

文章编号: 0254-0096 (2004) 01-0001-05

## 环境因子对土壤水分蒸散的影响

范爱武, 刘伟, 王崇琦

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 在有作物生长的条件下, 土壤散失到大气中的水分主要通过土壤表面蒸发和作物叶面蒸腾两种方式进行, 二者之和称为土壤水分蒸散。由于作物冠层的遮荫作用, 作物覆盖下土壤水分的蒸发强度与裸土情况下显然不同。本文建立了土壤水分蒸散率的计算公式, 并对几个环境因子的影响进行了讨论。计算结果表明, 冠层净辐射强度和空气饱和差对蒸散率影响较大, 而气温和风速的影响相对较小。当冠层净辐射强度和空气饱和差增大时, 蒸散率和日蒸散总量的增加均较为明显。另外, 作物的叶面积指数对蒸散也有较大的影响, 同时它对蒸发和蒸腾在蒸散中所占的比重影响很大, 叶面积指数增大时, 叶面蒸腾所占的份额增大, 而蒸发所占的份额相应地减小。

**关键词:** 土壤水分; 蒸发; 蒸腾; 蒸散; 环境因子

**中图分类号:** TK124

**文献标识码:** A

### 0 引言

在现代土壤学中, 水分、热量、养分和空气被称之为土壤的四大肥力因素, 而水分是其中最活跃的一个因子<sup>[1]</sup>。关于土壤中水分的迁移, 已有很多学者进行了研究<sup>[2-6]</sup>。对于土壤和大气之间水分交换的研究, 有的学者侧重于土壤表面的蒸发<sup>[7,8]</sup>, 另一部分学者则更加关注作物叶面的蒸腾<sup>[9,10]</sup>。众所周知, 在有作物生长的情况下, 土壤中的水分一方面通过土壤表面蒸发掉, 另一方面通过作物叶面的气孔而蒸腾, 二者的总和被称为蒸散。土壤水分是作物生活的基本条件。一般每制造一份干物质, 作物要消耗 300~500 份水分<sup>[1]</sup>。由此可见, 作物对于水分的需求是十分可观的。研究表明, 作物在新陈代谢活动中实际消耗的水分大约占其所吸收水分的 1%<sup>[11]</sup>, 故大约有 99% 的水分通过叶面蒸腾散失掉。因此, 为了正确衡量土壤向大气散失的水分, 必须全面考虑土壤表面蒸发和作物叶面蒸腾的影响, 尤其是在作物生长发育的旺盛期, 叶面蒸腾往往对土壤水分蒸散的贡献更大。鉴于此, 本文将着重于环境因子对土壤水分蒸散的影响进行探讨。

### 1 土壤水分蒸散率 $ET$ 的计算公式

对蒸散进行计算的方法大致可分为两大类。一类为水文学方法。由于作物在新陈代谢活动中实际消耗的水分只占作物所吸收水分的 1%<sup>[11]</sup>, 故可认为作物根系吸收的水分基本上等于冠层叶面的蒸腾量。土壤中的水分平衡可用下式来描述:

$$\text{降水} + \text{灌溉} = \text{渗透} + \text{径流} + \Delta W + ET$$

式中,  $\Delta W$  表示在一定时间内贮存于土壤中的水分的变化量。由于降水、渗透和土壤中水分含量的变化难以精确测量, 故蒸散量  $ET$  的计算精度受到很大的限制, 同时这种方法不能得到瞬时的蒸散强度。

另一类方法称之为微气象学方法。就是根据近地表的微气象参数和作物本身的一些几何参量来计算蒸散量, 它不需要知道地表以下的有关情况, 因此应用起来比较方便。同时它能得到蒸散的瞬时强度和累积值。本文将采用这种方法来推导蒸腾率  $EP$  和蒸发率  $ES$  的计算公式, 然后将两者相加即可得到蒸散率  $ET$  的计算公式。

