

芦芽山林线附近华北落叶松茎干生长特征 及其与环境因子的关系*

杨艳刚^{1,2} 江源^{1,2,3**} 张文涛^{1,3} 王耿锐^{1,3}

(北京师范大学¹中药资源保护与利用北京重点实验室,²资源学院,³地表过程与资源生态国家重点实验室 北京 100875)

摘要 分别于7月15日~8月7日(夏季期)和9月5日~10月9日(秋季期),在山西芦芽山林线附近,应用树木径向变化记录仪(Dendrometer)分别测量了3株和4株华北落叶松树干的径向生长过程,并同步监测环境因子。结果表明:1)华北落叶松茎干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)茎干变化在7~8月观测期内与土壤含水量、空气温度正相关,在9~10月观测期内与土壤含水量正相关,与土壤温度、空气温度负相关;3)径向净生长在夏季期为正,在秋季期为负,在9月初先下降,在9月中旬后基本保持为0;4)在两个观测期内,径向净生长与空气温度负相关,与土壤含水量显著正相关。图5 表5 参21

关键词 芦芽山林线;茎干径向变化;环境因子;华北落叶松

CLC S791.220.2 (225)

Stem Radial Growth Features of *Larix principis-rupprechtii* Responding to Environmental Factors at the Treeline of Mt. Luya, Shanxi, China*

YANG Yangang^{1,2}, JIANG Yuan^{1,2,3**}, ZHANG Wentao^{1,3} & WANG Gengrui^{1,3}

(¹Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Protection and Utilization of Beijing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

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

(³State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract The stem radial growth of 3 sample trees of *Larix principis-rupprechtii* from July 15 to August 7 (summer phase), and 4 sample trees from September 5 to October 9 (autumn phase) in 2007, was measured by Dendrometer, combined with synchronized instrumental observation and measurements including habitat temperature and moisture at the treeline of Mt. Luya, Shanxi, China. The results indicated: 1) the diameter of stems varied in sunny days with a daily fluctuation and it steadily widened, while in rainy days it continuously increased during the rain but it shrunk rapidly after the rain; 2) the radial variation of stems at the summer phase was positively correlated with both soil moisture and air temperature, whereas at the autumn phase it was positively with soil moisture but negatively with both air and soil temperatures; 3) the stem radial growth measured by the accumulative increment showed a positive value at 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 zero constantly from middle September on; 4) the radial increment of stems showed significant positive correlations with soil moisture, while a significant negative correlation with air temperature was found at the both phases. Fig 5, Tab 5, Ref 21

Keywords tree line of Mt. Luya; stem radial variation; meteorological factor; *Larix principis-rupprechtii*

CLC S791.220.2 (225)

林线(Tree line)是最清晰的植被界线之一^[1],是划分高山区景观类型的一条重要生态界限^[2]。林线是在区域气候与局地环境变量共同作用下形成的,对气候变化十分敏感,是良好的气候变化“指示剂”,其形成受到一个或几个限制性因子的制约,林线形成的原因已成为很多研究者关注的热点问题。Körner综合了全球高山林线分布高度与温度的关系,发现在全球范围内林线大致沿着6.7℃等温线分布,在不同纬度上略有偏差^[2]。Alvarez进行了室内模拟实验,发现根生长的临界温度约为6℃,并由此得出,根附近的土壤温度是林线形成的关键因子^[3,4]。Zweifel采用茎流计与茎干变化测量仪测定

树木生长的研究发现,降水是唯一控制树木茎向生长的因子,其他因子对树木生长只有阶段性的影响^[5]。还有多项研究发现树木生长与生长季内不同时段温度因子存在正相关或负相关关系^[6~8]。另外,生长季内干旱频发会严重削弱林线树木个体的发展,但是部分树种对干旱胁迫有一定弹性作用^[9,10]。其他因子,如树木个体及种间的竞争关系也会影响林线的位置与格局^[11]。可见,不同区域不同研究尺度上影响林线形成的原因各不相同,得出的结论不尽相同。

林线附近树木生长研究在我国尚未见报道。为了探明限制林线附近树木生长的主要因子,本文研究应用茎干变化测量仪(Dendrometer)结合生境气候及土壤的温度与水分特征测量,分析了芦芽山高山林线附近华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)的茎干径向生长特征及其与环境因子的关系,目的在于揭示林线附近华北落叶松的径向生长动态,揭示华北

