

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

熊 伟¹, 王彦辉^{1,*}, 于澎涛¹, 刘海龙², 时忠杰¹, 管 伟¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特 010019)

摘要 2005 年 6~9 月份在宁夏六盘山南侧的西峡林场,应用带状树木径向变化记录仪 (Dendrometer) 研究了 5 株华北落叶松树干的直径生长过程,结果表明,在无雨或小雨 (日降雨量 < 10mm) 天气下,树干直径变化呈现出明显的日周期性,可将其划分为 3 个阶段:收缩阶段、膨胀阶段和生长阶段。在连续降雨 (日降雨量 ≥ 10mm) 及随后的几个晴天中,树干直径变化并不表现出完整的日周期性。基于 Deslauriers 等人的方法,提出了树干直径日生长量估计的修正公式,并计算了华北落叶松树干直径日生长量和累积生长量,结果表明,各样木树干直径日生长量的季节变化趋势一致,即表现为前快后慢的季节变化格局,6~7 月份为快速生长期,其日均生长量在 27.0~44.2 μm 之间;8~9 月份为缓慢生长期,其日均生长量在 10 μm 以下。各测定样木的树干直径日生长量具有明显的个体差异,这主要与林木个体大小及其所处林分中的微环境条件差异有关。整个观测期内的树干直径累积生长过程可以较好地用幂函数描述。主分量分析和偏相关分析表明,影响树干径向生长的气象因子可划分为 3 类,其中日降雨量、日最低气温、日平均太阳辐射和日平均空气饱和差是影响树干径向生长的主要因子。

关键词 树木直径变化记录仪, 华北落叶松, 树干径向生长, 气象因子

文章编号: 1000-0933 (2007) 02-0432-10 中图分类号: Q142, Q948, S718.45 文献标识码: A

The growth in stem diameter of *Larix principis-rupprechtii* and its response to meteorological factors in the south of Liupan Mountain

XIONG Wei¹, WANG Yan-Hui^{1,*}, YU Peng-Tao¹, LIU Hai-Long², SHI Zhong-Jie², GUAN Wei¹

1. The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, The Forestry Ecological and Environmental Key Laboratory of National Forestry Ministry, Beijing 100091, China

2. Forestry College of Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (2): 432~441.

Abstract: The growth pattern in stem diameter of five sample trees of *Larix principis-rupprechtii* was measured by using dendrometer from June to September in 2005 in the south of Liupan Mountain, Ningxia. The results indicated that in the days with daily rainfall < 10mm, the daily fluctuation of stem diameter presented a periodical cycle and it could be divided

基金项目: 国家重大基础研究资助项目 (2002CB111501) 国家自然科学基金重点资助项目和面上资助项目 (30230290, 30671677) 国家林业局引进国际先进技术资助项目 (2003-4-43) 科技部社会公益研究专项资助项目 (2004DIB3J102)

收稿日期: 2006-01-10; 修订日期: 2006-10-07

作者简介: 熊伟 (1970~), 男, 四川渠县人, 博士, 主要从事森林生态、水文与树木生理生态学研究。E-mail: xwcaf@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyh@forestry.ac.cn

致谢: 数据分析得到中国科学院植物研究所李镇清研究员帮助, 中国林业科学研究院张小全研究员对本文写作给予帮助, 在此一并致谢!

Foundation item: This work was financially supported by National Great Basic Research Project (No. 2002CB111501) Key Project and General Project of National Natural Science Foundation of China (No. 30230290, 30671677) Introducing international Advanced Technology Project of National Forestry Ministry (No. 2003-4-43) and Special Project of Social Commonweal Research of the National Science and Technology Ministry (No. 2004DIB3J102)

Received date: 2006-01-10; Accepted date: 2006-10-07

Biography: XIONG Wei, Ph. D., mainly engaged in the forestry ecology, hydrology and tree eco-physiology. E-mail: xwcaf@163.com

into three phases : shrinking phase, expansion phase and growth phase. However, daily fluctuation of stem diameter presented a different pattern at in the days with daily rainfall ≥ 10 mm and followed clear days. Based on the method defined by Deslauriers *et al.* for estimating daily growth of stem diameter, a modified method was presented to calculate daily and cumulative growth of stem diameter, and the results showed that seasonal pattern of daily growth were similar among five sample trees. During June and July period, stem grows quickly with an average growth rate in stem diameter at 27.0—44.2 μ m per day. Relatively, It grows slowly during August and September period, with a mean growth rate at 10 μ m per day. Both daily and cumulative stem growth were significantly different among sample trees, which could attributed to the difference in tree domain and their positions in the stand. The pattern of cumulative growth could be fitted by the power function satisfactorily. Principle Component Analysis and Partial Correlation Analysis indicated that the meteorological factors could be classified into three groups, and daily precipitation, minimum daily temperature, average daily solar radiation and average daily vapor pressure deficit were four significant factors to determine daily stem growth.

