

# 桉树人工林冠层气象因子对雨季土壤水分的影响

黄志宏<sup>1</sup> 周国逸<sup>1</sup> MORRIS J.<sup>2</sup> 褚国伟<sup>1</sup> 张宁南<sup>3</sup> 尹光彩<sup>1</sup>

(1. 中国科学院华南植物研究所, 广东 广州 510650; 2. Center for Forest Tree Technology, Forest Science Center (PO Box 137) Heidelberg 3084 Australia; 3. 中国林业科学院热带林业研究所, 广东 广州 510520)

**摘要:** 对雷州桉树人工林集水区土壤水分及林冠层气象因子一年内(1999/10/01-2000/09/30)雨季的定位观测结果进行了典型相关分析, 得出如下结果: (1)在雨季, 土壤含水量(SMC)随着土壤深度变化而变化, 在 0-4 m 范围内层间含水量差异显著; 雨季各层 SMC 主要受降雨量的影响; (2)受充沛降雨量的强烈影响, 雨季各层 SMC 随着时间推移而逐渐升高; 雨季各层含水量变异系数较干季同层次的变异系数大; (3)雨季地下 50 cm 深(SM50)处 SMC 变化曲线波动较大, 与太阳辐射( $R_s$ )、降雨量(P)、风速(W)、水汽压差(VPD)、最高温度( $T_{max}$ )相关性极显著( $\alpha=0.001$ ); (4)较深层次(即 150 cm, 250 cm, 350 cm)土壤含水量变化的影响因素具有某种程度的相似性; 但与较浅层(50 cm)SMC 的主要影响因素和变化趋势均不同; (5)在雨季, 三个典型相关系数均达到显著性水平( $\alpha=0.01$ )。三组典型相关及重叠数值以第一典型相关值较大, 第二、第三的重叠量较小, 故林冠层气象因子主要由第一典型因素影响土壤含水量。林冠层气象因子通过 3 个典型变量可说明 SMC 总变异量的 30.9%。

**关键词:** 桉树人工林; 土壤水分; 雨季; 气象因子; 典型相关分析

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2003)03-0197-08

## Effects of Canopy Meteorological Factors on Soil Moisture Content during Rainy Seasons in an Eucalypt Plantation

HUANG Zhi-hong<sup>1</sup> ZHOU Guo-yi<sup>1</sup> MORRIS J.<sup>2</sup>,  
CHU Guo-wei<sup>1</sup> ZHANG Ning-nan<sup>3</sup> YIN Guang-cai<sup>1</sup>

(1. South China Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. Center for Forest Tree Technology, Forest Science Center (PO Box 137) Heidelberg 3084 Australia;

3. The Research Institute of Tropical Forestry, the Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

**Abstract:** Canopy meteorological factors, including solar radiation ( $R_s$ ), precipitation (P), wind speed (W), relative humidity (RH), maximum temperature ( $T_{max}$ ) and minimum temperature ( $T_{min}$ ), and soil moisture content (SMC) within 4 m soil depth were daily monitored from Oct.1, 1999 to Sep. 30, 2000 in an eucalypt plantation in Leizhou peninsula, Guangdong, China. Canonical correlation analysis (CCA) was employed to assess impacts of canopy meteorological factors on SMC. SMC differed significantly at different layers within 4 m soil depth, which was influenced mainly by precipitation in rainy seasons. SMC in rainy seasons increased with time due to the abundant precipitation. The coefficient of variance of SMC in rainy seasons was higher than that in dry seasons. SMC at 50 cm soil depth fluctuated obviously, which had a significant correlation with some meteorological factors such as solar radiation, precipitation, wind speed, vapour pressure deficit, and maximum temperature. Meteorological factors that affected soil moisture at deep layers (150, 250, and 350 cm) had almost similar pattern but differed from that at layer of 50 cm. The values of canonical correlation coefficients in rainy seasons were

收稿日期: 2002-11-12 接受日期: 2003-03-25

基金项目: 中国科学院创新工程项目(KZCX2-407); 国家自然科学基金(39928007、FST97/77); 中国科学院海外杰出青年项目支持。

significant. Among the three canonical correlation coefficients and variables, the value of the first canonical correlation and its variance in covariates explained by canonical variables was the highest, which indicated that the canopy meteorological factors affecting soil moisture content were mainly by the first canonical variables.

**Key words:** Eucalypt plantations; Soil moisture content; Rainy seasons; Meteorological factors; Canonical correlation analysis

土壤是研究森林水文效应的一个关键作用界面<sup>[1]</sup>,分析土壤水分的影响因子是研究森林生态系统水文效应的一个重要切入点<sup>[2]</sup>。土壤水分变化具有时空变异性<sup>[3-9]</sup>,土壤水分受林冠层气象因子的影响较大,并且有研究认为这种影响受冠层气象因子在量上的大小及土壤水分状态不同而有差异<sup>[7]</sup>。

气象因子,如降雨量、太阳辐射、平均与极端温度、水汽压差等,在生态学模型中常常是作为驱动因子的<sup>[8,9]</sup>。因此,可以将林冠层气象因子与土壤水分视为一个整体的两个方面。我们已对桉树人工林冠层气象因子对干季土壤水分动态影响进行了一定研究<sup>[10]</sup>。本文在前文的基础上,采用一种较成熟的统计方法—典型相关分析来探讨桉树人工林冠层雨季气象因子对土壤水分的影响,从林冠层气象因子的角度分析桉树人工林对林地土壤水分动态的作用特点,为研究桉树人工林生长与林冠层气象因子及土壤水分关系打下基础。

