和的异常值有 5、20(偏差分别是 1.858 2、

表 6 乔木状岳桦统计表

Table 6 Statistics of single tree Betula Ermanii height on quadrats

胸径/cm	高度均值/m	标准差	最大值/m	最小值/m	偏度	峰度
	<1.000	1.345	1.000	0.200	0.544	0.992
<1	1.500	1.531	1.900	1.000	2.920	6.863
1	2.000	0.997	2.800	1.500	2.510	4.431
2	2.671	0.111	2.800	2.500	-0.249	-0.944
3	3.500	0.000	3.500	3.500		
4	3.600	0.000	3.600	3.600		
5	5.500	0.000	5.500	5.500		
6	3.350	0.071	3.400	3.300		
8	4.713	0.155	5.000	4.500	0.644	0.592
10	5.450	0.860	5.000	7.200	2.420	5.887
13	7.000	0.000	7.000	7.000		
14	7.000	0.000	7.000	7.000		
16	6.800	0.000	6.800	6.800		
20	7.000	0.000	7.000	7.000		

-1.302 3)。增长曲线模型( $S = 1.453\ 8$ )拟和的异常值有5、20(偏差是2.398 5、-3.674 9)。二次模型( $S = 0.612\ 6$ )拟和的异常值有5、20(偏差是1.460 6、-1.123 9)。

拟和结果很好地体现了种群树高的增长规律( $Sig = 0.000 < 0.01$ ,  $Rsq$  值较高)。几个模型的异常值都出现在径级5 cm处,表明近期的气温对岳桦生长极为有利;径级为13 cm处树高增长趋缓;径级为18 cm时达到树高的极限(对称轴为18),说明林线处树高生长明显受环境限制。

### 2.2.3 树高其他统计量与径级

标准差与极差数值中0占绝对优势(50%),无法用模型拟和,用单个样本的K-S检验和单个样本的T检验判断标准差与极差的分布规律。单个样本的T检验(标准差,  $Sig. (2-tailed) = 0.185 > 0.05$ ;极差,  $Sig. (2-tailed) = 0.587 > 0.05$ )结果说明样本差异不显著,表明目前环境变化较小,对乔木岳桦树高增长影响不明显;单个样本的K-S检验(标准差,  $Sig. (2-tailed) = 0.000 < 0.05$ ;极差,  $Sig. (2-tailed) = 0.003 < 0.05$ )结果说明样本数值有小的差异,树高增长的同步性不典型,特殊值出现在径级6~10 cm区间,反应环境有小幅波动。偏度和峰度(8、10 cm)数值大,分析结果与标准差与极差的分析结果吻合。

## 2.3 样地内的气温变化

### 2.3.1 气温特点

利用长白山天池气象站(海拔2 624 m)48 a(1953—2000年)的气温数据和长白山北坡的气温递减率<sup>[22]</sup>,推算样地(海拔2 000 m)内的气温指标。从结果看该地段气温低(年均温均值-4.11℃,最

热月气温均值11.72℃,  $\sum t \geq 10^\circ\text{C}$ 和 $\sum t \geq 0^\circ\text{C}$ 均值分别为710.829℃、1 148.877℃),生长期短((日均温 $\geq 10^\circ\text{C}$ )和(日均温 $\geq 0^\circ\text{C}$ )分别为62 d, 153 d)。

### 2.3.2 气温变化

利用计算出的长白山北坡2 000 m处气温数据,逐年推算对岳桦生长有影响的气温指标,即积温( $\sum t \geq 0^\circ\text{C}$ ),计算年积温距平值(图3)。从图3的趋势模型(斜率为2.9374 > 0)可见,从1950年代起气温呈上升趋势( $R^2 = 0.134\ 4$ ,显示气温呈波动上升态势)。

将长白山北坡2 000 m处48 a的积温( $\sum t \geq 0^\circ\text{C}$ )数据输入DPS软件,应用小波分析模块进行处理(图4)。结果显示:1960年代初有一气温适宜期,1980年代左右有一较短的高温期,1990年代后出现明显的高温期(高温期内仍出现低温年)。整体看,气温呈有规则的波动上升趋势,这与东北地区50年来的气温变化过程基本吻合<sup>[23]</sup>。