Key Words : dendrometer ;*Larix principis-rupprechtii* ;growth in stem diameter ;meteorological factors

树木生长受树种生物学特性、微气象因子、立地条件和人工抚育措施等诸多因子的影响^[1]。树干径向生长是树木生长研究的主要内容之一,它对于认识树木生长受气象等环境因子的影响机制具有重要意义^[1]。国内目前测定活体树干径向生长的方法多为围尺或自制机械仪器测定^[1],但很难保障观测的连续性与完整性,所得数据也难以反映树干径向生长的昼夜变化过程及其对环境响应的机制。

早在 1962 年,Fritts 就应用带状树木径向变化记录仪 (Dendrometer) 来研究树木生长的短期变化对于气象因子的响应关系^[1],由于它可以与数据采集器连接起来自动、连续地记录短时间内树干的径向变化过程,所以自 20 世纪 70 年代中期以来,国外开始广泛地使用 Dendrometer 来研究树干的径向生长过程^[1,4~7]。这些研究证实,在小时或更短的时间尺度上研究树干径向生长可以为从生理生态学角度深入认识树木生长对于环境因子的响应机理具有重要价值^[1]。然而迄今为止,国内尚无应用此方法研究树木径向生长的报道。

本文应用 Dendrometer 研究了宁夏六盘山南部华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 的树干径向生长过程,同步观测了微气象因子,其主要目的在于了解:(1) 树干径向变化的昼夜规律与日生长量估计;(2) 树干径向生长的季节变化格局;(3) 树干径向生长对微气象因子的响应。

1 研究区自然条件概况

本研究区位于宁夏六盘山自然保护区 (E106°10'~30',N35°14'~42') 南部的核心区,属西峡林场的香水河小流域,海拔 2 040 ~ 2 942 m ,热量较低,水分充足。土壤主要为山地灰褐土,厚度约 30 ~ 100 cm。据泾源县气象局统计 :该地年均气温 5 ~ 5.8℃,年降水量 600 ~ 820 mm,多集中于 6 ~ 8 月份,干燥度 < 1.0 ,无霜期 100 ~ 130d,图 1 给出了 2005 年和近 10a 月平均温度和月降雨量的年内分布情况。

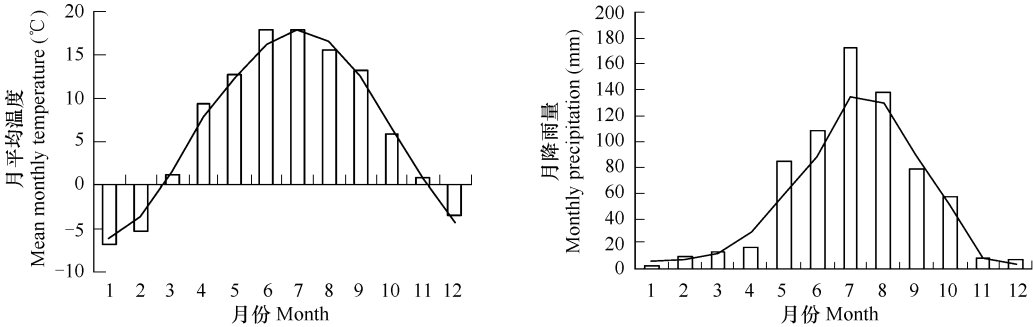


图 1 泾源县 2005 年 (柱) 和 1996 ~ 2005 年 (线) 月平均温度和月降雨量

Fig. 1 Mean monthly temperature and precipitation at Jingyuan County in 2005 (bars) and 1995 — 2005 (ines)

2 研究材料与方法

2.1 研究材料

选择生长良好的华北落叶松人工林,建立了 1 个 20 m × 20 m 的标准地,其海拔高度为 2286 m,坡向东南,坡位中下部,平均坡度 45° 林分密度 1275 株 · hm⁻²,年龄 22a,郁闭度 0.6,叶面积指数 2.3 (AI-2000 型植物冠层分析仪测定,LI-cor Inc.,美国),平均高 13.7m,平均胸径 12.2 cm 林内灌木树种较少,主要有黄刺玫 (*Rosa hugonis*) 等,盖度 20% ;草本层有华北苔草 (*Carex hancokiana* Maxim.)、铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum* Ledeb. var. *incana* Mattf.) 等,盖度 80% 左右。根据林木生长状况及其在林冠层中的相对高度,在样地内选择了 5 株样树 (表 1),其在样地中的具体位置见图 2。

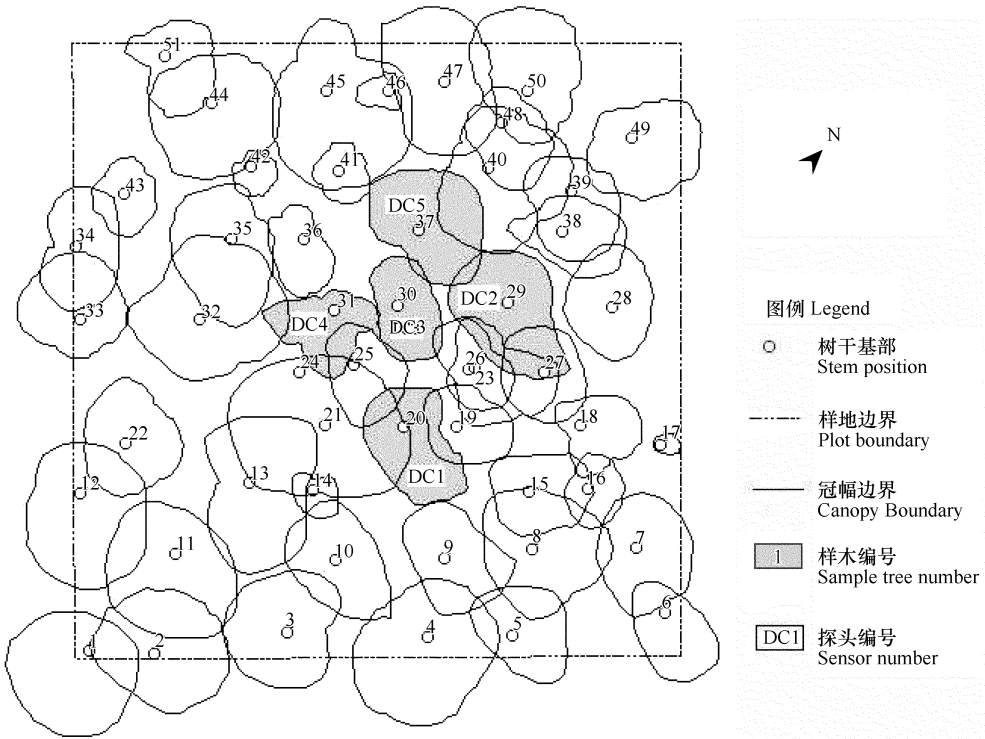


图 2 华北落叶松样地内 5 株测定径向变化样树的分布位置及树冠投影

Fig. 2 Stem position and canopy projection of 5 sample trees of *Larix principis-rupprechtii* in plot for stem diameter variation monitoring

