

# 红壤坡地干旱季节地表-大气界面水分传输 ——以茶园为例

段华平<sup>1,2</sup>, 卞新民<sup>1</sup>, 谢小立<sup>2</sup>, 王凯荣<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学农学系, 南京 210095; 2. 中国科学院亚热带区域农业研究所, 长沙 410125)

**摘要:**以红壤坡地茶园为研究对象, 用波纹比——能量平衡法研究了红壤坡地干旱季节地表-大气界面水热传输特性, 结果表明: 在茶园稳定生态系统中, 气象因素和表层土壤含水量是影响地表-大气界面水热传输的重要因素。特别是在受旱条件下, 土壤水分对地表-大气界面水热传输起决定作用, 土壤水分越小, 潜热通量越小, 显热通量越大, 反之亦然。观测期间, 棵间蒸发量占总蒸散量的 32%, 因此通过减少田间土壤水分蒸发来提高农田水分利用效率大有可为。

**关键词:**红壤坡地; 季节性干旱; 地表/大气界面; 水分传输

## Water transport through interface between land and atmosphere in dry season on red soil slopes

DUAN Hua-Ping<sup>1,2</sup>, BIAN Xin-Min<sup>1</sup>, XIE Xiao-Li<sup>2</sup>, WANG Kai-Rong<sup>2</sup> (1. Department of Agronomy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 457~463.

**Abstract:** Water resource is very rich in red soil regions of China. But the dramatic changes and spatial unbalances of rainfall in these regions is unfavorable for the agricultural sustainable development of this region. Based on Taoyuan Agro-ecological Experimental Station, Chinese Academy of Sciences, water transport processes through soil-atmosphere and leaf-atmosphere interface and their relationships with the environmental conditions were studied on red soil slopes tea plant. The aim of this study was to investigate the response characteristics of plant to seasonal drought and the approaches for regulating the interface processes and to provide the theoretical and practice basis for avoiding from or fighting against drought during the agricultural exploitation of red soil slopes. The results are as follows:

(1) When the effect of crop was neglected, seasonal variation of water transfer flux of soil-atmosphere interface was affected significantly by microclimate and top layer (0~20cm) soil water contents. Correlation analysis showed that the correlation coefficients between soil evaporation under crop canopy and air temperature, leaf temperature, relative humidity were highly significant (0.63<sup>\*</sup>, 0.76<sup>\*</sup>, -0.61<sup>\*</sup>,  $n=19$ ); the correlation coefficients between soil evaporation under crop canopy and net radiation, soil surface temperature, sunlight hour were significant (0.48<sup>\*</sup>, 0.50<sup>\*</sup>, 0.51<sup>\*</sup>,  $n=19$ ). When the LAI was 2.2 on red soil slopes, the function of relative evaporation ( $E/ET_0$ ) to soil water content ( $\theta$ ) was as follow:  $E/ET_0 = 1.1807 + 0.3876 \ln \theta$ ,  $R^2 = 0.6009$ ,  $P < 0.01$ .

(2) Stomatal behavior had the mechanisms of respond to environment change. The daily variation curve of stomatal resistance was W form under drought condition, and the daily variation curve of stomatal resistance was U form under wet condition, and stomatal resistance under drought condition was more than that of under wet condition. Multi-regression analysis between stomatal conductivity and light intensity, air temperature, relative humidity showed that plurality correlation

**基金项目:**中国科学院知识创新资助项目(KZCX2-407)

**收稿日期:**2003-03-20; **修订日期:**2003-12-10

**作者简介:**段华平(1975~), 男, 湖南茶陵人, 硕士, 讲师, 主要从事农业生态研究。E-mail: duanhp168@sina.com

**致谢:**桃源农业生态实验站实验员傅心贻、肖领先在实验数据的采集中做了大量的工作, 特此致谢。

**Foundation item:** The CAS Knowledge Innovation Project (No. KZCX2-407).

**Received date:** 2003-03-20; **Accepted date:** 2003-12-10

**Biography:** DUAN Hua-Ping, Master, Lecturer, mainly engaged in the research on agroecology. E-mail: Duanhp168@sina.com

coefficients ( $R$ ) and  $F$  test were highly significant level ( $R = 0.702$ ,  $F = 15.21$ ,  $P < 0.01$ ).  $t$  test of partial correlation coefficients revealed that all factors mentioned above affected stomatal behavior significantly. The transpiration rate was subjected to a number of micro-meteorological factors on the tea plantation. Correlation analysis and multi-factor successive regression analysis showed that net radiation and water vapor pressure deficit were the two major meteorological factors affecting transpiration of the tea plants. Transpiration rate was closely related to leaf stomatal conductivity. The former increased with the rise of the latter.

(3) The distributive characteristics of energy balance suggested that water and energy transport through interface between land and atmosphere was affected significantly by soil moisture. Soil moisture played an important role in latent and sensible heat transfer. The drier the soil, the higher the sensible heat flux and the smaller the latent heat flux, and vice versa. During the observation, neglecting the evapotranspiration of rainfall process, evapotranspiration was 60.02 mm more than homochronous precipitation, which was the major reasons of seasonal drought in red soil regions. The ratio of soil evaporation to the total field evapotranspiration was 32%, which illustrated the water-saving regulation potential on soil-atmosphere interface. The paper discussed the driving factors of water transport processes through soil-atmosphere and leaf-atmosphere interface and the probability of preventing them, which provided the theoretical supporting for interfacial water-saving on red soil slopes.