## 2.4 岳桦树高与气温变化的关系

依据林线岳桦种群生长受气温控制<sup>[24-26]</sup>的观点,采用多元相关分析研究岳桦树高增长与气温变化的关系。

### 2.4.1 岳桦理论树高与实际树高的偏差推测

增长模型适合用来分析岳桦树高的增长规律,遂用曲线拟和值与实际值之差作为环境影响树高增长的偏离变量。根据树轮分析测定的岳桦年龄,采用曲仲湘的分级原理与龄级划分方法<sup>[27]</sup>,建立径级与树龄的数学模型,将岳桦种群的径级结构转换为年龄结构(径级小于1 cm、树高小于1.5 m的个体按树高拟和),最终推测计算出每棵岳桦的年龄。

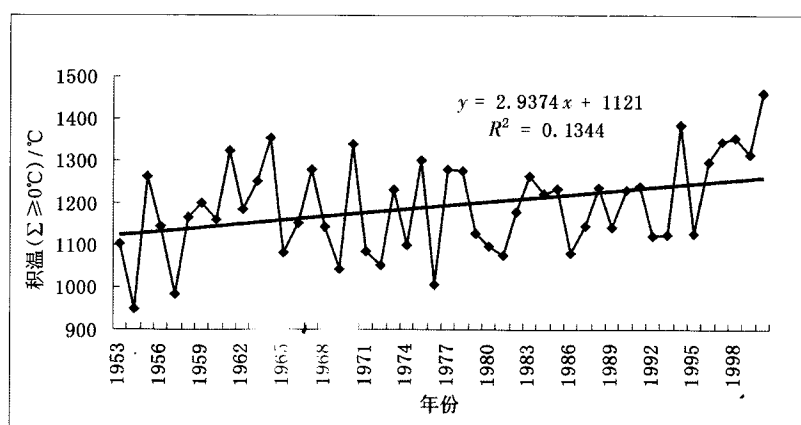


图3 长白山北坡2 000 m处积温距平曲线图

Fig.3 The temperature change on 2 000 meters the northern slope Changbai Mountains

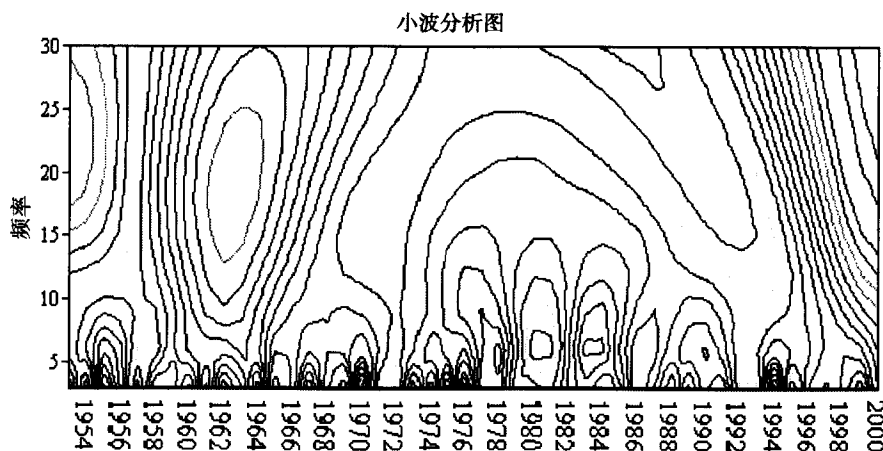


图4 长白山北坡2 000 m 积温( $\Sigma t \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )小波分析图

注:A 为长白山自然保护区

Fig.4 Wavelet analysis of accumulated temperature ( $\Sigma t \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) at elevation of 2000m on the northern slope Changbai Mountains

$$\text{灌丛状 } Y = e^{(2.5831 + 0.1311x)} \quad (R^2 = 0.985, p = 0.000 < 0.001) \quad (11)$$

$$\text{乔木状 } Y = e^{(2.5328 + 0.1293x)} \quad (R^2 = 0.973, p = 0.000 < 0.001) \quad (12)$$

$Y$  是年龄(年),  $X$  是径级(cm)

$$\text{灌丛状 } y = 6.4614 t^{0.925} \quad (t < 1.5 \text{ m}, R^2 = 0.791, p = 0.000 < 0.001) \quad (13)$$

$$\text{乔木状 } y = 6.4918 t^{0.901} \quad (t < 1.5 \text{ m}, R^2 = 0.833, p = 0.000 < 0.001) \quad (14)$$

