

# 树干径向变化对茎液流以及气象因子的响应<sup>\*</sup>

王琛, 余新晓, 陈丽华, 朱建刚, 梁启鹏

(北京林业大学 水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**应用改进的 SF-L 型热扩散式树液流测定装置和 DC 型植物生长测量仪, 结合北京 2007 年 6-10 月的气象数据, 探讨了北京山区油松、侧柏树干茎周长动态因素与液流速率和气象因子之间的相关关系, 并运用树木径向变化周期分段法将树木径向生长量从径向变化过程中分离开, 结果表明: (1) 油松、侧柏茎周长变化与液流速率的关系显著 ( $P < 0.01$ ), 油松为正相关, 侧柏为负相关。 (2) 空气水汽压亏缺、日温差、空气湿度和日照时数与油松、侧柏茎周长变化关系显著, 但在回归拟合过程中侧柏的解释因子只有空气水汽压亏缺和日平均风速, 且解释程度比较低 (0.356)。 (3) 油松、侧柏茎周长生长量的拟合水平较高, 且影响气象因子相同, 侧柏的液流速率也成为解释因子之一。水汽压亏缺、空气温湿度、日照时数、土壤水势和风速对树木的生长起到决定性的作用。

**关键词:** 树干茎周长变化; 树干茎周长生长量; 树干液流速率; 气象因子; 土壤水势

中图分类号: Q945.17; P463.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)01-0045-05

## Response of Stem Radial Variation That Caused by Sapflow and Meteorological Factors

WANG Chen, YU Xin-xiao, CHEN Li-hua, ZHU Jian-gang, LIANG Qi-peng

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** By the Application of improved SF-L type thermal dissipation sap flow velocity measuring device and DC-type plant growth measuring device, with the meteorological data from June to October in 2007 of Beijing, we discussed the relationship between the meteorological factors and the stem perimeter dynamic factors and sap flow velocity of *Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis* in Beijing mountain areas. Extract radial growth from the stem circadian cycle, by divide the circadian cycle into phases. The results show that: (1) There is remarkable correlation between the sap flow velocity and the stem perimeter ( $P < 0.01$ ), positive correlation for *Pinus tabulaeformis* and negative correlation for *Platycladus orientalis*. (2) The stem perimeter changes is remarkably correlated to air vapor pressure deficit, daily temperature difference, air humidity and sunshine hours. But in the regression fitting, the explanations for *Platycladus orientalis* only include air vapor pressure deficit and daily wind speed, and in low degree (0.356). (3) In the research of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis*, the fitness of stem perimeter growth is high, meteorological impact factors are identical, and the sap flow velocity in *Platycladus orientalis* becomes one of the explanations.

**Key words:** stem perimeter; stem perimeter growth; sap flow velocity; meteorological factors; soil water potential

近年来, 国内外对树木生长与环境变化关系的研究主要集中在观察分析树木年轮的宽度等特征因素与环境变化的对应关系, 或者通过年轮特征来推

测以前的气候特征, 通过树木年轮的变化特征, 不但可以了解树木的生长情况及其所在地当年气候变化的情况和规律, 还能得出气候变化对人类赖以生存

\* 收稿日期: 2009-07-27

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAD03A0201); 北京市科委重大项目 (D0706001000091)

作者简介: 王琛 (1984-), 男, 河北衡水人, 硕士生, 主要研究方向: 水土保持、森林水文。E-mail: wangchen1119@163.com

通信作者: 余新晓 (1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 水土保持、森林水文等。E-mail: yuxinxiao111@126.com

的生态系统的影响<sup>[1]</sup>。张寒松等利用树木年轮宽度资料重建长白山地区 240 年来降水量的变化<sup>[2]</sup>。陈振举等证明沈阳油松年轮宽度与全球气温变化、全球陆地和海洋温度变化和北半球气温变化有一定的相关性<sup>[3]</sup>。范敏杰等用树木年轮重建伊犁南天山北坡西部的降水量序列<sup>[4]</sup>。

在国外,带状树木径向变化记录仪(Dendrometer)早在 20 世纪 60 年代就被应用于树木生长与气候因子关系的研究<sup>[18]</sup>,直到 70 年代中期才被广泛应用于树木径向生长过程的研究中。而在我国此类研究才刚刚开始,熊伟等应用带状树木径向变化记录仪在六盘山对华北落叶松的树干径向生长与气象因子的关系进行了研究<sup>[8]</sup>。

