

芦芽山林线组成树种白杆径向生长特征 及其与环境因子的关系

杨艳刚^{1,2,4,*}, 张文涛^{2,3}, 任斐鹏^{1,2}, 王耿锐², 董满宇²

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875;
3. 北京师范大学中药资源保护与利用北京重点实验室, 北京 100875; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:在山西芦芽山林线附近,应用树干径向变化记录仪(Dendrometer)测量了6株白杆树干的径向生长过程,同步监测环境因子。观测期分为两个阶段,分别是7月15日~8月7日(夏季期),9月5日~10月9日(秋季期)。结果表明:(1)白杆树干径向变化在晴好天气呈现出有规律地波动式上升,在阴雨天气下则表现为持续上升,降雨结束后迅速下降;(2)树干径向生长曲线在两个阶段都呈二次曲线形式,在夏季期内树干径向生长为正,在秋季期初始阶段为负在9月中旬后逐渐变为0。(3)在两个观测期内的非降雨期内,树干径向变化与空气温度负相关,与空气相对湿度、土壤含水量、土壤水势正相关与土壤温度相关关系在两个时期内不同;在两个观测期内的降雨时段内,树干径向变化与环境因子的相关关系均不同。(4)距离分析结果表明,在秋季期内,温暖湿润的环境适宜白杆的生长,在夏季期内,湿润环境有利于白杆的生长。

关键词:芦芽山林线;树干径向生长量;温度因子;水分因子;白杆

文章编号:1000-0933(2009)12-6793-12 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Stem radius growth features of *Picea meyeri* and its relationship with environmental factors at the treeline of Luya Mountain

YANG Yan-Gang^{1,2,4,*}, ZHANG Wen-Tao^{2,3}, REN Fei-Peng^{1,2}, WANG Geng-Rui², DONG Man-Yu²

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 College of Resource Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Protection and Utilization of Beijing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6793 ~ 6804.

Abstract: The Stem radius variation (SRV) was measured by dendrometer from six sample trees of *Picea meyeri* at the tree-line of Luya Mountain, North China, combined with synchronized instrumental observation and measurement of habitat temperature, moisture, etc., from July 15th to the August 7th (summer phase) and from September 5th to October 9th (autumn phase) in 2007. The preliminary analytic results were as follows: (1) the diameter of stems varied on sunny days with a daily fluctuation but steadily widened, while on rainy days it continuously increased during the rain but shrunked rapidly after the rain. (2) The Stem radial increment(SRI) pattern in both phase, was fitted with a conic curve pattern, The SRI was shown a positive value in the summer phase, whereas in the autumn phase, it was turned out to be a negative figure first in early September but then kept as a zero constantly from the middle September on. (3) In no rain stage of both of these phase, the stem radius variation (SRV) was negatively correlated with air temperature and positively correlated with relative humidity (RH), soil moisture and soil water potential. Correlations between SRI and soil temperature were different. Daily stem fluctuation rhythm broken by precipitation correlations of soil temperature and other factors were different in rainy phase of both phases. (4) Through distance analysis, we found that a relative warmer and moister

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40571001, 40871055, 40671065)

收稿日期:2008-09-07; 修订日期:2009-08-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangyg@ires.cn

environment was suitable in autumn phase, and high RH and soil moisture was suitable for the growth of *Picea meyeri* in summer phase.

Key Words: Treeline of Luya Mountain in North China; stem radial increment; temperature conditions; water conditions; *Picea meyeri*

树木木质部水分变化导致树干径向变化。早在 19 世纪人们就发现这一现象,对影响树干径向变化的环境因子的研究逐步深入^[1]。近年来,国内外许多研究采用树干径向变化测量仪测量树木生长^[2~6]。与传统研究方法相比,采用树干径向变化测量仪测量树木直径实时变化,观测时间尺度更小,数据精度更高。

关于林线形成的原因有多种解释^[7~9],多数研究认为温度因子是控制林线形成的主要原因^[10,11],并且有试验结论认为根附近土壤温度是林线形成的关键因子^[12],但是在芦芽山地区林线分布并不依上述规律,林线在相对低温的阴坡分布位置更高。因此有必要研究这一地区林线树木生长的限制性因子,解释林线动态变化过程机理。

为探明芦芽山林线主要组成树种白杆(*Picea meyeri*)对不同环境因子组合的适应性,明确限制白杆生长的环境因子,应用树干径向变化测量仪进行树木生长季内生长观测,结合生境气候和土壤的温度与水分特征测量,研究了芦芽山高山林线附近白杆的径向生长动态,并建立白杆径向生长与环境因子的关系,探讨白杆对不同环境因子组合的适应性。

1 研究区概况

芦芽山是管涔山的主峰,位于吕梁山北端,北纬 38°35′~38°45′,东经 111°50′~112°5′,最高峰荷叶坪海拔 2787 m,其余山峰均在 2000 m 左右。芦芽山属暖温带半湿润区,具有明显的大陆性气候特点,夏季凉爽多雨,冬季寒冷干燥。年均气温 4~7℃,1 月份均温 -8~-12℃,7 月份均温 21~36℃,年降水量 384~679 mm,年蒸发量 1800 mm,年均相对湿度 50%~55%,无霜期 130~170 d^[13]。

芦芽山海拔 1850 m 以上地段,基本上是以华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和云杉属植物(*Picea meyeri*, *P. wilsonii*)为建群种组成的寒温性针叶林,低中山以暖温带落叶阔叶林和落叶阔叶灌丛为主。随海拔高度的升高,土壤呈现垂直地带性,依次为山地褐土、山地淋溶褐土、棕色森林土和亚高山草甸土^[14]。随海拔高度的增加,植被组成呈规律性的更替,植被垂直带自下而上可划分为:森林草原带(1300~1500 m)、落叶阔叶林带(1350~1700 m)、针阔叶混交林带(1700~1850 m)、寒温性针叶林带(1750~2600 m)和亚高山灌丛草甸带(2450~2772 m)^[15]。

