文章编号:1672-3317(2018)07-0050-11

# 砂石覆盖条件下夏玉米蒸发蒸腾量的估算

唐德秀1,2,3,李毅1,2,3\*,刘俸6,付亚亚1,2,3,李思逸1,2,3,赵丹5,冯浩2,4

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌712100;2.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究所,陕西杨凌712100;3.西北农林科技大学教育部农业重点实验室,

陕西杨凌 712100;4.中国科学院 水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100; 5.北京沃尔德防灾绿化技术有限公司,北京 100048;6.四川省水利水电勘测设计研究院,成都 610000)

摘要:【目的】准确估算作物蒸发蒸腾量(ET。)。【方法】基于2014—2016年遮雨棚下夏玉米土箱生长试验,对砂石覆盖条件下夏玉米ET。的单、双作物系数法计算公式进行了修正,并以小型蒸渗仪测得的ET。<sub>(来刚</sub>对修正后的作物系数法的适用性进行了评估。单作物系数由ET。<sub>(来刚</sub>和参考作物蒸发蒸腾量直接计算得到,用2014和2016年的单作物系数与砂石覆盖量进行拟合,得出计算ET。的单作物系数法修正公式后对2015年度的数据进行验证。【结果】砂石覆盖条件下夏玉米各生育阶段的ET。<sub>(来刚</sub>较为接近。在双作物系数法中引入修正系数验证后发现各处理条件下的计算值接近ET。<sub>(来刚</sub>。【结论】双作物系数法的计算结果能更好地估算砂石覆盖条件下夏玉米的蒸发蒸腾量。 关键词:作物系数法;砂石覆盖;夏玉米;蒸发蒸腾量;修正公式

中图分类号:S152.7

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0615

唐德秀,李毅,刘俸,等.砂石覆盖条件下夏玉米蒸发蒸腾量的估算[J].灌溉排水学报,2018,37(7):50-60.

文献标志码:A

### 0 引 言

作物蒸发蒸腾发生在土壤-植被-大气系统内的连续过程中,是作物生长发育过程中至关重要的水分供应和能量来源<sup>[1]</sup>,通常主要包括作物蒸腾量和棵间土壤蒸发量<sup>[2]</sup>。1948年,Penman<sup>[3]</sup>基于能量平衡和空气动力学原理,建立了模型对作物蒸发蒸腾量(*ET*<sub>c</sub>)进行估算,1965年Penman-Monteith模型<sup>[4]</sup>被推出,该公式能够明确*ET*<sub>c</sub>的变化过程及其影响机制。1998年,Allen等<sup>[6]</sup>提出对作物的高度和冠层阻力等标准化得到参考作物蒸发蒸腾量(*ET*<sub>o</sub>),随后联合国粮农组织(FAO)提出利用*ET*<sub>o</sub>和作物系数估算*ET*<sub>c</sub>,包括单作物系数法和双作物系数法。作物系数法在目前估算和区分作物蒸发蒸腾中应用较多<sup>[7]</sup>,Abolfazl<sup>[8]</sup>和Richard等<sup>[9-10]</sup>研究了作物系数和土壤蒸发之间的关系;刘钰等<sup>[11-12]</sup>基于田间实测资料对作物系数法在我国的适用性进行了验证;相关学者等<sup>[13-16]</sup>进一步研究发现,对FAO-56指南给出的参数结合实际情况进行适当修正或改进更为合理。

作物系数是计算作物 ET。的重要参数,反映了作物种类、作物本身的生物学特性、产量水平、土壤水肥状况以及田间管理水平对农田 ET。的影响<sup>[17]</sup>。基于作物系数法,在不同区域及不同覆盖条件下估算 ET。时<sup>[18]</sup>,需要利用当地试验资料对作物系数进行修正<sup>[5]</sup>。土壤表面覆盖砂石能够显著抑制土壤水分蒸发<sup>[19-20]</sup>,提高水分利用效率和作物产量<sup>[21-22]</sup>。虽然砂石覆盖条件下 ET。的研究较多,如蔡永坤等<sup>[23]</sup>研究发现覆砂度或者覆砂量越大,土壤蒸发量越小;但对砂石覆盖条件下的作物生长过程和产量的研究多以砂田西瓜为主<sup>[24-26]</sup>,目前关于砂石覆盖条件下用作物系数法计算 ET。的研究较少。

收稿日期:2017-10-11

**基金项目:**国家高技术研究发展计划项目(863计划)(2013AA102904);陕西省水利科技计划项目(2016slkj-17);中央高校基本科研业务费项目 (2452016069)

作者简介:唐德秀(1993-)女,四川南充人。硕士研究生,研究方向为农业水土资源利用与保护。E-mail: 398111535@qq.com 通信作者:李毅(1974-),女,陕西武功人。教授,博士生导师。主要从事旱区水土资源高效利用研究,E-mail: liyikitty@126.com