#### 1.1 作物叶面蒸腾率 $EP$ 的计算

对于作物叶面蒸腾率的计算, 已有许多研究者提出了各自的经验公式。本文采用彭曼-蒙特斯

收稿日期: 2002-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(59976010); 教育部博士点  
基金项目(2000048731)

(Penman-Monteith) 模式来计算, 因为实践证明它具有较高的精度<sup>[9]</sup>。公式如下:

$$EP = \frac{\Delta \cdot R_n + \rho c_p D_a / r_1}{[\Delta + \gamma(1 + r_c / r_1)] L} \quad (2)$$

式中,  $R_n$ ——作物冠层叶面截留的太阳净辐射强度,  $W/m^2$ ;  $D_a$ ——空气的饱和差, hPa, 等于空气中的水蒸汽压力与对应空气温度下的水蒸汽饱和压力之差;  $r_c$ ——作物冠层叶片整体气孔阻力, s/m;  $r_1$ ——叶片层流边界层阻力, s/m;  $\Delta$ ——饱和水汽压-温度曲线上的斜率, hPa/°C;  $\gamma$ ——湿度计常数, hPa/°C;  $\rho$ ——空气密度,  $kg/m^3$ ;  $c_p$ ——空气的定压比热,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $L$ ——水的汽化潜热,  $J/kg$ ;  $\rho$ ,  $\gamma$ ,  $L$  和  $\Delta$ ——均为气温  $T_a$  (°C) 的函数, 分别采用下述公式计算:

$$\rho = 1.2837 - 0.0039 T_a \quad (3)$$

$$\gamma = 64.55 - 0.064 T_a \quad (4)$$

$$L = 2498.9 - 2.33 T_a \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{25966.89}{(241.9 + T_a)^2} \cdot 10^{\frac{7.63 T_a}{241.9 + T_a}} \quad (6)$$

在充分供水的条件下, 冠层叶片整体气孔阻力  $r_c$  (s/m) 的计算式如下<sup>[12]</sup>:

$$r_c = 1.111(50.18 + 7.16 D_a) \exp(-0.281 LAI) \quad (7)$$

其中,  $LAI$  (Leaves Area Index) 为叶面积指数, 即单位面积土壤表面所覆盖的叶面积, 表征作物冠层叶片生长的旺盛程度。

空气层流边界层阻力  $r_1$  (s/m) 采用 Thom 与 O-liver 公式<sup>[13]</sup> 确定:

$$r_1 = 4.72 \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2 / (1 + 0.54 V_z) \quad (8)$$

式中,  $z$ ——参考高度, 一般取 2m。  $V_z$ —— $z$  高度处的风速, m/s;  $d$ ——零平面位移, m;  $z_0$ ——冠层表面粗糙度, m。  $d$  和  $z_0$  的计算公式为<sup>[11]</sup>:

$$d = 0.701 \cdot H^{0.979} \quad (9)$$

$$z_0 = 0.131 \cdot H^{0.997} \quad (10)$$

式中,  $H$ ——作物的高度, m。

### 1.2 土壤表面蒸发率 $ES$ 的计算

作物冠层叶片截留的太阳净辐射, 一部分为叶面蒸腾所利用, 剩下的才能到达土壤表面。由于作物冠层和土壤表面在太阳辐射能的分配方面存在着

这种关系, 因而土面蒸发和叶面蒸腾之间也必然存在某种联系。文献[12]的研究表明, 土壤表面蒸发  $ES$  与作物叶面蒸腾  $EP$  之间存在着如下关系:

$$ES = \alpha \cdot EP \quad (11)$$

式中,  $\alpha$ ——土壤蒸发与叶面蒸腾的比例系数, 它与叶面积指数  $LAI$  等密切相关, 而且具有明显的日变化。  $\alpha$  的表达式如下:

$$\alpha = \frac{\exp \left\{ -0.3973 LAI \left[ 1.0 + 1.036 \left| \sin \left( \frac{t-13}{12} \right) \right| \right] \right\}}{1 - \exp \left\{ -0.3973 LAI \left[ 1.0 + 1.036 \left| \sin \left( \frac{t-13}{12} \right) \right| \right] \right\}} \quad (12)$$