$Y$  是年龄(年),  $t$  是高度(m)

据此,基于样方调查的数据按照数学模型逐年推算受环境影响树高增长的偏离量。

#### 2.4.2 岳桦树高增长的年度偏离量与气温变量间的关系

将推算的长白山北坡2 000 m 处48 a(1953—2000年)的5、7、9月均温,  $\Sigma t \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Sigma t \geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 年均温及温暖指数,分别与灌木状岳桦和乔木状岳桦的年偏离量作多元相关分析(表7)。结果显示:气温明显影响岳桦树高的增长(相关系数),积温与最热月温度对树高增长影响尤为显著( $p < 0.05$ )。

表7 岳桦的树高生长的偏离(因变量)与气温因子间(自变量)的多元相关关系

Table 7 Multiple correlation analysis between height growth deviation of *Betula ermanii* (dependent variable) and air temperature factors (independent variable)

相关系数	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
y1	0.11	0.17	0.13	0.15	0.42**	0.19	0.23
y2	0.16	0.29*	0.26	0.39**	0.12	0.21	0.26

注: \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ ; x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, y1, y2 分别

代表5月均温,7月均温,9月均温,积温( $\Sigma t \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),积温( $\Sigma t \geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),年均温,温暖指数,灌木状岳桦的树高偏离量,乔木状岳桦的树高偏离量

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

1. 20世纪50年代以来,在突变型林线这一特定位置,气温呈波动上升的趋势,60年代初期,80年代,90年代后期出现较明显的高温期。

2. 气温变化和岳桦生长有较好的拟合关系。小径级水平(灌木状,乔木状)的岳桦,当气温升高、胁迫力下降时,按自身固有规律生长;大径级(主要为灌木状)岳桦的生长则出现偏离自身树高生长规律的现象:气温低、胁迫力大,树高生长受阻;气温升高、胁迫力变小,树高增长加快。

3. 灌木状岳桦树高与径级随气温的变化呈非线性增长,在径级是1~7、7~13、13~19和>19 cm时呈现为适应生长期,弱胁迫期和胁迫期。乔木状岳桦树高与径级随气温的变化亦出现两个拐点:径级为大于13 cm时,岳桦生长受低温限制,增长速度趋缓;径级小于5 cm时,气温升高有利于岳桦的生长。

4. 突变型林线岳桦对气温变化的响应不是温暖期向高海拔上侵,而是树高增长速度的加快。利用活跃积温增加的有利时机,无性繁殖的灌木状岳桦以向垂直方向拓展生态位的方式响应气温的升高;有性繁殖的乔木状岳桦则利用积温增加和生长期延长的叠加的有利时机以树高的增长速度加快来对气温的变化做出有利响应。



### 3.2 讨论

林线变化对环境演变的响应比较复杂<sup>[28]</sup>,本文仅仅是在通常认为响应最迟缓的突变型林线的特定位置来进行研究,可供借鉴的研究范例有限,难免有一些不足之处。

1. 由于缺乏长系列的气象资料(一些大径级岳桦生长年限超过气象资料的时间系列),致使建立的树高-气温的对应关系中某些相关系数偏低( $< 0.5$ ),影响树高-气温对应关系在时间和空间上的外推。