通过实测2014—2016年遮雨棚控水条件下砂石覆盖土表的夏玉米生长及蒸渗仪观测ET。试验数据,分别基于单作物系数法和双作物系数法提出砂石覆盖条件下的改进作物系数法公式,分析和验证其应用效果和估算精度,以期为陕西杨凌地区的农田水分管理提供一定科学指导。

# 1 材料与方法

# 1.1 试验设计

试验在陕西省杨凌市(108°24′E、34°20′N)进行。杨凌地处关中平原中部属暖温带季风半湿润气候区,海拔为521 m,全年无霜期221 d,日照时间2 196 h,年平均气温12.9 ℃,年平均降水量660 mm,降水多集中在7—10月。

夏玉米生长试验在遮雨棚下进行,试验系统由试验土 箱和称质量系统组成,其中土箱由10mm厚的透明有机玻 璃制成,规格为50cm×50cm,箱底均匀分布有直径 为5mm的孔,箱底垫有滤纸以防土壤漏出;称质量系统由 12个蒸渗仪构成,每套蒸渗仪由土箱、MHsensor称质量传 感器(精度为±0.02%,量程为300kg)、秤盘支座组成,与 CR1000数据采集器、2个扩展板及1个太阳能供电系统连 接,可用于记录土箱质量的动态变化。蒸渗仪试验系统如 图1所示。



在土壤表面覆盖体积质量为1.70 g/cm3 的砂土,取自

图1 蒸渗仪构成简图

杨凌南部的渭河滩,粒径范围在2~8 mm。试验设定4个土表均匀砂石覆盖处理,每个处理3个重复,如表1 所示。

	表1砂石覆盖夏玉米试验						
_	处理	M0	M23	M46	M69		
_	砂石覆盖量/(kg·m²)	0	23	46	69		
	砂石覆盖厚度/cm	0	1.4	2.8	4.2		

供试夏玉米品种为秦龙11,分别于2014年6月25日、2015年6月17日和2016年6月19日播种,于2014年10月11日、2015年10月7日和2016年10月15日收获。观测指标包括土箱质量、土壤含水率、株高、茎粗、叶长和叶宽,其中仅株高数据用于作物系数法。根据蒸渗仪逐时实测值计算日*ET*。,计算式为:

$$ET_{c,\mathfrak{FW}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} (W_{i,i} - W_{i,i+1})}{24S} , \qquad (1)$$

式中: $W_{t,i}$ 为第i天t时刻的土箱质量(g);S为土箱表面积(cm<sup>2</sup>)。有灌溉时当日W需减去灌溉量。

1.2 气象要素

夏玉米生育期内气象数据来源于杨凌国家一般气象站。2014、2015和2016年夏玉米生育期内的气象要素随时间的变化如图2所示。







1.3 作物系数法

1.3.1 单作物系数法

为简化计算,FAO-56建议将作物的生育期划分为4个阶段,即生长初期、发育期、生长中期和生长后期<sup>66</sup>。充分供水条件下上述4个作物生长阶段的*ET*。计算式<sup>127</sup>为:

$$ET_{c,\dot{\mu}} = K_c ET_0 , \qquad (2)$$

式中: $ET_{c,\mu}$ 为单作物系数法计算的 $ET_c(mm)$ ; $ET_0$ 为参考作物蒸发蒸腾量(mm); $K_{c,\mu}$ 为单作物系数。

因为蒸渗仪法是基于水量平衡原理而来的植物蒸发蒸腾量测定方法,是一种直接测定的方法,影响因素很多故误差来源较多<sup>[28]</sup>。本试验是在遮雨棚下完成,土表有砂石覆盖,与FAO-56中的单作物系数法计算条件有一定的差别。为此,砂石覆盖条件下的单作物系数*K*。计算式为:

$$K_{c,\hat{\mu}} = \frac{ET_{c,\hat{x}|\hat{m}|}}{ET_0}$$
(3)

 $ET_0$ 的计算方法很多,研究表明用 FAO-56 Penman-Monteith 公式计算的  $ET_0$ 与实测结果最为接近<sup>[6]</sup>,表达式为:

$$ET_{0} = \frac{0.408 \times \Delta (R_{n} - G) + \gamma \times \frac{900}{T + 273} \times \mu_{2} (e_{s} - e_{a})}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34\mu_{2})}, \qquad (4)$$

式中: $R_n$ 为作物冠层的净辐射(MJ/(m<sup>2</sup>·d));G为土壤热通量(MJ/(m<sup>2</sup>·d));在逐日尺度下G=0;T为平均气温( $\mathbb{C}$ ); $u_2$ 为2m高处的平均风速(m/s); $e_s$ 为饱和水气压(kPa); $e_a$ 为实际水气压(kPa); $\Delta$ 为饱和水压与温度曲线的斜率(kPa/ $\mathbb{C}$ ); $\gamma$ 为干湿表常数(kPa/ $\mathbb{C}$ )。