收稿日期:2008-03-18 接受日期:2008-05-23

*国家自然科学基金项目(Nos. 40871055, 40571001, 40671065)资助
Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 40871055, 40571001, 40671065)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: jiangy@bnu.edu.cn)

落叶松的径向生长与环境因子的关系,探讨华北高山限制华北落叶松生长的主要生态因子。

1 研究区概况

芦芽山国家级自然保护区位于山西省吕梁山脉北端(东经111°50′~112°5′30″,北纬38°35′~38°45′)位于宁武、五寨、岢岚三县交界处。芦芽山海拔2 787 m,是管涔山的主峰,也是汾河的水源地。芦芽山植被具有明显的垂直地带性,西坡基带植被为温带草原,东坡基带植被为暖温带落叶阔叶林,从山麓到山顶依次有暖温性落叶阔叶林、寒温性针叶林、亚高山灌丛草甸等^[12]。根据五寨气象站数据统计,该地区年均温4.3~6.7℃,年降雨量316~631 mm。2007年的气候条件与常年相比降水偏多,气温基本保持常年平均状态(图1)。

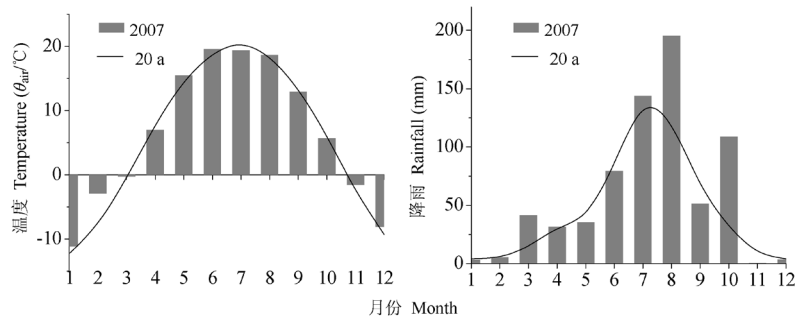


图1 五寨县气象站2007年、1988~2007年20 a的月平均温度和月降雨量
Fig. 1 Mean monthly temperature and precipitation in Wuzhai County in 2007 and 1988~2007

2 研究方法

2.1 样点设置

研究地点位于芦芽山山顶荷叶坪北坡林线附近的华北落叶松与云杉混交林,地理坐标为东经111°50′16″、北纬38°43′47″(图2)。地形具有宽谷与平梁相间分布的特征,群落的建群种为华北落叶松和白杆(*Picea meyeri*),林冠郁闭度为0.9,林下无灌木分布,草本植物稀疏。选择的观测样本位于高山针叶林上限林缘,各样木较均匀地分布在样地内,样木间平均距离约为3~5 m。生长地海拔2 737 m,坡度25°,坡向为北偏西45°,观测点周围分布有孤立乔木,上部零星分布有

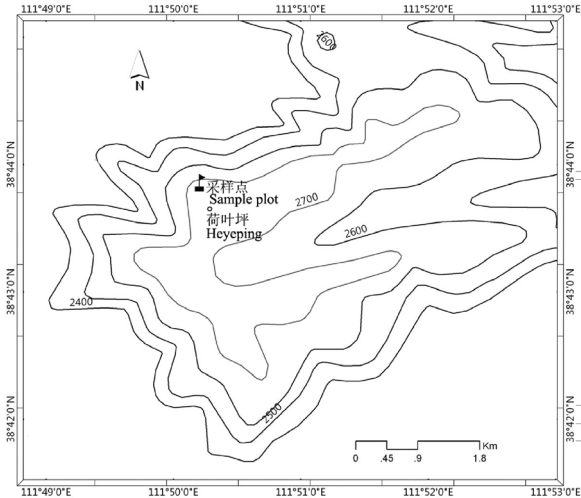


图2 研究区及采样点布设
Fig. 2 Location of the study plots

矮树,旗形树冠明显。周边广泛分布有以二柱头镰草(*Scirpus distigmaticus*)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)为优势种的高山草甸群落。

2.2 测定时间的选择与茎干变化的数据采集

观测时间选择:生长季节选择降水最丰沛、热量条件最好的7~8月,选择1~3#样木进行观测,生长季末期选择观测地温度跨越0℃变化的9~10月,选择1~4#样木进行观测(图1),以揭示最优生长条件和临界生长条件中茎干生长与生态因子的关系。