2 研究方法

2.1 样点布设

研究地点位于芦芽山荷叶坪北坡林线附近的白杆与华北落叶松混交林(图 1)。群落的建群种为华北落叶松和白杆,采样点位于芦芽山森林分布的上限林缘,北纬 38°43′47″,东经 111°50′16″,海拔 2737 m,平均坡度 25°,坡向为北偏西 45°。林内郁闭度 0.9,林下基本无灌层。各样木较均匀的分布在样地内,样木间平均距离约为 3~5 m,用生长锥取各样木树芯,确定树龄及胸径。

数据采集时段及样木基本情况见表 1。

2.2 树干径向变化数据采集

选择生长良好、干形较直的样木(表 1),用 DR\DD 型树干径向变化记录仪(Ecomatik, 德国),连续测定了树高 1.5 m 处的树干径向变化过程。各茎干径向变化记录仪连接在四通道 DL10 型数据采集器上(Ecomatik, 德国),数据记录步长设为 15 min,每 30 min 记录一个数据。

2.3 环境因子测定

在采样点放置 HOBO 小型自动气象站(Onset, 美国),测定林冠层空气温度和空气相对湿度、降雨条件。

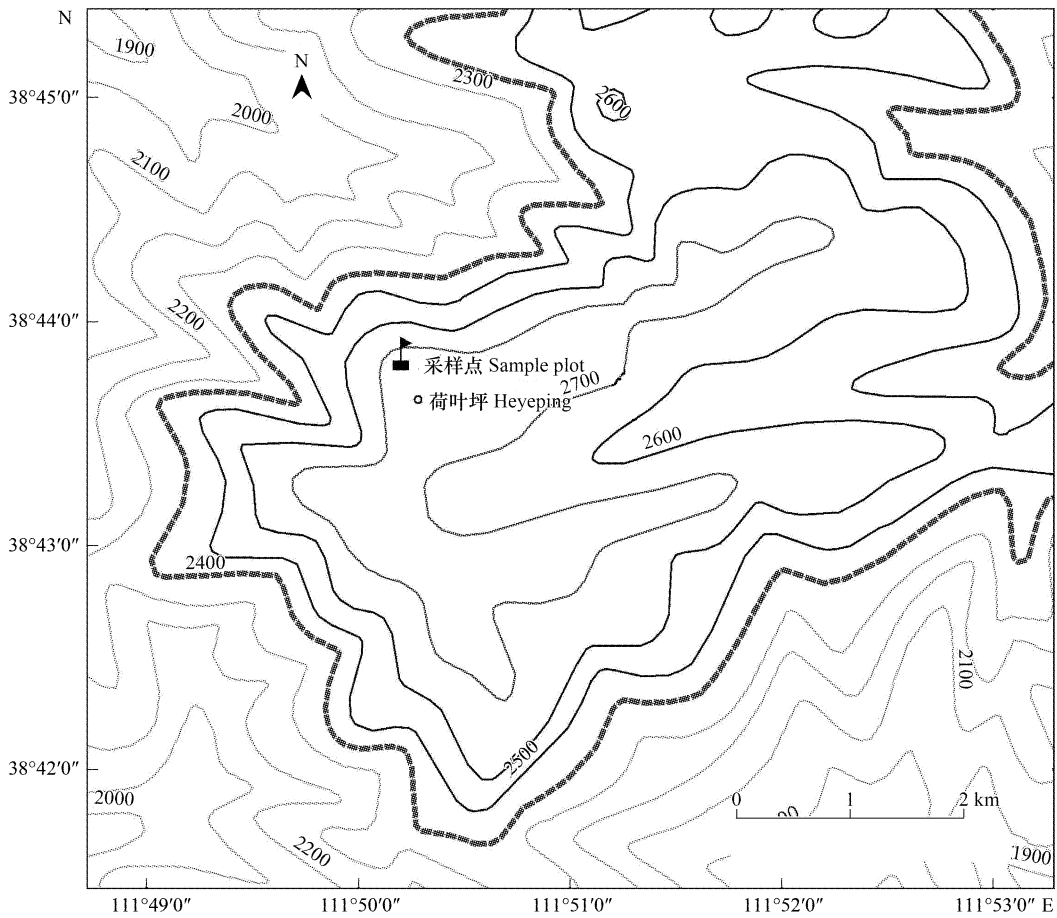


图1 研究区及采样点布设

Fig. 1 Location of the study plots

在林内各样木之间相对平坦且土层厚度 > 40cm 处放置土壤温度测量仪 (Delta, 英国)、ML2X 型土壤水分速测仪 (Delta, 英国)、PR2 型土壤剖面水分速测仪 (Delta, 英国) 和 EQ15 型土壤水势张力仪 (Ecomatik, 德国) 测定土壤温度和 10cm\20cm\30cm\40cm 土壤含水量及土壤水势, 采样时间间隔设为 30min, 传感器埋入土深为 20cm 的土壤中, 进行连续测定。

表 1 观测时段进行茎干径向变化、径向生长测量的样木特征

Table 1 Observation time and characters of sample trees for SRV&SRI monitor

第 1 阶段 Summer phase	第 2 时段 Autumn phase	样木编号 No.	树高 Tree height (m)	胸径 Dicometerac breast height (cm)	冠幅直径 Crawn width (m)
2007-07-15	2007-09-05	1#	6	30	3.7
~ 08-07	~ 10-09	2#	4.5	14	1.5
		3#	5.5	24	4
		4#	4	18	1.6
		5#	6	25	3.7
		6#	6	23	4

2.4 数据处理与分析

统计分析在 SPSS 13.0 统计软件中进行, 图形绘制在 Origin 7.5 图像处理软件中进行。首先绘制两个观测时段内白杆生长曲线, 探索白杆生长规律, 再将树干径向日变化与环境因子进行偏相关分析, 对树干径向生长与环境因子进行距离分析, 探索不同时段内白杆生长对环境因子的响应, 找出不同时段内白杆的适生环境

条件。

通常情况下,晴好天气的茎生长采用相邻两日树干最大值的差值计算,降雨期内树干净生长值采用修正公式计算^[2,6]。

树干径向生长量用每日径向生长量表示。树木径向生长量(stem radial increment, SRI)计算公式:

$$G_d = D_{\max \cdot (i+1)} - D_{\max \cdot i} \quad (0\text{mm} < P_d < 10\text{mm})$$

$$G_d = \frac{1}{n} (D_{\max \cdot af} - D_{\max \cdot bf}) \quad (P_d \geq 10\text{mm})$$