1.3.2 双作物系数法

双作物系数法把作物系数分为基础作物系数K<sub>e</sub>和土壤蒸发系数K<sub>e</sub><sup>66</sup>。基于双作物系数ET<sub>e</sub>计算式为:

$$ET_{e,\overline{x}} = (K_{eb}K_{s} + K_{e}) ET_{0}, \qquad (5)$$

式中: $K_{eb}$ 为基础作物系数; $K_{e}$ 为土壤蒸发系数; $K_{s}$ 为土壤水分胁迫系数,本试验在作物生长期间是充分供水, $K_{s}$ =1。式(4)适用于作物生长的4个阶段。

FAO-56 推荐玉米的基础作物系数分别为生长初期 $K_{cb ini}=0.15$ ,生长中期 $K_{cb mid}=1.15$ ,生长末期 $K_{cb end}=0.15$ 。当作物生长发育中、后期的 $u_2 \neq 2.0$  m/s,最小相对湿度 $RH_{min} \neq 45\%$ ,且 $K_{cb} > 0.45$ 时, $K_{cb mid}$ 和 $K_{cb end}$ 做如下调整:

$$K_{\rm cb} = K_{\rm cb(\#\#)} + \left[ 0.04(\mu_2 - 2) - 0.004(RH_{\rm min} - 45) \right] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} , \tag{6}$$

式中:h为计算时段内最大株高的平均值(m)。

在较大降雨或灌溉后地表土壤湿润时,K。逐渐变大直到增大到最大值;当表土干燥时,K。很小,甚至为0。土壤蒸发系数可用下式确定:

$$K_{\rm e} = K_{\rm r} (K_{\rm c max} - K_{\rm cb}) \leq f_{\rm ew} K_{\rm c max} , \qquad (7)$$

式中: K<sub>emax</sub>为降雨或灌溉后作物系数的最大值; K<sub>r</sub>为由累积蒸发水深决定的表层土壤蒸发衰减系数; f<sub>ew</sub>为发 生棵间蒸发的土壤占全部土壤的比例。

降雨或灌溉后作物系数的最大值Kcmax由下式计算:

$$K_{\rm cmax} = \max\left\{\left\{1.2 + \left[0.04(\mu_2 - 2) - 0.004(RH_{\rm min} - 45)\right](\frac{h}{3})^{0.3}\right\}, \left\{K_{\rm cb} + 0.05\right\}\right\}.$$
(8)

## 1.4 误差评价指标

采用决定系数(*R*<sup>2</sup>)、相对均方根误差(*RRMSE*)和纳什系数(*NSE*)对单作物系数法、双作物系数法模拟 *ET*。的适用性进行分析。*R*<sup>2</sup>和*NSE* 越接近1,表示拟合度越高;*RRMSE* 越接近0,表明模拟偏差越小。以单作物系数法为例,评价指标的计算式依次为:

$$R^{2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{m} (ET_{c,\bar{\mu}}^{i} - \overline{ET_{c,\bar{\mu}}}) (ET_{c,\bar{\chi},\bar{\eta}}^{i} - \overline{ET_{c,\bar{\chi},\bar{\eta}}})\right]^{2}}{\sum_{i=1}^{m} (ET_{c,\bar{\mu}}^{i} - \overline{ET_{c,\bar{\mu}}})^{2} \sum_{i=1}^{m} (ET_{c,\bar{\chi},\bar{\eta}}^{i} - \overline{ET_{c,\bar{\chi},\bar{\eta}}})^{2}},$$
(9)

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} (ET_{c, \mathcal{G}, \mathbb{M}}^{i})^{2}}}{\overline{ET_{c, \mathcal{G}, \mathbb{M}}}}, \qquad (10)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{m} (ET_{c,\#}^{i} - ET_{c,\#}^{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{m} (ET_{c,\#}^{i} - \overline{ET_{c,\#}})^{2}},$$
(11)

式中:  $ET_{c,\hat{\mu}}^{i}$ 为第 $i \sqcap ET_{c,\hat{\mu}}$ ;  $ET_{c,\hat{g}||}^{i}$ 为蒸渗仪实测的第 $i \sqcap ET_{c}$ ;  $\overline{ET}_{c,\hat{\mu}}$ 为 $ET_{c,\hat{\mu}}^{i}$ 的平均值;  $\overline{ET}_{c,\hat{g}||}$ 为 $ET_{c,\hat{g}||}^{i}$ 的平均值;  $\overline{ET}_{c,\hat{g}||}$ 为 $ET_{c,\hat{g}||}^{i}$ 的平均值;  $\overline{ET}_{c,\hat{g}||}$ 

# 2 结果与分析

## 2.1 参考作物蒸散量

根据气象数据由式(4)计算得到的 $ET_0$ 如图3所示。由图3可知,3a夏玉米生育期内 $ET_0$ 波动不大,2014、2015和2016年夏玉米生育期内总 $ET_0$ 分别为411.78、418.79和453.02 mm。