选择生长良好、干形较直的样木(表1),用树干径向变化记录仪DR\DD型,连续测定了树高1.5 m处的茎干径向变化过程。每个采样点分别放置DL10型数据采集器,通过便携式计

表1 进行径向生长测量的样木特征

Table 1 Characters of the four sample trees of *L. principis-rupprechtii* for stem radial growth measurement

样木编号 Number	树高 Tree height (h/m)	胸径 Diameter (d/cm)	冠幅直径 Crown diameter (d/m)	树龄 Tree age (t/a)
1	5	15	1.5	35~45
2	8	28	3.5	45~50
3	9	20	2	40~45
4	10	22	2.5	40~45

算机向数据采集器发送数据采集命令,数据采集步长设为15 min,每30 min记录一个数据。并对周围相同径级的树木取年轮测定样木年龄范围。

2.3 环境因子的选择与测定

林线是在高山极端环境影响下形成的重要生态界限,有关高山地区限制树木生长因素的较多研究结果认为低温是限制树木生长的主要生态因子^[12, 13, 14],而近期研究指出生境干旱也可能是林线以上树木不能生长的重要因子^[15~17]。因此,本研究选择温度和水分两类生态因子,研究其对林线树木径向生长的作用与影响。

各生态因子的测量方法如下:

气温与空气湿度:在林缘采样点上部草甸地上1.5 m处放置HOBO小型自动气象站,测定生境气温和空气相对湿度条件,采样时间间隔为30 min。

降雨量观测:在林缘上部开阔地放置雨量自动记录仪记录雨量。

土壤表层温度与水分：在林缘样木附近放置土壤温度测量仪、FDR频域反射土壤水分速测仪和土壤水势张力仪测定土壤温度、土壤含水量和土壤水势，采样时间间隔设为30 min，传感器埋入土深为20 cm的土壤中，进行连续测定。

土壤剖面水分含量测定：将40 cm探管置入土中，采用PR2土壤剖面水分测量仪，分别测量10 cm、20 cm、30 cm和40 cm深度的土壤含水量。

2.4 数据处理与分析

数据分析在SPSS统计软件支持下进行。首先将茎干径向变化、茎干径向净生长数据与环境因子进行偏相关分析，探索环境因子对树木径向生长的影响规律。分别模拟两个时段华北落叶松茎干径向累积变化曲线，分析其不同阶段的生长特征。主要的生长因子及环境因子计算公式如下：

通常情况下，受降雨影响的树干生长被当作缺失值处理^[4]，其他晴好天气的净生长采用相邻两日茎干最大值的差值计算，本文计算净生长采用了相应的修正公式，对降雨时期内茎干径向净生长值进行处理。

树木径向净生计算公式^[18, 19]为：

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

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

其中， 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10 mm时，用茎干日最大值减去前一日茎干

最大值；日降雨量大于10 mm时，用降雨过程结束后第一天茎干变化最大值减去降雨前一日茎干最大值，并除以相隔的日数。

环境因子日均值计算公式为：

$$M_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} M_i}{24}$$

其中， M_{mean} 表示某环境因子的日平均值， M_i 表示一日内测得的某环境因子小时平均值。

树木茎干径向累积变化量计算公式为：

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

其中， G_{cum} 表示茎干径向累积变化量， $G_{d \cdot i}$ 表示可计算的日净生长量， n 表示净生长的观测天数。

3 研究结果

3.1 茎干径向变化特征

茎干径向变化包括其真正的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，径向变化是一个以天为周期的波动上升过程，茎干径向日变化分为3个阶段(图3，表2)，首先是收缩阶段，从凌晨茎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，树干开始膨胀直至茎干恢复至前一日茎干最大值为止；增长阶段，茎干继续增长，直至达到另一个最大值，并开始下一个日生长为止，上述情况通常发生在连续晴朗的天气条件下。在连续阴雨天气，茎干径向变化因吸水作用而表现为持续“生长”。雨后又表现为连续下降，

表2 各样木两个观测期内茎干径向变化统计
Table 2 Stem radial variation of each sample tree in measuring periods

监测时段(月.日) Measuring periods (Month.Day)	编号 Number	最大值出现时间 Appearing time of maximum value	最小值出现时间 Appearing time of minimum value	日平均增长(Δd/μm) Average daily growth
07.15~08.07	1	1:30~3:00	15:30~17:00	15.95
	2	6:00~8:30	16:00~19:00	18.59
	3	1:30~4:00	14:30~16:00	5.95
09.05~10.09	1	4:00~8:00	15:00~19:00	-13.34
	2	3:00~7:00	13:00~17:00	-26.49
	3	6:00~10:00	18:00~20:00	-26.26
	4	9:00~12:00	20:00~21:00	-24.80