2.2 研究方法

2.2.1 树干径向变化记录仪的技术原理及测定

国外目前使用的树干径向变化记录仪有点状和带状两种,其工作原理基本相同 由于树干直径在收缩、膨胀变化过程中会对固定在其上的探头产生不同大小的压力,而压力变化又会直接影响探头连线的电阻值,也就是说探头所感受的瞬间压力与其连线的电阻值之间存在较好的线性关系,利用这种关系就能够用探头来监测瞬时树干收缩-膨胀的微小变化 然后通过探头与数据采集器连接,最终实现对树干直径变化过程的自动连续监测。

2005 年 6 ~ 9 月,选择生长良好、干形较直的 5 株样木 (表 1),用带状树干径向变化记录仪 (DC 型,德国, Ecomatik 公司,Http ∴/ www. ecomatik. de) 连续测定了树高 1.5m 处的树干径向变化过程。具体方法是 :首先用木锉小心将探头安装部位树干的粗死皮除去,把套上塑料管的金属线围绕树干一周,注意要避免金属线与树皮直接接触 将金属线末端穿过探头感应器上的小孔,然后把上面的螺丝拧紧使金属线和探头感应器固定在树干上,并通过调节松紧螺丝来控制感应器输出线的电阻值,使其初始值达到 2 Kohm 左右,然后再次拧紧固定螺丝,完成探头安装 将探头信号输出线与数据采集器 (DL2e,英国剑桥,Delta Device) 连接起来 可根据

样树与数据采集器之间的实际距离加延长线,但总长度不能超过100m)最后,通过便携式计算机向数据采集器设置发送数据采集命令,数据采集步长设为5 min。

2.2.2 气象因子测定

在样地100m外的空旷处建立了气象观测场,假定气象观测场测定代表森林冠层的气象条件^[1]。用自动气象站(Intelimet,美国,Dynamax公司)同步测定太阳辐射(W·m⁻²)、空气温度(℃)、空气相对湿度(%)、风速(m·h⁻¹)和风向(°)等,用空气温度和相对湿度来计算饱和水汽差(P_a)。

表1 2005年进行树干径向变化测定的5株华北落叶松样树
Table 1 Characters of 5 sample trees of *Larix principis-rupprechtii* for stem diameter change monitored in 2005

样木编号 Tree number	探头编号 Sensor number	林木分级 Tree class ^[1]	树高 Height (m)	胸径 DBH (cm)	冠幅 Canopy (m)		样木坐标 Coordinate	
					高度 Height	直径 Diameter	X (m)	Y (m)
20	DC 1	亚优势木 Codominant	15.0	15.20	12.8	1.65	10.9	7.5
29	DC 2	优势木 Dominant	16.4	14.40	13.8	1.94	14.5	11.6
30	DC 3	中等木 Intermediate	12.4	11.00	9.3	1.36	10.8	11.5
31	DC 4	中等木 Intermediate	11.8	9.20	9.2	1.35	8.7	11.3
37	DC 5	优势木 Dominant	16.2	14.00	13.4	1.85	11.6	14.0

2.3 数据整理与分析

定期(每隔7d左右)用便携式电脑连接数据采集器,下载收集树干径向变化的原始数据,用EXCEL初步分析数据,样地位置图用AcrmapTM(8.3版本)软件处理,主分量分析、偏相关分析和回归分析用统计软件SPSS(1.0版本)进行。

3 结果与分析

3.1 树干径向昼夜变化规律及其生长量的确定

树木直径变化包括因真正生长而导致的增粗和因为树干含水变化而引起的收缩或膨胀变化,要直接判读树木直径生长及其时间分布是很困难的。根据Deslauriers等的方法^[1],可将华北落叶松树干径向日变化划分为3个阶段:(I)收缩阶段(Contraction phase):树干直径从日最大值向其最小值变化的时间;(II)膨胀阶段(Expansion phase)树干直径从日最小值恢复到前一天最大值所需的时间;(III)生长阶段:Stem increment phase)树干直径从膨胀期结束至下一个日最大值的时间(图3),并依据生长阶段树干直径变化的增量来计算其日生长量。应该说,真正的生长并非局限在这样划分的“生长阶段”,只是其在数值上能够体现前后两天水分条件相近时的生长量。

基于上述的阶段划分方法,计算了观测期内树干日变化各阶段的起始时间范围(表2)。结果表明,一般从9:00~10:00开始,由于树木冠层强烈的蒸腾作用导致树干液流加快,树干直径开始缩小进入收缩阶段,至16:30~17:30降到最低值,之后由于蒸腾作用逐渐减弱和根系吸水补充,树干开始持续膨胀进入膨胀阶段;夜间至翌日凌晨经过生长阶段逐渐达到下个直径最大值,完成1个树干直径的日周期性变化。