**Key words:** red soil slopes; seasonal drought; land-atmosphere interface; water transport

文章编号: 1000-0933(2004)03-0457-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

南方红壤丘陵地区水资源丰富,但由于时间和空间上的分配不均,伏秋季节性干旱严重,往往成为该区农业可持续发展的主要障碍因素。南方丘陵区季节性干旱问题虽有很多报道,取得了多项成果,如根据南方丘岗区水资源态势、红壤持水特性、水土资源协调机制、季节性干旱发生规律等来采取一些防治措施<sup>[1,2]</sup>。然而从界面角度剖析该区季节性干旱期水分传输特征以及探讨界面节水调控研究鲜见报道。

## 1 野外观测

### 1.1 野外观测场地

试验在中国科学院桃源农业生态试验站进行,该站位于湖南省桃源县漳江镇宝洞峪村(110°30'E, 28°55'N),海拔 92.2~125.3 m,年平均气温 16.5℃,年降雨量 1440 mm,年降雨总量不少,但季节分配不均,伏秋旱频繁发生,土壤类型为第四纪红土发育的红壤。该站气候和土壤代表广大红壤低丘岗地类型。测点设于试验站的红壤坡地茶园经营系统长期定位研究区,地貌为一典型的坡地单元,试验区投影面积为 1000 m<sup>2</sup> (20 m × 50 m),梯土撩壕,1995 年条植茶株,目前已形成稳定群落,园内安装 MAOS-1 小气候自动观测系统。

### 1.2 野外观测方法

**1.2.1 地表-大气界面水汽通量的确定(波纹比-能量平衡法)** 在 2001 年 6 月到 10 月,由波纹比-能量平衡法计算求得地表、大气界面水分通量(蒸散量)。计算公式为:  $\lambda \times ET = (R_n - G) / (1 + 0.647 \times \Delta T / \Delta e)$ <sup>[3]</sup>。式中,  $\lambda$ ;  $E_T$ ;  $R_n$ ;  $G$ ;  $\Delta T$ ;  $\Delta e$  分别代表汽化潜热 ( $\lambda = 2.4956 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ); 蒸散量 ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ); 辐射通量密度 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ); 土壤热通量密度 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ); 空气温度梯度 (℃); 空气湿度梯度 (hPa)。换算成蒸散量  $E_T$  单位 ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 上式则为:  $E_T = [(R_n - G) / (1 + 0.647 \times \Delta T / \Delta e)] \times 0.00144$ 。日蒸散总量可用面积积分法求得。被测大气中的水汽分压可用实用测湿公式来描述:  $e = e_s(T_w) - r(T_d - T_w)$ , 其中:  $e_s(T_w) = 6.1078 \exp[17.27T_w / (237.3 + T_w)]$ <sup>[4]</sup>。式中,  $e$ ;  $e_s(T_w)$ ;  $T_d$ ;  $T_w$ ;  $r$  分别代表空气水汽压 (hPa); 温度为  $T_w$  所对应纯水平面饱和水汽压 (hPa); 干球温度 (℃); 湿球温度 (℃); 干湿球温度表方程中常数 (取 0.647)。

**1.2.2 土壤-大气界面水汽通量的确定(Micro-Lysimeter 法)** Micro-Lysimeter 是一种无扰动的、封底的、可移动的、安装于土壤中的原状土柱,用以监测水分散失的小型观测器皿。由 PVC 管制成,高 15 cm,内径 10 cm,表面积 78.5 cm<sup>2</sup>,1 g 的变化相当于 0.127 mm 的蒸发。用 TDR 监测 Micro-Lysimeter 内外的土壤含水量,不一致时及时更换,降雨后要更换。在处理垫面分上中下 3 个坡位进行监测,每个坡位重复 3 次取平均。每次称重都在傍晚日落后(18:00~19:00)进行。利用两次之间的重量差和 Micro-Lysimeter 的表面积换算得土壤蒸发量。

**1.2.3 冠层-大气界面水汽通量的确定** 由波纹比-能量平衡法得到的蒸散量减去同期土壤蒸发量得冠层蒸腾量。用整株容器法测蒸腾速率日变化及其与环境生态因子的关系。具体操作方法是,在晴天选取样株,于 6:00 从地面处锯断样株,原地移入盛水的容器,并放入数据记录仪,用测针在杯边作水位指示针,加水至指针水位。由于植株蒸腾的进行,杯内水位不断下降,定期(每隔 1 h 一次)向杯内加水至指示水位,并记录注水量,即为该时段的茶树样株蒸腾耗水量 ( $\text{ml} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{plant}^{-1}$ )。

然后结合样株叶面积(激光叶面积仪 CI-203 测得)换算出蒸腾速率为( $\mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ )。