### 2.2 作物生育期的划分

生长初期从播种日期到地表覆盖度为10%结束,发育期从地表覆盖度为10%到地面被有效全覆盖结束,生长中期从作物有效全覆盖地表开始到作物开始成熟结束,生长后期从开始成熟到完全衰老为止。根据作物的实际生长状况记录,确定的不同砂石覆盖条件下夏玉米各生长发育期长度如表2所示。由表2可知,2014年砂石覆盖M23、M46和M69处理的夏玉米生育期相比不覆盖处理M0分别提前4、9和17 d;2015年提前7、11和17 d;2016年提前1、6和13 d。说明砂石覆盖量越大,生育期提前的越多。研究结果与Liu等<sup>[29]</sup>在华北平原夏玉米试验结果较为一致,均表明砂石覆盖能够抑制土壤水分蒸发<sup>[19-20]</sup>,促进植物生长<sup>[22]</sup>,使夏玉米的生育期提前。

年份	处理	生长初期	发育期	生长中期	生长后期	全生育期	
	M0	20	42	30	21	113	
2014	M23	20	34	34	21	109	
2014	M46	20	30	33	21	104	
	M69	20	28	27	21	96	
	M0	20	42	32	20	114	
2015	M23	20	32	35	20	107	
2013	M46	20	31	32	20	103	
	M69	20	27	30	20	97	
	M0	20	43	29	20	112	
2017	M23	20	33	38	20	111	
2016	M46	20	32	34	20	106	
	M69	20	28	31	20	99	

#### 表2 不同砂石覆盖处理下夏玉米各生长阶段的划分

# 2.3 单作物系数法

用分段单值平均法计算作物系数 $K_{e}$ ,生长初期作物系数记为 $K_{eini}$ ;中期作物系数记为 $K_{emid}$ ;后期作物系数 记为 $K_{end}$ 。砂石覆盖条件下4个生育期的 $K_{e,#}$ 在夏玉米的生育期内形成折线图。3个试验年份, $K_{e,#}$ 的变化 如图4所示。





不覆砂条件下夏玉米2014年生长初期、中期和成熟期的K<sub>e.#</sub>值分别为0.74、0.86和0.80;2015年为0.92、1.07和0.58;2016年为0.93、1.15和0.85。与FAO-56指南的推荐值(K<sub>cini(FAO)</sub>=0.50,K<sub>emid(FAO)</sub>=1.20,K<sub>cend(FAO)</sub>=0.60)相比,本试验所得计算结果不同,可能是因为遮雨棚下的作物生长状况与大田作物有所区别,生长更旺盛,所以K<sub>e.#</sub>大;同时说明式(2)中的作物系数在砂石覆盖条件下应用需要实测数据校验。

2014、2015和2016年的夏玉米各生长阶段K<sub>e,#</sub>的变化规律基本一致,但因气象条件变化,2016年K<sub>e,#</sub>相对于前2个试验年份要稍大些。在夏玉米生长初期,K<sub>ein</sub>均小于1,与砂石覆盖量呈现负相关的关系,砂石覆

盖量越大,*K*<sub>cini</sub>越小;在夏玉米快速生长期,随着砂石覆盖量的 增加,夏玉米的生长速度随之增加,生育期提前,*K*<sub>c.\*</sub>随时间的 增长曲线变陡;砂石覆盖条件下的夏玉米提前进入生长中期, *K*<sub>cmid</sub>均大于1,且砂石覆盖量越大,*K*<sub>cmid</sub>越大;夏玉米进入生长后 期后*ET*<sub>c</sub>减少,*K*<sub>cend</sub>逐渐减小,但不同砂石覆盖处理对其影响的 差异不大。



d

为了将作物系数与砂石覆盖量建立联系,用2014年和2016年不同阶段作物系数K。的平均值与砂石覆盖量A进行拟

合,结果如图5所示。由图5可知,K。和A之间的关系可用二次 图5 不同阶段单作物系数与砂石覆盖量的拟合 多项式表达,K<sub>cini</sub>和K<sub>cmid</sub>与砂石覆盖的拟合效果较好,R<sup>2</sup>均在0.97以上,但K<sub>cend</sub>的拟合结果稍差一些。通用计 算式为:

$$K_{c,\hat{\mu}} = bA^2 + cA + d \quad , \tag{12}$$

式中:A为砂石覆盖量( $kg/m^2$ );b < c 和 d为拟合参数。

考虑砂石覆盖量的影响,将式(1)修正为:

$$ET_{c,\hat{\mu}} = (bA^2 + cA + d)ET_0$$
 , (13)

生长阶段	b	С	d	$R^2$	修正公式			
初期	4×10-5	-0.008 2	0.838	0.997	$ET_{c,\hat{\mu}} = (4 \times 10^{-5} A^2 - 0.008 \ 2A + 0.838) ET_0$			
中期	5×10-5	0.002 9	1.020	0.972	$ET_{c,\#} = (5 \times 10^{-5} A^2 + 0.002 \ 9A + 1.02) ET_0$			
后期	2×10-5	-0.002 2	0.833	0.509	$ET_{c,\#} = (2 \times 10^{-5} A^2 - 0.002  2A + 0.833) ET_0$			

表3不同生育阶段K<sub>e.</sub>\*与A的拟合关系及ET。修正公式

为了验证该方法的适用性,用拟合所得的3个方程(表3)计算出2015年夏玉米各生长阶段的*ET*。, #与夏玉米生育期内*ET*。, #約5d平均值对比,结果如图6所示。