式中, P_d 表示日降雨量(mm); $D_{\max \cdot bf}$ 表示连续降雨阶段前一天树干直径的日最大值(μm); n 表示 $D_{\max \cdot bf}$ 和 $D_{\max \cdot af}$ 之间的间隔天数; $D_{\max \cdot af}$ 表示连续降雨阶段后某一天树干直径的日最大值(μm)。日降雨量小于 10mm 时,用树干日最大值减去前一日树干最大值;日降雨量大于 10mm 时,用降雨过程结束后第 1 天树干径向变化最大值减去降雨前一日树干最大值。

树木树干径向累积变化量(Cumulated SRI)计算公式:

$$G_{\text{cum}} = \sum_{i=1}^n G_{d \cdot i}$$

式中, G_{cum} 表示树干径向生长累积变化量, $G_{d \cdot i}$ 表示可计算的径向日生长量, n 含径向生长的观测天数。

3 研究结果

3.1 树干径向变化特征

树木树干径向变化包括树木真正的加粗生长和木质部含水量变化导致的膨胀和收缩变化。在两个观测期内的晴朗天气条件下,树木径向变化是一个以天为周期的波动上升过程,一日内树干径向变化分为 3 个阶段(图 2),首先是收缩阶段,从凌晨树干半径最大时开始至午后或傍晚结束;恢复阶段,从下午或傍晚收缩过程结束开始,树干开始膨胀直至树干恢复至前一日树干最大值为止;增长阶段,树干继续增长,直至达到另一个最大值,并开始下一个日生长为止^[16]。在连续阴雨天气,树干由于吸水导致连续加粗,表现出持续“生长”。降雨结束后出现连续下降。

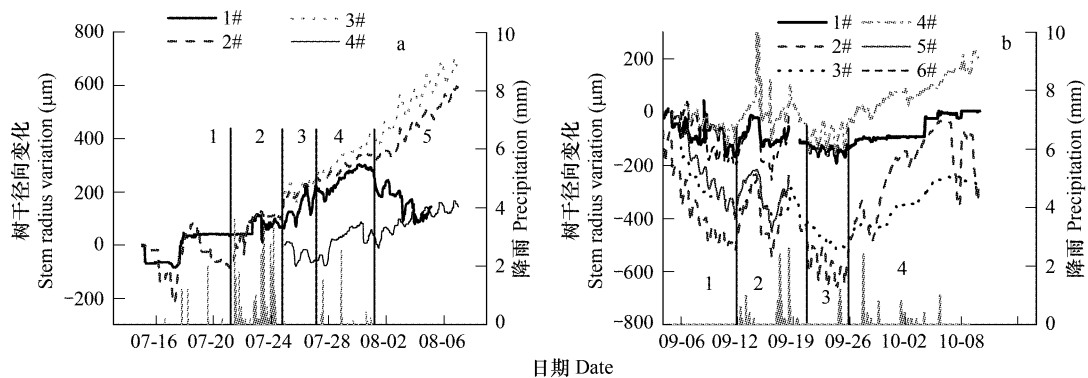


图 2 两个阶段白杆树干径向变化特征

Fig. 2 Stem daily variation affected by rainfall in the two measuring periods

树干径向变化最大值在 7~8 月份观测期内通常出现在中午前后,在 9~10 月份观测期内出现时间略晚,两个阶段内树干径向变化最小值通常出现在午夜至凌晨。在生长季中期,日均径向生长量在 $3.14 \sim 34.66 \mu\text{m}$ 之间。生长季末期日均径向生长量平均为 $-33.78 \sim 1.31 \mu\text{m}$ 。根据树干径向变化与降雨量的对应关系,将 7~8 月份观测期分为 5 个阶段,其中第 2 阶段与第 4 阶段为降雨期,1、3、5 阶段为非降雨期。将 9~10 月份观测期分为 4 个阶段,其中 2、4 阶段为降雨期,1、3 阶段为非降雨期(表 2)。

表 2 各样木两个阶段树干日变化统计
Table 2 Stem daily variation of each sample tree in two phases

观测月份 Measuring period (month)	树木编号 No.	最小值出现时间 Time of maximum value appeared	最大值出现时间 Time of minimum value appeared	日平均径向生长量 Daily average SRI (μm)
7~8	1	13:00~14:30	23:30~2:00	3.14
	2	9:00~11:30	0:00~2:30	24.81
	3	10:30~14:30	0:00~2:00	34.66
	4	10:00~12:00	23:00~1:00	10.95
9~10	1	12:00~16:00	21:00~23:00	-5.00
	2	14:00~16:00	1:00~4:00	-30.43
	3	14:00~16:00	23:00~1:00	-15.79
	4	13:00~16:00	0:00~4:00	1.31
	5	14:00~16:00	2:00~4:00	-33.78
	6	14:00~16:00	1:00~5:00	-15.08

3.2 树干径向生长量及累积变化特征

3.2.1 两个观测期内树干径向生长量变化特征

7~8 月份观测期内,4 株样木径向生长均呈二次曲线变化特征,样木径向生长量为正。1#样木树干径向变化最大值出现较早(7 月 25 日),其余 3 株样木径向生长量的最大值出现在 8 月 1 日~4 日之间,在这之后逐渐下降(图 3)。

