

水分胁迫下土壤水蒸散模型研究

巫东堂 韩 雄 焦晓燕 陈明昌

陈 阳

(山西省农业科学院土壤肥料研究所, 太原 030031)

(山西经济管理学院, 太原 030006)

摘 要 对水分胁迫下农田土壤水分蒸散模型进行了研究, 在水分胁迫下实际蒸散量 (ET) 与潜在蒸散量 (ET_m) 之间关系为: $ET = K_w \cdot ET_m$, K_w 与根层土壤有效水含量具有直线相关性。模型中考虑根系分布的影响, 能明显提高模型精度。

关键词 模型 土壤水蒸散 水分胁迫

农田蒸散包括农田蒸发和作物蒸腾两部分, 在土壤充分供水条件下, 它取决于大气蒸发力和作物因素; 在土壤水分胁迫下, 它不仅取决于大气和作物因素, 而且与土壤湿度有关。蒸散代表着农田的耗水量, 但是农田蒸散量的实际测定困难较大, 因此, 建立计算蒸散量的数学模型在研究土壤水蒸散及农业生产应用方面都有一定的价值。

1 试验方法

试验在北纬 35° 、海拔 470m 的晋南黄土高原上进行。

将冬小麦分为出苗~冬前 (地上部分停止生长, 下同), 冬前~返青, 返青~拔节, 拔节~抽穗, 抽穗~成熟五个生育时期, 在每个生育时期始末, 用烘干-称重法分别测定 3m 上层土壤水分含量, 0~60cm 每 10cm 为一层, 60~300cm 每 20cm 为一层。田间持水量用环刀法^[1]测定, 质地用比重计法^[1]测定, 凋萎湿度用最大吸湿水乘系数获得。温度、风速、日照、相对湿度等气象数据由县气象站提供, 降雨量在试验点实测。

2 数学模型

2.1 土壤充分供水蒸散模型

在土壤充分供水时蒸散量受大气、作物因素影响, 其表达式为:

$$ET_m = K_c \cdot ET_0 \quad (1)$$

式中, ET_m 为土壤充分供水时的实际蒸散量, 即潜在蒸散量, ET_0 为参考蒸散量, 表示气象因素对蒸散量所起的作用, 通过彭曼公式计算:

$$ET_0 = C \cdot [W \cdot R_n + (1 + W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d)] \quad (2)$$

e_a 、 e_d 分别为平均温度下饱和水汽压和实际水汽压, 通过气温及平均相对湿度计算, $f(u)$ 为风速函数; R_n 为净辐射总量; 可通过气温、日照时数、天文辐射量等气象资料计算。 W 是由温度和海拔决定的加权系数 ($W = \frac{\Delta}{\Delta + r}$), C 是对最大相对湿度和昼夜风速比率等的调整系数。 K_c 为作物系数, 用彭曼公式计算的参考蒸散量是在有良好矮草覆盖充分供水下的蒸散量, 因此计算农田种植作物条件下的蒸散量需引入作物系数。

2.2 土壤水分胁迫下蒸散模型

旱地农田多数情况下, 土壤水分不能充分供给作物所需, 在水分胁迫下模型中需要引入土壤湿度因素项 K_w , 即:

$$ET = K_w \cdot K_c \cdot ET_0 \quad (3)$$

ET 为水分胁迫下的实际蒸散量, K_w 反映土壤湿度因素, 由于土壤水分对蒸散量的影响关系比较复杂, 通常人们多用土壤有效水相对含量与蒸散量的关系进行计算^[2], 其表达式为:

$$\begin{cases} K_w = 0, & (W_s - W_p) / (W_k - W_p) \leq 0 \\ K_w = (W_s - W_p) / F(W_k - W_p) & 0 < (W_s - W_p) / (W_k - W_p) < F \\ K_w = 1 & (W_s - W_p) / (W_k - W_p) \geq F \end{cases} \quad (4)$$

W_s 为土壤实际含水量, W_k 为田间持水量, W_p 为凋萎系数, F 为临界值。

3 结果与分析

3.1 小麦生育期内气象条件及土壤物理常数

根据小麦生育期月平均气温、日照、相对湿度和风速等资料 (表 1) 用彭曼公式计算月平均日参考蒸散量 (ET_0), 结果列于表 1。

表 1 月平均气温、日照、相对湿度和风速

项 目	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
气温(℃)	13.25	5.33	1.37	-0.47	2.17	5.17	13.40	17.30	25.77
日照(h/d)	6.1	5.8	5.8	5.0	4.3	4.6	7.5	7.2	7.9
相对湿度(%)	72	70	61	62	58	73	68	65	67
风速(m/s)	1.4	1.7	1.7	1.2	1.6	1.7	1.8	1.7	1.7
ET_0 (mm/d)	2.6	1.43	0.96	0.80	1.49	1.97	3.92	4.78	6.14