由图6可看出,各砂石覆盖处理夏玉米*ET*<sub>c.,单</sub>和*ET*<sub>c.,速测</sub>较为符合。在生长初期,各处理的拟合值都接近于 实测值;在发育期,M0、M23、M46和M69处理的相对偏差分别为31.83%、0.04%、-13.51%和13.04%;在生长 中期,相对偏差分别为2.05%、-0.1%、1.53%和-0.48%;在生长后期,相对偏差分别为42.11%、51.21%、23.83% 和15.27%;全生育期的相对偏差分别为15.95%、4.7%、-1.99%和6.39%。



# 2.4 双作物系数法

3个试验年份实测的夏玉米株高如图7所示。从图7可以看出,2016年度的夏玉米株高略高于2014和

2015年度。

基于式(6)计算的基础作物系数分别为K<sub>cbin</sub>=0.15,K<sub>cbmid</sub>=1.07,K<sub>cbend</sub>=0.15。通过式(6)、式(7)计算得到的 双作物系数K<sub>cb</sub>+K<sub>e</sub>在生育期内的变化如图8所示。由图8可知,2014年和2015年的K<sub>cb</sub>+K<sub>e</sub>在夏玉米生育期 内的变化基本一致,而2016年的有所不同,产生变化的原因主要是田间管理发生了改变,增加了灌水次数, 由于双作物系数法在计算过程中考虑了土壤湿润面的问题,每次灌水后K<sub>cb</sub>+K<sub>e</sub>均会明显增加。在生长初期, 2014年和2015年的K<sub>cb</sub>+K<sub>e</sub>基本相同,2016年稍大一些,因为在生长前期夏玉米长势相似,且生长初期均为 20 d。在生长发育期,每次灌水后,夏玉米以最大K<sub>cb</sub>+K<sub>e</sub>蒸发一个阶段后,随着土体表面水分的减少,K<sub>cb</sub>+K<sub>e</sub> 会逐渐减小;且随着砂石覆盖量的增加,夏玉米生长速度随之增加,ET<sub>c</sub>相应变大,K<sub>cb</sub>+K<sub>e</sub>的最小值依次增 大。当其达到最大值时,夏玉米进入生长中期,即灌浆期,株高、茎粗和叶面积均达到生育期内的最大值,以 最大的速率进行腾发。进入生长后期,夏玉米开始枯萎,叶面积减小,ET<sub>c</sub>减小,故K<sub>cb</sub>+K<sub>e</sub>也逐渐减小,且砂石 覆盖量越大,K<sub>cb</sub>+K<sub>e</sub>越大。



图8 夏玉米生育期内双作物系数变化





计算所得的*K*<sub>cb</sub>+*K*<sub>c</sub>值与实际值有一定差异,需基于蒸渗 仪实测*ET*<sub>c</sub>数据对砂石覆盖条件下的计算结果进行修正,引 入修正系数α,其值取为4个不同生育阶段*ET*<sub>c.实测</sub>与由计算得 到的*ET*<sub>c.∞</sub>的商的平均值。基于此,修正的*ET*<sub>c</sub>公式表示为:

$$ET_{c,\overline{x}} = \alpha \left( K_{cb} + K_{e} \right) ET_{0} \quad , \tag{14}$$

式中:α为修正系数。

对夏玉米不同生长阶段*ET*。修正系数 a 和砂石覆盖量 A 进行拟合,结果如图9,由图9可知,2014和2016年修正系数 a 随砂石覆盖量 A 的变化较有规律性。可用二次多项式表达 二者之间的关系,公式为:

$$\alpha = eA^2 + fA + g \quad , \tag{15}$$

式中:e、f和g为拟合参数。

故双作物系数法计算ET。的计算式表示为:

$$ET_{e,\overline{M}} = \left(eA^2 + fA + g\right)\left(K_{eb} + K_e\right) ET_0 \quad . \tag{16}$$

表4 不同生育阶段 $\alpha$ 与A的拟合关系及 $ET_c$ 修正公式

生长阶段	е	f	g	$R^2$	修正公式
初期	0.000 1	-0.022 4	2.72	0.998	$ET_{e,\pi} = (0.000 \ 1A^2 - 0.022 \ 4A + 2.72)(K_{eb} + K_e) ET_0$
发育期	-9×10 <sup>-5</sup>	0.006 9	1.24	0.994	$ET_{e, \mathcal{R}} = (-9 \times 10^{-5} A^2 + 0.006 \ 9A + 1.24) (K_{eb} + K_e) ET_0$
中期	9×10 <sup>-5</sup>	-0.003	1.01	0.990	$ET_{e,\Xi} = (9 \times 10^{-5} A^2 - 0.003A + 1.01) (K_{eb} + K_e) ET_0$
后期	6×10-5	-0.008 2	1.15	0.953	$ET_{c,\mathcal{R}} = (6 \times 10^{-5} A^2 - 0.008 \ 2A + 1.15)(K_{cb} + K_e) ET_0$