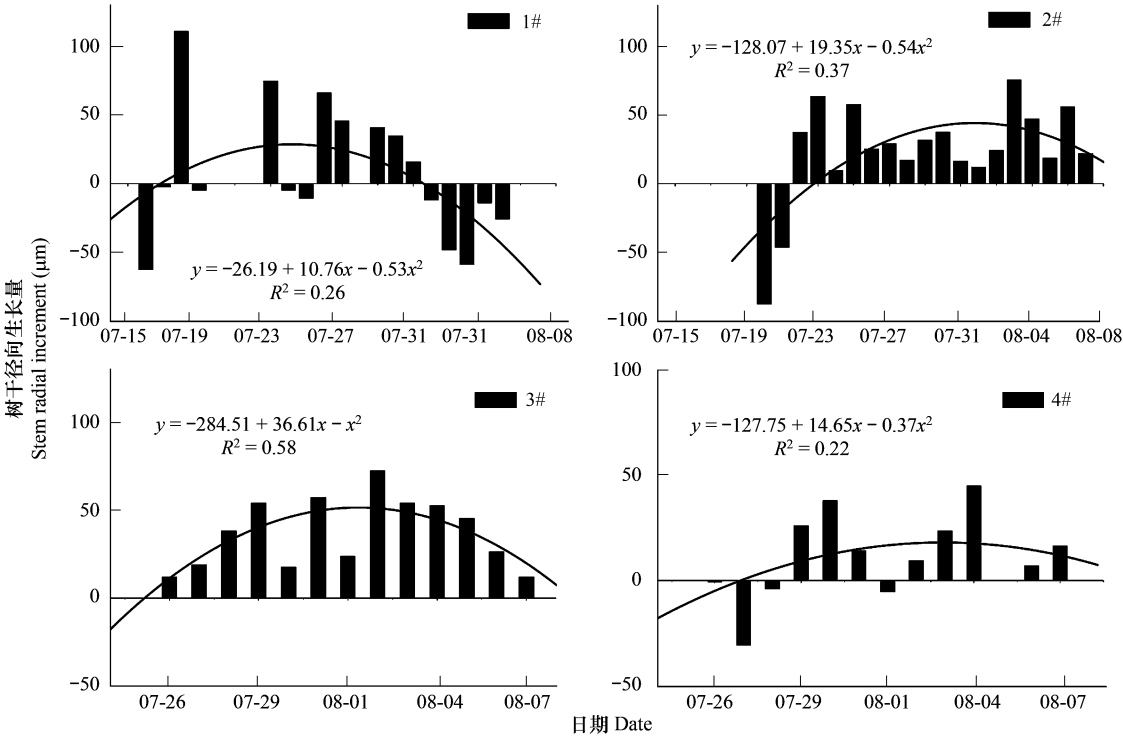


图 3 7~8 月份白杆树干径向净生长曲线
Fig. 3 SRI curve of *Picea meyeri* in July and August

9~10 月份观测期内,1#~4#样木可用二次曲线进行拟合,5#、6#样木观测时间较短,反映的是观测前期的径向生长变化特征,其拟合曲线与前 4 株不一致,分别用三次曲线和线性方程拟合。这一阶段内径向生长量为负值,前半段观测期内生长量增加,后半段内减慢且变得平稳,趋近于 0(图 4)。

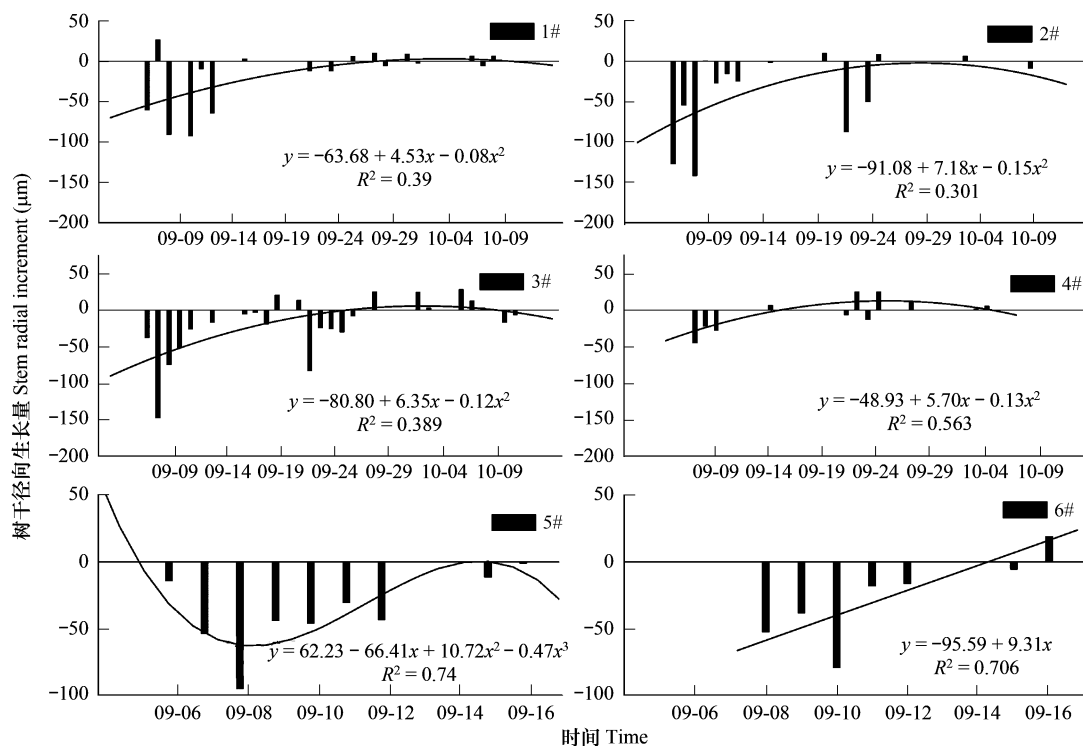


图4 9~10月份白杆树干径向净生长曲线

Fig. 4 SRI curve of *Picea meyeri* in September and October

3.2.2 两个观测期内树干径向累积变化特征

将径向生长量逐日累加,即得树干径向累积变化量,在7~8月份观测期内2#~4#白杆呈匀速生长。1#样木生长在7月31日出现拐点,在此时间点后开始下降。2#、3#样木径向累积变化总量较高,在400~500 μm 之间。1#、4#径向累积变化总量较低,约在140~160 μm 之间(图5)。

9~10月份观测期内,6株样木径向累积变化量先下降,而后变的平稳,曲线转折点出现在9月14日附近。4#样木累积变化量呈现先下降在后期又回升的趋势,但总体上呈下降趋势。这个时期内2#、3#、5#样木茎干收缩量较大,在330~520 μm 之间。1#、6#样木收缩量较小,在150 μm 左右,4#样木出现20 μm 左右的增长(图6)。