1.2.4 监测数据 试区气象要素监测包括逐日的温度、相对湿度、降雨、日照时数、辐射值等。由气象园内水分蒸发池观测的水面蒸发量作为大气蒸发力( $ET_0$ )指标。MAOS-1 小气候自动观测系统监测茶园系统不同层面(土表下 5cm 土壤、土壤表面、冠层)温度、风速、辐射值等。并由通风干湿表读数计算出空气饱和水汽压差  $D$ —(hPa)。公式为: $D=e_s-e$ , 式中, $e=e_s(T_w)-r(T_d-T_w)$ , 其中: $e_s(T_w)=6.1078\exp[17.27T_w/(237.3+T_w)]^{[4]}$ 。 $T_d$  和  $T_w$  分别为两个不同高度干球、湿球温度的平均值, $e$  为实际水汽压, $e_s(T_w)$  为湿球温度下对应纯水平面的饱和水汽压, $r$  为干湿表系数(取 0.647), $e_s$  为饱和水汽压,用  $e_s=e_s(T_d)$  计算。

利用时域反射仪(TDR)测定茶园 3 个坡位(上、中、下)3 个层次(0~20cm、20~60cm、60~100cm)的体积土壤含水量( $V/V\%$ )。用 AP<sub>4</sub> 气孔计测叶片气孔阻力,选取晴天 6:00~19:00,每小时测定 1 次,每次随机抽取 10~15 片成熟叶取平均值。

2 结果与分析

2.1 土壤-大气界面水分传输

1960~2001 年桃源县多年平均降雨量为 1442 mm,2001 年试区降雨量仅为 1189.2mm,为少雨年。据湖南省农业区划用概率论进行水旱年景的划分标准<sup>[5]</sup>,在 4~9 月份降雨量小于 739 mm 时为大旱,2001 年 4~9 月份降雨量为 617.7mm,因此 2001 年是大旱年,夏秋季节性干旱严重,观测结果可以反映干旱季节下的土壤-大气界面水分传输特点。

2.1.1 土壤-大气界面水分通量的动态变化特征 观测期间,茶园叶面态势变化不大,作物因素变化对土壤-大气界面水分通量季节变化的影响较小,但由于气象因素的季节变化以及土壤水分的季节动态变化,土壤-大气界面水汽通量也呈现出明显的季节变化特征(图 1)。6、7 月份雨量充足(降雨量分别为 124.3mm,118.2mm),表层土壤(0~20cm)含水量高(24%),光热条件充足(大气蒸发力分别为  $2.2\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $3.6\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),土壤-大气界面水汽通量也高,6 月份平均为  $1.57\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,7 月份平均为  $1.56\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。8 月份,雨量不多(49.2mm),在 8 月中旬连续 10d 没有下雨,加上晴朗高温(大气蒸发力为  $3.3\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),表层土壤含水量较低(11%),土壤-大气界面水分传输在一定程度上受到传输物质——水分的限制,尽管大气蒸发能力高,其界面水汽通量月平均仅为  $1.29\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。9 月份,降雨特别稀少,仅仅在 9 月 21 日前后下了 13.8mm 的雨。据彭廷柏等<sup>①</sup>通过对桃源丘岗区季节性干旱的分析研究,认为如果连续 2 旬降雨 $\leq 5.0\text{mm}$ ,土壤表层水分含量降至田间含水量的 50%左右,即有干旱现象发生,并将此确定为干旱临界线。自 8 月 25 日至 9 月 19 日连续 26 d 没有下雨,加之光热条件好(大气蒸发力  $3.7\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),土壤含水量迅速降低,特别是表层土壤(0~20cm)含水量低(10%),因此在此期间出现严重的干旱现象。土壤-大气界面水分传输量大幅度降低( $0.69\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。到了 10 月份,雨水充沛(降雨量为 155.1mm),旱情得到根本缓解,尽管大气蒸发力较低( $1.73\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),棵间蒸发量较 9 月份迅速增加,月平均达到

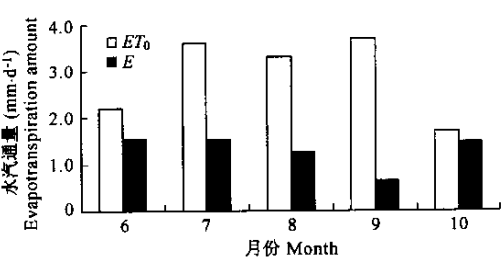


图 1 坡地茶园土壤蒸发量( $E$ )与大气蒸发力( $ET_0$ )的季节变化  
Fig.1 Seasonal variation of soil evaporation and evapotranspiration amount on slopes tea plant

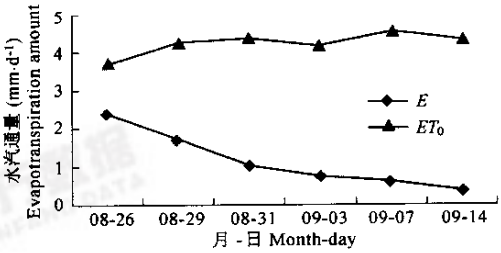


图 2 降雨后茶园土壤蒸发量和大气蒸发力的变化过程  
Fig.2 The variation of tea plantation soil evaporation and evapotranspiration amount after rainfall

$1.52\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,是 9 月份的 2.2 倍。由此可见,在红壤坡地茶园稳定群落中,当作物因素对土壤-大气界面水分传输季节变化影响不大时,水汽通量除受到气候条件的影响外,还明显受到土壤含水量特别是表层(0~20cm)土壤含水量的影响。