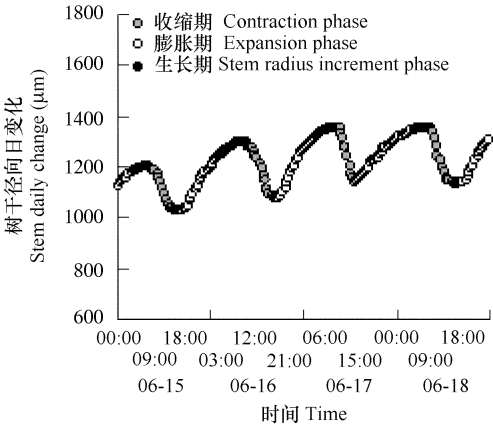


图3 华北落叶松树干径向的日变化及阶段区分
Fig. 3 Daily changes of stem diameter and division of three variation phases of *Larix principis-rupprechtii*

表 2 华北落叶松树干径向日变化各个阶段的起始时间

Table 2 Initiation time of three phases of daily change of stem diameter of <i>Larix principis-rupprechtii</i>						
DC 编号 DC number	DC1	DC2	DC3	DC4	DC5	
收缩阶段 Contraction phase	7 14 ~ 12 D6	7 26 ~ 12 28	6 14 ~ 12 D2	6 54 ~ 12 D4	6 19 ~ 12 D5	
膨胀阶段 Expansion phase	12 50 ~ 21 52	11 45 ~ 21 47	13 32 ~ 21 28	12 42 ~ 20 46	11 53 ~ 21 13	
生长阶段 Stem increment phase	0 38 ~ 15 48	1 25 ~ 15 35	1 32 ~ 18 D8	3 D5 ~ 21 47	0 57 ~ 16 19	

表 2 同时说明,观测期内树干径向日变化各阶段的起始时间存在着较大差异 (标准差大),这主要与天气 (尤其是降雨)影响树干径向日变化有关。总体来看,在无雨或小雨天气下 (日降雨量 < 10mm),树干径向日变化呈现出上述的周期性波动 (图 4 中的 a) 在连续降雨天气下 (日降雨量 ≥ 10mm),树干径向日变化呈现出持续增长态势 (图 4 中的 b),并不出现收缩阶段 在连续降雨后的几天内 (图 4 中的 c),树干直径日变化虽然具有周期性,但树干直径日最大值会出现连续下降,并不出现生长阶段或出现了“负增长”。也就是说,在连续降雨或持续干旱的天气情况下,如果继续用 Deslauriers 等的方法来判读和计算树干直径日生长量,会产生较大的偏差。

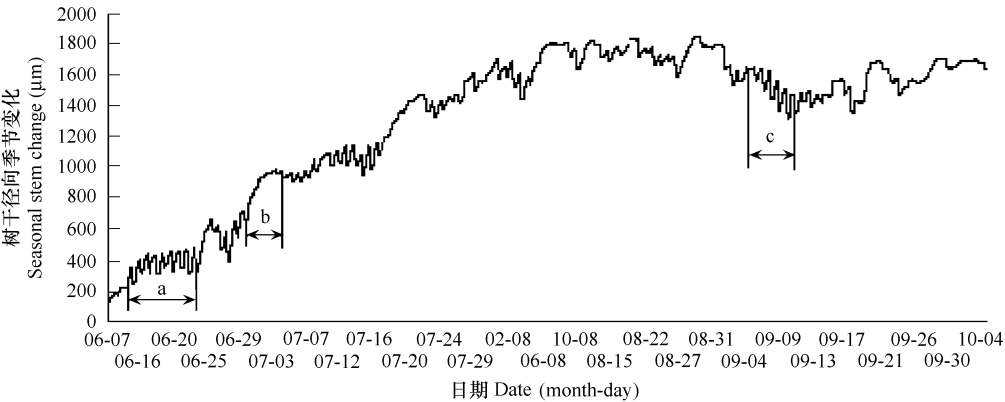


图 4 华北落叶松树干径向的季节变化

Fig. 4 Seasonal changes of stem diameter of *Larix principis-rupprechtii*

3.2 树干径向日生长量的估计

基于以上认识,在 Deslauriers 等的方法基础上,本研究提出了估计华北落叶松树干径向日生长量的修正公式:

$$G_d = \begin{cases} D_{\max \cdot (+1)} - D_{\max \cdot i} & 0\text{mm} \leq P_d < 10\text{mm} \\ \frac{1}{n}(D_{\max \cdot af} - D_{\max \cdot bf}) & P_d \geq 10\text{mm} \end{cases} \quad (1)$$

式中, G_d 表示树干直径的日生长量 (μm); $D_{\max \cdot i}$ 表示第 i 天树干直径的日最大值 (μm); $D_{\max \cdot (+1)}$ 表示第 $i + 1$ 天树干直径的日最大值 (μm); 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),其中 $D_{\max \cdot af}$ 必须满足 $D_{\max \cdot (+1)} \geq D_{\max \cdot i}$ 的前提条件。对公式 (1)可以理解为 在无雨或小雨天气下,可以直接用 Deslauriers 等提出的方法来计算树干直径的日生长量 在降雨 (日降雨量 ≥ 10mm)及随后的几天中,假定这一时期内天气对树木生长影响作用相同,可以用连续降雨开始、结束的树干直径日最大值差值的平均值来估计其日均生长量。这样既可以避免降雨过程中对树干直径日生长量的高估,同时也可以减少连续降雨阶段随后几天中直径日生长量出现“负值”的机率,即在一定程度上消除了水分条件急剧干化对树干直径日生长量判断的影响。