研究树木生长对气候变化的响应具有及其重要的生态学意义。但其中也存在许多不确定因素,给这个领域的研究带来诸多不便,本文旨在通过连续测量树木的径向变化,以探求气象因子以及树木蒸腾对树木径向变化的影响,以期为进一步研究提供参考。

## 1 试验区概况

试验区设在北京林业大学妙峰山林场,它位于北京市西北郊太行山北部,燕山东端,116°28'E,39°54'N,面积 811.73 hm<sup>2</sup>。植被属于温带落叶松林带的山地栎林和油松林带,气候属于大陆性季风气候型;春季干旱多风,夏季炎热多雨,冬季干旱寒冷,年均温 12.2℃,最高气温 39.7℃,最低气温 -19.6℃,降水量近 700 mm,多集中在 7-8 月。

## 2 研究材料与方法

### 2.1 研究材料

在油松侧柏混交林中设置 40 m × 40 m 标准地作为试验地,用铁蒺藜四周围起来以防止游人、牲畜的随意进入。标准地内土层厚度为 40~60 cm,土壤粘重、通气透水性较差;林下灌木为荆条(*Verbenaceae*)、酸枣 [*Ziziphus jujuba* Var. *Spinosa* (Bunge) Hu]、孩儿拳头(*Grewia biloba* vra)和构树(*Broussonetia papyrifera*),盖度 80%以上。林相整齐,长势中庸。试验地油松平均树高 8.4 m,平均胸径 15.9 cm;侧柏平均树高 10.7 m,平均胸径 20.9 cm。

### 2.2 研究方法

2.2.1 树木径向变化的测定及其生长的确定 选择 3 株油松(*Pinus tabulaeformis*,胸径 14.9 cm、15.8 cm、14.2 cm,树高 8.5 m、8.9 m、8.4 m)和 3 株侧柏(*Platycladus orientalis*,胸径 20.5 cm、22.8 cm、22.4 cm,树高 10 m、9.1 m、10.3 m)作为样本,

在 1.3 m 树高处安装 DC 型植物生长测量仪(德国, Ecomatick 公司)从 6-11 月连续测定树干的径向变化,每 5 min 记录一次数据。

本试验采用单通道树木径向变化记录测量仪,利用下面公式来计算树干周长:

$$V = R \times CF \quad (1)$$

式中:V——茎杆周长的变化量(μm);R——通道所截获的电阻值(欧姆);CF——每台仪器的矫正值。

树木径向增长(Stem radius increment),简称 SRI(图 1),指因为树木的生长而引起的径向增长,通常用径向生长计测量出来的结果包含因气象因素影响的变化量和因生长造成的变化量,四阶段法旨在分离出 SRI。

四阶段法是 Dowens 等通过方法论描述完成的,将近似 24 h 的生理周期划分为三个分界清晰的阶段。这三个阶段定义如下:(1)收缩阶段,开始于上午的最高值到日最低值结束。(2)膨胀阶段,从一天中的最低值开始到第二天的最高值结束。(3)树干径向增长阶段,如果膨胀阶段超出了前一天的日最高值,那么从刚刚超出的那一刻算起到这天日最高值结束。如果没有超出,则认定增长量为零。人们通常通过比较两天(大约两个周期)的最高值来计算树干的径向增长量。(4)三个阶段的总合统称为第四阶段<sup>[7]</sup>。

根据圆周长的计算公式可以轻易得出树干周长的变化量与半径(直径)的变化量呈直线线性关系,所以树干茎周长的变化可以替代树干胸径变化。本文在论述中运用了两个径向变化因素:树干茎周长变化,树干茎周长生长量。

2.2.2 树干液流的测定 在上述所选的 3 株油松和 3 株侧柏样木上,分别在 1.7 m 树高处的西北侧安装 SF-L 型热扩散式树液流测定仪(德国, Ecomatick 公司)从 6-11 月连续测定树干的液流变化,每 30 min 记录一次数据。

SF-L 型热扩散式树液流测定装置包括 4 根热电偶探针,其 4 根探针中只有中间的上针加热,左右两针与底针间的温差  $TR_1$  和  $TR_2$  就是树干两个高度间的自然温差。