式中,  $t$ ——一日内的时刻, 从零点开始排序。

### 1.3 蒸散率 $ET$ 的计算

土面蒸发率和叶面蒸腾率的计算公式既已获得, 蒸散率的计算公式也就可以得到, 即:

$$ET = ES + EP = \frac{\Delta \cdot R_n + \rho c_p D_a / r_1}{[\Delta + \gamma(1 + r_c / r_1)] L} \cdot \left[ 1 + \frac{\exp \left\{ -0.3973 LAI \left[ 1.0 + 1.036 \left| \sin \left( \frac{t-13}{12} \right) \right| \right] \right\}}{1 - \exp \left\{ -0.3973 LAI \left[ 1.0 + 1.036 \left| \sin \left( \frac{t-13}{12} \right) \right| \right] \right\}} \right] \quad (13)$$

其中,  $\rho$ ,  $\gamma$ ,  $L$ ,  $\Delta$ ,  $r_c$  和  $r_1$  分别由式(3)~(8) 确定。

## 2 环境因子对蒸发、蒸腾和蒸散的影响

### 2.1 蒸发率、蒸腾率和蒸散率的日变化

本文所指的环境因子包括气温  $T_a$ 、冠层截留的净辐射强度  $R_n$ 、空气饱和差  $D_a$  等气象因子以及植株的叶面积指数  $LAI$  等几何参数。文献[4]和[12]的实验研究表明,  $T_a$ 、 $R_n$  和  $D_a$  等气象因素在一日内呈余弦波变化, 只是气温和空气饱和差相对于冠层净辐射强度存在滞后效应, 其值分别用下述各式计算<sup>[4,12]</sup>:

$$T_a(t) = \bar{T}_a + T_{ar} \cos \left( \frac{t-14}{12} \right) \pi \quad (14)$$

$$R_n(t) = R_{max} \cos \left( \frac{t-12}{12} \right) \pi \quad (15)$$

$$D_a(t) = D_{min} + D_{ar} \cos \left( \frac{t-14}{12} \right) \pi \quad (16)$$

式中,  $\bar{T}_a$ ——日平均气温, °C;  $R_{max}$ ——日最大净辐射强度,  $W/m^2$ ;  $D_{min}$ ——最小空气饱和差,

hPa;  $T_{ar}$ ,  $D_{ar}$ ——分别为气温和净辐射强度的日变幅;  $t$ ——时刻, 从午夜零点开始计时。4 月 14 日实测的冬小麦田的有关气象参数和植株几何参数如表 1 所示。

表 1 实测的有关气象参数和植株的几何参数

$\bar{T}_a$	$T_{ar}$	$R_{max}$	$D_{min}$	$D_{ar}$	$H$	LAI
/°C	/°C	$W \cdot m^{-2}$	/hPa	/hPa	/m	
15.4	9.2	443	0	16.5	0.39	3.2