2.1.2 降雨后土壤-大气界面水分通量的变化过程 降雨(8 月 23~25 降雨量  $P=18.2\text{mm}$ )之后,茶园棵间蒸发及同期的大气蒸发力随时间的变化过程如图 2。从  $E$  和  $ET_0$  的变化过程可以看出,8 月 26 日为雨后的第 1 天,地表湿润(0~20cm 土壤含水量为 20%),棵间蒸发耗水量达到了  $2.4\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,以后棵间蒸发强度随着土壤含水量(特别是表层含水量)的降低也逐渐减弱,到了 9 月 14 日,0~20cm 土壤含水量降为 10%左右,棵间蒸发量仅为  $0.42\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,然而从 8 月 29 日到 9 月 14 日大气蒸发能力有一个缓慢上升的过程,如 8 月 29 日与 9 月 14 日大气蒸发力分别为  $3.7\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $4.4\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。可见在土面蒸发强度随

土壤含水率降低而减弱的阶段时, 棵间蒸发受大气蒸发力的影响较小, 而土壤水分状况成为主要限制因素。

2.1.3 土壤-大气界面水分传输与影响因子的关系

(1)土壤-大气界面水汽通量与气象因子的关系 简单相关分析表明(表1), 棵间蒸发与空气温度、冠层温度、空气饱和水汽压差呈极显著的正相关, 与地表温度、净辐射、日照时数呈显著的正相关, 与风速、土表下5cm土壤温度相关性则不明显。

此处有一现象值得注意, 那就是棵间蒸发与空气温度、冠层温度的相关性大于与地表温度的相关性, 而刘昌明等<sup>[6]</sup>认为发生于地表面的土壤蒸发与土壤温度密切相关, 尤其是地表温度是决定土-气界面上物质与能量交换过程的一个物理量。本实验出现这种不一致的可能原因是地表温度计放置的位置过于靠近茶树内侧, 导致地表温度偏低所致。

表1 棵间蒸发与气温、叶温、风速、空气饱和水汽压差等的相关系数  
Table 1 Correlation coefficients between soil evaporation and microclimate factors

	$T_{air}$	$T_{leaf}$	$T_g$	$T_s$	$V$	$D$	$R_n$	$SH$
相关系数 Correlation coefficient	0.63**	0.76**	0.50*	0.35	0.05	0.59**	0.48*	0.51*

$n=19$ ,  $R_{0.01,19}=0.55$ ;  $R_{0.05,19}=0.43$ , \*表示相关性极显著, \*表示相关性显著;  $T_{air}$  空气温度 Air temperature;  $T_{leaf}$  叶温 Leaf temperature;  $T_g$  地表温度 Soil surface temperature;  $T_s$  土表下5cm土壤温度 Soil temperature;  $V$  风速 Wind velocity;  $D$  空气饱和水汽压差 Water vapor pressure deficit;  $R_n$  净辐射 Net radiation;  $SH$  日照时数 Sunlight hour

(2)土壤-大气界面水汽通量与表层(0~20cm)土壤含水量的关系 大气蒸发力( $ET_0$ )定义为在一定气候条件下, 供给蒸发面的水分不受限制条件下的蒸散量。图3给出了相对土面蒸发强度( $E/ET_0$ )与土壤含水量的关系。采用相对土面蒸发强度是为了消除气象因素的影响。试验得出土壤含水量对 $E/ET_0$ 有显著的影响, 当红壤坡地茶园在叶面积指数为2.2时,  $E/ET_0$ 随土壤表层(0~20cm)含水量之间的关系, 可用下式表示:

$$e/ET_0 = 1.1807 + 0.3876\ln\theta, R^2 = 0.6009, P < 0.01$$

式中 $\theta$ 代表土壤表层体积含水量。

2.2 叶-气界面水分传输

2.2.1 叶-气界面水汽通量季节动态变化 茶园叶-气界面日平均水汽通量因季节而异(图4)。6月降雨量为124.3mm, 最长连续没有下雨的时段仅仅4d, 土壤容积含水量高(24.96%), 茶树没有受到水分胁迫, 但是大气蒸发力较低, 为 $2.2\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 茶园叶-气界面水汽通量 $2.78\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。7月份, 降雨量为118.2mm, 最长连续没有下雨的时段也仅4d, 土壤容积含水量达23.69%, 加之大气蒸发力高, 为 $3.6\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 茶园叶-气界面水汽通量为观测期间的最高值, 达 $3.57\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。8月份降雨量为49.2mm, 土壤含水量有所降低, 大气蒸发力比7月份也有所降低, 为 $3.3\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 因此, 界面水汽通量也有所降低, 为 $2.61\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。到了9月份, 降雨稀少, 全月仅在20~22日降了13.8mm雨, 土壤长期受到水分胁迫, 潘根生等<sup>[7]</sup>研究表明茶树受到水分胁迫后, 在较短的时间内就迅速作出生理响应, 使蒸腾速率降到较低水平, 因此尽管此月的大气蒸发力为观测期间的最高值, 达到 $3.7\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 但界面水汽通量迅速降低, 仅为 $1.71\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。可见茶园叶-气界面水汽通量的动态变化不仅受气象条件的控制, 还与土壤水分状况密切相关。

2.2.2 不同水分条件下气孔阻力日变化 气孔是叶-气界面水分传输的通道, 气孔阻力是SPAC系统中水流运动的主要控制因素, 研究气孔阻力的动态变化, 可为叶-气界面的合理调控提供依据。