自然温差

$$TR = (TR_1 + TR_2) / 2 \quad (2)$$

温差更正

$$TC = T - (TR_1 + TR_2) / 2 \quad (3)$$

树干液流速率

$$Uc = 0.714 \times \left( \frac{TC_{max} - TC}{TC} \right)^{1.231} \quad (4)$$

式中:  $U_c$ ——树干液流速率 [ $\text{ml}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ];  
TCmax——温差最大值,即在降雨日液流速度为零,空气湿度 100 % 时的温差值。

2.2.3 土壤水势的测定 在所选的 3 株油松和 3 株侧柏样木上,分别在树根部地面下 20 cm 深土壤中埋设 EQ 土壤水势仪(德国,Ecomatick 公司)从 6 - 11 月连续测定树下土壤水势变化,每 30 min 记录一次数据。

2.2.4 气象因子的测定 气象数据由试验地旁的标准气象站观测而来。

其中,空气水汽压亏缺(kPa),由以下公式求出:

$$D = ae^{\left(\frac{bT}{T+c}\right)} (1 - RH)$$

(5)

式中:  $RH$ ——空气湿度;  $T$ ——摄氏温度,常数  $a = 0.611 \text{ kPa}$ ,  $b = 17.502$ ,  $c = 240.97$  <sup>[8]</sup>。

3 结果与分析

3.1 油松、侧柏树干径向变化与茎液流速率的动态分析

从图中可以看出,油松与侧柏的树干周长的变化趋势是相同的,由于在相同的立地条件下,所以初步推断影响两个树种树干周长变化趋势的气象因子是大致相同的。

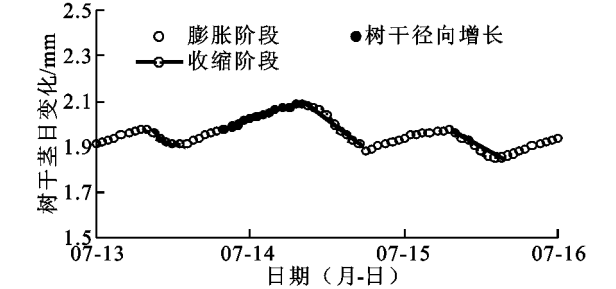


图 1 树干径向生理周期中三个阶段的划分

另外,比较两个树种的树干径向变化量可以得出:侧柏的径向变化幅度要大于油松,经计算,油松

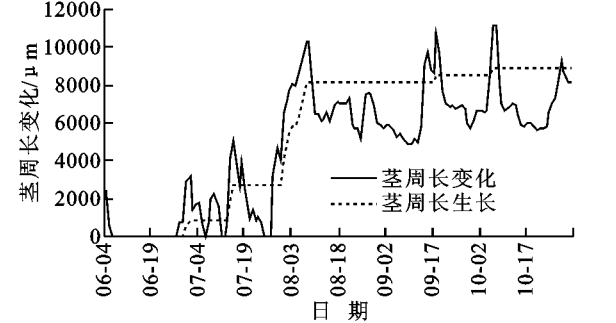


图 3 油松长期树干茎周长动态变化

3.2.1 土壤水势 经分析油松、侧柏的树干茎周长生长量与土壤水势没有相关性,树干茎周长变化与日变化量只有侧柏与土壤水势保持了低显著水平的

树干周长的日平均变化幅度为 579.01  $\mu\text{m}$ ,胸径的日平均变化幅度为 184.3  $\mu\text{m}$ ,侧柏树干周长的日平均变化幅度为 2 204.82  $\mu\text{m}$ ,胸径的日平均变化幅度为 701.81  $\mu\text{m}$ 。

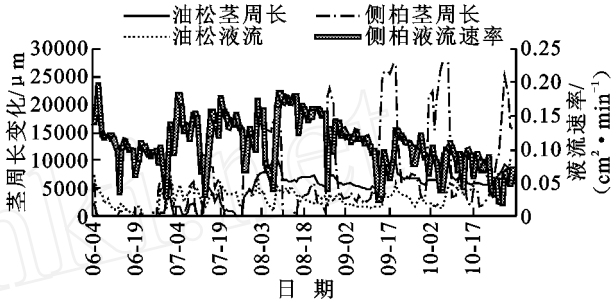


图 2 油松、侧柏长期树干茎周长与液流速率动态变化

经计算,2007 年 6 - 10 月油松的日平均液流速率为 0.029 8  $\text{ml}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ,侧柏的日平均液流速率为 0.108 1  $\text{ml}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ,侧柏日平均液流速率为油松的三倍多,而侧柏树干周长和胸径的日变化幅度是油松的三倍多。从表 1 中可以看出油松、侧柏的茎周长变化与其液流速率关系显著,但相关程度不大,这说明茎液流活动的确能引起树干径向的微变化,但不唯一;油松为正相关,侧柏为负相关,观察数据后认为可能是由于观测期的几次降水,浸水后的侧柏树皮过于松软,导致树干径向变化测量结果出现迟钝、滞后的现象。