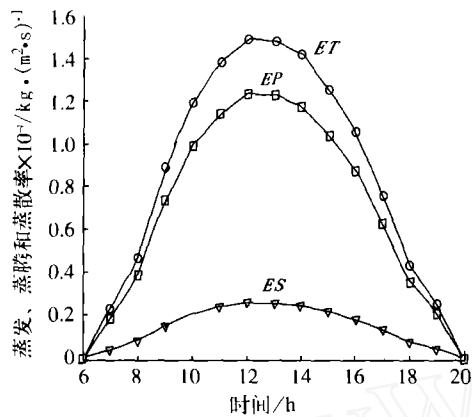


图 1 蒸发率、蒸腾率和蒸散率的日变化  
Fig.1 The diurnal changes of ES, EP and ET

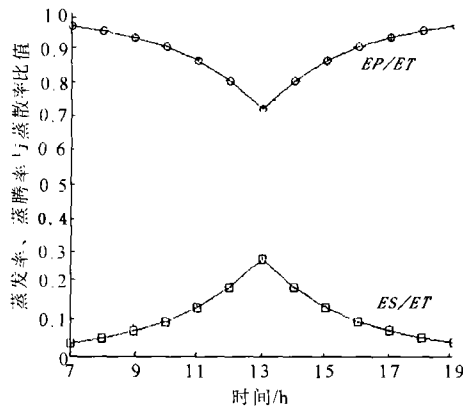


图 2 蒸发率、蒸腾率与蒸散率比值的日变化  
Fig.2 The diurnal changes of ES/ET and EP/ET

图 1 为蒸发率、蒸腾率和蒸散率的日变化曲线, 图 2 给出了蒸发率、蒸腾率与蒸散率的比值的日变化规律。从图 1 可以看出, 蒸发率、蒸腾率和蒸散率从 6:00 左右开始增加, 到 12:00~13:00 左右达到最大值, 然后开始下降, 一直到 20:00 左右

土壤水分的蒸散才大致停止。由图 2 可以看出, 在一天中的各个时期, 作物的叶面蒸腾在土壤水分的蒸散中起主要作用。13:00 时其比值达到最小值, 但仍然超过了 70%; 与此同时, 蒸发在土壤水分的蒸散中的比重达到最大值, 但也低于 30%。

## 2.2 气象因子对土壤水分蒸散的影响

从式(2)~(8)和式(13)可以看出, 土壤水分的蒸散率与作物冠层截留的净辐射强度  $R_n$ 、气温  $T_a$ 、空气饱和差  $D_a$  和风速  $V_z$  等气象参数以及植株的叶面积指数 LAI 等几何参数有密切关系。为了考察这几个气象因子对土壤水分蒸散的影响, 我们通过将其中的一个气象参数改变, 其余参数均保持不变, 以此来观察蒸散率的日变化和一天中总蒸散量的变化大小, 其结果分别如图 3、图 4 和表 2 所示。

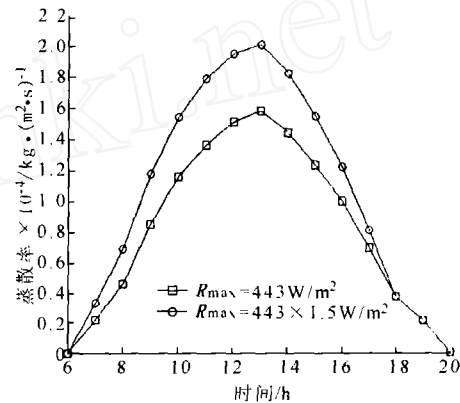


图 3 冠层净辐射强度对蒸散率的影响  
Fig.3 The influence of  $R_n$  on ET

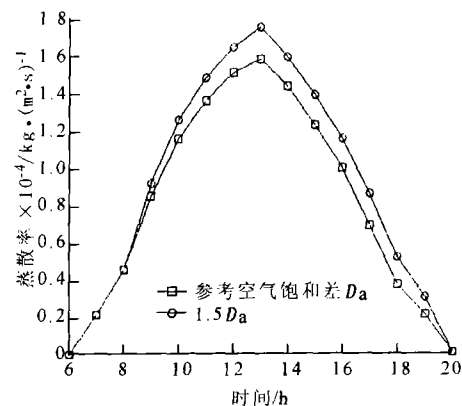


图 4 空气饱和差对蒸散率的影响  
Fig.4 The influence of  $D_a$  on ET

从图3可以看出,当冠层的净辐射强度为参考工况的1.5倍时,土壤水分蒸散率的增加较大,尤其是在9:00~16:00这段时间内增加的幅度更为明显。从表2可以看出,此时一天中的总蒸散量相对于参考工况增加了27.8%。图4给出了空气饱和差为参考工况的1.5倍时土壤水分蒸散率的日变化曲线。由于空气饱和差的变化相对于净辐射强度的变化有大约两个小时的滞后,此时两条曲线差别较大的时间段出现在11:00~18:00。同时从表2可以看出,空气饱和差为参考工况的1.5倍时一天中