2. 树高与径级的测量精度有一定误差,可能影响到分析结果和结论的精确性。

3. 由于篇幅有限,仅对气温做动态的统计分析,其他生境因子(风、水、土壤等)对岳桦生长影响在后续文章中探讨。

### 参考文献(References)

- [1] Körner C h and Paulsen J A. Study of high altitude treeline temperatures [J]. *Journal of Biogeography*, 2004, 31:713-732
- [2] Camarero J J, Emilia G, Fortin, M J. Spatial pattern of subalpine forest-alpine grassland ecotones in the Spanish Central Pyrenees [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 134(1-3): 1-16
- [3] Wang Xiaochun, Zhou Xiaofeng, Sun Zhihu. Research Advances in the Relationship between Alpine Timberline and Climate Change [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(3): 301-305 [王晓春,周晓峰,孙志虎.高山林线与气候变化关系研究进展[J].生态学杂志,2005,24(3):301-305]
- [4] Yan Shun, Kong Zhaochen, Yang Zhenjing, et al. Fluctuation of timberline and environment change near the northern Piedmonts of Tianshan Mts. during the last 2000 Years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(6): 699-704 [阎顺,孔昭宸,杨振京,等.东天山北麓2000多年以来的森林线与环境变化[J].地理科学,2003,23(6):699-704]
- [5] Wu Xiangding, Shao Xuemei. 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]
- [6] Tian Jun, Liu Hongyan, Tian Yuhong, et al. Characteristics and spatial patterns of vegetation on the upper forest boundary on Mt. Guandi, Shanxi Province [J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(1), 63-67 [田军,刘鸿雁,田育红,等.山西关帝山森林上限附近植被的性质与空间格局[J].山地学报,2003,21(1):63-67]
- [7] Chang Yu, Bu rencang, Hu Yuanman, et al. Quantitative determination of landscape boundary between mountain birch and tundra in the northern slope of Changbai Mountain [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(4), 477-483 [常禹,布仁仓,胡远满,等.长白山北坡苔原/岳桦景观边界的定量检测[J].地理科学,2003,23(4),477-483]
- [8] Yu Dapao, Zhou Li, Dong Baili, et al. Structure and dynamics of *betula ermanii* population on the northern slope of Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 30-34 [于大炮,周莉,董百丽,等.长白山北坡岳桦种群结构及动态分析[J].生态学杂志,2004,23(5):30-34]
- [9] Hao Zhanqing, Deng Hongbing, Jiangping, et al. Co-occurrence of plant species among communities with changes in Altitudes on the northern slope of Changbai Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9):1421-1426 [郝占庆,邓红兵,姜萍,等.长白山北坡植物群落间物种共有度的海拔梯度变化[J].生态学报,2001,21(9):1421-1426]
- [10] Zhou Xiaofeng, Wang Xiaochun, Han Shijie, et al. The Effect of global climate change on the dynamics of *betula ermanii*-tundra ecotone in the Changbai Mountains [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1):227-231 [周晓峰,王晓春,韩士杰,等.长白山岳桦苔原过渡带动态与气候变化[J].地学前缘,2002,9(1):227-231]
- [11] Cheng Wei, Lou Peng, Wu Ning. Ecological characteristics of Minjiang fir (*Abies Faxoniana* Rehd. ET Wild) population near timberline on upper Min River [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2005, 11(3):300-303 [程伟,罗鹏,吴宁.岷江上游林线附近岷江冷杉种群的生态学特点[J].应用与环境生物学报,2005,11(3):300-303]
- [12] Zhang Yangjian, Dai Limin. The trend of treeline on the northern slope of Changbai Mountain [J]. *Journal of Forestry Research*, 2001, 12(2): 97-100
- [13] Wang Xiangping, Fang Jingyun, Tang Zhiyao, et al. Climatic control of primary forest structure and DBH-height allometry in north-east China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234:264-274
- [14] Xu Linjun, Peng Hong, Chen Cungen, et al. Quantitative analysis of the *Larix chinensis* forest's distribution at Qinling Mountains and the character of the Alpine timberline at Taibai Mountain [J]. *Acta Botanica Boreali - Occidentalia Sinica*, 2005, 25(5): 968-972 [许林军,彭鸿,陈存根,等.秦岭太白红杉林分布及太白山高山林线特征的定量分析[J].西北植物学报,2005,25(5):968-972]
- [15] Shen Zehao, Fang Jingyun, Liu Zengli, et al. Structure and dynamics of *Abies fabri* population near the alpine timberline in Hailuo Clough of Gongga Mountain [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(12):1288-1293 [沈泽昊,方精云,刘增力,等.四川贡嘎山海螺沟林线附近峨眉冷杉种群的结构与动态[J].植物学报,2001,43(12):1288-1293]
- [16] Dullinger S, Dirnbock T, Grabherr G. Modelling climate change driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invisibility [J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92(2): 241-252
- [17] Zhang Yangjian, Dai Limin. The trend of treeline on the northern slope of Changbai Mountain [J]. *Journal of Forestry Research*, 2001, 12(2): 97-100
- [18] Wang Xiaochun, Han Shijie, Zou Chunjing, et al. Geostatistical analysis of the pattern of *betula ermanii* population in Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13