## 1 研究地概况

研究地位于广东遂溪县雷州林业局纪家林场(20°52'N, 109°25'E),属热带北缘海洋性季风气候。年均气温 23.5℃,最热月 7 月,平均气温 28.9℃,极端最高温 37.2–38.8℃;最冷月 1 月,平均气温 15.2℃,极端最低温 1.4–3.6℃;年降雨量 1 885 mm,分配不均,干季、雨季差别明显,4–9 月为雨季,降雨

量约占全年的 80%;年蒸发量 1 763 mm,年均相对湿度 80.4%。平均海拔高约 30 m。桉树人工林主要有尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)、刚果 12 号桉(*E. ABL12*)、巨桉(*E. grandis*)、赤桉(*E. camaldulensis*)、雷林 1 号桉(*E. leizhouensis* No. 1)、W5(*E. ABL12*)、柠檬桉(*E. citriodora*)等。试验地林分为桉树纯林,主要是尾叶桉和 W5,样地林分密度为 1 970 株  $\text{hm}^{-2}$ ,平均树高 18 m,郁闭度 0.6。林地平整,土壤为粘质砖红壤,较瘠薄。林下植被稀少,主要有鹧鸪草(*Eviachne pallascens*)、坡柳(*Dodencia viosa*)等。6–11 月时有台风侵袭,风力一般达 9–10 级,对林木生长影响很大。

纪家林场样地土壤理化性质概况如表 1 所示<sup>[11]</sup>。从表 1 中可知,纪家样地土壤属粘质砖红壤,土壤中铝、铁化合物含量高,  $\text{SiO}_2$  含量不高。

## 2 研究方法

### 2.1 数据获取

采用小集水区定位研究方法,观测时段为 1999 年 10 月 1 日至 2000 年 9 月 30 日。小集水区面积约 260  $\text{hm}^2$ 。

**土壤水分测定** 在桉树人工林小集水区內选择有代表性样地 1 个,将土壤含水量测定仪(Theta Probes, Delta T Devices, UK)的水分感应探测探头分别埋于 50 cm、150 cm、250 cm、350 cm 不同

表 1 雷州半岛桉树人工林地土壤粘粒 (<0.002 mm) 化学及物理分析  
Table 1 Results of chemical and physical analysis of clay (<0.002 mm) under eucalypt plantation in Leizhou peninsula

母质 Parent material	层段 Soil horizon	粘粒化学成分 Chemical composition of clay ( $\text{g kg}^{-1}$ )										
		烧失量 Ignition loss	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	MnO	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
玄武岩 Basalt	0–15 A	168.2	294.9	177.2	330.8	13.37	1.201	5.409	5.615	1.096	1.110	1.52
	15–23 AB	156.3	306.2	175.8	330.5	12.14	1.326	3.556	7.456	1.883	1.015	1.75
latosol	23–100 B	164.4	293.7	180.7	331.0	13.33	1.607	3.298	2.963	1.320	0.711	1.51
		游离铁 Free $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ( $\text{g kg}^{-1}$ )	阳离子交 换量 CEC ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	交换性 Ca Exch-Ca ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	交换性 Mg Exch-Mg ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	砂粒 2.0– 0.05 mm Coarse sand	粉粒 0.05– 0.0002 mm Silt ( $\text{g kg}^{-1}$ )	粘粒 <0.002 mm clay	质地 Soil texture class			
	0–15 A	120.4	7.73	1.23	1.03	89.3	207.0	704.2	粘土 clay			
	15–23 AB	115.5	4.09	痕迹 Trace	3.26	235.6	134.7	630.5	粘土 clay			
	23–100B	122.5	4.09	痕迹 Trace	3.49	176.0	205.7	619.5	粘土 Silty clay			

引自 林书蓉等<sup>[11]</sup>,有改动。After Lin S R<sup>[11]</sup>。

深度的土层内, 感应器数据传输时间步长设为 30 min 次<sup>-1</sup>, 自动记录数据。本文所讨论的系统含水量是指地下 0-4 m 范围的土壤含水量(soil moisture content, SMC)。

**林冠层气象因子测定** 林冠层气象因子(canopy meteorological factors, CMF) 测定地点与土壤水分测定点相同。采用林冠层气象自动化观测系统(Tain Electronics, Box Hill, Australia), 此系统由微功率数据采集器(micropower data loggers)和环境传感器(environmental sensors)组成。测定内容为辐射( $R_s$ )、降雨量( $P$ )、风速( $W$ )、最高温度( $T_{max}$ )、最低温度( $T_{min}$ )、相对湿度( $RH$ )。水汽压差( $VPD$ )由  $RH$ 、 $T_{max}$  及  $T_{min}$  根据公式(1)计算得到<sup>[2]</sup>。上述所有数据均为自动记录, 每月将数据用专用电脑从数据存储器内取出。

$$e_a = 0.61 \exp \frac{17.27T}{T+237.3}, e_d = RH e_a, VPD = e_a - e_d \quad (1)$$