表 1 油松、侧柏茎周长变化与液流速率之间的

| Pearson 相关系数 |          |            |
|--------------|----------|------------|
|              | 油松茎周长变化  | 侧柏茎周长变化    |
| 油松茎液流速率      | 0.290 ** | -          |
| 侧柏茎液流速率      | -        | - 0.387 ** |

注: \*\*表示  $P < 0.01$  水平显著。

3.2 油松、侧柏树干径向变化与气象因子的动态分析

按照周期分段法法计算油松、侧柏的茎周长变化和茎周长的生长量,如图 3 - 4。

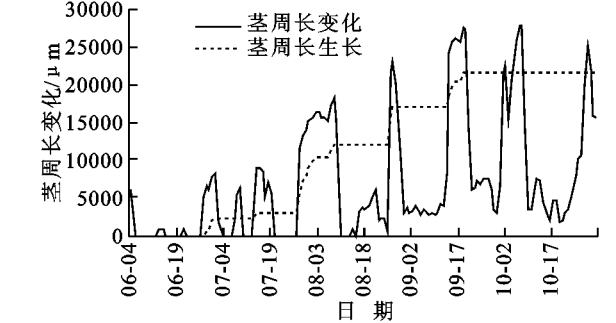


图 4 侧柏长期树干茎周长动态变化

相关性,而且相关程度极低,不到 0.2。例如,土壤水势在无雨期时保持了长时间的低水平,8 月 26 日,9 月 13 日、14 日三天日均降水不足 10 mm 的降

雨(9.5 mm、7.1 mm、7.6 mm)并没有引起土壤水势的明显增加,而降雨的确造成了树干径向变化第三阶段的延迟,即树干周长的持续增长(油松:2.29 mm、0.79 mm、3.36 mm,侧柏:21.25 mm、4.32 mm、15.98 mm),使其趋势关系与平日相悖。这说明土壤水势对树干径向变化的影响不明显,不是直接影响因子。

表 2 油松、侧柏茎周长动态与环境因子之间的

Pearson 相关系数侧柏茎周长

| 项 目     | 油松       |          | 侧柏       |          |
|---------|----------|----------|----------|----------|
|         | 变化       | 生长量      | 变化       | 生长量      |
| 油松土壤水势  | 0.11     | -0.06    | 0.17 *   | -0.01    |
| 侧柏土壤水势  | 0.06     | -0.05    | 0.01     | -0.03    |
| 空气水汽压亏缺 | -0.56 ** | -0.45 ** | -0.58 ** | -0.51 ** |
| 日平均气温   | -0.51 ** | -0.57 ** | -0.41 ** | -0.73 ** |
| 日最高气温   | -0.53 ** | -0.54 ** | -0.47 ** | -0.69 ** |
| 日最低气温   | -0.42 ** | -0.53 ** | -0.28 ** | -0.69 ** |
| 日温差     | -0.24 ** | -0.07    | -0.40 ** | -0.05    |
| 平均相对湿度  | 0.29 **  | 0.12     | 0.43 **  | 0.09     |
| 日降水量    | -0.07    | -0.12    | -0.01    | -0.12    |
| 平均风速    | -0.20 *  | -0.26 ** | -0.08    | -0.24 ** |
| 日照时数    | -0.03    | 0.08     | -0.27 ** | 0.04     |

\*  $P < 0.05$  \*\*  $P < 0.01$ 。

3.2.2 空气水汽压亏缺与相对湿度 油松、侧柏树干的茎周长变化、生长量与空气水汽压亏缺之间都呈显著负相关关系。这与树干液流速率与空气水汽压的趋势关系相同。说明空气水汽压亏缺是影响油松、侧柏树干径向变化和树木生长的气象因素之一。