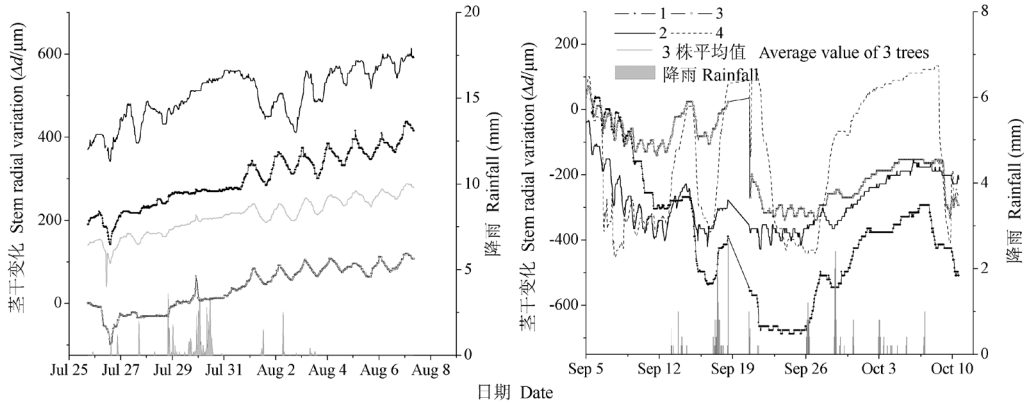


图3 两个观测期内茎干日变化特征
Fig. 3 Stem daily variation affected by rainfall in observation phases

表3 两个观测期内茎干变化因子的偏相关系数
Table 3 Partial correlation between stem radial variation and environmental factors

监测时段(月.日) Measuring periods (Month.Day)	编号 Number	空气温度 Air temperature ($\theta_{air}/^{\circ}\text{C}$)	土壤温度 Soil temperature ($\theta_{soil}/^{\circ}\text{C}$)	空气相对湿度 Relative humidity (RH/%)	20 cm土壤含水量 20 cm soil moisture ($\Phi/\text{m}^3\text{ m}^{-3}$)	40 cm土壤含水量 40 cm soil moisture ($\Phi/\text{m}^3\text{ m}^{-3}$)	土壤水势 Soil water potential (Ψ/kPa)
07.15~08.07	1	0.71**	0.06	-0.03	0.53**	—	—
	2	0.50**	-0.17**	0.34**	0.94**	—	0.86**
	3	0.69**	0.02	-0.09	0.38**	—	—
	平均值 Average	0.45**	-0.24**	0.22**	0.92**	—	0.86**
09.05~10.09	1	-0.52**	-0.60**	0.58	0.94**	0.95**	0.94**
	2	-0.47**	-0.74**	0.73**	0.84**	0.89**	0.77**
	3	-0.43**	-0.65**	0.70**	0.70**	0.75**	0.55**
	4	-0.15**	-0.39**	0.41**	0.40**	0.41**	0.26**
	平均值 Average	-0.47**	-0.67**	0.42**	0.82**	0.85**	0.72**

** $P<0.01$; * $P<0.05$. The same below

表4 两个观测期内茎干变化日平均值与环境因子的偏相关分析
Table 4 The partial correlation between daily average stem radial variation and environmental factors

监测时段(月.日) Measuring periods (Month.Day)	编号 Number	空气温度 Air temperature ($\theta_{air}/^{\circ}\text{C}$)	土壤温度 Soil temperature ($\theta_{soil}/^{\circ}\text{C}$)	空气相对湿度 Relative humidity (RH/%)	20 cm土壤含水量 20 cm soil moisture ($\Phi/\text{m}^3\text{ m}^{-3}$)	40 cm土壤含水量 40 cm soil moisture ($\Phi/\text{m}^3\text{ m}^{-3}$)	土壤水势 Soil water potential (Ψ/kPa)
07.15~08.07	1	0.18	0.83**	0.03	0.71**	—	—
	2	-0.17	0.67**	0.34	0.97**	—	0.94**
	3	0.25	0.85**	-0.02	0.62**	—	—
	平均值 Average	-0.23	0.74**	0.26	0.92**	—	0.94**
09.05~10.09	1	-0.87**	0.71**	0.79**	0.99**	0.98**	0.97**
	2	-0.98**	0.00	0.95**	0.95**	0.95**	0.85**
	3	-0.95**	0.10	0.97**	0.82**	0.83**	0.67**
	4	-0.73*	0.19	0.79*	0.57*	0.58*	0.40
	平均值 Average	-0.96**	0.62*	0.94**	0.92**	0.92**	0.80**

