

# 红壤坡地农业景观(旱季)地表界面水分传输研究\*

## —— I. 土壤-大气界面水分传输

谢小立 段华平 王凯荣

(中国科学院亚热带区域农业研究所 长沙 410125)

**摘要** 定位观测研究红壤坡地土壤-大气界面水分传输结果证明,不同地表植被群落构建和不同农业利用景观土壤蒸发量有差异,但水汽传输通量的动态变化规律一致,土壤蒸发量日变化为典型单峰曲线。界面水分传输通量受诸多因素影响,当地表植被群落稳定、作物因素影响较小时,水汽通量除受气候条件影响外还明显受土壤含水量特别是表层土壤含水量的影响。界面水汽传输通量与净辐射能呈显著正相关,与环境温度有很好的相关性,温度越高其蒸发越强,与空气湿度呈极显著负相关。界面水汽传输通量主要受 0~20cm 表层土壤水分控制,二者间存在线性关系。土壤蒸发量占系统蒸散量的 1/3,该部分非生产性水分消耗有控制降低的可能,可通过土壤培肥、灌溉控制、物理障碍等手段抑制土壤蒸发。

**关键词** 坡地 景观 界面 水分传输

**Study on surface water transport in agricultural landscape on the slop lands of red soil (dry season) I. Water transport at soil-atmosphere interface.** XIE Xiao-Li, DUAN Hua-Ping, WANG Kai-Rong (Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125), *CJEA*, 2003, 11(4): 55~58

**Abstract** A located observation and study of water transport at soil-atmosphere interface was conducted. The results show that there are differences in soil evaporation among different agricultural cultivations while no difference in the dynamic variation of water vapor transfer flux. The daily variation curve of soil evaporation is a typical single peak curve. Many factors may affect the surface water transport. When surface vegetational types are stable and the effects of crop are not remarkable, the water transfer at soil-atmosphere interface is affected not only by climatic condition but also apparently by soil water contents (0~20cm). The water vapor transfer through interface is significantly positively correlated with the net radiation and is correlated with the environmental temperature. It is also affected by water potential and has a highly significant negative correlation with the air humidity. Therefore, the water vapor transfer at interface is mainly controlled by soil surface(0~20cm) water contents. Their relationship has a linear correlativity. The amount of soil evaporation is 1/3 of the total field evapotranspiration. There are potentials for controlling the consumption to these none productive water moisture. Measures such as soil-manuring, irrigation-controlling, physical obstacle of preventing soil evaporation are presented.

**Key words** Slopes, Landscape, Interface, Water transport

我国现有 6°~15°红壤缓坡地 2100 万 hm<sup>2</sup>,是发展粮食和亚热带经济作物及果、林、草的重要基地<sup>[1]</sup>。地表-大气界面(土壤-大气、冠层-大气)水分传输是土壤-植物-大气连续系统水热运动过程中非常重要的环节,且该界面水分传输量(蒸散量)在水资源中所占比重较大,对系统水分转化和有效利用起决定作用<sup>[2]</sup>。本试验研究了季节性干旱早期土壤-大气界面水分传输规律及其与环境生态条件的关系,为寻求调控红壤坡地农业地表界面过程的有效途径,制定防旱、抗旱技术措施提供理论依据。

### 1 试验材料与方法

试验在中国科学院桃源农业生态试验站观测试验场进行,该地位于湖南省桃源县漳江镇宝洞峪村,东经 111°30',北纬 28°55',年均气温 16.5℃,年降雨量 1440mm,年日照时数 1520h,土壤类型为第四纪红土发育的红壤,植被为武陵山植被区系。于 1995 年建设坡地不同利用系统结构功能及其演替长期定位试验区(南偏东 15°,坡长 62m,坡度 8°~11°,图影面积 1hm<sup>2</sup>),2001 年 6 月 1 日~10 月 31 日进行实地测量研究,该年

\* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-407)资助

收稿日期:2002-11-30 改回日期:2002-12-31

试区夏秋季节干旱严重,测量结果可代表干旱季节的地表-大气界面水分传输规律。作物区,季节作物为甘薯,梯土不撩壕,每年栽种 2 茬旱作物。茶园区,为常绿灌丛植被,梯土撩壕,条植茶树。橘园区,为常绿灌木植被,梯土撩壕,3m×3m 种植碰柑。各处理按常规管理,试验期间未灌溉。用波文比能量平衡法计算地表-大气界面水分通量(蒸散量)式为<sup>[2]</sup>:

$$\lambda \times E_T = (R_n - G)/(1 + 0.647 \times \Delta T/\Delta e) \quad (1)$$

式中, $\lambda$  为汽化潜热,数值为 2495.6J/g, $E_T$  为蒸散量(mm/h), $R_n$  为辐射通量密度( $W/m^2$ ), $G$  为土壤热通量密度( $W/m^2$ ), $\Delta T$  为空气温度梯度( $^{\circ}C$ ), $\Delta e$  为空气湿度梯度(hPa)。经换算得:

$$E_T = [(R_n - G)/(1 + 0.647 \times \Delta T/\Delta e)] \times 0.00144 \quad (2)$$

日蒸散总量可用面积积分法求得。

用 Mirco-Lysimeter 法计算确定土壤-大气界面水汽通量。每 3d 更换土柱 1 次,降雨或灌溉后及时更换,处理垫面上中下 3 个坡位进行监测,重复 3 次取其平均值,测量降雨过程、雨后及雨后 24h、48h、72h、96h 直至下次降雨的土壤蒸发动态,傍晚日落后(18:00~19:00)称土壤重量,利用 2 次重量差和土柱表面积计算土壤蒸发量。利用时域反射仪(TDR)测定处理垫面(上、中、下)3 个坡位雨前、雨后及雨后 24h、48h、72h、96h 直至下次降雨的 0~20cm、20~60cm、60~100cm 土层土壤体积含水量。试区气象要素由气象园提供,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。用 MAOS-I 小气候自动观测系统监测不同层面(土壤、土壤表面、冠层)温度、风速和辐射值等,并由通风干湿表读数计算空气饱和水汽压差( $D$ , hPa)。影响因子分析以茶园垫面为基准,用 EXCEL、SAS 软件统计分析数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 红壤坡地土壤-大气界面水分通量变化特征

红壤坡地土壤-大气界面水汽通量季节动态变化。观测期间各处理土壤-大气界面水汽传输通量存在差异,但动态变化趋势一致,界面水汽通量呈明显的季节变化特征(见图 1)。

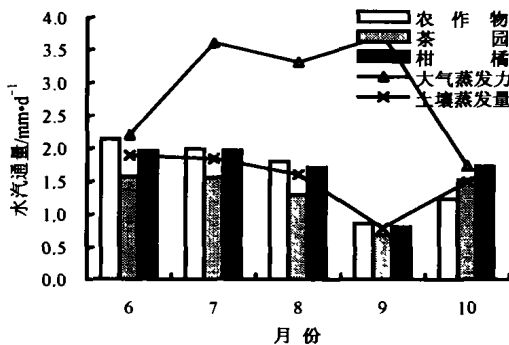


图 1 红壤坡地土壤蒸发量与大气蒸发力季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of soil evaporation and air evapotranspiration ability in red soil slopes

红壤坡地土壤-大气界面水汽通量日变化。由图 2 可知红壤坡地土壤-大气界面土壤蒸发量日变化为典型单峰曲线,总趋势为清晨蒸发强度较低,12:00~14:00 出现峰值,午后随太阳辐射减弱和气温降低,蒸发强度不断下降,18:00 左右降至极低。由于 1 天内土壤含水量变化较小,故土壤-大气界面水汽通量日变化是气象因素日变化的综合反映。试验结果表明,红壤坡地农业利用方式不同,土壤-大气界面水汽传输量亦不同,这是因地表植被类型不同,地表盖度、空间、遮盖材料和植物根系对土壤水分影响等因素共同作用的结果,但均未改变土壤-大气界面水分传输量动态变化规律。