3m 土层土壤水分物理常数结果列于表 2, 田间持水量、凋萎系数均为重量百分数, 凋萎系数是最大吸湿水乘 1.3 系数所得^[4], 质地按卡庆斯基分类。^[3]。

3.2 土壤湿度影响值 (K_w) 的计算

由公式 (3) 知, 通过实测法求 K_w 值, 除要有 K_c 、 ET_0 值, 还要实测实际蒸散量 ET 值。根据农田水分平衡式^[3], 在无地下水补给, 无地表径流下, $ET = S_1 - S_2 + P$, 其中 S_1 、 S_2 分别为某一时期始末土壤贮水量, P 为降雨量。小麦各生育期土壤贮水差值, 降雨量及日平均实际蒸散量结果见表 3, 土壤水分增减值是各生育期始末 3m 土层土壤含水量之差。

表 2 土壤水分物理常数

土 层 (cm)	容 重 (g/cm ³)	田间持水量 (W/W, %)	凋萎系数 (W/W, %)	质 地
0~10	1.31	20.5	6.24	轻壤
10~20	1.45	20.1	5.93	轻壤
20~30	1.30	18.3	6.36	轻壤
30~40	1.28	18.3	6.47	轻壤
40~50	1.42	18.8	7.32	轻壤
50~60	1.47	19.3	8.58	中壤
60~80	1.35	19.3	7.18	轻壤
80~100	1.35	20.2	6.86	轻壤
100~120	1.32	19.5	6.80	轻壤
120~140	1.26	19.4	6.77	轻壤
140~160	1.30	21.4	6.55	轻壤
160~180	1.29	21.5	6.44	轻壤
180~200	1.27	21.1	6.70	轻壤
200~300	1.27	21.0	6.60	轻壤

表 3 各生育期日均蒸散量

项 目	出苗~冬前	冬前~返青	返青~拔节	拔节~抽穗	抽穗~成熟
降雨量(mm)	26.6	31.9	40.4	34.7	50.6
土壤水增减(mm)	-11.0	3.0	21.9	-46.1	-60.3
蒸散量(mm/d)	0.616	0.286	2.01	3.23	2.77

根据表 1、表 3 平均日参考蒸散量、日实际蒸散量及作物系数, 计算得 K_w 值见表 4。

表 4 各生育期 ET_0 、 K_c 、 K_w 值

项 目	出苗~冬前	冬前~返青	返青~拔节	拔节~抽穗	抽穗~成熟
ET_0	2.01	1.16	2.94	4.35	5.46
K_c	0.35	0.35	0.75	1.16	0.95
K_w	0.876	0.704	0.912	0.640	0.534

因当地无 K_c 值资料, 暂选用联合国粮农组织提供的冬小麦 K_c 值。

3.3 K_w 值与土壤有效水的关系模型

以前的研究多以植物根层土壤有效水确定 K_w 值, 根据冬小麦 95% 根系分布层^[5], 小麦出苗~冬前根系分布层为 0~100cm, 冬前~返青、返青~拔节、拔节~抽穗为 0~200cm, 抽穗~成熟为 0~300cm, 划分各生育期平均土壤含水量见表 5。

表 5 小麦各生育期平均含水量 (mm)

土层(cm)	出苗~冬前	冬前~返青	返青~拔节	拔节~抽穗	抽穗~成熟
0~50	88.1	84.4	92.2	73.6	65.2
50~100	102.0	99.2	92.7	83.1	74.3
100~200	159.0	159.4	149.8	146.0	131.1
200~300	190.5	192.5	190.4	190.4	168.2

根层土壤有效水相对含量与实测 K_w 值成直线相关, $r=0.803$, 相关式为:

$$K_w = 0.131 + 1.445 \frac{W_s - W_k}{W_p - W_k}$$

根系在根层不同深度分布有很大差异, 从不同深度土层吸入的水量也就不同, 因此作物对不同深度的土壤水分的利用率也不同, 为了更客观反映根层土壤有效水与 K_w 的关系, 引入根系分布校正值 (R) 即:

$$K_w = f \left(\sum_{i=1}^n R_i \frac{W_{si} - W_{ki}}{W_{pi} - W_{ki}} \right)$$