3.3 树干径向生长的季节变化格局

根据公式 (1)和 Deslauriers 等人的方法同时计算了 5 株样木树干直径日生长量和累积生长量,结果表明,

2 种方法估计的树干直径日生长量的季节变化趋势一致,即表现为前快后慢的生长规律 图 5) 6~7 月份为快速生长期,其日均生长量在 27.0~44.2 μm 之间 8~9 月份为缓慢生长期,其日均生长量在 10 μm 以下。图 5 表明,由于排除了连续降雨阶段对树干径向生长判读的扰动,用公式 () 所得到的直径生长累积曲线比较平滑,缩小了直径日生长量判读值的波动幅度。值得注意的是,在 8 月份以后仍有负值的日均生长量,其主要原因是 在 8 月下旬~9 月上旬连续无雨的天气下,树干贮水量明显下降导致的直径大幅收缩掩盖了其生长。为定量认识华北落叶松单株直径生长的季节变化过程,采用理查德方程、逻辑斯蒂方程、异速生长方程等多种函数模型分别拟合了 5 株样木树干直径累积生长的过程曲线,结果表明,用幂函数 $Y = aX^b$ 拟合效果最好,方程的确定系数均在 0.85 以上,经 F 检验,方程全部显著 图 5)。

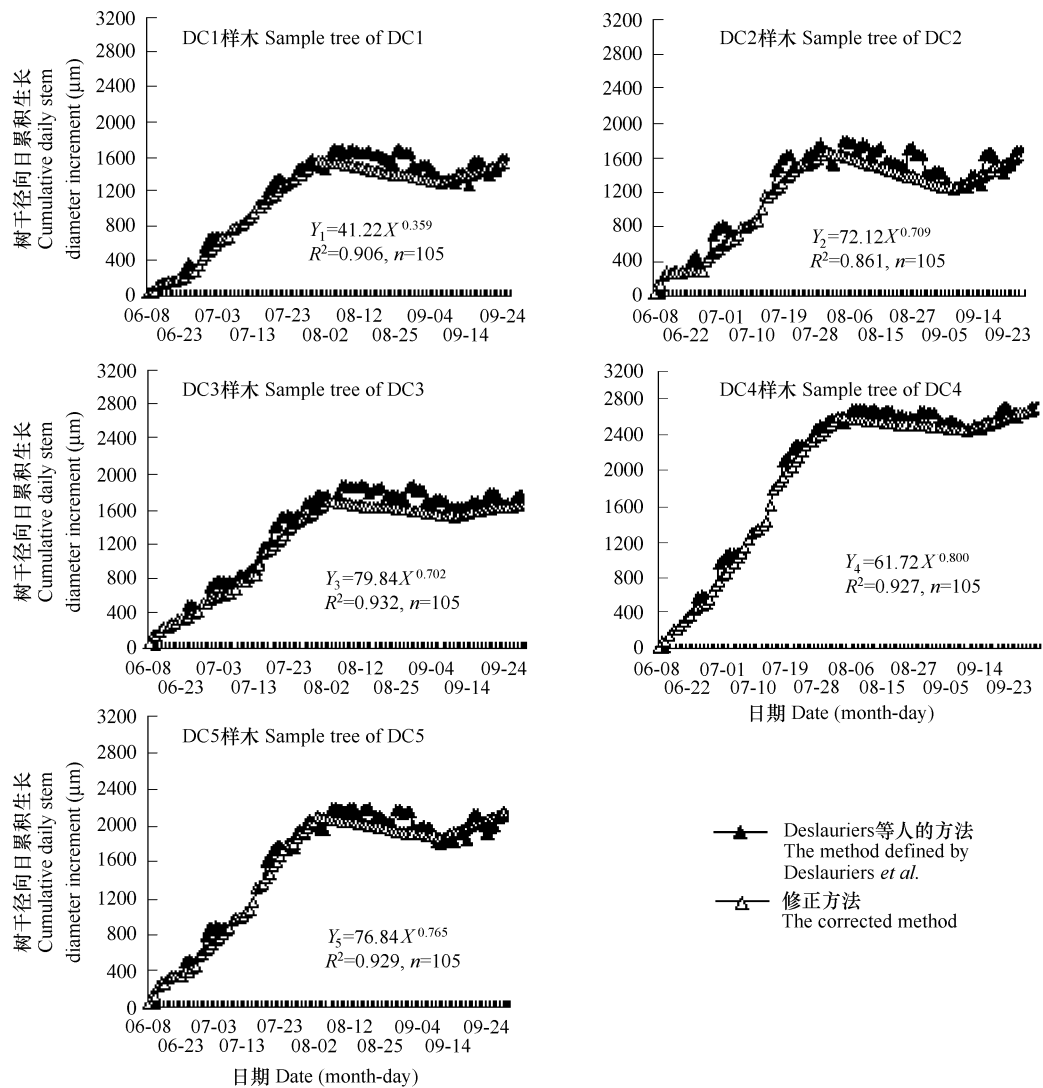


图 5 华北落叶松树干直径累积日生长量的季节变化

Fig. 5 Seasonal changes of cumulative stem diameter growth of *Larix principis-rupprechtii*

Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 和 Y_5 分别表示 DC1、DC2、DC3、DC4 和 DC5 样木树干直径的累积生长量 (μm) ; X 表示天数 (月 1 日为第 1 日) Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 和 Y_5 refer to cumulative stem diameter growth (μm) respectively, X refers to day of the year and the first day is Jan. 1

表 3 列出了 5 株样木树干直径日生长量的月份平均值,结果表明,树干直径的日生长量和累积生长量都存在着明显的个体差异,在快速生长期尤其突出。其中,DC4 样木树干直径的生长幅度最大,其中 7 月份的相对生长速率可达到 0.065%,为 DC1 的 2.86 倍,DC5 次之,DC1、DC2 和 DC3 生长较慢,说明胸径小的树干径向相对生长率要大于胸径大的,这可能与华北落叶松的生物遗传特性有关,也可能与 DC4 样木的西北方向有