油松、侧柏树干的茎周长变化与相对湿度呈正相关,但茎生长量与相对湿度不相关,说明空气的相对湿度的确影响油松、侧柏树干的径向变化,但对两树种的生长不起决定性作用。

空气水汽压亏缺和相对湿度与树干茎周长变化的关系,前者为负相关,后者为正相关,这是在相对湿度很高或空气水汽压亏缺很低的天气条件下(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<sup>[6]</sup>。

3.2.3 气温 油松、侧柏树干的茎周长变化与日平均气温、日最高气温、日最低气温和日温差的关系显著,呈负相关关系,且最有效影响茎周长变化的气象因素是日最高气温。这是由于研究期雨水较充足,空气湿度大和较高的温度导致树干茎流量减少所造成的。

油松、侧柏树干的茎周长生长量与日平均气温、日最高气温和日最低气温的关系显著,呈负相关关系,最有效影响茎周长生长量的气象因素是日平均气温。大多研究都证明气温确是影响树木生长的决

定因素之一,生长季高温有利于树木的生长,但树木的生长与气象因素的关系是极其复杂的,有待进一步研究<sup>[1]</sup>。此研究领域现阶段的认识为在生长季开始时,最低温度的升高有利于延长生长季,故温度与年轮宽度(干径向生长)呈正相关,而在生长旺季,温度升高会导致蒸散加剧,土壤含水量降低,从而抑制树木的生长,故多表现出与年轮宽度(干径向生长)呈负相关<sup>[17]</sup>。

3.2.4 日降水量 从表 2 可知油松、侧柏树干径向变化与日降水量没有关系,而降雨确实引起了树干径向变化第三阶段的延续,但是在没有降水的时候,空气水汽压亏缺、气温等气象因素亦可以引起树干的径向变化,所以在长时间序列的尺度上,树干径向变化与日降水量表现为不相关。另外,降水量并不直接影响树木的生理变化,而要经过影响土壤水分变化而起间接作用,具有滞后性和其他气象因子的限制也是造成有相关性的主要原因。

3.2.5 日平均风速和日照时数 总体来看,油松、侧柏树干茎周长生长量都与日平均风速关系显著。油松树干茎周长变化与日平均风速在 5% 显著水平下显著。都呈正相关关系,但相关程度都很低。这是因为大风能带走林地上方近乎饱和的空气,促进树木蒸腾,加大树干茎流,但风速过大也能使树木叶片毛孔关闭,不利于蒸腾。

油松、侧柏树干的茎周长日变化量与日照时数呈显著关系,且为负相关。侧柏茎周长变化与日照时数关系显著,亦呈负相关,但相关程度比较低,只有 -0.27。许多研究表明适度的太阳辐射能促进树木的生长,但由于实验条件限制,在本研究中用日照时数来替代太阳辐射,其中所造成的偏差在所难免。

3.2.6 油松、侧柏树干径向动态模拟 以 2007 年 6 - 10 月时间段内测定的树干径向变化、树干茎液流和各气象因子数据为基础,选择油松、侧柏树干茎周长变化  $V_1$  和茎周长生长量  $V_2$  为因变量,树干液流速率和各气象因子为自变量建立回归模型。分别为:

多元逐步回归分析表明,在树干茎周长变化模型中,油松的模拟程度( $R^2 = 0.504$ )要优于侧柏( $R^2 = 0.356$ ),两树种的影响因子只共同拥有空气水汽压亏缺,油松的茎周长变化趋势还受到日照时数、日温差和日平均气温的影响,而影响侧柏的气象因子还有日平均风速。

两个树干径向变化因素中,对茎周长生长量的模拟是模拟程度最好的,对油松和侧柏的解释程度分别为 0.563, 0.691, 经过对比发现影响两树种的气象因子十分相似,都有空气水汽压亏缺、日照时

数、日平均气温、日平均风速、日最低气温、土壤水势和日平均相对湿度,而侧柏多出了侧柏液流速率一个因子。由此可知,油松、侧柏两树种的径向生长主要受水汽压亏缺、日照时数、温湿度、土壤水势甚至