式中:  $e_a$  为温度  $T$  时的饱和水汽压 (kPa),  $e_d$  为实际水汽压(kPa),  $RH$  为相对湿度(%),  $T$ : 温度(°C)。

## 2.2 数据处理方法

数据分析采用典型相关分析(canonical correlation analysis, CCA), 典型相关分析用于揭示两组多元随机变量之间的关系, 一组为自变量(解释变量)组, 另一组是标准变量组。与其它相关统计方法相比, 典型相关分析特别适合于所分析的标准变量组的各个变量之间本身具有较强的相关性。这种关系可表达为两个以上  $X$  变量与两个以上  $Y$  变量间的线性组合, 使其简单相关达到最大。用方程式表示如下:

$$U = a_1 y_1 + a_2 y_2 + a_3 y_3 + \dots + a_k y_k \quad (2)$$

$$W = b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_k x_k \quad (3)$$

其中,  $U$ 、 $W$  为典型变量,  $a_i$ 、 $b_j$  ( $i, j=1, 2, \dots, k$ ) 为线性组合的系数, 也称典型权数。

将收集的数据分成两类, 即 SMC 因子和 CMF。土壤水分按照不同深度分 50 cm、150 cm、250 cm、350 cm 4 个层次的子变量, 依次用 SM50, SM150, SM250, SM350 表示, 在分析表达式中用  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_4$  表示; CMF 由  $R_s$ 、 $P$ 、 $W$ 、 $VPD$ 、 $T_{max}$ 、 $T_{min}$  等 6 个子变量组成, 在分析表达式中用  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_6$  表示。

在以往的研究中, 由于样本数量局限而引起随机误差的影响可能会较大, 这已引起许多研究者的注意<sup>[3]</sup>。本试验中土壤水分监测是每日自动观测记

录, 而且其它观测项目也是同步记录, 样本数据可比性、数据精度及样本数量的局限性在一定程度上得到了改善。用统计软件 SAS6.11 进行统计分析。

## 3 结果和分析

### 3.1 土壤剖面含水量的垂直变化

对土壤水分垂直分布特征的定量研究分析, 采用了王孟本等<sup>[2]</sup>的标准差(S.D.)判别法。先进行雨季土壤剖面各层土壤含水量总体方差分析(ANOVA), 然后作不同土壤剖面层间含水量平均值多重比较( $q$  检验法)。总体方差分析及层间平均值差异显著性结果分别如表 2 和 3 所示。

表 2 雨季土壤含水量层间差异方差(ANOVA)分析( $\alpha=0.001$ )

Table 2 Homogeneity test of variances at different soil layers in rainy seasons ( $\alpha=0.001$ )

方差来源 Source of variance	离差平方和 Sum of squares of deviations	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 统计值 F value	F 检验值 Critical F value
组间 Between groups	0.240	3	8.008E-02	90.940	5.479***
组内 Within groups	0.641	728	8.881E-04		

表 3 雨季土壤含水量层间差异多重( $q$  检验法)比较( $\alpha=0.01$ )

Table 3 Multiple comparisons of variation of soil moisture content in soil layers in rainy seasons ( $\alpha=0.01$ )

	$x_1-x_4$	$x_1-x_3$	$x_1-x_2$
$x_1=0.453$	-0.048**	-0.01**	-0.023**
$x_2=0.476$	-0.025**	0.013**	
$x_3=0.463$	-0.038**	/	
$x_4=0.501$	/	/	

$x_i$ 、 $x_j$  为各层土壤含水量平均值( $i=1-4, j=2-4, i \neq j$ )。  $x_i$ 、 $x_j$  represent mean soil moisture content in layers ( $i=1-4, j=2-4, i \neq j$ )。

方差分析结果表明桉树人工林林地各层含水量差异显著( $\alpha=0.001$ ), 多重比较也表明层间差异达到显著水平( $\alpha=0.01$ ), SM50、SM150、SM250 和 SM350 的土壤含水量值对应的变异系数依次为 0.082, 0.063, 0.032, 0.064。这说明在雨季, 桉树人工林土壤含水量可分为 4 层—即活跃层(0-100 cm)、次活跃层(100-200 cm)、相对稳定层(200-300 cm)和次稳定层(300-400 cm)。从图 1 可以看出各层土壤含水量在雨季内的变化动态。

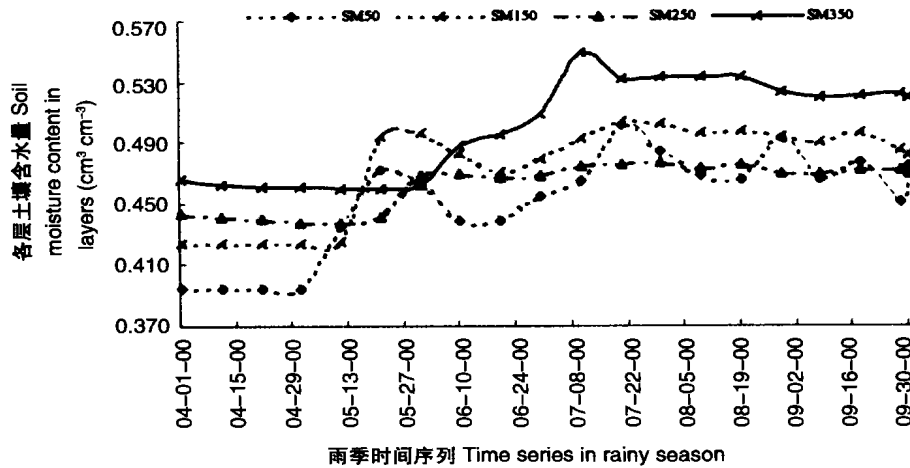


图 1 2000 年雨季土壤水分含量变化

Fig. 1 Distribution of soil moisture content in each layers during rainy season in 2000

SM50, SM150, SM250, and SM350 represent soil moisture at 50, 150, 250, and 350 cm, respectively.