在晴朗高温的天气状况下, 由于气象条件的日变化规律, 气孔阻力也呈现明显的日变化(图5)。在土壤水分供应充分时(0~20cm土壤含水量为24%), 茶树气孔阻力的日变化表现为早晚高, 其它时间低, 且在正午前后, 气孔阻力达一天中最低值。因此, 在土壤水分供应充足时, 气孔阻力的日变化为“U”型。当土壤水分受到胁迫时(0~20cm土壤含水量为12%), 茶树气孔阻力日变化也表现为早晚高, 其它时间低, 但有一个显著的特点是在12:00~13:00有一较小峰值。即, 茶树通过“午睡”现象以调节作物体内的水分平衡, 这一现象也被其他的学者发现<sup>[8]</sup>, 表明在干旱条件下, 茶树有通过调节气孔开度以防止水分过多损失

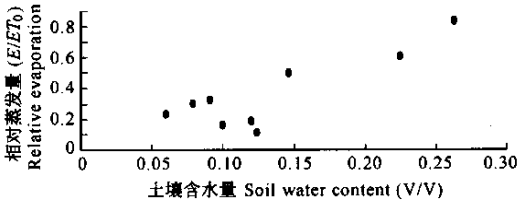


图3 相对蒸发( $E/ET_0$ )与表层(0~20cm)土壤含水量的关系  
Fig.3 Relationships between relative evaporation and (0~20cm) soil water content

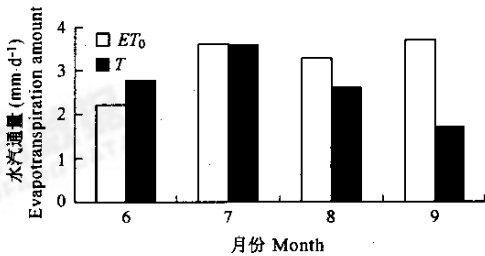


图4 坡地茶园蒸腾量( $T$ )和大气蒸发力( $ET_0$ )的季节变化  
Fig.4 Seasonal variation of transpiration and evapotranspiration amount on slopes tea plant



“自我保护”能力。因此,在土壤水分胁迫的晴朗高温天气条件下,茶树气孔阻力日变化为“W”型。

另外,在晴朗高温天气条件下,当土壤水分亏缺时,气孔阻力比不受水分胁迫时大,从 7:00~19:00,土壤水分亏缺时的日平均气孔阻力为  $8.17\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,而不受水分胁迫时的日平均气孔阻力为  $0.83\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。可见,气孔阻力变化反映了土壤水分的变化情况,张斌等<sup>[9]</sup>认为气孔阻力可作为土壤干旱胁迫指标。

2.2.3 气象因子对气孔行为的影响 气孔导度是气孔阻力的倒数,是衡量植物气孔开张程度的一个指标。气孔导度是影响蒸腾强度高低的关键因子,受诸多气象生态因子的影响,这些因子交互作用,很难区别各个因子的准确作用过程。作者对气孔导度( $C$ )与光强( $L$ )、气温( $T$ )、相对湿度( $R_h$ )之间进行回归分析,结果如下:

$$C = 0.89T + 0.00085L + 0.042R_h - 5.577$$

复相关系数  $R=0.702$ ,  $F=15.21$ ,  $F_{0.01,(3,47)}=2.80$

数值回归方程的复相关系数、 $F$  检验值均达到极显著水平,表明气孔导度与光强、气温、相对湿度因子的综合变化密切相关,因而可以通过测定气象因子来预测气孔开度的变化状况。

对上述多元回归方程的偏相关系数进行  $t$  检验 ( $t_T=2.67^*$ ,  $t_L=3.20^{**}$ ,  $t_{R_h}=5.16^{**}$ ,  $t_{0.05,51}=2.008$ ,  $t_{0.01,51}=2.678$ ),可以得出各因子分别与气孔导度的相关程度。结果表明对气孔导度影响极显著的因子是光强、相对湿度,气温对气孔导度的影响达到了显著水平。

#### 2.2.4 茶园蒸腾作用与影响因子的关系

(1)茶园蒸腾速率与环境因子的分析 植物蒸腾受环境中许多生态因子的综合影响,其中以气象因子影响最为明显<sup>[10]</sup>。简单相关分析(表 2)表明,净辐射、空气饱和水汽压差、气温、地表温度、风速对蒸腾速率都存在极显著的正相关。

进一步对茶园蒸腾速率与同期净辐射、气温、地表温度、空气饱和水汽压差、风速 5 个因子进行多元回归和逐步回归分析,结果如下(表 3)。

多元回归方程的复相关系数  $R$ 、 $F$  检验值均达到极显著水平,表明茶园的蒸腾强度与各生态因子的综合变化密切相关,因而可通过测定环境因子来预测茶园蒸腾的大体情况。多元逐步回归分析的结果表明:在影响蒸腾的诸多因素中,净辐射、空气饱和水汽压差是影响蒸腾作用的 2 个主要环境因子。风速的影响,与其它各因子相比,一般来说规律性不堪明显。当叶温高于气温,若风速增加,通常蒸腾作用随之减小,然而,风速增加,由于叶片边界层阻力的降低,有时也会出现风速对蒸腾无促进作用;当叶温低于气温时,风速对蒸腾作用有促进作用<sup>[6]</sup>。气温未能入选逐步回归方程可能主要是由于气温对蒸腾的影响受净辐射的控制。