- (7): 781–784 [王晓春, 韩士杰, 邹春静, 等. 长白山岳桦种群格局的地统计学分析[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 781–784]
- [19] Shi Peili, Li Wenhua. Boundary form effects of timberline ecotone on colonization of woody plants and timberline dynamics in Changbai Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4), 573–580 [石培礼, 李文华. 长白山林线交错带形状与木本植物向苔原侵展和林线动态的关系[J]. 生态学报, 2000, 20(4), 573–580]
- [20] Tranquillini W. Physiological ecology of the alpine timberline [M]. New York: Springer Verlag, 1979: 1–12
- [21] Chen Yufeng. Research on response of vegetation to climate change [J]. *Progress in Geography*, 1997, 16(2): 70–77 [陈育峰. 自然植被对气候变化响应的研究: 综述[J]. 地理科学进展, 1997, 16(2): 70–77]
- [22] Jing G H. Comprehensive physical geography. Changchun: Northeast Normal University Press, 1990: 112 [景贵和. 综合自然地理学[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1990: 112]
- [23] Guo Zhimei, Miao Qilong, Li Xiong. Variation characteristics of temperature over northern China in recent 50 Years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(4): 448–454 [郭志梅, 缪启龙, 李雄. 中国北方地区近 50 年来气温变化特征的研究[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 448–454]
- [24] Wang Xiangping, Zhang Ling, Fang Jingyun. Geographical differences in alpine and its climate interpretation in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 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(6): 871–879]
- [25] Xu Ming, Chen Jiquan, Brian L B. Temperature and its variability in oak forests in the southeastern Missouri Ozarks [J]. *Clim Res*, 1997, 8(3): 209–223
- [26] Rickebusch S, Lischke H, Bugmann H. Understanding the low-temperature limitations to forest growth through calibration of a forest dynamics model with tree-ring data [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 246 (2–3): 251–263
- [27] Qian J J. The research of *Betula ermanii* forest on Changbai Mountain [G]//The Symposium of Changbai Mountain. Northeast Normal University Press, Changchun, 1981: 164–176 [钱家驹. 长白山上岳桦林的调查研究[G]//长白山论文集. 长春: 东北师大出版社, 1981: 164–176]
- [28] Li Mingcai, Lou Tianxiang, Kong gaoqiang, et al. Characteristics of stable Carbon Isotope compositions of different life form species growing at the timberline in Sergiyemla Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3160–3167 [李明财, 罗天祥, 孔高强, 等. 色季拉山林线不同生活型植物稳定碳同位素组成特征[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3160–3167]

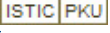
## Climatic Response of *Betula ermanii* from Closed Treeline in Changbai Mountains

WANG Xiaodong, LIU Huiqing

(College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

**Abstract:** On the north slope of Changbai Mountain 10 quadrats were selected in local closed treeline. The tree height and size class of shrub and single tree *Betula ermanii* were obtained from field measured, and the tree age was determined by standard dendrochronological techniques. The relationship between the tree height and size class was established by means of the regression model against the collected data. The variation tendency of accumulated temperature in the past 48 years on the 2 000 m high of the northern slope on Changbai Mountains was also calculated through the wavelet analysis method. The relationship between the tree height and accumulated temperature was established by means of multiple correlation analysis against the collected data. The results show that the tree height and size class have significant response against the high temperature period in the past 48 years on Changbai Mountains, including the beginning of 1960s, and late 1980s and 1990s. The tree height growth for shrub *Betula ermanii* is divided into adaptive phase, low stress phase and high stress phase according to its size class of 1–7, 7–13, 13–19 and larger than 19 cm. Two inflection points of growth restriction and optimum growth occurred for single tree *Betula ermanii* with size class of 13 cm and 5 cm separately. According to the high temperature period for the well-ordered growth of shrub and single tree *Betula ermanii* as well as the low temperature period for the growth restriction of *Betula ermanii*, the interannual variation of the growth for the tree height and size class of *Betula ermanii* responses the temperature variation significantly.