表 4 雨季气象因子对土壤含水量的典型相关分析结果

Table 4 Effects of meteorological factors on soil moisture content in rainy season tested by canonical correlation analysis

典型相关与变量 Canonical correlation and canonical variables	典型相关系数 Canonical coefficient	第一变量组、第二变量组和第三变量组 First, second and third canonical variables
第一典型相关系数 First canonical correlation coefficient $r_1$	$r_1=0.618^{***}$	$U_1=0.516y_1+0.228y_2-0.443y_3+0.785y_4$
第一典型变量 First canonical variables ( $U_1, W_1$ )		$W_1=1.482x_1+0.398x_2-0.532x_3-0.967x_4-0.796x_5+0.074x_6$
第二典型相关系数 Second canonical correlation coefficient $r_2$	$r_2=0.542^{***}$	$U_2=1.508y_1-1.087y_2-0.077y_3-0.450y_4$
第二典型变量 Second canonical variables ( $U_2, W_2$ )		$W_2=-0.454x_1+0.692x_2+0.285x_3+0.008x_4+0.038x_5+0.230x_6$
第三典型相关系数 Third canonical correlation coefficient $r_3$	$r_3=0.280^{**}$	$U_3=0.585y_1-1.191y_2+2.488y_3-1.571y_4$
第三典型变量 Third canonical variables ( $U_3, W_3$ )		$W_3=0.534x_1+0.501x_2-0.303x_3+0.299x_4-0.552x_5+1.009x_6$

### 3.2 土壤含水量与林冠层气象因子变量间的典型相关分析

土壤 4 层水分子变量为  $y_1, y_2, y_3, y_4$ , 由此构成因变量  $Y$ ; CMF 6 个子变量  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ , 组成控制变量  $X$ 。对两组变量 ( $Y, X$ ) 作典型相关分析, 结果的选取满足  $\alpha=0.01$  的显著性水平, 并要求累积特征根百分比大于 85%, 据此选取前三个典型相关系数及典型相关变量。

表 4 结果表明 3 对典型相关变量具有以下 3 个特点:

第一, 在  $\alpha=0.001$  显著水平上有 2 个典型相关系数, 有一个相关系数在  $\alpha=0.01$  显著水平上; 累加特征根值为 96.8%。说明雨季的 6 个气象因子主要是通过 3 个典型因素 ( $U_i, W_i$ ) ( $i=1, 2, 3$ ) 影响 SMC。

典型变量表达式中各因子前系数的绝对值反映了对典型变量的贡献率大小, 其中正负号表明作用的方向性。( $U_i, W_i$ ) 为第一典型变量,  $U_1$  中土壤各层的负载系数呈现出相对平均的趋势, 主要体现在

各层系数绝对值相差较小。从系数绝对值来看, 对 SMC 影响较大的是 SM50 和 SM350 两层。雨季土壤浅层 SM50 较 SM150、SM250 的负载系数大, 说明该层对 SMC 变化有更重要的影响。土壤浅层 SM50 作为地表和大气作用界面层, 它是 4 个土壤层中最先接受降水的土层, 由于雨季存在较强的降水作用, SM50 层在土壤水分变化中起着较为重要的作用, 因此在土壤(将 4 个土壤层次作为一个整体来看)中所占的比例变大。

第二, 第一典型相关变量表达式  $W_1$  中,  $R_s$  的负载系数最大, VPD、 $T_{max}$  负载系数绝对值次之, 说明三者对 SMC 变化可能起着更多的作用。P 的系数虽不是最大的, 但不表明降雨量在系统水分含量中所起作用不重要; 相反, 这在一定程度上说明桉树人工林生态系统仅仅有充足的降雨量是不够的, 还需要有利于维持系统水分的其它因素的协同作用。

第三, 第二典型相关变量 ( $U_2, W_2$ ) 表达式  $U_2$  中, SM50、SM150 负载系数较大, 其余二者负载系数较小, 说明 SM50、SM150 对 SMC 影响较大。  $W_2$  中负

载系数较大的是  $R_s$  和  $P$ , 其余系数影响较小。  $R_s$  和  $P$  系数符号相反, 表明二者所起作用相反的, 前者通过蒸发使系统水分减少, 后者使系统水分增加。

### 3.3 林冠层气象因子对土壤水分影响的显著性检验

虽然通过研究 SMC 变化与 CMF 间的典型相关关系, 典型相关变量表达式可给出二者关系的一个总体轮廓, 但还不能确定各影响因子显著性程度。因此, 我们进一步作了典型变量中各因子间相关性检验。