一个较大的林间空隙有关(图 2),还有待于进一步分析。另外,虽然 DC2 样木树干直径日生长量变幅很大(标准差很大),但由于正负相抵造成累积生长量并不高,这说明它的径向变化受树体内水分状况影响较大。

表 3 华北落叶松树干直径日生长量的月份平均值

Table 3 Monthly means of daily stem diameter growth of five sample trees of *Larix principis-rupprechtii*

	6 月份 Jun.	7 月份 Jul.	8 月份 Aug.	9 月份 Sep.
DC1	27.0 (0.019%) * ±18.2	33.3 (0.023%) ±16.6	-4.2 (-0.002%) ±9.9	6.0 (0.004%) ±8.4
DC2	28.6 (0.020%) ±40.4	36.4 (0.025%) ±38.7	-9.3 (-0.006%) ±10.8	9.3 (0.008%) ±15.2
DC3	32.8 (0.030%) ±23.0	34.2 (0.031%) ±29.6	-1.8 (0.002%) ±10.7	3.6 (0.003%) ±5.5
DC4	44.2 (0.050%) ±22.5	56.9 (0.065%) ±35.6	-0.9 (0.001%) ±11.7	7.9 (0.009%) ±7.7
DC5	35.8 (0.027%) ±30.0	45.3 (0.034%) ±28.5	-3.2 (0.002%) ±12.7	8.6 (0.006%) ±9.8

* 括号内的数值为直径的相对生长速率 The values in the bracket are relatively stem growth rate

3.4 树干径向生长对微气象因子的响应关系

初步选择日降雨量 (P)、日平均气温 (T_{mean})、日最低气温 (T_{min})、日最高气温 (T_{max})、日平均辐射 (R_{mean})、日平均风速 (WS_{mean})、日平均相对湿度 (RH_{mean})、日平均饱和差 (VPD_{mean}) 作为影响树干直径生长的自变量,为反映各因子所包含的综合信息,对各因子进行了主分量分析 (Principle Components Analysis,以下简称 PCA),计算了各因子间的相关矩阵(表 4)和特征根及贡献率(表 5)。

表 4 微气象因子之间的相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficients matrix among micro-meteorological factors

相关系数 Correlation coefficients	T_{mean}	P	R_{mean}	WS_{mean}	RH_{mean}	T_{max}	T_{min}	VPD_{mean}
T_{mean}	1.000 **	0.144 **	0.280 **	0.427 **	0.067	0.841 **	0.895 **	0.287 **
P		1.000	-0.443 **	0.026	0.424 **	-0.125 *	0.338 **	-0.369 **
R_{mean}			1.000	0.159 *	-0.718 **	0.647 **	-0.081 *	0.779 **
WS_{mean}				1.000	-0.020	0.307 **	0.386 **	0.199 *
RH_{mean}					1.000	-0.313 **	0.379 **	-0.391 **
T_{max}						1.000	0.585 **	0.591 **
T_{min}							1.000	-0.041
VPD_{mean}								1.000

带 * 和 ** 分别表示该偏相关系数在 $P=0.01$ 和 $P=0.05$ 的水平上显著 The values marked * * and * mean they are significant at $P=0.01$ and $P=0.05$ respectively

表 5 特征根及贡献量

Table 5 Eigenvalue and contribution in PCA

主分量 Component	1	2	3	4	5	6	7	8
特征根 Eigenvalu	3.478	2.651	0.780	0.681	0.282	0.080	0.028	0.021
贡献量 Contribution (%)	43.475	33.143	9.753	8.510	3.521	0.996	0.346	0.256
累积贡献量 Cumulative contribution (%)	43.475	76.618	86.370	94.881	98.402	99.398	99.744	100.00

由表 5 可知,第一主分量和第二主分量的累积贡献率已达到 76.618%,信息损失率为 23.382%,基本上能够反映出各微气象因子所包含的信息。根据第一、第二主分量的特征向量还可以得到主分量方程:

$$Y_1 = 0.879VPD_{\text{mean}} + 0.667T_{\text{max}} + 0.851R_{\text{mean}} - 0.683RH_{\text{mean}} + 0.295T_{\text{min}} + 0.427T_{\text{mean}} - 0.363P + 0.389WS_{\text{mean}}$$

$$Y_2 = -0.343VPD_{\text{mean}} + 0.369T_{\text{max}} - 0.324R_{\text{mean}} + 0.640RH_{\text{mean}} + 0.918T_{\text{min}} + 0.750T_{\text{mean}} + 0.560P + 0.405WS_{\text{mean}}$$

式中,第一主分量 Y_1 的方程中, VPD_{mean} 和 R_{mean} 的系数最高,日最高温度次之,而 RH_{mean} 和 P 的系数为负值,说明它是反映该地区潜在蒸散力的综合气象因子;第二主分量 Y_2 的方程中, T_{min} 和 T_{mean} 的系数最高, P 和 RH_{mean}

次之,而 VPD_{mean} 和 R_{mean} 的系数为负值,说明它是反映该地区水热条件的综合因子,它直接与树干径向的生长相关。

直观起见,分别以第一、第二主分量为横坐标和纵坐标,则可得到 8 个微气象因子的二维分类图 (图 6)。结果表明,可将 8 个微气象因子分为 3 类:① P 和 RH_{mean} ,两者相关系数为 0.424 (表 5),它们与树干形成层细胞分裂和伸长所需要的水分紧密相连,所以是影响树干径向生长的关键因子;② $T_{mean}, T_{max}, T_{min}$ 和 WS_{mean} ,各因子间相关系数均达到显著相关 (表 4),它们与树木光合物质的形成、积累和消耗紧密相连,因此也是影响树干径向生长的直接因子;③ VPD_{mean} 和 R_{mean} ,两者相关系数 0.779 (表 4),它们与树木叶片气孔开度所调节的光合作用等生理过程紧密相关,因此是影响树干径向生长的间接因子。