如图3中2#样木所示. 根据前述净生长量计算公式, 分别计算降雨和非降雨两个阶段的茎干净增长, 在生长季中期, 茎干径向变化总体呈上升趋势, 日均生长量为5.95~18.59 μm . 9~10月观测期内茎干径向变化总体呈下降趋势, 受降雨影响在后期下降趋势减缓. 连续阴雨天气之后茎干由于吸水仍表现为持续加粗(图3). 由于前期降水较少, 在9月12日一次小的降雨过程中, 茎干亦有较大变化, 可见这一阶段内茎干径向变化对水分变化比较敏感. 根据前述径向净生长量计算公式, 分别计算降雨和非降雨两个阶段的茎干径向净增长, 这一期内, 日均径向生长量-13.34~-26.49 μm .

3.2 茎干径向变化与环境因子的关系

由图3可以看出, 7~8月降雨期内茎干径向变化仍呈现较平稳的上升趋势, 除2#样木外, 其他样木径向变化的变幅与无雨时期相比较小. 将茎干径向变化与对应的环境因子数据做小时平均后, 进行偏相关分析, 结果(表3)表明, 生长季中期3株样木及各样木径向变化平均值均与空气温度、20 cm土壤含水量呈极显著正相关. 此外, 2#样木及3株样木的径向变化平均值还与土壤温度呈极显著负相关, 与空气相对湿度、20 cm土壤水势呈极显著正相关. 生长季末期, 4株样木及其径向变化平均值均与空气温度、土壤温度呈极显著负相关, 与空气相对湿度、不同深度土壤含水量、土壤水势呈极显著正相关(表3).

3.3 茎干径向变化日均值与环境因子的关系

7~8月观测期内, 3株样木茎干径向变化日均值及各样木平均值与土壤温度、20 cm土壤含水量极显著正相关. 而与空

气温度、相对湿度的相关性未通过显著性检验. 2#样木及3株样木径向日变化平均值与土壤水势极显著正相关. 9~10月观测期内, 4株样木茎干径向变化日均值及其平均值均与空气温度极显著负相关, 与空气相对湿度、20 cm/40 cm土壤含水量、土壤水势极显著正相关, 4#样木茎干径向变化日均值与土壤水势相关性未通过显著性检验. 1#样木以及所有样木茎干径向变化日均值与土壤温度呈极显著正相关(表4).

3.4 华北落叶松茎干径向累积变化与环境因子的关系

3.4.1 生长季中期华北落叶松径向累积变化特征 多数关于树木径向生长的研究, 只考虑晴好天气的茎干径向生长量, 这段时期往往有较明显的生长趋势. 对于连续降雨期以及降雨后的一段时期内的茎干变化不进行茎干径向净生长的计算^[19]. 也有研究发现, 树木在生长季中、前期完成大部分径向生长, 而在秋、冬季的生长末期和休眠期内还有部分“回缩”^[20]. 因此, 我们分别探讨7~8月观测期与9~10月观测期内茎干径向累积变化过程, 以及环境因子对径向累积变化的影响.

7~8月观测期内树木的累积径向变化呈持续上升趋势(图4). 直径较小的1#样木的径向生长累积变化表现出线性增长趋势, 直径较大的2#和3#样木的径向生长累积变化呈现出二次曲线的变化特征. 这种径向累积变化趋势的差异, 很可能反映了落叶松在不同年龄阶段的生长特征.