6~7 月份雨量充足,红壤坡地 0~20cm 表层土壤含水量高,大气蒸发力分别为 2.2mm/d 和 3.6mm/d,土壤-大气界面水汽通量也高。8 月份雨量较少,坡地表层土壤含水量较低,土壤-大气界面水分传输一定程度受抑。9 月份降雨特别稀少,仅 9 月 21 日前后降雨 13.8mm,干旱现象发生,加之光热条件好,土壤含水量迅速降低,特别是 0~20cm 表层土壤含水量低,土壤-大气界面水分传输量大幅降低。10 月份雨水充沛,旱情得到根本缓解,辐射虽减弱、气温降低,但土壤蒸发量较 9 月份迅速增加。表明作物因素对红壤坡地土壤-大气界面水分传输季节变化影响较小时,水汽通量除受气候条件影响外,还明显受土壤含水量特别是表层土壤含水量的影响。

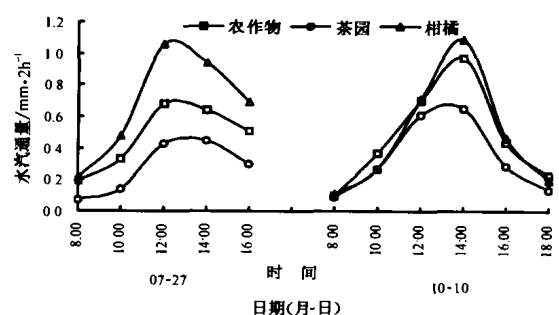


图 2 红壤坡地土壤蒸发量日变化

Fig. 2 The daily variation of soil evaporation of red soil slopes

### 2.2 红壤坡地土壤-大气界面水分传输的影响因子及其关系

红壤坡地土壤蒸发量与净辐射的动态变化关系见图 3。相关分析表明红壤坡地净辐射与土壤蒸发量呈

显著正相关( $R = 0.48^*$ ,  $R_{0.05(n=19)} = 0.43$ ),表明净辐射显著影响土壤-大气界面水分传输,且有滞后现象。

红壤坡地土壤蒸发量与其环境温度有较好相关性,温度越高则蒸发越强。温度高则大气水势低,土壤-大气系统间水势差增加,土壤水分子活性增加,有利于土壤水分蒸发。图 4 表明,水汽通量变化呈单峰型,与冠层温度、空气温度变化趋势一致。相关分析表明红壤坡地裸间蒸发与空气温度、冠层温度呈极显著正相关(气温  $R = 0.63^{**}$ ,  $R_{0.01(n=19)} = 0.55$ , 叶温  $R = 0.76^{**}$ ,  $R_{0.01(n=19)} = 0.55$ ),与地表温度呈显著正相关( $R = 0.50^*$ ,  $R_{0.05(n=19)} = 0.43$ ),与土壤温度则相关性不明显( $R = 0.35$ )。刘昌明等<sup>[3]</sup>认为发生于地表的土壤蒸发量与土壤温度密切相关,地表温度是决定土壤-大气界面物质与能量交换的物理量之一。

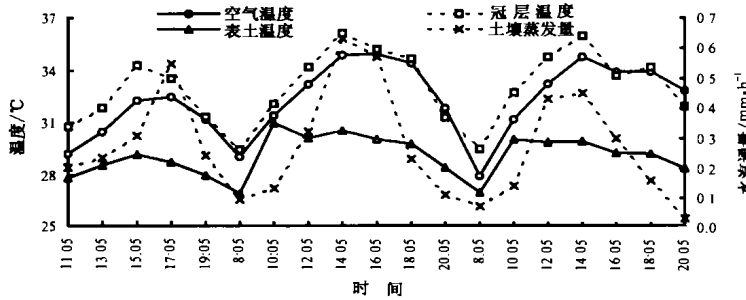


图 4 红壤坡地土壤蒸发量与气温、冠层温度和表土温度的关系  
Fig. 4 Relationships among soil evaporation and air temperature, crop canopy temperature and soil surface temperature in red soil slopes