采用表4中的*ET*。修正公式计算2015年砂石覆盖条件下夏玉米各生育阶段的*ET*。,取5d平均后的*ET*。,<sub>求测</sub>进行对比,结果如图10所示。



由图10可看出,各处理下*ET*<sub>c.来</sub>与*ET*<sub>c.来制</sub>较为接近。在生长初期,M0、M23、M46和M69处理的相对偏差 分别为-18.25%、14.48%、36.93%和51.74%;发育期,4个处理的相对偏差分别为22.49%、-13.76%、-7.42%和 14.82%;生长中期,相对偏差分别为16.47%、4.53%、7.35%和-9.02%;生长后期,相对偏差分别为60.06%、 50.61%、29.62%和-8.37%;从全生育期来看,M0、M23、M46和M69处理的相对偏差分别为14.8%、2.92%、 6.63%和2.55%。

与单作物系数法对比发现,在生长初期,*ET*<sub>c,单</sub>与*ET*<sub>c,实测</sub>更接近;发育期,M0、M46处理的*ET*<sub>c,双</sub>更接近 *ET*<sub>c,实测</sub>;在生长中期,各处理均是*ET*<sub>c,单</sub>与*ET*<sub>c,实测</sub>更接近;在生长后期,M0、M46处理的*ET*<sub>c,单</sub>更接近*ET*<sub>c,实测</sub>。从 全生育期来看,各处理均是*ET*<sub>c,双</sub>能更好地估算实测的夏玉米蒸发蒸腾量。

# 2.5 单、双作物系数法计算值和实测值对比分析

图 11 是 2015 年 *ET*<sub>c.#</sub>、*ET*<sub>c.或</sub>和 *ET*<sub>c.或测</sub>的对比图。从图 11 可以看出,2015 年的计算值和实测值拟合情况较好,各数据点均在1:1线附近,M23 处理的拟合效果最好,修正值与实测值之间的误差较小。



表5是2015年用单作物系数法和双作物系数法计算的夏玉米ET。与实测值的评价指标计算结果。由表5可知,修正后的单、双作物参数法在砂石覆盖条件下ET。估算应用中均有一定的适用性,且砂石覆盖量越大,拟合结果越好。双作物系数法能更好地估算砂石覆盖条件下夏玉米的ET。。

表5 2015年ET。计算值的适用性统计参数

およ王田		单作物系数法		双作物系数法		
处理	$R^2$	RRMSE	NSE	$R^2$	RRMSE	NSE
M0	0.782	29.4%	0.423	0.636	34.8%	0.173
M23	0.784	30.9%	0.599	0.858	25%	0.728
M46	0.850	27.9%	0.709	0.870	28.3%	0.747
M69	0.883	25.4%	0.777	0.932	19.8%	0.854

# 3 讨论

FAO-56 推荐的作物系数综合了多种因素的影响,因此作物系数法在不同地区应用时 ET。估算的结果差 异较大,需要进行区域校正。Shahrokhnia等<sup>[30]</sup>研究发现在半干旱地区,用FAO-56 推荐的作物系数法计算作 物蒸散量在日尺度上单作物系数法更准确,在季节尺度上双作物系数法更为准确。Rosa等<sup>[31-32]</sup>基于双作物 系数法开发了 SIMdualKc模型,可直接计算农田蒸散,且输入参数少,模拟结果较好<sup>[33-35]</sup>。冯禹等<sup>[13-14]</sup>基于叶 面积指数对双作物系数法进行了修正,发现修正后的双作物系数法能够较为准确地估算和区分黄土高原地 区旱作春玉米蒸散。樊引琴等<sup>[36]</sup>研究发现在地面部分被作物覆盖的情况下,双作物系数法比单作物系数法 更接近实测值,而在地面完全覆盖的情况下,二者差别不大。

覆盖措施对作物 ET。有一定影响<sup>[19-20]</sup>,砂石覆盖对土壤水分的抑制作用能够提高水分利用效率和作物产量<sup>[21-22]</sup>。陈士辉等<sup>[24]</sup>发现西瓜的 ET。受砾石粒径大小的影响很大,小粒径砾石覆盖的明显低于大粒径;Xie 等<sup>[25-26]</sup>发现地表覆盖砂石能够通过增加西瓜根系密度而提高产量;Wang等<sup>[19]</sup>对地表覆膜及覆砂2种覆盖措施进行研究后发现地表覆砂比覆膜更能提高土壤温度和水分,增大水分利用效率及西瓜产量。砂石覆盖可以抑制土壤蒸发,增加作物产量,但是长期砂石覆盖可能导致土壤沙化,需要进一步考虑解决。目前在砂石覆盖条件下用作物系数法计算 ET。的研究较少,刘晓青等<sup>[37]</sup>研究了砾石覆盖对夏玉米作物系数的影响,发现夏玉米全生育期内的单作物系数与砾石覆盖量呈线性关系。