如表 5 结果表明: SM50 处 SMC 和  $R_s$ 、 $P$ 、 $W$ 、 $VPD$ 、 $T_{max}$  之间的相关性达极显著水平 ( $\alpha=0.001$ )。因此影响蒸发、蒸腾作用的  $R_s$ 、 $P$ 、 $W$ 、 $VPD$ 、 $T_{max}$  等因素在雨季都可以明显改变 SM50 处 SMC 的状况。雷州地处中国南亚热带沿海, 雨季太阳辐射强烈、

降雨量充沛、台风、高温高湿, 是当地此时主要气候特征。这可能是雨季 SM50 处 SMC 变化曲线波动较大的主要原因。

SM150 处 SMC 和  $R_s$ 、 $W$ 、 $VPD$  相关性达极显著水平 ( $\alpha=0.001$ ), 和  $T_{max}$  相关性显著 ( $\alpha=0.05$ )。对影响 SMC 达显著水平因子的分析表明, 影响土壤较深层次(SM150, SM250, SM350)SMC 变化的因素有一定程度的相似性, 即能影响 SM150 处 SMC 的因子往往也是影响 SM350 处 SMC 的因子; 影响较深层次 SMC 变化的主要因素与表层 (SM50) 的不同, 因而其 SMC 的变化趋势也不同。说明 SMC 不仅受土壤所处地下深度影响, 同时还与环境因素(如降雨)作用强度与方式有关。其它地方的研究<sup>[14-19]</sup>也证实了这一点。

表 5 典型变量(X, Y)中各因子间相关性检验  
Table 5 Significance test among special variables in (X, Y)

控制变量 Independent variables (X)	SM50 显著性值 Significance for SM50	SM150 显著性值 Significance for SM150	SM250 显著性值 Significance for SM250	SM350 显著性值 Significance for SM350
辐射量 Solar radiation	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***
降雨量 Precipitation	0.000***	0.135	0.261	0.193
风速 Wind speed	0.001***	0.000***	0.000***	0.000***
水汽压差 VPD	0.000***	0.000***	0.003***	0.000***
最高温度 $T_{max}$	0.001***	0.002*	0.005*	0.007*
最低温度 $T_{min}$	0.066	0.166	0.246	0.723

### 3.4 土壤水分动态影响因素综合分析

SMC 与 CMF 典型相关变量给出了二者相互关系的总体轮廓, 显著性检验则指出了冠层气象因子与 SMC 相关关系的有效性。因此, 我们进一步分析环境因素各变量及土壤层含水量变量同 3 个典型变量, 即  $(U_1, W_1)$ 、 $(U_2, W_2)$  和  $(U_3, W_3)$  的相关性以及这些因素与典型变量间错综复杂的联系以得出一个综合的评价。

从表 6 可以看出: 3 个典型相关系数均达到

0.01 以上显著水平, 林冠层 6 个气象因子主要通过三个典型变量影响 SMC。CMF 第一典型变量 ( $W_1$ ) 可说明 SMC 第一典型变量 ( $U_1$ ) 总变异量 38.2%; SMC 第一典型变量 ( $U_1$ ) 可解释 SMC 变异量 68.3%; CMF 通过第一典型变量 ( $U_1, W_1$ ) 可以解释 SMC 总变异量的 26.1%。CMF 第二典型变量 ( $W_2$ ) 可说明 SMC 第二典型变量 ( $U_2$ ) 总变异量 29.4%; SMC 第二典型变量 ( $U_2$ ) 可解释 SMC 变异量 13.6%; CMF 与 SMC 重叠部分为 4.0%。即 CMF 通过第二典型变量

表 6 林冠层气象因素与各层土壤含水量的典型相关分析  
Table 6 Canonical correlation analysis for canopy meteorological factors and soil moisture at different layers

控制变量 Independent variables (X)	典型变量 Canonical variables			效标变量 Dependent variables (Y)	典型变量 Canonical variables		
	$W_1$	$W_2$	$W_3$		$U_1$	$U_2$	$U_3$
辐射量 $R_s$	0.096	-0.693	0.487	SM50	0.883	0.332	0.241
降雨量 $P$	0.345	0.844	0.138	SM150	0.815	-0.261	0.279
风速 $W$	-0.334	0.394	-0.321	SM250	0.730	-0.455	0.509
水汽压差 VPD	-0.354	-0.614	0.466	SM350	0.868	-0.400	0.047
最高温度 $T_{max}$	-0.287	-0.383	0.698				
最低温度 $T_{min}$	-0.374	0.039	0.812				
抽出变异数百分比 Pct Var DE	9.8	31.2	28.7	抽出变异数百分比 Pct Var DE	68.3	13.6	9.9
				重叠百分比 Pct Var CO	26.1	4.0	0.8
				$\rho^2$	0.382	0.294	0.079
				$\rho$	0.618***	0.542***	0.280*

( $U_2, W_2$ )可解释 SMC 总变异量的 4.0%。CMF 第三典型变量( $W_3$ )可说明 SMC 第三典型变量( $U_3$ )总变异量 7.9%; SMC 第三典型变量( $U_3$ )可解释 SMC 变异量 9.9%; CMF 与 SMC 重叠部分为 0.8%, 表明第一、第二典型变量可解释 CMF、SMC 大部分变异量, 第三典型变量的解释能力较弱, 可忽略。CMF 和 SMC 在第一至第三典型变量的重叠部分共计 30.9%, 即: CMF 通过 3 个典型变量可说明 SMC 总变异量的 30.9%。三组典型相关及重叠数值以第一典型相关较大, 第二、第三的重叠量较小, 可见 CMF 主要由第一典型变量影响 SMC。