足且蒸发量大,故潜热消耗(蒸散量)约占净辐射的 70%。由图 5 可知,7 月 9 日 13:00 左右红壤坡地潜热通量、净辐射均达最大值,分别为  $612\text{W}/\text{m}^2$  和  $871\text{W}/\text{m}^2$ ,之后随净辐射的降低而潜热通量逐渐减弱。显热通量最大值为  $329\text{W}/\text{m}^2$ ,出现于上午 9:00 左右,之后逐渐降低。9 月 23 日已连续 27d 未降雨,代表低土壤水分日(0~20cm 土层土壤体积含水量 9.1%),表层土壤较干,作物蒸腾速率显著低于正常水分条件,故坡地潜热消耗下降,其潜热通量仅为净辐射的 40%左右,而显热通量占净辐射的大部分。潜热通量日变化平缓,中午未随净辐射增加而增加,这与土壤水分胁迫有关。13:00 左右感热通量、净辐射均达最大值,分别为  $474\text{W}/\text{m}^2$  和  $688\text{W}/\text{m}^2$ ,之后随净辐射的降低而感热通量逐渐减弱,感热通量与辐射通量变化基本一致。

红壤坡地水汽通量与表层土壤含水量的关系。当土壤蒸发受大气蒸发力影响较小时,土壤水分状况成为主要限制因素。表层土壤蒸发过程可分为表层土壤蒸发强度保持稳定阶段、表层土壤蒸发强度随土壤含水率变化阶段和水汽扩散阶段<sup>[4]</sup>。一般认为第 1 阶段土壤蒸发量受控于能量即太阳辐射而非土壤湿度,但第 2 阶段土壤湿度是决定土壤蒸发量大小的关键因子。红壤坡地土壤蒸发主要受 0~20cm 表层土壤水分控制,相对表土蒸发强度( $E/ET_0$ )与土壤含水量的关系见图 6,采用相对表土蒸发强度可消除气象因素的影响。试验表明土壤含水量对表土蒸发强度有显著影响,当叶面积指数为 2.2 左右时表土蒸发强度与 0~20cm 土壤表层含水量间的线性关系为:

$$E/ET_0 = 0.0301\theta - 0.0413 \quad (R^2 = 0.734) \quad (3)$$

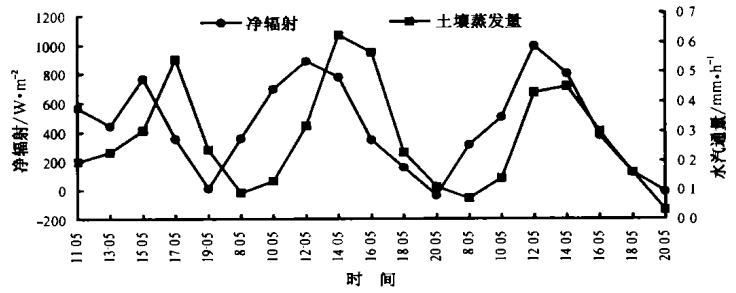


图 3 红壤坡地土壤蒸发量与净辐射的关系  
Fig. 3 Relationship between soil evaporation under crop canopy and net radiation in red soil slopes

蒸发的驱动力是界面水势梯度,而土壤-大气界面水势梯度是土壤水势与大气水势之差,大气水势又决定于空气相对湿度,故饱和水汽压差愈高,空气相对湿度越低,蒸发能力愈强。土壤蒸发量与相对湿度相关分析表明裸间蒸发与相对湿度呈极显著负相关( $R = -0.61^{**}$ ,  $R_{0.01(n=19)} = 0.55$ )。

### 2.3 红壤坡地土壤水分与土壤-大气界面水分传输特征

红壤坡地土壤水分与能量平衡。7 月 9 日为大雨后的第 2d,代表高土壤水分日(0~20cm 土层土壤体积含水量 23%),土壤水分充足且蒸发量大,故潜热消耗(蒸散量)约占净辐射的 70%。

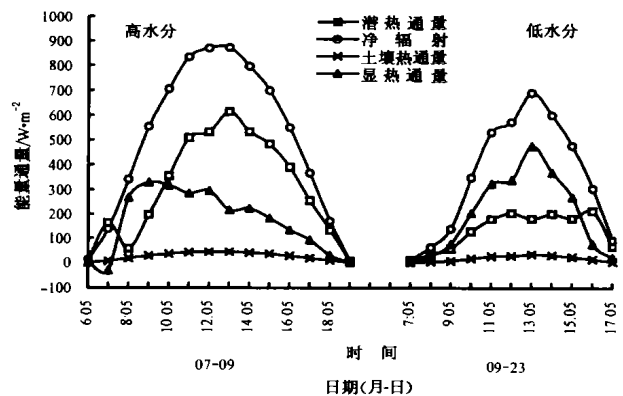


图 5 红壤坡地不同土壤水分状况的能量平衡  
Fig. 5 Diurnal energy budget in different soil moistures in red soil slopes