式中, i 表示不同根层, 分 0~50, 50~100, 100~200, 200~300cm 四个层次, 即 $n=4$, R_i 表示某层根系分布校正值, R_i 值确定是根据该层土壤根系生物量占总生物量多少而定, 根据小麦不同时期根系随深度变化函数关系^[5], 确定小麦各个生育期。不同层次 R_i 值见表 6。

表 6 小麦各生育期不同层次 R 值

土层 (cm)	出苗~冬前	冬前~返青	返青~拔节	拔节~抽穗	抽穗~成熟
0~50	0.67	0.52	0.53	0.52	0.48
50~100	0.22	0.25	0.25	0.26	0.25
100~200	0.10	0.18	0.18	0.20	0.21
200~300	0.01	0.05	0.04	0.02	0.06

根层有效水含量经过 R 值校正后与 K_w 呈直线相关, 关系式为:

$$K_w = a + b \cdot \sum_{i=1}^n R_i \left(\frac{W_{si} - W_{ki}}{W_{pi} - W_{ki}} \right)$$

$r=0.906$, 相关性明显大于校正之前, 因此在计算蒸散量模型中引入 R 值能进一步提高精度, a 、 b 为经验系数, 分别为 0.179、1.34, 不同土壤、不同气候类型地区可能有所不同。

土壤含水量达到或超过临界值 F_1 时, 能充分供给作物所需, $K_w=1$; 土壤有效水相对含量降到或低于临界值 F_2 时, 蒸散量为零, $K_w=0$ 。因此 K_w 值与土壤有效水的关系模型为:

$$\begin{cases} K_w = 0 & \sum_{i=1}^n R_i \left(\frac{W_{si} - W_{pi}}{W_{ki} - W_{pi}} \right) \leq F_2 \\ K_w = a + b \sum_{i=1}^n R_i \left(\frac{W_{si} - W_{pi}}{W_{ki} - W_{pi}} \right) & F_2 < \sum_{i=1}^n R_i \left(\frac{W_{si} - W_{pi}}{W_{ki} - W_{pi}} \right) < F_1 \\ K_w = 1 & \sum_{i=1}^n R_i \left(\frac{W_{si} - W_{pi}}{W_{ki} - W_{pi}} \right) \geq F_1 \end{cases}$$

$$\text{式中: } F_1 = \frac{1-a}{b}, F_2 = -\frac{a}{b}$$

当 $a=0.179$, $b=1.34$ 时, F_1 、 F_2 分别为 0.61 和 -0.31。 $F_1=0.61$, 说明土壤有效水含量等于或大于最大有效水 61% 时, 能充分供给作物所需, 这一结果与其它研究结果基本一致; $F_2=-0.31$ 说明根层土壤含水量低于凋萎系数、高于风干土时, 蒸散量为零。根据实际

情况, 下层土壤含水量一般不会低于凋萎系数, 当下层土壤含水量等于或接近凋萎系数, $0 \sim 50\text{cm}$ 含水量接近风干土时, $\sum_{i=1}^n R_i \left(\frac{W_{si} - W_{pi}}{W_{kl} - W_{pi}} \right) = F_2$, 此时是蒸散量为零的临界含水量。

参 考 文 献

- 1 中国科学院南京土壤研究所, 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1977
- 2 王树森, 邓根云. 地膜覆盖下土壤水分效应的模拟研究. 华北农学报, 1990, 5(1): 46~50
- 3 朱祖祥. 土壤学. 北京: 农业出版社, 1983, 11~12
- 4 罗戴. 土壤水. 北京: 科学出版社, 1964, 332~339
- 5 苗果园等. 黄土高原旱地冬小麦生长规律的研究. 作物学报, 1989(2): 104~115

Model of Soil Water Evapotranspiration in the Condition of Water Stress

Wu Dongtang Han Xong Jiao Xiaoyan Chen Mingchang

(Institute of Soil and Fertilizer, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan)

Chen Yang

(Shanxi College of Economic Management, Taiyuan)

Abstract A model of soil water evapotranspiration in farmland under the condition of water stress has been established. In the condition of water stress, the relationship between actual evapotranspiration capacity (ET) and potential evapotranspiration capacity (ETm) is $ET = K_w \cdot ET_m$. There is a linear correlation between K_w and the content of available water in root region. The accuracy of modelling can be improved by introducing the effect of root distribution into the model.

Key words: Model; Soil water evapotranspiration; Water stress