CMF 与第一典型变量( $W_1$ )相关性较高者为 P、W、 $T_{\min}$ 、VPD、 $T_{\max}$ ; SMC 与第一典型变量( $U_1$ )相关系数多数在 0.8 以上。

#### 4 讨论

典型相关分析方法近年来在地学研究中已被广泛采用<sup>[17]</sup>。其突出特点是, 典型相关分析将每组变量作为一个整体看待, 通过典型负载系数可以定量判别不同因子对因变量的影响程度或对被解释变量的解释的贡献程度; 维度检验可以精简不显著的维度; 综合各种分析指标能对两个变量组之间的整体相关性进行评价, 真正反映两组变量间的线性相关情况。生态学中各种模型大都基于土壤-植被-大气连续体(Soil-Plant-Atmosphere-Continuum (SPAC))思想, 其中以气象因子为模型的主要驱动因子, 如 MAESTRO<sup>[18,19]</sup>、BIOMASS<sup>[20,21]</sup>和 MBL/SPA<sup>[22]</sup>等。气象因子对土壤水分的影响是一种具有整体性的相互作用, 因此, 从理论上来说, 典型相关分析法用来探讨林冠层气象因子对土壤水分变化具有较大的优越性。

土壤水分具有明显的时空尺度特征。雷州桉树人工林土壤水分在垂直剖面上差异显著, 其雨季土壤水分垂直分布是 SM50、SM150、SM250、SM350 的 SMC 分别为 0.453、0.467、0.463、0.501。结合在该地干季土壤含水量变化的研究结果<sup>[10]</sup>, 我们发现, 在整个干、湿季中桉树人工林土壤含水量变化曲线呈现出“V”字形, 这与本文所取时间段有一定关系, 干、雨季跨 2 个年份。如果单从一个年份来看, 则土壤含水量变化曲线近似于单峰曲线, 这与周国逸等<sup>[23]</sup>研究结果相似。雨季土壤 4 m 范围内的 SMC 维持在较高的水平, 明显较干季的高<sup>[10]</sup>。从 SMC 时间序列的变化趋势看, SMC 在干季是逐渐下降的, 在雨

季则是逐渐上升的。干季各层土壤含水量变异系数(CV)分别为 0.055、0.034、0.027、0.041, 而对应的雨季各层 CV 为 0.082、0.063、0.032、0.064。比较干季、雨季各层 CV 大小, 发现雨季的 CV 较同层干季的大。这种现象一方面反映了雨季降雨量充沛而集中, 可以不断地补充各层下渗以及蒸散所失去的水分; 同时, 雨季高温高湿、强烈的太阳辐射等因素使得土壤蒸发加大, 各层 CV 随之增大。出现这种变化的主要原因可能与干、湿季降水量及其分布差异等因素有关。

雨季与干季第一典型相关变量中负载系数较大的土壤深度是不同的。雨季中负载系数较高的是 SM50 和 SM350; 干季则是 SM250、SM350。出现这种情况的主要原因之一是干季、雨季降雨量大小、强度与分布有差异。干季降雨的频度与强度均较小, 不足以补充土壤蒸发量, 土壤处于较长时期的水分收支失衡状态, 水分积累为负, 因而较深土层的含水量逐渐占据系统贮水总量中的主导地位。

研究还发现, 雨季  $R_s$ 、P、W、VPD、 $T_{\max}$  同 SM50 相关性显著,  $R_s$ 、W、VPD、 $T_{\max}$  同 SM150、SM250、SM350 相关性显著。林冠层气象因子对不同深度土壤含水量产生的效果不同, 原因可能是雨季的降雨量及其他气象因子发生了较大的变化, 同时占主导地位的因子也发生了变化; 另外, 干季和雨季林冠层结构的变化, 导致对 SM150 处水分改变的影响也不一样。SM250 和 SM350 同  $R_s$ 、W、VPD 相关性极显著( $\alpha=0.001$ ), 同  $T_{\max}$  相关性显著( $\alpha=0.05$ ), 这表明水分在土壤较深层次的运动主要受  $R_s$ 、W、VPD、 $T_{\max}$  因素影响, 且与林地土壤入渗特征有关<sup>[24]</sup>。

从土壤水分运动的能量学角度来看, 土壤含水量还受温度的影响<sup>[25]</sup>, 温度变化引起地下水位变动从而影响地下水面上土壤持水量; 温度变化影响土壤导水率, 从而影响土壤水分入渗; 温度明显影响土壤水的蒸发性能。另一方面, 从桉树水分生理角度来看,  $R_s$ 、W、VPD、 $T_{\max}$  等也是影响桉树蒸腾作用的环境因素<sup>[15,16,26]</sup>, 因为蒸腾作用是系统贮水量下降的原因之一<sup>[27,28]</sup>, 树干树液流量变化与环境气象因子变化密切相关, 如每天树液流密度同当天的平均 VPD 成线性相关<sup>[29,30]</sup>。Kallarackal 等<sup>[31]</sup>根据其研究结果指出, 在印度南部桉树气孔导度除受大气中水汽压差调节外还受叶片水势调节, 根部甚至在受到轻微的水分胁迫下气孔导度会受到相当的影响, 水汽压差是影响蒸腾的主要变量; 单位土地面