总蒸散量的增加率为12.1%。另外,通过计算发现,单纯的气温变化或风速变化对土壤水分蒸散的影响相对于净辐射强度和空气饱和差要小(这里未给出其日变化的图形)。这是由于水分蒸散所需的热量主要来源于太阳辐射能,而水蒸汽向大气中扩散的驱动力则主要为空气饱和差,或者说大气相对湿度大小。由表2的最后两列可以看到,当气温升高一半时,总蒸散量仅仅增加了2.2%;风速为参考工况的两倍时,总蒸散量也只增加了4.3%。

表2 气象因素变化对日蒸散量的影响

Table 2 The influence of the change of meteorologic parameters on the day evapotranspiration

气象因素变化	$R_{\max}, T_a, D_a, V_z$	$1.5R_{\max}$	$1.5D_a$	$1.5T_a$	$2V_z$
日蒸发量/ $\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	0.643	0.821	0.714	0.657	0.667
日蒸腾量/ $\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	3.715	4.749	4.172	3.797	3.878
日蒸散量/ $\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	4.358	5.570	4.886	4.454	4.545
日蒸散量的增加率/%		27.800	12.100	2.200	4.300

### 2.3 叶面积指数 LAI 对蒸散率的影响

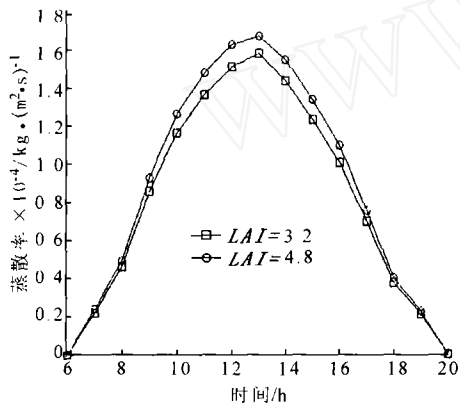


图5 冠层叶面积指数对蒸散率的影响

Fig.5 The influence of LAI on ET

前面已经指出,叶面积指数 LAI 表示单位土壤表面上覆盖的作物叶子的面积, LAI 越大,作物的叶子越茂密,因而通过作物冠层的叶面蒸腾而散失的水分也越多;而另一方面,由于作物冠层的遮荫作用,此时土壤蒸发在总蒸散中所占的份额将变小。图5和图6分别给出了当叶面积指数增大为参考工况的1.5倍时对蒸散率的影响以及对蒸发率、蒸腾率与蒸散率之间比值的影响。从图5可以看到,叶面积指数增大时,蒸散率也相应增大,尤其

在10:00~15:00之间较为明显。而由图6可以明显地看出,叶面积指数增大后,叶面蒸腾在蒸散中所占的比重明显提高,在最小的时候都超过了80%;相应地,蒸发所占的比例就明显地缩小了。

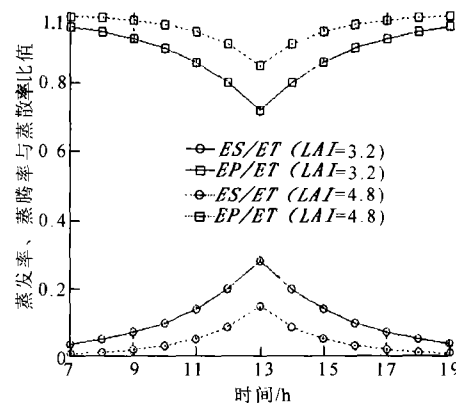


图6 叶面积指数对蒸发率、蒸腾率与蒸散率比值的影响

Fig. 6 The influence of LAI on ES/ET and EP/ET

## 3 结 论

通过分析可看到,土壤水分的蒸散率具有较为明显的日变化,从早上开始增加,在中午左右达到最大值,然后逐渐减小。同时,蒸发率、蒸腾率与

蒸散率之间的比值也呈现出明显的日变化。在几个气象因子中, 冠层净辐射强度和空气饱和差对土壤水分的蒸散率的影响较大, 而气温和风速的影响相对来说较小。当冠层净辐射强度和空气饱和差增大时, 蒸散率和一天中的总蒸散量的增加均较为明显。另外, 作物的叶面积指数对土壤水分的蒸散也有较大的影响, 同时它对蒸发和蒸腾在蒸散中所占的比重影响很大, 叶面积指数增大时, 叶面蒸腾所占的份额增大, 而蒸发所占的份额则相应地减小。