为进一步量化树干径向生长对各气象因子的响应关系,进行了偏相关分析 (表 6),结果表明,日降雨量、日最低气温、日平均相对湿度和日平均饱和差等 4 个因子与树干径向日生长量呈显著相关;日最高气温和日平均风速与树干径向日生长量无显著相关;日平均气温和日平均辐射与各样木树干径向日生长量相关性表现不一致,这主要与样木个体所处林分环境条件的差异有关。例如,DC4 样木树干的径向生长量与日平均辐射无显著相关,是因为该样木在林分中为被压木,接受较少的太阳辐射缘故,而其生长量却与间接辐射所引起的温度变化相关。DC1、DC2 和 DC5 样木在林分属于优势木和亚优势木,其林冠直接暴露在太阳辐射下,因此树干的径向生长量与太阳辐射显著相关。

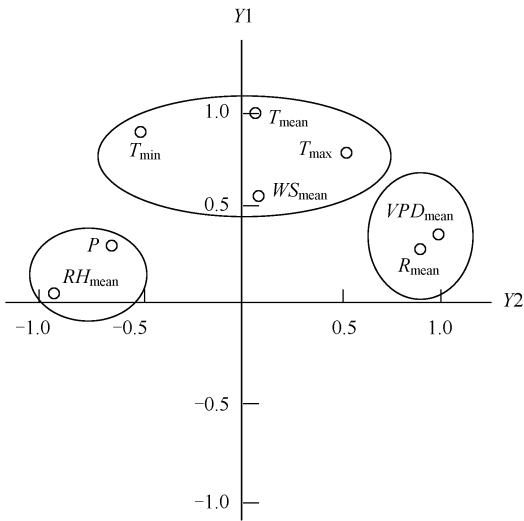


图 6 微气象因子第一、第二主分量坐标及分类
Fig. 6 Coordinate of the first and the second Compo-nents and classification of micro-climate factors

表 6 华北落叶松树干径向日生长量与微气象因子的偏相关系数

Table 6 Partial coefficients between daily stem growth of *Larix principis-rupprechtii* and meteorological factors

编号 Number	T_{mean}	T_{max}	T_{min}	P	R_{mean}	WS_{mean}	RH_{mean}	VPD_{mean}	样本数 Sample number
DC1	0.252	0.034	0.418 **	0.496 **	-0.315 **	-0.126	0.360 **	-0.255 **	125
DC2	0.229	-0.012	0.420 **	0.480 **	-0.322 **	-0.080	0.369 **	-0.272 *	125
DC3	0.271 *	0.073	0.416 **	0.477 **	-0.224 *	-0.090	-0.304 *	-0.198 *	125
DC4	0.394 **	0.209	0.477 **	0.495 **	-0.093	0.012	0.226 *	-0.079 **	125
DC5	0.269	0.056	0.428 **	0.501 **	-0.267 *	-0.119	0.339 **	-0.232 *	124
DC1-5	0.272	0.063	0.423 **	0.480 **	-0.247 **	-0.079	0.319 **	-0.210 **	619

带 * 和 * 分别表示该偏相关系数在 $P=0.01$ 和 $P=0.05$ 的水平上显著;DC1-5 表示将 5 个样木放在一起分析的情况 The values marked ** and * mean they are significant at $P=0.01$ and $P=0.05$ respectively;The values in the line of DC1-5 are gained by using data from all of five sample trees

综合考虑 PCA 分析和偏相关分析,最后选择日降雨量、日最低气温、日平均太阳辐射和日均饱和差等 4 个因子作为影响树干直径生长量的主要微气象因子,采用多元线形回归分析建立了相应的线形模型:

$$Y = -7.131 + 5.242P - 0.085 R + 10.848T - 60.807VPD \quad R = 0.558 \quad n = 619$$

式中, Y 为树干直径日生长量 (μm), P 为日降雨量 (mm), R 为日平均太阳辐射强度 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), T 为日平均空气温度 ($^{\circ}\text{C}$), VPD 为日平均饱和差 (kPa)。经方差分析的 F 检验,表明方程回归显著。

4 讨论

4.1 树干径向生长的定义及生长量计算

树干径向变化是其木质部形成和体内水分含量变化所引起的树干体积变化共同作用的结果,前者是由于

树干形成层细胞的分裂和伸长^[6]而产生的不可逆过程;后者是因为树体内水分收支平衡所引起树干体积物理涨缩变化^[1,12]的可逆过程。采用 Deslauriers 等^[5]的定义计算华北落叶松树干径向日生长量时,在非连续降雨天气条件下可以将两者分开,从而能较准确地估计树干径向日生长量。然而,在气象变化剧烈的条件下,如属于半干旱半湿润地区的本文研究地点,用此方法计算连续降雨后晴天时段的树干直径的日生长量时会频频出现负值。由于很难从生物学角度对“负值生长”给予合理解释,国外研究中常将树干径向负值生长作为零^[5]或丢失数据^[6]处理。