(2)茶园蒸腾速率与气孔导度的关系 叶片气孔是植株蒸腾的水汽出入的通道,植株 80%~90% 的水分蒸腾由气孔散失,当叶子的气孔一旦闭合时,植物就几乎停止蒸腾作用。由于蒸腾速率除与气孔开度有关外还与供给的能量有关,因此在不同的天气条件下蒸腾速率与气孔导度的关系不同,即在相同的气孔导度时不同天气条件下的蒸腾速率不同<sup>[8]</sup>。作者据茶园全天气孔导度和蒸腾速率的观测结果绘出的蒸腾速率( $T$ )与气孔导度( $C$ )的关系,如(图 6)所示。可以看出,对于同一天,蒸腾速率( $T$ )与气孔导度( $C$ )的关系密切,且随着气孔导度的增加蒸腾速率不断增加。虽然总体上蒸腾与气孔导度有明显的关系,简单相关分析表明蒸腾速率与气孔导度达极显著水平( $R=0.7995$ ,  $R_{0.01,15}=0.5055$ ),但分散点的离散表明其它因子也有较大的影响作用。

#### 2.3 SPAC 模型与地表-大气界面水热平衡

2.3.1 能量平衡的动态变化 农田生态系统获得的净辐射( $R_n$ ),经过转化,形成土壤热通量( $G$ ),显热通量( $H$ ),潜热通量

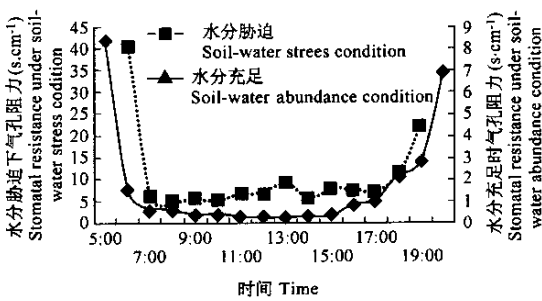


图 5 晴天不同水分状态下的气孔阻力日变化

Fig. 5 Daily variation of stomatal resistance under different soil moisture condition in the sunshine

表 2 茶园蒸腾速率与气温、地表温度等的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between tea plant transpiration rate and microclimate factors

气温 Air temperature	地表温度 Soil-surface temperature	净辐射 Net radiation	风速 Wind velocity	饱和水汽压差 Water vapor pressure deficit
0.627**	0.624**	0.651**	0.555**	0.637**

$n=69$ ,  $R_{0.01,69}=0.3017$ , \*\* 表示相关性极显著

表 3 茶园蒸腾速率与小气候因素多元回归分析

Table 3 Multi-regression results of tea plant transpiration rate and some microclimate factors

多元回归结果 From multi-regression	逐步回归结果 From stepwise multi-regression
$y=0.1844T_{air}-0.2805T_g+0.0016R_n+0.5024V+0.0374D+2.5203$	$y=0.0018R_n+0.0589D+0.2987$
$n=69$ , $R=0.739$ , $F=15.152$ , $F_{0.01,5,63}=3.31$ , $P<0.01$	$n=69$ , $R=0.729$ , $F=37.341$ , $F_{0.01,2,66}=4.95$ , $P<0.01$

$T_{air}$  空气温度 Air temperature;  $T_g$  地表温度 Soil surface temperature;  $R_n$  净辐射 Net radiation;  $V$  风速 Wind velocity;  $D$  空气饱和水汽压差 Water vapor pressure deficit

( $LE_t$ ), 作物光合固定能( $P$ )及植物体内能( $M$ )<sup>[11]</sup>几项, 因此, 根据能量守恒定律可写出农田能量平衡方程式如下:

$$R_n = G + H + LE_t + P + M$$

在实际工作中,  $P$  项和  $M$  项的总和一般比主要成分的测量误差还要小, 故常可忽略。据 Gupta 等<sup>[12]</sup>人的研究, 当作物郁闭地面后, 土壤的热通量  $G$  小于净辐射的 1%; 张鸿儒等<sup>[13]</sup>计算了充分灌溉和非充分灌溉地的  $G/R_n$ , 发现绝大多数的每小时  $G/R_n$  都小于 5%; Monteith 等<sup>[14]</sup>研究表明, 当叶面积达指数达 3.0 左右, 裸露土壤较少的情况下, 土壤热通量一般只占 0.05 $R_n$  左右。本试验田间叶面积指数为 2.2, 裸露土壤较少, 土壤热通量取 0.05 $R_n$  应该是合理的。所以, 观测期间农田生态系统截获的净辐射主要转化成潜热通量与显热通量。