#### [参考文献]

- [1] 丘华昌, 陈明亮. 土壤学[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995.
- [2] Hillel D. Computer simulation of soil water dynamics [M]. International Development Research Centre, 1977.
- [3] 康绍忠, 刘晓明, 张国瑜. 作物覆盖条件下田间水热运移的模拟研究[J]. 水利学报, 1993, (3): 11—17.
- [4] 范爱武, 刘伟, 王崇琦. 土壤温度和水分日变化的实验研究[J]. 太阳能学报(已录用).
- [5] 陈永平, 施明恒, 金峰. 太阳辐射、大气对流下未饱和土壤中热质迁移过程的实时仿真研究[J]. 太阳能学报, 2001, 22(1): 102—106.
- [5] Chen Yongping, Shi Minghong, JinFeng. Simulation of heat and mass transfer in unsaturated soil under solar radiation and air convection[J]. Acta Energeiae solaris sinica, 2001, 22 (1): 102—106.
- [6] 林家鼎, 孙菽芬. 土壤内水分流动、温度分布及其表面蒸发效应的研究[J]. 水利学报, 1983, (7): 1—8.
- [7] Hillel, D. Evaporation from bare soil under steady and diurnally fluctuating evaporativity [J]. Soil science, 1975, 120: 230—237.
- [8] Staple W J. Modified Penman equation to provide the upper boundary condition in computing evaporation from soil[J]. Soil Sci Soc Amer Proc., 1974, 38: 837—840.
- [9] 康绍忠, 熊运章, 刘晓明. 用彭曼-蒙特斯模式计算田间作物水分散失量的研究[J]. 西北农业大学学报, 1991, 1: 23—28.
- [10] Mariusz Merta, Christoph Sambale, et al. Suitability of plant physiological methods to estimate the transpiration of agricultural crops[J]. Plant nutrition and soil science, 2001, 164: 43—48.
- [11] Norman J. Rosenberg. Microclimate: The Biological Environment[M]. John Wiley & Sons, 1974.
- [12] 康绍忠, 刘晓明, 高新科, 等. 土壤-作物-大气连续体水分传输的计算机模拟[J]. 水利学报, 1992, (3): 1—12.
- [13] Choudhury B. Modeling the effect of weather condition and soil water potential on canopy temperature for corn [J]. Agric Meteorology, 1983, 29: 169—182.

## EFFECTS OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON THE EVAPOTRANSPIRATION OF THE SOIL WATER

Fan Aiwu, Liu Wei, Wang Chongqi

(Department of Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** There are two ways for the soil water to diffuse into the atmosphere when the soil surface is covered with crops. The one through the soil surface is called evaporation; the other through the surfaces of the crop leaves is called transpiration. The total of evaporation and transpiration is usually defined as the evapotranspiration of the soil water. With crops growing in the soil, the evaporation is quite different from that of the bare soil due to the shading effect of the crop canopy. The calculation formula of the evapotranspiration rate of the soil water was deduced and some discussions on the influences of several environmental factors were conducted. The calculation results showed that the neat radiant intensity  $R_n$  and the saturation difference of the atmosphere  $D_a$  exert significant influences on the evapotranspiration while the effects of the atmospheric temperature  $T_a$  and wind speed  $V_z$  are relatively small. With the increase of  $R_n$  or  $D_a$ , an obvious rise in the evapotranspiration rate and the total evapotranspiration of the day occurs. Moreover, the bigger the leaves area index(LAI), the bigger the proportion of the transpiration and the smaller the proportion of the evaporation.

**Keywords:** soil water; evaporation; transpiration; evapotranspiration; environmental factors

**联系人 E-mail:** faw01@sina.com