3.4.2 生长季末期华北落叶松径向累积变化特征 分别做出9~10月去除降雨影响前后的茎干径向累积变化曲线. 未去除降雨影响之前, 华北落叶松茎干径向累积变化曲线整体呈收缩趋势, 中间有波动性上升. 其中几次上升过程均由降雨引起(图

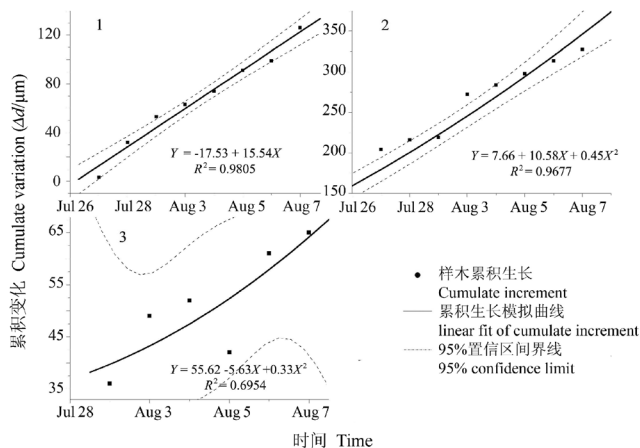


图4 7~8月茎干径向生长累积变化曲线

Fig. 4 Cumulate variation of stem radial growth in July and August

5). 当去除这些影响后, 华北落叶松茎干径向累积变化曲线呈现出先下降而后保持不变的特征, 9月上旬下降较快, 但是这一阶段的衰减值并不大, 基本在200~300 μm之间。在9月10日前后, 茎干径向累积变化基本保持不变。这种规律在2#、3#和4#样木的茎干变化中都有所体现, 只有1#样木茎干收缩期相对较长, 直至9月下旬, 仍未出现停止收缩的趋势。

3.4.3 华北落叶松茎干径向净生长与环境因子的关系 晴朗天气条件下, 用一日茎干变化的最大值减去前一日茎干变化最大值即得一日茎干径向净生长量^[18, 19, 21], 降雨期内茎干径向净生长由茎干累积变化曲线模拟。7~8月观测期, 2#样木及3株样木径向净生长平均值与空气温度显著负相关, 与土壤水势显著正相关; 1#样木径向净生长与土壤温度、20 cm土壤含水量显著正相关。3#样木及3株样木茎干径向净生长平均值与土壤温度显著正相关。9~10月观测期, 1#、2#、3#样木及4株样木径向净生长平均值均与空气温度显著负相关, 1#、2#、3#样木径向净生长与土壤温度显著负相关。只有2#样木与空气相对湿度正相关。除4#样木与土壤水势呈显著正相关外, 其它3株样木径向净生长均与土壤水势极显著正相关(表5)。

4 结论与讨论

4.1 华北落叶松茎干径向日变化规律

华北落叶松茎干径向日变化规律在晴好天气较为明显, 受冠层蒸腾拉力的拉动, 茎干内水分有规律的流动, 表现出规律变化。在连续降雨天气, 由于降雨导致湿度过高抑制了

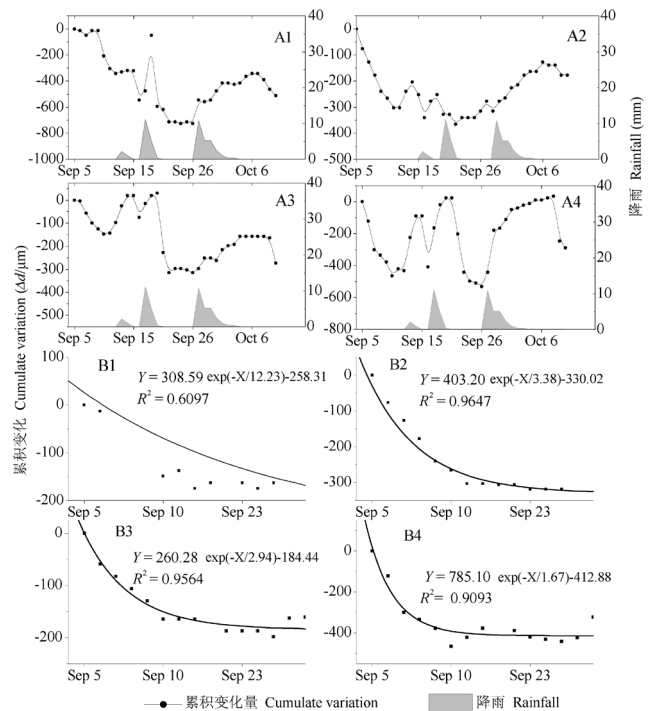


图5 9~10月茎干径向累积变化曲线(A1~A4为消除降水影响前的生长曲线, B1~B4为消除降水影响后的生长曲线)

Fig. 5 Cumulated variation of stem radial growth in the end of the growth season (A1~A4 represent the growth curves with influence of rainfall and B1~B4 the curves without influence of rainfall)