从图 7 中可以看出, 大部分时间潜热通量占净辐射的大部分, 其次是显热通量, 土壤热通量最小。在 6、7、8 月份, 雨水充沛, 土壤含水量高, 潜热通量(蒸散量)占净辐射的比例大(64%)。但是在 9 月上、中旬, 潜热通量所占的比例不大, 相反显热通量占了净辐射的大部分(63%)。因为自 8 月 24 日一直到 9 月 20 日没有下雨, 0~20cm 土壤体积含水量仅 10% 左右, 当茶树受到水分胁迫后, 在较短的时间内就迅速作出生理响应, 使蒸腾速率降到较低水平, 另外裸间蒸发强度随着表层土壤含水量的降低也逐渐减弱。所以当土壤水分胁迫时, 蒸散量(潜热通量)会显著降低, 致使潜热通量占净辐射的比例降低。在 9 月 20~22 日, 由于降雨, 土壤含水量增加, 此后潜热通量占净辐射的比例也迅速增加(68%)。可见, 在农田净辐射能的转化过程中, 当作物因素影响较小时, 土壤水分对垂直于地表-大气界面的水分和能量传输过程有重要的抑制或加快作用。对于显热和潜热输送, 土壤水分起决定作用, 土壤水分越小, 潜热通量越小, 显热通量越大, 反之亦然。

**2.3.2 地表-大气界面水分通量及土壤蒸发占蒸散的比例** 地表-大气界面的水分通量主要通过作物裸间蒸发和植株蒸腾完成, 裸间蒸发量的确定有利于确定农田节水潜力。从 6 月 6 日至 9 月 30 日, 蒸散共观测 90d, 蒸散量为 348.22mm, 而同期降雨量为 288.2mm, 忽略降雨期间的蒸散量, 同期蒸散耗水量比降雨量还要多 60.02mm, 这正是该区容易发生季节性干旱的重要原因之一。从 6 月 6 日到 9 月 30 日土壤蒸发共观测 75d, 蒸发量为 88.44mm, 这部分水为无效耗水, 可以通过人为的调控手段了部分地得到抑制。从图 8 可以看出, 裸间蒸发量占了总蒸散量的较大比例, 以观测期间月平均值乘以当月天数所得月蒸发量和月蒸散量, 得出 6 月至 9 月  $E/ET$  的值为 0.32, 也就是说在此期间大约有 1/3 的田间耗水是无效耗水, 因此通过减少田间土壤水分无效蒸发, 可以大大提高农田水分利用效率。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 土-气界面水分传输的驱动力及抑制的可能

实验得出观测期间作物裸间蒸发占同期蒸散量的 32% 左右, 这部分的水量是可以通过调控加以利用的潜在水量。因此, 根据土壤-大气界面水分传输的驱动因子, 在红壤坡地季节性干旱期通过一些措施, 尽量减少裸间蒸发量, 这对提高农田作物水分利用效率, 缓解季节性干旱起到十分重要的作用。

裸间土壤蒸发与农田小气候密切相关, 研究结果表明, 裸间蒸发与空气温度、叶温、空气饱和和水气压差呈极显著的正相关, 与土壤表面温度、净辐射呈显著正相关。据此, 降低田间土壤温度及其周围环境温度、降低空气饱和和水气压差(增加近地层空气湿度)、辐射冷却等有效的抑制土壤-大气界面水分传输量。土壤因素是调控裸间蒸发的重要手段。本文结果表明, 随着表层土壤含水量的降低, 相对蒸发有降低的趋势, 说明在不影响作物蒸腾条件下, 保持土壤表层干燥是减少裸间蒸发的主要途径。

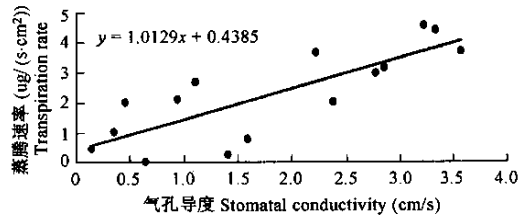


图 6 茶园蒸腾速率与叶片气孔导度的关系

Fig. 6 Relationship between tea plant transpiration rate and stomatal conductivity

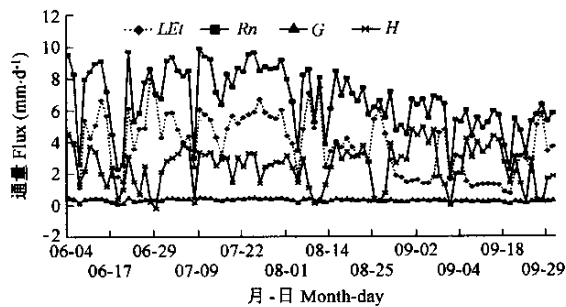


图 7 茶园能量平衡的季节变化

Fig. 7 Seasonal variation of energy balance on tea plantation

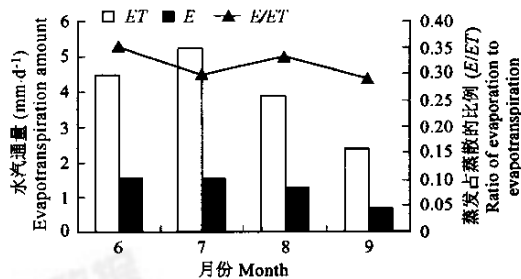


图 8 茶园土壤蒸发( $E$ )与蒸散( $ET$ )的比例关系

Fig. 8 Ratio of soil evaporation and evapotranspiration on slopes of tea plant

3.2 叶-气界面水分传输的驱动力及抑制的可能

植物蒸腾作用所散失的水量在区域性水循环和水平衡中起很重要的作用,若蒸腾作用被减小而又不影响植物正常生理活动的话,则作物的水分利用效率会明显增加。

植物生长环境生态因子的变化会引起植物蒸腾驱动力的变化。试验结果表明,净辐射、风速、气温、地表温度、饱和水汽压差与茶园蒸腾作用为极显著的正相关关系。可以根据蒸腾作用随环境因子的变化规律,进行有效的人为调控以提高水分利用效率。