3.3 白杆树干径向变化与环境因子的关系

3.3.1 7~8月份观测期树干径向变化与环境因子的关系

树木树干径向变化由木质部水分变化导致,这种变化与环境因子有密切关系^[1]。应用偏相关分析方法,分析树干径向变化值与环境因子的关系。在非降雨阶段,树干径向变化与空气温度负相关,与空气相对湿度正相关,1#、2#样木树干径向变化在第1阶段与土壤温度负相关,在第3阶段正相关,在第5阶段相关关系不同,与土壤含水量在第1、5阶段正相关,在第3阶段负相关。非降雨期内各样木树干径向变化均与土壤水势、空气相对湿度正相关,与土壤温度在第2阶段负相关,在第4阶段正相关(表3)。

3.3.2 9~10月份观测期树干径向变化与环境因子的关系

在无降雨的第1、3阶段,各样木与土壤温度、20、40cm土壤含水量、土壤水势、空气相对湿度正相关,与空气温度负相关。在有降雨的第2、4阶段内,树干径向变化与空气温度负相关,与20、40cm土壤含水量、土壤水势正相关,与土壤温度的相关关系不一致,与空气相对湿度在第2阶段正相关,在第4阶段负相关(表4)。

3.4 白杆径向生长量与环境因子的距离分析

3.4.1 7~8月份白杆径向生长量与环境因子的距离分析

研究影响树干径向生长的环境因子是找出白杆生长限制性因子及白杆适生生境的关键。距离分析通过

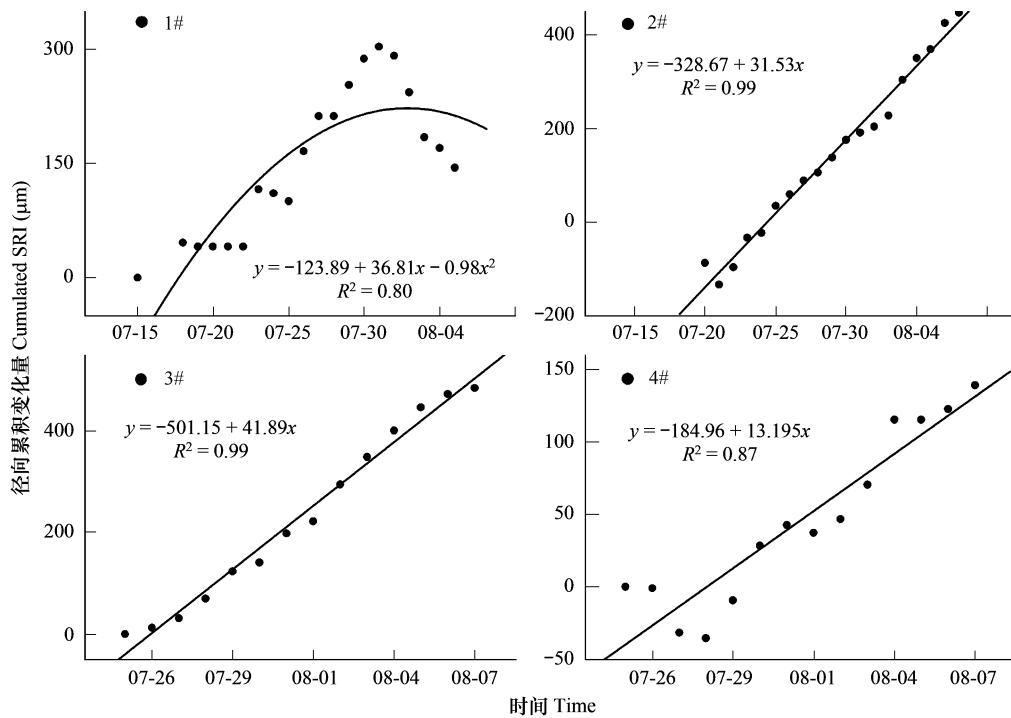


图5 7~8月份白杆树干径向累积变化曲线

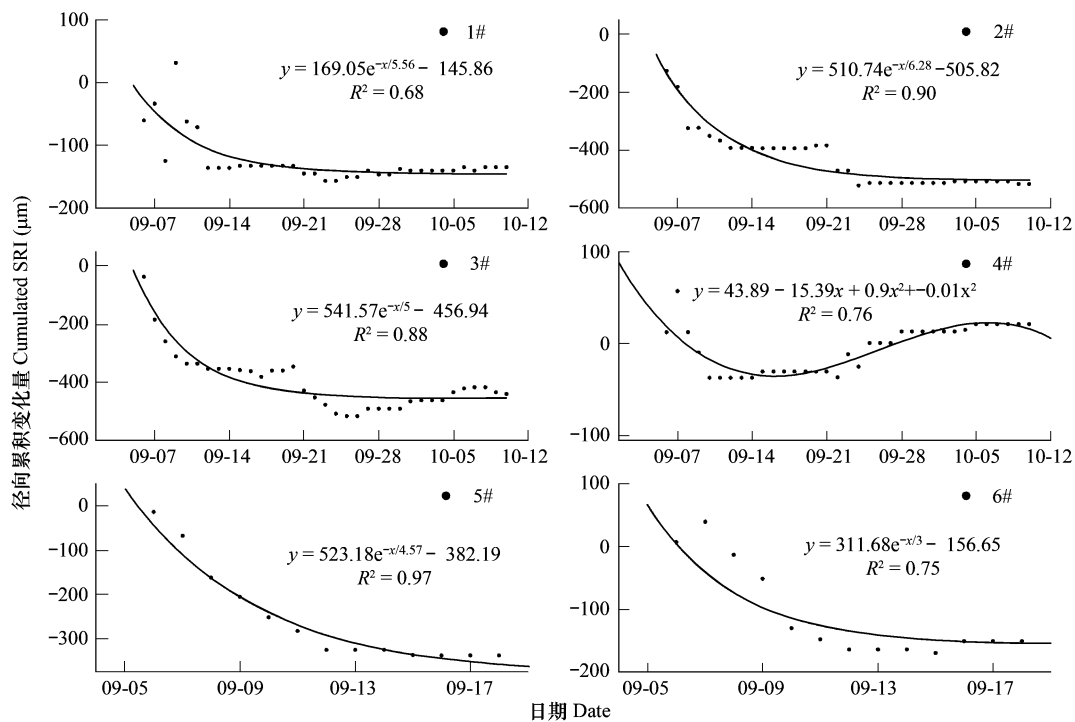
Fig. 5 Cumulated SRI of *Picea meyeri* in July and August