兹基于FAO-56中推荐的单、双作物系数法,对夏玉米的蒸发蒸腾量进行了估算,将作物系数与砂石覆 盖量之间建立关系,对砂石覆盖条件下的作物系数法进行修正,提出了砂石覆盖条件下单、双作物系数法计 算夏玉米生育期内*ET*。的修正公式,利用这些公式可以直接估算出夏玉米生育期内逐日蒸发蒸腾量,可为干 旱半干旱地区估算覆盖条件下的夏玉米*ET*。提供一定参考。但与以往研究不同的是,文中提出的作物系数 修正模式,依据是小型蒸渗仪(面积50 cm×50 cm)观测数据,与大田实际情况有一定差异,该差异今后还有 待进一步研究。

### 4 结 论

1)单作物系数K。与砂石覆盖量A之间的关系可用二次多项式表达,修正后的单作物系数法将不同砂石 覆盖量引入蒸发蒸腾量定量关系,并针对夏玉米的不同生育阶段对参数取值进行定量化,从而得到砂石覆 盖条件下单作物系数法的修正模式。

2)双作物系数法的修正与单作物系数法有所区别,用修正系数α与砂石覆盖量A进行模拟,得到考虑砂石覆盖情况下的双作物系数法修正模式,经观测数据验证,表明将砂石覆盖度引入传统的双作物系数法,可 对夏玉米的不同生育阶段蒸发蒸腾量做出合理估算。

3)不同砂石覆盖条件下夏玉米各生育阶段单、双作物系数法的计算值和蒸渗仪得到的实测值基本接近,双作物系数法的计算结果能更好地估算砂石覆盖条件下夏玉米的蒸发蒸腾量。

#### 参考文献:

- [1] 康绍忠,梁银丽,蔡焕杰,等.旱区水-土-作物关系及其最优调控原理[M].北京:中国农业出版社, 1998.
- [2] 康绍忠,刘晓明,熊运章,等.土壤-植物-大气连续体水分传精理论及其应用[M].北京:水利电力出版社,1994.

[3] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A 193, Mathematical and Physical Sciences, 1948,193(1032): 120-145.

[4] MONTEITH J L. Evaporation and environment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1965: 205-234.

[5] 张宝忠,许迪,刘钰,等.多尺度蒸散发估测与时空尺度拓展方法研究进展[J].农业工程学报,2015,31(6):8-16.

- [6] ALLEN R G, PEREIRAL L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [7] KOOL D, AGAM N, LAZAROVITCH N, et al. A review of approaches for evapotranspiration partitioning[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 184: 56-70.
- [8] ABOLFAZL MAJNOONI-HERIS, ALI A S,et al. Determination of single and dual crop coefficients and ratio of transpiration to evapotranspiration for canola[J].Annals of Biological Research, 2012, 3(4):1 885-1 894.
- [9] ALLEN R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparision study[J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1/2) :27-41.
- [10] ALLEN R G, PEREIRA L S, SMITA M, et al. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1):2-13.
- [11] 刘钰, PEREIRALS.对FAO推荐的作物系数计算方法的验证[J].农业工程学报, 2000, 16 (5): 26-30.
- [12] 刘钰,汪林,倪广恒,等.中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J].农业工程学报,2009,25(12):6-12.
- [13] 冯禹,崔宁博,龚道枝,等.基于叶面积指数改进双作物系数法估算旱作玉米蒸散[J].农业工程学报,2016,32(9):90-98.
- [14] 冯禹,崔宁博,龚道枝,等.基于极限学习机的参考作物蒸散量预测模型[J].农业工程学报,2015,31(25):153-160.
- [15] 赵丽雯,吉喜斌.基于FAO-56双作物系数法估算农田作物蒸腾和土壤蒸发研究:以西北干旱区黑河流域中游绿洲农田为例[J].中国农业科学, 2010,43(19):4016-4026.
- [16] 文冶强,杨健,尚松浩.基于双作物系数法的干旱区覆膜农田耗水及水量平衡分析[J].农业工程学报,2017,33(1):138-147.
- [17] 韦斯·沃伦德,唐·格兰姆斯著.美国国家灌溉工程手册[M].水利部国际合作司等,编译.北京:中国水利水电出版社,1998.
- [18] FERREIRA M I, SILVESTRE J, CONCEICAO N, et al. Crop and stress coefficients in rainfed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques [J]. Irrigation Science, 2012, 30: 433-447.
- [19] WANG Y, XIE Z, MALHI S S, et al. Effects of gravel-sand mulch, plastic mulch and ridge and furrow rainfall harvesting system combinations on water use efficiency, soil temperature and watermelon yield in a semi-arid Loess Plateau of Northwestern China[J]. Agricultural Water Management, 2011, 101(1), 88-92.
- [20] WANG Y, XIE Z, MALHI S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(3):374-382.
- [21] BU L, LIU J, ZHU L, et al. The effects of mulching on maize growth, yield and water use in a semi-arid region[J]. Agricultural Water Management, 2013,123: 71-78.
- [22] SUN H, SHAO L, LIU X, et al. Determination of water consumption and the water-saving potential of three mulching methods in a jujube orchard[J]. European Journal of Agronomy[J]. 2012, 43: 87-95.
- [23] 蔡永坤,李毅,冯浩.不同砂石覆盖度和粒径对土壤水分蒸发的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):273-277,297.
- [24] 陈士辉,谢忠奎,王亚军,等.砂田西瓜不同粒径砂砾石覆盖的水分效应研究[J].中国沙漠,2005,25(3):433-436.
- [25] XIE Z, WANG Y, JIANG W, et al. Evaporation and evapotranspiration in a watermelon field mulched with gravel of different sizes in northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1/2):173-184.
- [26] XIE Z, WANG Y, JIANG W, et al. Impacts of a gravel-sand mulch and supplemental drip irrigation on watermelon (Citrullus lanatus [Thunb.] Mats. & Nakai) root distribution and yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 89(1):35-44.
- [27] ALLEN R, SMITH M, PEREIRA L, et al. An update for the calculation of reference evaporation[J]. Synlett, 1994, 31(7):672-674.
- [28] RANA G, KATERJI N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the Geld under Mediterranean climate: a review [J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13 (2/3):125-153.
- [29] LIU Y J, LUO Y. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97: 31-40.
- [30] SHAHROKHNIA M H, SEPASKHAH A R. Single and dual crop coefficients and crop evapotranspiration for wheat and maize in a semi-arid region[J]. Theor Appl Climatol, 2013,114: 495-510.
- [31] ROSA R D, PAREDES P, RODRIGUES G C, et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive soft-ware: 1. Background and computational strategy[J].Agricultural Water Management, 2012, 103: 8-24.
- [32] ROSA R D, PAREDES P, RODRIGUES G C, et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 2.Model testing[J]. Agricultural Water Management, 2012, 103:62-77.
- [33] QIU R J, DU T S, KANG S Z, et al. Assessing the SIMDua1Kc model for estimating evapotranspiration of hot pepper grown in a solar greenhouse in Northwest China[J]. Agricultural Systems, 2015, 138:1-9.
- [34] ZHAO N N, LIU Y, CAI J B, et al. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporation component[J]. Agricultural Water Management, 2013, 117: 93-105.
- [35] GAO Y, YANG L L, SHEN X J, et al., 2014. Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2014, 146: 1-10.
- [36] 樊引琴,蔡焕杰.单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J].水利学报, 2002(3):50-54.
- [37] 刘晓青, 左亿球, 冯浩, 等. 砾石覆盖量对夏玉米作物系数及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2):15-23.