植物蒸腾, 而使茎干持续加粗, 导致树木茎干水分以及细胞含水量持续增加, 这一过程一直持续到蒸腾恢复。

熊伟等在六盘山对华北落叶松径向生长的研究中, 发现8~9月份为缓慢生长期, 其日均生长量在10 μm以下, 对比其研究, 可以看出, 芦芽山林线附近的华北落叶松在8~9月份间生长速度略高于六盘山地区的华北落叶松^[18](表2)。

在7~8月之间的生长旺盛期, 茎干径向日变化与气温和土壤含水量呈正相关关系, 这种规律与熊伟等认为的六盘山地区华北落叶松径向生长受降雨和日最低温限制不同^[18]。我们认为, 由于本研究观测样地位于芦芽山海拔2 737 m的阴坡, 夏季降水丰沛, 温度适中。由于土壤水分条件好, 大气相对湿度也较高。因此, 温度升高不仅未引起植物体内因失水而导致的茎干萎缩, 而且由于蒸腾拉力增加, 提高了植物细胞的

表5 茎干径向净生长量与环境因子的偏相关系数

Table 5 Partial correlation between stem radial growth and environmental factors

监测时段(月.日) Measuring periods (Month.Day)	编号 Number	空气温度 Air temperature ($\theta_{air}/^{\circ}\text{C}$)	土壤温度 Soil temperature ($\theta_{soil}/^{\circ}\text{C}$)	空气相对湿度 Relative humidity (RH/%)	20 cm土壤含水量 20 cm soil moisture ($\Phi/\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	40 cm土壤含水量 40 cm soil moisture ($\Phi/\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	土壤水势 Soil water potential (Ψ/kPa)
07.15~08.07	1	0.11	0.57*	0.25	0.58*	—	—
	2	-0.50*	-0.07	0.09	0.21	—	0.40*
	3	-0.20	0.38*	0.16	0.16	—	—
	平均值 Average	-0.52*	0.29*	0.23	0.48*	—	0.40*
09.05~10.09	1	-0.38*	-0.50**	0.24	0.13	0.12	0.67**
	2	-0.43*	-0.51**	0.31*	0.15	0.15	0.64**
	3	-0.36*	-0.41*	0.23	0.09	0.08	0.58**
	4	-0.24	-0.26	0.11	-0.01	-0.02	0.43*
	平均值 Average	-0.34*	-0.42	0.17	0.08	0.07	0.58**

吸水能力。因此, 茎干径向变化与温度和水分因子之间均呈现出显著的正相关关系。

9~10月的观测数据表明, 华北落叶松径向变化规律与7~8月有显著不同, 其变化表现为与温度因子呈负相关, 与水分因子呈正相关。这种变化规律反映了水分条件对茎干径向变化的限制作用。由于9~10月降水量逐渐减少, 因此土壤含水量降低, 同时, 较低的土壤温度也降低了水分的有效性。因此, 气温增加导致的蒸腾失水不能及时得到有效补充, 从而表现为茎干萎缩, 并且在有少量降雨时, 茎干径向变化出现了较大波动, 可见华北落叶松个体在这一阶段对水分变化十分敏感。茎干变化日均值变化与环境因子之间的关系与茎干日变化相似。

4.2 茎干累积变化特征

分段模拟了华北落叶松的径向累积变化曲线, 在生长季中期, 华北落叶松茎干径向累积变化呈匀速上升, 生长季末期, 华北落叶松茎干径向累积变化先下降, 后维持不变。这与多数研究类似, 即树木生长在生长季内的数月内完成, 而在其他月份以及非生长季内基本维持不变, 在秋、冬季茎干的直径还会有一定的收缩。本研究中, 茎干径向累积变化从下降过程至不变过程的转折点出现在9月10日左右, 这一时间是否为华北落叶松茎干变化从萎缩到保持基本不变变化的转折时间点, 还有待于进一步研究。

4.3 茎干累积变化与环境因子的关系

本文将两个测量期内的径向净生长分别进行计算, 这段时期内由降水导致的茎干径向变化不进行茎干径向净生长计算, 这部分数据由累积变化曲线模拟生成(图5)。结果表明, 在7~8月观测中, 华北落叶松茎干径向净生长与空气温度显著负相关, 与土壤温度、土壤水势、土壤水分显著正相关。由此可见, 在生长季节内水分因素可能限制了华北落叶松的生长。在9~10月的观测中, 华北落叶松茎干径向变化表现为日趋收缩。茎干收缩过程与空气相对湿度的正相关关系表明, 空气干燥导致的过度蒸腾, 是茎干径向收缩的重要原因之一。