本研究提出了 Deslauriers 方法的修正公式,在气象条件由干变湿的季节,即直径快速生长期(6~7 月份),基本解决了“负值生长”情况,使估计值更加接近真实的树木直径生长过程;然而,在气象条件由湿变干的季节,即直径生长缓慢期(8~9 月份),树干直径的日生长量仍然出现负值,这是由于连续干旱天气条件下树干径向真实生长量被树体失水引起的体积减小量掩盖了。据 Mäkinen 等人的研究^[1],树干径向变化受树体本身水分状况(收缩和膨胀)影响很大,应用 Dendrometer 测定的数据在特殊条件下(如连续降雨或干旱)还不能直接地反映出木质部形成导致的真实生长。因此,怎样通过定量区分不同影响因素的作用而从 Dendrometer 测定数据中准确获得树干径向生长数据,还有待于理论上的完善。

另外,根据 Mäkinen 等人对挪威云杉(*Picea abies* (L.) Karst.)树干径向生长格局的研究表明,树干径向生长的季节格局呈“S”型曲线,即树干径向生长出现慢-快-慢的变化规律^[1]。而本研究中华北落叶松树干的径向生长格局呈幂函数曲线,即树干径向生长表现为先快后慢的变化过程,这是因为本研究的测定期较晚(6 月份开始),缺乏生长季早期(4~5 月份)的数据,从而还不能反映整个生长季树干径向生长的过程所致,但在生长季中后期(6~9 月份)树干径向生长的过程曲线与上述研究是一致的。

4.2 树干直径生长对气象因子的响应

PCA 分析和偏相关分析表明,降雨量是影响树干直径日生长的主要气象因子之一,这与大多数研究结论一致^[3,4,5]。在本研究中,水分对树木生长的影响同时还表现在相对湿度和饱和差两个因素上,其中与前者呈正相关,与后者呈负相关,这并不是由于树木表皮在潮湿空气中吸收水分引起的膨胀作用,而是在相对湿度很高或空气饱和差很低的天气条件下(如雨或雾)由于树冠蒸腾作用大大减弱和根系继续吸水引起树干含水量增加导致的结果。Herzog 指出^[4],树干径向日变化是与树干液流活动紧密相连的,在不考虑生长的情况下,树干径向变化是由树体水分含量变化引起的,而不是外部树皮直接从空气中吸水的原因。

有研究报道^[3,14],温度(尤其是夜间温度)是影响树干形成层细胞伸长和增大的主要因素。本研究中,日最低温度是唯一与所有测定样木树干径向生长量呈显著相关的温度因子,这是由于日最低温度往往出现在夜间或凌晨,而这段时间正是树干径向生长的活跃期,由此看来,本研所得结论与上述文献的研究结论还是较为一致的。

综上所述,利用 PCA 和偏相关分析所筛选的 4 个微气象因子与树干直径日生长量有较好的相关关系,但树干直径生长对于一些气象因子(如太阳辐射)的响应还存在着明显的个体差异。因此,要深入了解树干径向生长对各气象因子的响应机制,还需进一步认识树体内的水分动态平衡以及树木个体及其所处林分环境条件差异对树干径向变化的影响。

References :

- [1] Mäkinen H, Nöjd P, Saranpää P. Seasonal changes in stem radius and production of new tracheids in Norway spruce. *Tree Physiology*, 2003, 23 : 959—968.
- [2] Chen Z H, Zhang D M, Guo Z H. Diameter growth of three tree species in the lower subtropical climate. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (6) : 939—943.
- [3] Fritts H C. The relevance of dendrographic studies to tree ring research. *Tree Ring Bull.* 1962, 24 : 9—11.
- [4] Herzog K M, Häslner, Thum R. Diurnal changes in the radius of a subalpine Norway spruce stem : their relation to the sap flow and their use to estimate transpiration. *Trees*, 1995, 10 : 94—101.

[5] Deslauriers A, Morin H, Urbinati C, *et al.* Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Quebec (Canada). *Trees*, 2003, 17 477—484.

[6] Downes G, Beadle C, Worledge D. Daily stem growth patterns in irrigated *Eucalyptus globules* and *E. nitens* in relation to climate. *Trees*, 1999, 14 102—111.

[7] McLaughlin S B, Wullschlegel S, Nosal M. Diurnal and seasonal changes in stem increment and water use by yellow poplar trees in response to environmental stress. *Tree Physiology*, 2003, 23 1125—1136.

[8] Kimmins J P. *Forest Ecology*. New York : Macmillan, 1987. 340—341.

[9] Wang Z F, Zhu T Y, Zhu J W, *et al.* *Forest Meteorology*. Beijing : China Forestry Publishing House, 1985.

[0] Wang S S, Gao R F, Wu G M. *Plant Physiology*. Beijing : China Forestry Publishing House, 1991.

[1] Irvine J, Grace J. Continuous measurements of water tensions in the xylem of trees based on the elastic properties of wood. *Planta*, 1997, 202 455—461.

[2] Offenthaler I, Hietz P, Richter H. Wood diameter indicates diurnal and long-term patterns of xylem water potential in Norway spruce. *Trees*, 2001, 15 215—221.

[3] Richardson S D, Dinwoodie J M. Studies on the physiology of xylem development I. The effects of night temperature on tracheid size and wood density in conifers. *J. Inst. Wood Sci.*, 1960, 6 3—13.

[4] Antonova G F, Stasova VV. Effects of environmental factors on wood formation in Scots pine stems. *Trees*, 1993, 7 214—219.

参考文献：

[2] 陈章和, 张德明, 郭志华. 南亚热带气候下三种树木径向生长季节节律研究. *生态学报*, 1999, 19 (6) 939 ~ 943.

[9] 王正非, 朱廷曜, 朱劲伟, 等. *森林气象学*. 北京 : 中国林业出版社, 1985.

[0] 王沙生, 高荣孚, 吴贯明. *植物生理学*. 北京 : 中国林业出版社, 1991.