图6 9~10月份白杆径向累积变化曲线

Fig. 6 Cumulated SRI of *Picea meyeri* in September and October

考察变量间相互接近的程度,分析变量间相似性。将各样木径向生长量与环境因子的距离系数加权平均后估算样木径向生长量与环境因子的平均距离系数。

表 3 7~8 月份白杆树干径向变化与环境因子相关系数

Table 3 Correlation coefficients between SRV of *Picea meyeri* and environmental factors

观测阶段 Measuring phase	样木编号 No.	风速 Wind speed (m/s)	空气温度 Air temperature (℃)	空气相对湿度 Relative humidity (%)	土壤温度 Soil temperature (℃)	土壤水势 Soil water potential (kPa)	20cm 土壤含水量 20cm soil moisture (%)
1	1	0.11 **	-0.57 **	-0.23 **	-0.26 **	0.97 **	0.95 **
	2	0.08	-0.52 **	0.14 **	-0.11 **	0.35 **	0.64 **
2	1	-0.09	-0.21 **	0.58 **	-0.51 **	0.65 **	0.63 **
	2	0.03	-0.14	0.55 **	-0.40 **	0.57 **	-0.32 **
3	1	0.06	-0.16 **	0.23 **	0.33 **	0.76 **	-0.64 **
	2	-0.04	0.13	-0.01	0.70 **	0.57 **	-0.95 **
	3	-0.10	-0.35 **	0.25 **	-0.16 **	0.60 **	0.19
	4	-0.35 **	-0.61 **	-0.01	-0.68 **	-0.29 **	0.10
4	1	0.79 **	-0.13 **	0.69 **	0.77 **	-	0.77 **
	2	0.87 **	0.01	0.61 **	0.84 **	-	0.69 **
	3	0.79 **	0.04	0.66 **	0.80 **	-	0.73 **
	4	0.55 **	-0.11	0.74 **	0.72 **	-	0.86 **
5	1	0.51 **	0.06	-0.11 **	0.66 **	-	0.28 **
	2	-0.44 **	-0.38 **	0.46 **	-0.49 **	-	0.12 **
	3	-0.59 **	-0.34 **	0.25 **	-0.77 **	-	-0.09
	4	-0.53 **	-0.38 **	0.22 **	-0.80 **	-	-0.12 **

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; 下同 the same below

表 4 9~10 月份白杆树干径向变化与环境因子相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficients between SRV of *Picea meyeri* and environmental factors in September and October

观测阶段 Measuring phase	样木编号 No.	空气温度 Air temperature (℃)	空气相对湿度 Relative humidity (%)	土壤温度 Soil temperature (℃)	土壤水势 Soil water potential (kPa)	20cm 土壤 含水量 20cm soil moisture (%)	40cm 土壤 含水量 40cm soil moisture (%)
1	1	-0.32 **	0.15 *	-0.31 **	0.45 **	0.43 **	0.46 **
	2	-0.55 **	0.50 **	-0.42 **	0.54 **	0.66 **	0.71 **
	3	-0.29 **	0.20 **	-0.28 **	0.72 **	0.82 **	0.85 **
	4	-0.56 **	0.49 **	-0.53 **	0.33 **	0.40 **	0.46 **
	5	-0.38 **	0.28 **	-0.42 **	0.75 **	0.84 **	0.88 **
	6	-0.39 **	0.30 **	-0.54 **	0.65 **	0.72 **	0.77 **
2	1	-0.32 **	0.52 **	0.17 *	-0.11	0.01	-0.10
	2	-0.64 **	0.62 **	-0.11	0.33 **	0.39 **	0.28 **
	3	-0.01	0.31 **	0.38 **	0.33 **	-0.11	-0.20 *
	4	-0.08	0.16	0.15	-0.09	0.05	-0.01
	5	-0.43 **	0.48 **	-0.29 **	0.10	0.20 *	0.05
	6	-0.53 **	0.62 **	-0.30 **	0.15	0.20 *	0.06
3	1	-0.45 **	0.28 **	-0.09	-	0.36 **	-
	2	-0.51 **	0.18	-0.25 **	-	0.43 **	-
	3	-0.00	-0.26 **	-0.34 **	-	0.84 **	-
	4	-0.80 **	0.64 **	0.17	-	-0.22	-
4	1	-0.41 **	-0.30 **	-0.11 *	-	0.11 *	-
	2	0.02	0.12 *	0.20 **	-	0.59 **	-
	3	-0.32 **	-0.25 **	-0.03	-	0.33 **	-
	4	-0.54 **	-0.28 **	-0.34 **	-	0.11 *	-

非降雨期内,树干径向生长量与环境因子的平均距离由近至远依次为空气相对湿度、20cm 土壤含水量、土壤温度、空气温度、土壤水势。其中与空气温度、土壤水势的距离平均值为负。降雨期内树干径向生长量与环境因子的平均距离由近至远依次为 20cm 土壤含水量、空气相对湿度、土壤温度、土壤水势、空气温度,其中与空气温度的距离为负值(表 5)。

表 5 7~8 月份白杆树干径向净生长量与环境因子的距离系数
Table 5 Distance between SRI of *Picea meyeri* and environmental factors in July and August

观测阶段 Measuring phase	样木编号 No.	土壤水势 Soil water potential (kPa)	空气温度 Air temperature (℃)	空气相对湿度 Relative humidity (%)	土壤温度 Soil temperature (℃)	20cm 土壤 含水量 20cm soil moisture (%)
1	1#	-0.91	-0.08	0.62	0.93	0.92
	2#	-0.79	0.16	0.36	0.95	1
3	1#	-0.97	0.57	0.92	0.68	-0.94
	2#	0.99	-0.69	-0.97	-0.78	0.98
	3#	-0.93	0.95	0.97	0.98	-0.96
	4#	0.52	-0.95	-0.63	-0.89	0.6
5	1#	0.7	-0.92	0.48	0.61	0.98
	2#	0.61	-0.91	0.78	0.57	0.91
	3#	-0.26	0.37	-0.59	-0.33	-0.24
	4#	0.58	-0.85	0.52	0.49	0.94
距离平均 Average distance		0.19	-0.55	0.29	0.26	0.57
2	1#	0.38	-0.99	0.9	-0.55	0.97
	2#	-0.88	0.03	-0.33	0.77	-0.15
4	1#	0.53	0.45	-0.46	0.51	0.45
	2#	-0.12	-0.52	0.67	-0.66	0.25
	3#	-0.71	-0.66	0.59	-0.44	-0.21
	4#	-0.18	-0.7	0.76	-0.59	0.52
距离平均 Average distance		-0.26	-0.15	0.28	0.07	0.26