**Key words:** Closed treeline; tree height; regression model; climate change

作者: 王晓东, 刘惠清, WANG Xiaodong, LIU Huiqing  
作者单位: 东北师范大学城市与环境学院, 吉林长春, 130024  
刊名: 山地学报   
英文刊名: Journal of Mountain Science  
年, 卷(期): 2011, 29(5)

## 参考文献(28条)

1. Korner C h;Paulsen J A Study of high altitude treeline temperatures[外文期刊] 2004(5)
2. Camarero J J;Emilia G;Fortin M J Spatial pattern of subalpine forest-alpine grassland ecotones in the Spanish Central Pyrenees[外文期刊] 2000(1-3)
3. 王晓春;周晓峰;孙志虎 高山林线与气候变化关系研究进展[期刊论文]-生态学杂志 2005(03)
4. 阎顺;孔昭宸;杨振京 东天山北麓2000多年以来的森林线与环境变化[期刊论文]-地理科学 2003(06)
5. 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[期刊论文]-地理学报 1996
6. 田军;刘鸿雁;田育红 山西关帝山森林上限附近植被的性质与空间格局[期刊论文]-山地学报 2003(01)
7. 常禹;布仁仓;胡远满 长白山北坡苔原/岳桦景观边界的定量检测[期刊论文]-地理科学 2003(04)
8. 于 大炮;周莉;董百丽 长白山北坡岳桦种群结构及动态分析[期刊论文]-生态学杂志 2004(05)
9. 郝占庆;邓红兵;姜萍 长白山北坡植物群落间物种共有度的海拔梯度变化[期刊论文]-生态学报 2001(09)
10. 周晓峰;王晓春;韩士杰 长白山岳桦苔原过渡带动态与气候变化[期刊论文]-地学前缘 2002(01)
11. 程伟;罗鹏;吴宁 岷江上游林线附近岷江冷杉种群的生态学特点[期刊论文]-应用与环境生物学报 2005(03)
12. Zhang Yangjian;Dai Limin The trend of treeline on the northern slope of Changbai Mountain[外文期刊] 2001(02)
13. Wang Xiangping;Fang Jingyun;Tang Zhiyao Climatic control of primary forest structure and DBH-height allometry in northeast China 2006
14. 许林军;彭鸿;陈存根 秦岭太白红杉林分布及太白山高山林线特征的定量分析[期刊论文]-西北植物学报 2005(05)
15. 沈泽吴;方精云;刘增力 四川贡嘎山海螺沟林线附近峨眉冷杉种群的结构与动态[期刊论文]-植物学报 2001(12)
16. Dullinger S;Dimbock T;Grabherr G Modelling climate change driven treeline shifts:relative effects of temperature increase, dispersal and invisibility[外文期刊] 2004(02)
17. Zhang Yangjian;Dai Limin The trend of treeline on the northern slope of Changhai Mountain[期刊论文]-Journal of Forestry Resesrch 2001(02)
18. 王晓春;韩士杰;邹春静 长白山岳桦种群格局的地统计学分析[期刊论文]-应用生态学报 2002(07)
19. 石培礼;李文华 长白山林线交错带形状与木本植物向苔原侵展和林线动态的关系[期刊论文]-生态学报 2000(04)
20. Tranquillini W Physiological ecology of the alpine timeberline 1979
21. 陈育峰 自然植被对气候变化响应的研究:综述[期刊论文]-地理科学进展 1997(02)
22. 景贵和 综合自然地理学 1990
23. 郭志梅;缪启龙;李雄 中国北方地区近50年来气温变化特征的研究[期刊论文]-地理科学 2005(04)
24. 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[期刊论文]-地理学报 2004(06)
25. Xu Ming;Chen Jiquan;Brian L B Temperature and its variability in oak forests in the southeastern Missouri Ozarks 1997(03)
26. Rickebnsch S;Lischke H;Bugmann H Understanding the lowtemperature limitations to forest growth through calibration of a forest dynamics model with tree-ring data 2007(2-3)
27. 钱家驹 长白山上岳桦林的调查研究 1981
28. 李明财;罗天祥;孔高强 色季拉山林线不同生活型植物稳定碳同位素组成特征[期刊论文]-生态学报 2008(07)

## 引证文献(1条)

1. 宗盛伟, 许嘉巍, 吴正方 长白山西坡小叶章侵入苔原带调查与机理分析[期刊论文]-山地学报 2013(4)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_sdx201105006.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201105006.aspx)