# Estimating the Evapotranspiration of Summer Maize under Sandy Gravel Mulch

TANG Dexiu<sup>1,2,3</sup>, LI Yi<sup>1,2,3\*</sup>, LIU Feng<sup>6</sup>, FU Yaya<sup>1,2,3</sup>, LI Siyi<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Dan<sup>5</sup>, FENG Hao<sup>2,4</sup>

(1.College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

3. Key Laboratory of Agriculture, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

4. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China;

5.Beijing Woerde Disaster Prevention Green Technology Co.,Ltd., Beijing 100048, China;

6. Sichuan Water Resources and Hydroelectric Investigation & Design Institute, SWHI, Chengdu 610000, China)

Abstract: [Objective] Accurately estimating the evapotranspiration (ET<sub>2</sub>) is imperative to design irrigation schedule for a catchment, and this paper investigated how the ET<sub>c</sub> changed in response to mulch with sandy gravels. [Method] A shelter experiment was conducted from 2014 to 2016 with the soil mulched with sandy sand at 0, 23, 46 and 69 kg/m<sup>2</sup> respectively; the model plant in the experiment was summer maize. The  $ET_c$  formulae with single and dual crop coefficients were modified to calculate the evapotranspiration, and they were then tested against measured values. The single crop coefficient was calculated by regressing the measured evapotranspiration from a lysimeter to the calculated reference crop evapotranspiration for the four mulches in 2014 and 2015, with the data in 2015 used for validation. [Result] The  $ET_{cs}$  calculated using the single-coefficient and the dualcoefficient models both agreed well the measured values during all growth stages, with a determination coefficient of 0.782, 0.784, 0.85 and 0.883, and a relative mean root square error of 29.4%, 30.9%, 27.9% and 25.4% respectively for the four gavel treatments, suggesting that the accuracy of the model increased with the amount of gravels. The dual crop coefficient method separated the transpiration from soil evaporation, with the crop coefficient calculated by modifying the FAO-56 using a correction parameter to account for the impact of the gravels. Tests against the 2015 data revealed that the calculated value using the modified methods agreed well with all measurements, with a determination of 0.636, 0.858, 0.87 and 0.932, and a relative root mean square error of 34.8%, 25%, 28.3% and 19.8% respectively for the four treatments. [Conclusion] We proposed modified formulae to estimate the evapotranspiration of maize with the soil mulched by sandy gravel; comparison showed that the modelled results agree well with the measured values.

Key words: crop coefficient; sandy gravel mulch; summer maize; evapotranspiration; correction coefficient

责任编辑:赵宇龙