3.4.2 9~10 月份树干径向生长量与环境因子的距离分析

9~10 月份非降雨期内各样木树干径向生长量与环境因子的平均距离由近至远依次为:土壤温度、相对湿度、40cm 土壤含水量、20cm 土壤含水量、土壤水势、空气温度,只与土壤温度、空气相对湿度的距离系数为正,与其他各环境因子的距离平均为负值,在降雨期内树干径向生长量与环境因子的平均距离由近至远依次为:相对湿度、土壤水势、20、40cm 土壤含水量、土壤温度、空气温度。与土壤温度、空气温度的距离为负值(表 6)。

4 结论与讨论

4.1 白杆树干径向日变化规律

生长季中期,白杆树干径向日均生长量个体间存在差异,在 8 月 1 日~4 日之间出现生长拐点,这段时间内研究区内降水明显减少,土壤含水量下降,树木根部可利用水分减少,可能是导致径向生长量下降的原因,因为 Gebler 等人也发现,生长季内干旱会严重削弱林线树木个体的生长^[17,18]。

生长季末期,径向生长量呈增加趋势由负值增加至 0 左右保持稳定,9 月 29 日~10 月 4 日之间。此阶段内各样木径向净变化量为负值,前半段时期内生长量增加,后半段内土壤低温导致生长减慢,秋季低温可能是限制树木生长的重要因素^[11]。

4.2 白杆累积变化规律

生长季中期,白杆呈匀速生长。就这一时段内累积变化总量来看,2#、3#样木累积变化量较大,在 400~

500 μm 之间,1#、4#累积生长量较低,约在 140 ~ 160 μm 之间。

表 6 9 ~ 10 月份白杆树干径向净生长量与环境因子的距离系数

Table 6 Distance between SRI of *Picea meyeri* and environmental factors in September and October

观测阶段 Measuring phase	样木编号 No.	土壤水势 Soil water potential (kpa)	空气温度 Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	空气相对湿度 Relative humidity (%)	土壤温度 Soil temperature ($^{\circ}\text{C}$)	20cm 土壤 含水量 20cm soil moisture (%)	40cm 土壤 含水量 40cm soil moisture (%)
1	1#	0.19	0.1	-0.1	-0.08	0.17	0.11
	2#	-0.42	0.25	-0.04	0.71	-0.39	-0.36
	3#	-0.47	0.05	0.04	0.75	-0.42	-0.37
	4#	0.14	-0.45	0.47	-0.07	0.14	0.28
	5#	0.06	-0.54	0.6	0.49	0.11	0.24
	6#	0.29	-0.64	0.63	-0.1	0.29	0.44
3	1#	-0.57	-0.81	0.21	0.75	-0.57	-0.57
	2#	-0.59	-0.17	0.4	0.55	-0.59	-0.59
	3#	-0.53	-0.91	-0.04	0.84	-0.53	-0.53
	4#	-0.25	-0.29	-0.08	0.38	-0.25	-0.25
距离平均 Average distance		-0.22	-0.34	0.21	0.42	-0.2	-0.16
2	1#	0.38	-0.62	0.81	-0.31	0.15	0.08
	2#	0.55	-0.53	0.72	-0.4	0.16	0.07
	3#	0.4	-0.46	0.6	-0.46	0.21	0.14
	4#	0.03	-0.12	0.15	-0.2	0.09	0.07
	5#	0.7	-0.39	0.51	-0.6	0.19	0.15
	6#	0.26	-0.73	0.85	-0.06	0.2	0.11
4	1#	0.18	-0.64	-0.14	0.62	0.18	0.18
	2#	-0.42	-0.19	0.07	0.37	-0.42	-0.42
	3#	-0.15	-0.17	-0.06	0.63	-0.15	-0.15
	4#	-0.13	-0.45	-0.49	0.03	-0.13	-0.13
距离平均 Average distance		0.18	-0.43	0.3	-0.04	0.05	0.01

生长季末期,各样木累积变化基本呈指数衰减变化特征。该时段起始的几日内无降雨,干旱使径向生长显著下降^[19]。后期经历两次降水过程,其间湿度大,叶片蒸腾拉力下降,树干持续补充水分,但同时由降水导致的低温降低了土壤水势,导致根部吸水困难,树干恢复过程缓慢。

4.3 树干径向变化与环境因子的关系

晴朗天气条件下,树干径向日变化规律与空气温度日变化规律一致、与空气相对湿度相反,因此与空气温度负相关,与空气相对湿度正相关。各样木树干径向变化与土壤温度的关系不一致,可能是由于各样木树干径向变化的“峰”、“谷”值出现时间及波动周期长度差异造成,树木个体的水分利用状况差异是造成这一现象的原因。各样木树干径向变化对水分条件的响应程度受温度控制,更易受到影响根部吸水能力的土壤温度控制,当水分条件改变时,各样木根部的吸水能力受到不同程度影响,因此不同样木与土壤温度的响应不一致。

生长季末期降雨期内,各样木对水分条件变化响应的程度仍存在差异,导致其与土壤温度、空气相对湿度的相关关系不一致。

4.4 树干径向生长与环境因子关系

7 ~ 8 月份非降雨期,相对湿度、土壤含水量、土壤温度依次是控制树木径向生长的最主要因子,相对湿度高抑制树木蒸腾,控制植物体内物质及能量的损失,土壤含水量高使树木根部有充足的水分供给,这两者的结合为白杆创造了一个适宜的生长条件。降雨期内也是如此。树干净生长与空气温度距离为负,史江峰等对贺兰山油松进行的树木年轮气候分析认为,1 ~ 8 月份温度和树木生长负相关,是因为较高的温度不利于土壤中