茎干收缩过程与土壤温度的负相关关系表明, 较高的土壤温度虽有利于植物吸收水分, 但由于树木根系对水分的吸收同时受土壤与根系之间水势差的影响。因此, 对9~10月这段时期内茎干收缩过程的一个更好的解释可能是, 由于持续无雨天气, 土壤水势持续下降(−36.56 kPa~−67.39 kPa), 限制了这一时期内植物根系对水分的吸收, 所以茎干表现出一个明显的收缩过程, 另外土壤低温也导致植物体吸水困难, 加剧了这一过程对茎干径向净生长的影响。

References

- Wang XP (王襄平), Zhang L (张玲), Fang JY (方精云). Geographical differences in alpine timberline and its climatic interpretation in China. *Acta Geogr Sin* (地理学报), 2004, **159** (6): 872~879
- Körner C, Paulsen J. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *J Biogeogr*, 2004, **31**: 713~732
- Alvarez-Uribe P, Körner C. Low temperature limits of root growth in deciduous and evergreen temperate tree species. *Funct Ecol*, 2007, **21**: 211~218
- Downes G, Beadle C, Worledge D. Daily stem growth patterns in irrigated *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* relation to climate. *Trees*, 1999 (14): 102~111
- Zweifel R, Häsler R. Dynamics of water storage in mature subalpine *Picea abies*: Temporal and spatial patterns of change in stem radius. *Tree Physiol*, 2001, **21** (9): 191~193
- Brubaker LB. Spatial patterns of tree growth anomalies in the Pacific Northwest. *Ecology*, 1980, **61** (4): 798~807
- Enright NJ, Montreuil P. Principal components analysis of tree-ring/climate relationships in white spruce (*Picea glauca*) from Schefferville Canada. *J Biogeogr*, 1984, **11**: 353~361
- Taylor RM. Tree-ring analysis in forest productivity studies: An investigation of growth-climate relationships in the New Forest, Hampshire. *J Biogeogr*, 1981, **8**: 293~312
- Gebler A, Keitel C, Kreuzwieser J, Rainer M, Wolfgang S, Heinz R. Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees*, 2007, **21**: 1~11
- Corcuera L, Camarero JJ, Pelegrín EG. Effects of a severe drought on *Quercus ilex* radial growth and xylem anatomy. *Trees*, 2004, **18**: 83~92
- Zou CJ (邹春静), Wang QL (王庆礼), Han SJ (韩士杰). Study on competition relationship between dicotyledons in dark conifer forest in the Chingbai Mountains. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2001, **7** (2): 101~105
- Zhang JT (张金屯). District of vegetation vertical zone in Luya Mountain, Shanxi. *Acta Geogr Sin* (地理学报), 1989, **9** (4): 346~353
- Dullinger S, Dirnböck T, Grabherr G. Modeling climate change-driven treeline shifts: Relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility. *J Ecol*, 2004, **92**: 241~252
- Elliott GP, Baker WL. Quaking aspen (*Populus tremuloides* Michx.) at treeline: A century of change in the San Juan Mountains, Colorado, USA. *J Biogeogr*, 2004, **31**: 733~745
- Holtmeier FK, Broll G. Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecol & Biogeogr*, 2005, **14**: 395~410
- Pichler P, Oberhuber W. Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *For Ecol & Manage*, 2007, **242** (2/3): 688~699
- Duan BL (段宝利), Yin CY (尹春英), Li CY (李春阳). Responses of conifers to drought stress. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2005, **11** (1): 115~122
- Xiong W (熊伟), Wang YH (王彦辉), Yu PT (于澎涛), Liu HL (刘海龙), Shi ZJ (时忠杰), Guan W (管伟). The growth in stem diameter of *Larix principis-rupprechtii* and its response to meteorological factors in the south of Liupan Mountain. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2007, **27** (2): 432~441
- Deslauriers A, Morin H, Urbinati C, Carrer 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, **14**: 477~484
- Sevanto S, Vesala T M, Perämäki M, Nikinmaa E. Time lags for xylem and stem diameter variations in a Scots pine tree. *Plant Cell & Environ*, 2002, **25**: 1071~1077
- 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 Phytol*, 2006, **176**: 301~310