积蒸腾的差异主要与叶面积差异成比例<sup>[32,33]</sup>。

可见,林地土壤水分受林冠层气象因子作用是十分复杂的。有待进一步研究的是桉树人工林蒸腾耗水量同林冠层气象因子以及土壤水分动态的关系。

### 参考文献

- [1] Yu Z Y (余作岳), Zhou G Y (周国逸), Peng S L (彭少麟). Comparative study on surface runoff for three types of vegetation in Xiaoliang experimental station [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 1996, 20(4): 355-362. (in Chinese)
- [2] Tian D L (田大伦), Xiang W H (项文化). Study on dynamic regularity of soil moisture in Chinese fir plantation [A]. In: Liu X Z (刘焯章). Long-term located research on forest ecosystem [C]. Beijing: Forestry Press of China, 1993. 209-215. (in Chinese).
- [3] Davidson J. Ecological aspects of *Eucalyptus* plantations [A]. In: White K, Ball J, Kashio M. Proceedings of the regional expert consultation on *Eucalyptus* Vol. 1 [C]. Bangkok: FAO Regional Office for Asia and the Pacific, 1993. 35-61.
- [4] Gong Y S (龚元石), Liao C Z (廖超子), Li B G (李保国). Spatial variability and fractal dimension for soil water content and bulk density [J]. Acta Pedol Sin (土壤学报), 1998, 35(1): 10-15. (in Chinese)
- [5] Qiu Y (邱扬), Fu B J (傅伯杰), Wang J (王军). Quantitative analysis of relationships between spatial and temporal variation of soil moisture content and environmental factors at a gully catchment of the Loess Plateau [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 2000, 20(5): 741-747. (in Chinese)
- [6] Qiu Y (邱扬), Fu B J (傅伯杰), Wang J (王军), et al. Spatial heterogeneity of soil moisture content on the Loess Plateau, China and its relation to influencing factors [J]. Chin J Appl Ecol (应用生态学报), 2001, 12(5): 715-720. (in Chinese)
- [7] Zhou G Y (周国逸), Yu Z Y (余作岳), Peng S L (彭少麟). Study on water balance of the three ecosystems in Xiaoliang experimental station [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 1995, 15(Supp.(A)): 223-229. (in Chinese)
- [8] O'Loughlin E M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis [J]. Water Resour Res, 1986, 22(5): 794-804.
- [9] Waring R H, McDowell N. Use of physiological process model with forestry yield tables to set limits on annual carbon balances [J]. Tree Physiol, 2002, 22: 179-188.
- [10] Huang Z H (黄志宏), Zhou G Y (周国逸), Morris J, et al. Canonical correlation analysis of meteorological factors on dry seasonal soil water content dynamics in eucalypt plantation on Leizhou peninsula of China [J]. Sci Silv Sin (林业科学), 2003, (in press). (in Chinese)
- [11] Lin S R (林书蓉), Liao G R (廖观荣), Li S Y (李淑仪), et al. The soils under the eucalyptus plantation in Leizhou peninsula [A]. In: Zeng T X (曾天勋). Studies on the eucalypts ecosystem of short rotation in Leizhou, Guangdong province [C]. Beijing: Forestry Press of China, 1995. 1-12. (in Chinese)
- [12] Running S W, Nemani R R, Hungerford R D. Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis [J]. Can J For Res, 1987, 17: 472-483.
- [13] Wang M B (王孟本), Li H J (李洪建). Quantitative study on the soil water dynamics of various forest plantations in the Loess Plateau in northwestern Shanxi [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 1995, 15(2): 178-184. (in Chinese)
- [14] Oren R, Pataki D E. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests [J]. Oecologia, 2001, 127: 549-559.
- [15] Phillips N, Oren R, Zimmermann R, et al. Temporal patterns of water flux in trees and lianas in a Panamanian moist forest [J]. Trees, 1999, 14: 116-123.
- [16] Pataki D E, Oren R, Smith W K. Sap flux of co-occurring species in a western subalpine forest during seasonal soil drought [J]. Ecology, 2000, 81(9): 2557-2566.
- [17] Gao H X (高惠璇). Practical statistics and SAS system [M]. Beijing: Beijing University Press, 2001. 358-362. (in Chinese)
- [18] Wang Y P, Jarvis P G. Description and validation of an array model-MAESTRO [J]. Agri For Meteorol, 1990, 51: 257-280.
- [19] Wang Y P, Jarvis P G. Effects of incident beam and diffuse radiation on PAR absorption, photosynthesis and transpiration of Sitka spruce-A simulation study [J]. Silva Carelica, 1990, 15: 167-180.
- [20] McMurtrie R E, Rook D A, Kelliher F M. Modelling the yield of *Pinus radiata* on a site limited by water and nutrition [J]. For Ecol Manag, 1990, 30: 381-413.
- [21] McMurtrie R E, Gholz H L, Linder S, et al. Climatic factors controlling the productivity of pine stands: a model based analysis [J]. Ecol Bull, 1994, 43: 173-188.
- [22] Williams M, Rastetter E B, Fernandes D N, et al. Modelling the soil-plant-atmosphere continuum in a *Quercus-Acer* stand at Harvard Forest: The regulation of stomatal conductance by light, nitrogen and soil/plant hydraulic properties [J]. Plant Cell Environ, 1996, 19: 911-927.
- [23] Zhou G Y (周国逸), Yu Z Y (余作岳), Peng S L (彭少麟). The dynamics of soil moisture and underground water in the three different ecosystems in Xiaoliang experimental station [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 1995, 15(Supp. A): 217-221. (in Chinese)
- [24] Zhou G Y (周国逸), Pan W C (潘维涛). Infiltration law of rainfall in the forest land [J]. Acta Conser Soliet Aquae Sin (水土保持学报), 1990, 4(2): 79-84. (in Chinese)
- [25] Zhang F L (张富仑), Zhang Y P (张一平), Zhang J C (张君常). Advance in effects of temperature on soil moisture movement and maintenance [J]. Adv Pedol (土壤学进展), 1994, 22(6): 20-25. (in Chinese)
- [26] Pataki D E, Oren R, Phillips N. Responses of sap flux and stomatal conductance of *Pinus taeda* L. trees to stepwise reductions in leaf area [J]. J Exp Bot, 1998, 49(322): 871-878.
- [27] Davidson D A, Watson A I. Spatial variability in soil moisture as predicted from airborne thematic mapper (ATM) data [J]. Earth