风速的影响,与众所周知的茎液流影响因子相同,但油松的径向生长在茎液流变化时变化不如侧柏敏感,导致对油松茎周长生长量回归分析时将茎液流速率排除在解释因子之外。

表 3 油松、侧柏树干径向变化与环境因子的多元回归模型

| 品种 | 回归模型  | $R^2$ |
|----|---|-------|
| 油松 | $V_1 = 11918.644 - 3395.384x_1 + 457.225x_2 - 384x_3 - 116.586x_4$  | 0.504 |
|    | $V_2 = 21729.39 - 4594.823x_1 + 490.758x_2 - 781.073x_4 - 169.711x_5 + 643.549x_6 - 2.03x_7 - 85.983x_8$                    | 0.563 |
| 侧柏 | $V_1 = 12556.01 - 8887.162x_1 + 200.594x_5$   | 0.356 |
|    | $V_2 = 50972.063 - 8397.074x_1 + 633.195x_2 - 1853.104x_4 - 299.972x_5 + 950.998x_6 - 4.251x_7 - 164.564x_8 + 54196.122x_9$ | 0.691 |

注:  $x_1$ :空气水汽压亏缺(kPa);  $x_2$ :日照时数(h);  $x_3$ :日温差(°);  $x_4$ :日平均气温(°);  $x_5$ :日平均风速(dm/s);  $x_6$ :日最低气温(°);  $x_7$ :土壤水势(kPa);  $x_8$ :日平均相对湿度;  $x_9$ :侧柏液流速率[ml/(cm<sup>2</sup>·min)]。

4 结论与讨论

通过相关分析和逐步回归分析发现,两种分析的结果不是完全相同的,譬如对油松、侧柏树干茎周长变化量的相关分析结果中,日最高气温与两树种的相关性是显著的,而日照时数是不相关的,但在拟合模型中,日最高气温被排除,日照时数加入解释因子当中,日照时数并不直接作用于树干茎周长的生长,而是通过改变空气温湿度等因子来影响树木径向生长的,这就使得在两变量的相关分析中变现为不相关,而在逐步回归分析中由于确实对树木径向生长起到了关键作用而被认定为解释因子。

按照常理,较高的气温有利于光合作用,应该有利于树木的径向生长,增加树木年轮的宽度<sup>[5]</sup>。Sheppard、Akkemik、Mäkinen 以及 Deslauriers 的研究亦证明生长季开始时最低温度的升高有利于延长树木的生长时间,增加树木径向生长量<sup>[7,9,12,15]</sup>。但本文所作分析表明油松、侧柏的树干茎周长生长量与气温呈负相关关系,Rolland、Larsen 等和 Szeicz 等研究发现,当生长季的温度过高而水分又不足时,生长季的高温多表现为与年轮宽度的负相关,抑制了树木的径向生长<sup>[11,14,16]</sup>,这与本文的研究结论相符。

研究表明,当树木生长季节需要充分的水分和适合生长的温度时,强度的太阳辐射会使表层土壤的含水量降低而不利于树木根系吸收土壤肥力,结果导致减缓树木的生长<sup>[13-14]</sup>,本文用日照时数来代替由于设备问题而无法测定的太阳辐射,但日照时数并不能反映太阳辐射的强弱,而树木光合作用对阳光的需求使得茎周长生长量模型中日照时数的系数为正。

从目前研究状况来看,通过古树的年轮特征来推测若干年前的气候已经成为国内外研究的一个热

点,但其中也存在了许多不确定因素,为了更能精确地研究年轮与其影响因子的关系,对现在树木生长与气候关系的研究就显得十分必要,也会是未来研究的一个方向,运用现代科技在这一领域的进一步综合研究将会对人类文明、自然科学的进步产生重大贡献。

参考文献:

[1] 范玮熠,王孝安. 树木年轮宽度与气候因子的关系研究进展[J]. 西北植物学报,2004,24(2):345-351.

[2] 张寒松,韩士杰,李玉文,等. 利用树木年轮宽度资料重建长白山地区 240 年来降水量的变化[J]. 生态学杂志,2007,26(12):1924-1929.

[3] 陈振举,何兴元,陈玮,等. 沈阳福陵油松年轮对全球性气温波动的响应[J]. 应用生态学报,2007,18(9):1946-1952.

[4] 范敏杰,袁玉江,魏文寿,等. 用树木年轮重建伊犁南山北坡西部的降水量序列[J]. 干旱区地理,2007,30(2):268-273.

[5] 邵雪梅,范金梅. 树轮宽资料所指示的川西过去气候变化[J]. 第四纪研究,1999(1):81-89.

[6] 熊伟,王彦辉,于澎湃,等. 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[J]. 生态学报,2007,27(2):432-441.