式中,  $\theta$  为土壤表层体积含水量。

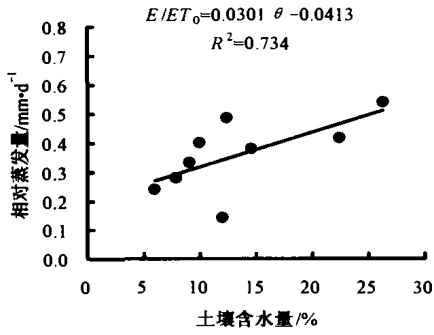


图6 红壤坡地表土相对蒸发量与0~20cm表土含水量的关系  
Fig.6 Relationship of relative evaporation and 0~20cm soil water content in red soil slopes

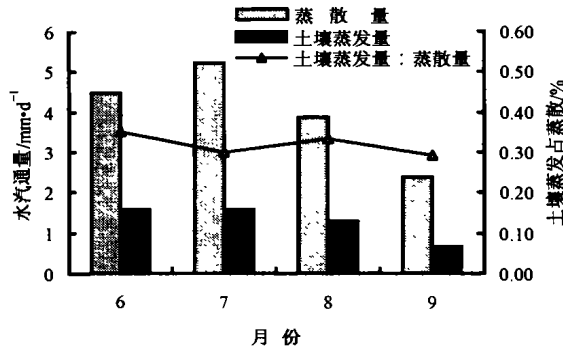


图7 红壤坡地土壤蒸发量与蒸散量的关系  
Fig.7 The proportion of soil evaporation and evapotranspiration in red soil slopes

利用波文比能量平衡法计算红壤坡地月平均蒸散量变化见图7,图7表明7月份地表-大气界面水分通量达最大值,8月下旬因降雨量减少,土壤含水量不足,地表-大气界面水分通量有所减少,进入9月份几

乎无降雨,水分胁迫严重,蒸散量急剧降低。地表-大气界面水分通量主要通过土壤水分蒸发和植株蒸腾完成,6月6日~9月30日蒸散耗水量为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多60.02mm。图7表明裸间蒸发占总蒸散量的30%左右,即此期约有1/3的田间耗水为无效耗水,通过减少田间无效耗水则可提高农田水分利用效率。

### 3 小结与讨论

红壤坡地不同农业利用景观土壤蒸发量有差异,但水汽传输通量动态变化规律一致,土壤蒸发量日变化为典型单峰曲线。土壤-大气界面水分传输通量受诸因素影响,当地表植被群落稳定、作物因素影响较小时,水汽通量除受气候条件影响外还明显受土壤含水量特别是表层土壤含水量的影响。土壤-大气界面水汽传输通量与净辐射、环境温度呈显著正相关,与空气湿度呈极显著负相关。季节性干旱期增加土壤含水量,使作物恢复正常蒸腾状态<sup>[7]</sup>,可有效缓解干旱。土壤蒸发消耗的水分不参与作物干物质积累过程,属非生产性水分消耗,该部分水量可通过土壤培肥、灌溉控制、物理障碍等抑制土壤蒸发手段加以利用<sup>[5-6]</sup>。

### 参 考 文 献

- 1 何电源. 南方土壤类型及分布. 中国南方土壤肥力及栽培作物施肥. 北京:北京科学技术出版社,1994. 3~27
- 2 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
- 3 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
- 4 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学. 北京:清华大学出版社,1988. 144~146
- 5 唐登银,罗毅,于强. 农业节水的科学基础. 灌溉排水,2000,19(2):1~9
- 6 刘昌明,张喜英等. 大型蒸渗仪与小型裸间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究. 水利学报,1998(10):36~39
- 7 Monteith J. L. Vegetation and the atmosphere. VOL. 1, Principles. London Academic Press, 1975