水分的保持,间接地导致树木生长的减慢^[20],本研究结果也发现,7~8月份水分条件是控制白杆生长的主要因子,其生长与温度负相关,温凉湿润的环境更适宜白杆的生长。

9~10月份非降雨期内土壤温度、相对湿度依次是控制径向生长的主要因子,在这一时期内,土壤温度成为控制白杆生长的主要因子。温暖湿润,森林郁闭度低的地方更适宜白杆的生长。降雨期内土壤水势与土壤含水量成为控制生长的主要因子,主要是由于降水导致土壤含水量增加,土壤水势升高,并且高的相对湿度抑制了树干的蒸腾,控制植物体能量的损失,有利于干物质的积累。降雨期内温度的降低又在一定程度上抑制了树木生长。不论是生长季中或末期,空气温度都与生长距离最远,是最次要的因子。

多项研究发现树木生长与夏季温度存在负相关关系^[16,21],同时秋季低温是限制树木生长的重要因素^[11]。戴君虎等人对五台山植被带的研究发现,夏季降水对五台山的高山带木本植物生长有较大影响。由于夏季温度较高,冻土融化,提高了降水的利用效率,促进了树木生长^[22]。可见,温度通过改变土壤含水量、土壤水势等环境因子控制树木的生长,而本文在生长季两个时期内的研究结果也证明了这一结论。

限于研究区观测条件和其他的因素影响,本文选择的观测期仅是一个生长季内的2个典型时段,观测样本也十分有限,还需在未来工作中以更多的样本和更长的观测时间来进一步说明芦芽山高山林线分布格局的形成原因。

References:

- [1] Sevanto S. Tree stem diameter change measurements and sap flow in Scots pine, University of Helsinki, 2003.
- [2] Deslauriers A, Morin H, Urbinati C, Carier M. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Québec (Canada). *Trees*, 2003, 17(6): 477—484.
- [3] Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, Morin H, Saracino A, Motta R, Borghetti M. Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length. *New Phytologist*, 2006, 170(2): 301—310.
- [4] Sevanto S, Vesala T M, Perämäki M, Nikinmaa E. Time lags for xylem and stem diameter variations in a Scots pine tree. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25(8): 1071—1077.
- [5] Zweifel R, Häslér R. Dynamics of water storage in mature subalpine *Picea abies*: temporal and spatial patterns of change in stem radius. *Tree Physiology*, 2001, 21(9): 191—193.
- [6] Xiong W, Wang Y H, Yu P T, Liu H L, Shi Z J, Guan W. The growth in stem diameter of *Larix principis-rupprechtii* and its response to meteorological factors in the south of Liupan Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 432—441.
- [7] Holtmeier F K. Ecological Aspects of climatically-caused timberline fluctuations. In Martin Beniston (Editor) *Mountain Environment in Changing Climates*. London. New York: Rautledge, 1994. 220—233.
- [8] Holtmeier F K, Broll G. Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14(5): 395—410.
- [9] Jobbagy E G, Jackson R B. Global controls of forest line elevation in the northern and southern hemispheres. *Global Ecology & Biogeography*, 2000, 9(3): 253—268.
- [10] Wilmsking M, Juday G P, Barber V A, Zald H J. Recent climate warming forces contrasting growth responses of white spruce at treeline in Alaska through temperature thresholds. *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1724—1736.
- [11] Taylor R M. Tree-ring analysis in forest productivity studies: an investigation of growth-climate relationships in the New Forest, Hampshire. *Journal of Biogeography*, 1981, 8(4): 293—312.
- [12] Körner C. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 1998, 115(4): 445—459.
- [13] Mi X C, Zhang J T, Zhang F, Shanguan T L, Li A H, Zheng F Y. Analysis of relationship between patterns of vegetation and soil in Shanxi Plateau. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(4): 336—344.
- [14] Zhang J T. District of vegetation vertical zone in Luya Mountain, Shanxi. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 9(4): 346—353.
- [15] Ma Z Q. *Shanxi Vegetation*. Beijing: China Science and Technology Press, 2000. 45—74.
- [16] Downes G, Beadle C, Worledge D. Daily stem growth patterns in irrigated *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in relation to climate. *Trees*, 1999, 14: 102—111.
- [17] Gebler A, Keitel C, Kreuzwieser J, Matyssek R, Seiler W, Rennenberg H. Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees*, 2007, 21(1): 1—11.

- [18] Corcuera L; Camarero J J, Gil-Pelegrín E. Effects of a severe drought on *Quercus ilex* radial growth and xylem anatomy. *Trees*, 2004(1), 18: 83—92.
- [19] Pichler P, Oberhuber W. Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2-3): 688—699.
- [20] Shi J F, Liu Y, Vaganov E, Cai Q F, Shishov V. A primary discussion on the climatic response of *Pinus tabulae formis* in the Helan mountain. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 245—250.
- [21] Brubaker L B. Spatial patterns of tree growth anomalies in the Pacific Northwest. *Ecology*, 1980, 61(4): 798—807.
- [22] Dai J H, Pan Y, Cui H T, Tang Z Y, Liu H Y, Cao Y L. Impacts of climate change on alpine vegetation on Wutai mountains. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 217—224.

参考文献:

- [6] 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 刘海龙, 时忠杰, 管伟. 六盘山南坡华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)树干直径生长及其对气象因子的响应. *生态学报*, 2007, 27(2): 432~441.
- [13] 米湘成, 张金屯, 张峰, 上官铁梁, 李爱华, 郑凤英. 山西高原植被与土壤分布格局关系的研究. *植物生态学报*, 1999, 23(4): 336~344
- [14] 张金屯. 山西芦芽山植被垂直带的划分. *地理学报*, 1989, 9(4): 346~353.
- [15] 马子清. 山西植被. 北京: 中国科学技术出版社, 2000. 45~74.
- [20] 史江峰, 刘禹, Vaganov E, 蔡秋芳, Shishov V. 贺兰山油松生长的气候响应机制初步探讨. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 245~250.
- [22] 戴君虎, 潘娜, 崔海亭, 唐志尧, 刘鸿雁, 曹燕丽. 五台山高山带植被对气候变化的响应. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 217~224.