蒸腾速率( $T$ )与气孔导度( $C$ )的关系密切,且随着气孔导度的增加蒸腾速率增大,由于气孔阻力是气孔导度的倒数,从而气孔阻力增加蒸腾速率减小。因此,降低水分无效蒸腾,提高水分利用效率,从气孔角度方面考虑将成为另一个着眼点。为了说明实施气孔调节的可能途径,就得考虑气孔阻力与其影响因子之间的关系。研究结果表明:气孔导度与光强、气温、相对湿度多元回归方程的偏相关系数 $t$ 检验都达极显著水平,说明这3个生态因子强烈的影响着气孔行为。因此,进一步研究通过改变植物周边环境生态因子,以调节气孔行为,进而调节作物蒸腾作用,以期节约用水,缓解该区季节性干旱有重要的科学意义。

References:

[1] Zhang B, Zhang T L. Cause of seasonal draught formation and strategy of the eastern hills in southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(4):499~503.

[2] Xie X L, Wang K R. Equilibrium and Management of Water Resources in Hilly Area Around Dongting Lake. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **15**(4):92~95.

[3] Xie X Q, Wang J J. *Observation and analysis of water environment factors*. Beijing: Chinese Standard Press, 1998.

[4] Liu S X, Mo X G, Li J, et al. The effects of soil moisture and soil-atmosphere interface on water-heat transfer in winter wheat field. *Geographical Research*, 1999, **18**(1):24~30.

[5] Hunan Agricultural regional planning commission. *Hunan Agricultural regional planning*. Hunan Technology and Sciences Press, 1989. 69~80.

[6] Liu C M, Wang H X. *The interface processes of water movement in the soil-crop atmosphere system and water-saving regulation*. Beijing: Sciences Press, 1999.

[7] Pan G S, Luo Y P, Qian L S. Physiological responses of tea (*Camellia Sinensis*) to different soil moisture regimes. *Journal of Tea*, 1999, **25**(4):197~201.

[8] Kang S Z, Liu X M, Xiong Y ZH. *The theory and applying of water transport through soil-plant-atmosphere continuum*. Beijing: Hydroelectricity Press, 1994.

[9] Zhang B, Ding X W, Zhang T L. Variation of hydraulic resistances in red soil-crop-air continuums in different farming systems in dry season. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, **38**(1): 17~24.

[10] Peng F L, Huang B L, Li J, et al. A study on the pattern of plant transpiration water consumption in agroforestry systems in sea-coast areas. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1999, **23**(6).

[11] Mo X G, Liu S X, Yu H L, et al. Seasonal variation of energy budget and evapotranspiration partitioning in wheat field. *Acta Geographica Sinica*, 1997, **52**(6):536~542.

[12] Gupta P L and Sastry, P. S. N. Estimating evapotranspiration from midday canopy temperature. *Irrig. Sci.*, 1986, **7**:237~243.

[13] Niu W Y, Zhou Y H, Zhang Y, et al. *The energy and substance exchanging in farming ecosolystem*. Beijing: Agrometeorology Press, 1987. 156~164.

[14] Monteith J L. *Vegetation and the Atmosphere*. VOL. 1, Principles, London: Academic Press, 1975.

参考文献:

[1] 张斌,张桃林. 南方东部丘陵区季节性干旱成因及其对策. 生态学报, 1995, **15**(4):499~503.

[2] 谢小立,王凯荣. 环洞庭湖丘岗地区水资源平衡及其管理. 水土保持学报, 2001, **15**(4):92~95.

[3] 谢贤群,王立军,主编. 水环境要素观测与分析. 北京:中国标准出版社, 1998.

[4] 刘苏峡,莫兴国,李俊. 土壤水分及土壤-大气界面对麦田水热传输的作用. 地理研究, 1999, **18**(1):24~30.

[5] 湖南省农业区划委员会,编著. 湖南省农业区划. 长沙:湖南科学技术出版社, 1989. 69~80.

[6] 刘昌明,王会肖,等著. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控. 北京:科学出版社, 1999.

[7] 潘根生,骆耀平,钱利生. 茶树对水分的生理响应. 茶叶, 1999, **25**(4):197~201.

[8] 康绍忠,刘晓明,熊运章著. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用. 北京:水利电力出版社, 1994.

[9] 张斌,丁献文,张桃林,等. 干旱季节不同耕作制度下红壤-作物-大气连续体水流阻力变化规律. 土壤学报, 2001, **38**(1):17~24.

[10] 彭方仁,黄宝龙,李杰,等. 海岸带复合农林系统植物蒸腾耗水规律研究. 南京林业大学学报, 1999, **23**(6).

[11] 莫兴国,刘苏峡,于沪宁,等. 冬小麦能量平衡与蒸散分配的季节变化分析. 地理学报, 1997, **52**(6):536~542.

[13] 张鸿儒,卢振民,牛文元. 利用冠层温度——蒸散模型计算农田水分散失. 见:牛文元,周允华,张翼,等编著. 农田生态系统能量物质交换. 北京:气象出版社, 1987. 156~164.