- Surface Processes and Landforms, 1995, 20:219-230.
- [28] Greenwood et al. Differences in annual evaporation between grazed pasture and *Eucalyptus* species in plantations on a saline farm catchment [J]. *J Hydrol*, 1985, 78(3-4):261-278.
- [29] Morris J, Louise M, Collopy J. Transpiration and canopy conductance in a eucalypt plantation using shallow saline groundwater [J]. *Tree Physiol*, 1998, 18:547-555.
- [30] Oren R, Phillips N, Ewers B, et al. Sap-flux-scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest [J]. *Tree Physiol*, 1999, 19: 337-347.
- [31] Kallarackal J, Somen C K. Water use by *Eucalyptus tereticornis* stands of differing density in southern India [J]. *Tree Physiol*, 1997, 17:195-203.
- [32] Phillips N, Bergh J, Oren R, et al. Effects of nutrition and soil water availability on water use in a Norway spruce stand [J]. *Tree Physiol*, 2001, 21:851-860.
- [33] Battaglia M, Cherry M L, Bell D T, et al. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature [J]. *Tree Physiol*, 1998, 18:521-528.

欢迎订阅 欢迎投稿  
《热带亚热带植物学报》(双月刊)

《热带亚热带植物学报》是中国科学院主管、中国科学院华南植物研究所和广东省植物学会联合主办、科学出版社出版的国家级学术性期刊。主要刊载热带亚热带地区植物学研究的论文报告、科研简报、综述评等;介绍植物学研究领域中各分支学科的新发现、新理论、新方法和新技术等,为推动植物学研究和开发热带亚热带植物资源,为国民经济建设和科学技术进步做出贡献。主要读者对象为本学科的研究人员、大专院校师生等。

本刊创刊于1993年,刊号为CN 44-1374/Q,是中国自然科学核心期刊。本刊多年来被美国《生物学文摘》(BA)、美国《化学文摘》(CA)、英国《CAB International》的多种专业文摘以及《中国科学引文数据库》、《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》、《中国生物学文摘》等收录。被评为广东省优秀科技期刊、中国学术期刊(光盘版)规范优秀期刊。

本刊2004年起改为双月刊,大16开,96页,2004年每册15.00元,全年订价90元(包括邮费)。可直接汇款到本刊编辑部或通过天津“联合征订服务部”订购,地址为:天津市大寺泉集北里别墅17号,邮编:300385,电话:(022)23973378。国外发行代号BM7260,中国国际图书贸易总公司(北京399信箱)订阅。

编辑部地址:广州市乐意居华南植物研究所内,邮编:510650

电话:(020)37252514 传真:(020)37252711

E-mail: jtsb@scib.ac.cn 网址: <http://ryzb.chinajournal.net.cn> <http://rdyrdzwx.periodicals.net.cn>

《植物遗传资源学报》2004年征订启事

《植物遗传资源科学》是中国农业科学院作物品种资源研究所和中国农学会遗传资源分会联合主办的学术期刊,由中国工程院院士董玉琛研究员担任主编,2000年创刊,2003年公开发行。国内刊号CN11-4996/S,国际统一刊号ISSN1672-1810。报道内容:大田作物、园艺作物、观赏植物、林用植物、草类植物、药用植物及其他一切经济植物的有关遗传资源研究结果和高水平综述或评论。诸如种质资源的考察、收集、保存、评价、利用、创新、信息学、管理学等;以及起源、演化、分类等系统学;基因发掘、鉴定、克隆、基因文库建立、遗传多样性研究等。介绍研究成果和学科进展,进行学术交流,提供可供遗传育种和农业生产利用的优异资源以及国外有关研究信息。读者对象:从事植物遗传资源科学研究以及相关学科的科技人员,各有关大专院校的师生,农业行政和推广人员。季刊。大16开本,96页。每期10元,全年40元。各地邮局发行,邮发代号:82-643

本刊编辑部常年办理订阅手续,如需邮挂每期另加2元。编辑部地址:100081北京中关村南大街12号中国农科院作物科学研究所《植物遗传资源学报》编辑部,电话:010-62186657,传真:010-621802799。