[7] Akkemik Ü. Dendroclimatology of umbrella pine (*Pinus pine* L.) in Istanbul[J]. Tree-Ring Bulletin,2000,56:17-20.

[8] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environment biophysics [M]. New York: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg,1998:36-51.

[9] Deslauriers A, Morin H, Urbinati C, et al. Daily weather response of balsam fir stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Quebec[J]. Trees:structure and function,2003,17(6):477-484.

(下转第 55 页)

## 4 结 语

通过对黄土高原小流域水土保持措施对下垫面抗蚀力的影响进行了深入的分析。建立了水土保持措施对下垫面抗蚀力影响的定量研究指标体系,并建立了水土保持措施对小流域抗蚀力研究的一套评价方法。这个指标体系也可以用于多个影响因素对下垫面抗蚀力的研究。将该研究方法应用于岔巴沟地区具有典型性。在该地区应用后得出的结论与实地考察得出的结论相符合。因此,该方法在黄土高原小流域下垫面抗蚀力的研究中具有一定的科学性和有效性。由于数据的限制,未能将一些小措施加入到该评价体系。随着科学技术的发展和黄土高原小流域治理的不断完善,对黄土高原小流域抗蚀力的研究有待进一步的探索。

### 参考文献:

- [1] 冉大川,刘斌,罗全华,等. 泾河流域水土保持措施减水减沙作用分析[J]. 人民黄河, 2001, 23(2): 9-11.
- [2] 朱金兆,胡建忠. 黄河中游地区侵蚀产沙规律及水土保持措施减洪减沙效益[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(3): 41-48.
- [3] 赵东波. 基于高分辨率遥感图像的水土保持措施信息的提取和分析[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2007.
- [4] 李发斌,王青,李树怀. 王家沟流域水土保持工程措施经济效益分析[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 237-240.
- [5] 康玲玲,王云璋,王霞. 黄土高原沟壑区水土保持综合治理关键措施与组合研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 59-62.
- [6] 熊运阜,王宏兴,白志刚,等. 梯田、林地、草地减水减沙效益指标初探[J]. 中国水土保持, 1996(8): 10-14.
- [7] 黎锁平. 水土保持综合治理效益的灰色系统评价方法[J]. 水土保持科技情报, 1995(4): 23-26.
- [8] 胡良军. 基于 GIS 的区域水土流失定量评价指标研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18(5): 24-27.
- [9] 张胜利,李体,赵文林,等. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
- [10] 高振纪,郭伦,马修军. 黄土高原水土流失监测指标体系研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 53-55.
- [11] 杨皖苏. 关于水利科学基础学科中若干问题的 Delphi 调查[J]. 水科学进展, 1993, 4(4): 316-322.
- [12] 侯岳衡,沈德家. 指数标度及其与几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, 1995, 15(10): 43-46.
- [10] Downes G, Beadle C, Worledge D. Daily stem growth patterns in irrigated *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in relation to climate[J]. *Trees*, 1999, 14: 102-111.
- [11] Larsen C P S, MacDonald G M. Relations between tree-ring widths, climate, and annual area burned in the boreal forest of Alberta[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1995, 25: 1746-1755.
- [12] Mäkinen H P, Nöjd K, Mielikäinen. Climatic signal in annual growth variation in damaged and healthy stands of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in south Finland[J]. *Trees*, 2001, 15: 177-185.
- [13] Oberhuber W, Stumböck M, Kofler W. Climate-tree growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness[J]. *Trees*, 1998, 13: 19-27.
- [14] Rolland C. Tree-ring and climate relationships for *Abies alba* in the internal Alps[J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1993, 53: 1-11.
- [15] Sheppard P R, Graumlich L J, Conkey L E. Reflected-light image analysis of conifer tree rings for reconstructing climate[J]. *Holocene*, 1996, 6: 62-68.
- [16] Szeicz, J M, MacDonald G M. A 930-year ring-width chronology from moisture-sensitive white spruce (*Picea glauca* Moench) in the northwestern Canada[J]. *The Holocene*, 1996, 6: 345-351.
- [17] 郑淑霞,上官周平. 树木年轮与气候变化关系研究[J]. 林业科学, 2006, 42(6): 100-107.
- [18] Fritts H C. The relevance of dendrographic studies to tree ring research[J]. *Tree Ring Bull.*, 1962, 24: 9-11.

(上接第 49 页)