

砂石覆盖条件下冬小麦蒸散量的单、双作物系数法估算

李 毅^{1,2} 付亚亚^{1,2} 唐德秀^{1,2} 李思逸^{1,2} 冯 浩^{1,2}

(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院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 农田蒸散 (ET_c) 是农业系统能量平衡和水分平衡的关键要素, 砂石覆盖条件下 ET_c 的估算对于评价砂石覆盖对农田作物的影响非常重要。为准确估算砂石覆盖条件下冬小麦 ET_c , 在陕西杨凌建立了遮雨棚下的蒸渗仪动态观测系统。利用 FAO-56 的 Penman-Monteith (PM) 模型和单、双作物系数法对冬小麦 ET_c 进行估算, 并基于两年度不同砂石覆盖量下冬小麦实测 ET_c 数据, 对单、双作物系数法进行改进和修正, 得到适用于砂石覆盖条件下单、双作物系数与砂石覆盖量的关系。结果表明: ①冬小麦不同生长阶段的单作物系数与砂石覆盖量具有很好的线性关系, 进一步结合估算的参考作物腾发量 (ET_0) 计算, 能很好地模拟两年度不同砂石覆盖量下的冬小麦 ET_c 。②基于冬小麦实测 ET_c 对双作物系数进行修正, 可得到其修正系数 A 与砂石覆盖量之间的线性关系, 进一步结合 ET_0 可准确估算两年度不同砂石覆盖量下的冬小麦各生长阶段 ET_c 。③不同砂石覆盖量下, 双作物系数法比单作物系数法和 PM 模型估算冬小麦 ET_c 的精度更高。总体上, 单、双作物系数法在估算砂石覆盖条件下的冬小麦 ET_c 中仍有一定的适用性, 但需经实测数据进行修正。

关键词: 冬小麦; 蒸散量; 砂石覆盖; PM 模型; 单作物系数法; 双作物系数法

中图分类号: S161.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0261-10

Estimation of Evapotranspiration of Winter Wheat Based on Single and Dual Crop Coefficient Approaches under Sand – Gravel Mulching Conditions

LI Yi^{1,2} FU Yaya^{1,2} TANG Dexiu^{1,2} LI Siyi^{1,2} FENG Hao^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

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

Abstract: Field crop evapotranspiration (ET_c) plays a key role in energy and water balance of agricultural systems, and the estimation of ET_c under the sand – gravel mulching conditions is vital for assessing the influences of sand – gravel mulching on field crops. In order to accurately estimate the evapotranspiration of winter wheat under the conditions of sand – gravel mulching, the dynamic observation system of the lysimeter under a rain shelter was established in Yangling, Shaanxi. The FAO – 56 Penman – Monteith equation was used to calculate the reference crop evapotranspiration (ET_0). A weighing lysimeter was used to measure actual ET_c of winter wheat under the different sand – gravel mulching amounts. The single and dual crop coefficient approaches were adopted in conjunction with ET_0 to estimate measured ET_c . The results showed that a good linear relationship was obtained between single crop coefficient and sand – gravel mulching amounts at the three different growth stages of winter wheat. The equation can better simulate ET_c of winter wheat under the sand – gravel mulching conditions. The ranges of determination coefficient (R^2) between measured ET_c and ET_{cs} (ET_c estimated by the single crop coefficient method) were 0.77 ~ 0.80 (in the first year) and 0.73 ~ 0.76 (in the second year), respectively. There was a good linear relationship between dual crop coefficient and sand – gravel mulching amounts. This relationship was introduced to modify the dual crop coefficient under sand – gravel mulching conditions. The modified dual crop coefficient approach can also better simulate ET_c of

收稿日期: 2017-07-04 修回日期: 2017-10-12

基金项目: 中国农业科学院农田灌溉研究所/农业部作物需水与调控重点实验室基金项目 (FIRI2016-03)、国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2013AA102904)、陕西省水利科技计划项目 (2016slkj-17) 和中央高校基本科研业务费专项 (2452016069)

作者简介: 李毅 (1978—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源利用研究, E-mail: liyikitty@126.com

winter wheat under different sand – gravel mulching amounts compared with the measured ET_c . The ranges of R^2 between the measured ET_c and the simulated ET_c were 0.83 ~ 0.88 (in the first year) and 0.87 ~ 0.92 (in the second year), respectively. The single crop coefficient approach simulated average evapotranspiration better than the dual crop coefficient approach, although the dual crop coefficient approach was more accurate on daily ET_c . In conclusion, the single and dual crop coefficient approaches were still applicable for estimating the ET_c of winter wheat under the sand – gravel mulching conditions, but it needed revision by using the measured data.

Key words: winter wheat; evapotranspiration; sand – gravel mulching; Penman – Monteith model; single crop coefficient approach; dual crop coefficient approach

0 引言

在水资源短缺的西北干旱、半干旱地区,合理分配有限的水资源和提高水分利用效率非常重要^[1]。蒸散对地表能量平衡和水量平衡亦有着重要的影响^[2-4],灌溉用水很大一部分以蒸散发的形式流失。因此,准确估算作物蒸散发是合理分配灌溉用水的重要依据。砂石覆盖技术是干旱区和半干旱区一项非常有效的保墒措施,可减少无效耗水、协调土壤蒸发和作物蒸腾之间的比例、有效利用水分和提高作物产量^[5-6]。蔡永坤等^[7]通过研究土壤水分蒸发在不同砂石覆盖度和粒径条件下的变化,指出砂石覆盖有效地降低了土壤水分蒸发的速率和累积土壤蒸发量的增长量。赵丹等^[8]研究发现,随着覆盖度(0%、25%、50%、75%、100%)的增大,土壤蒸发量和累积蒸发量降低。冯浩等^[9]研究指出,砾石覆盖提高了土壤保蓄降水的能力,并且夏玉米和冬小麦的产量也显著增加。可见,研究砂石覆盖条件下的作物蒸散发过程对于田间水分循环机理的研究非常重要。

由于砂石覆盖对作物蒸散发(ET_c)有着重要的影响^[10],因此需要采用合适的模型对其进行准确估算。目前用于估算 ET_c 的模型主要有 Shuttleworth – Wallace 双源模型^[11]、N95 分块模型^[12]以及 PM 模型和 FAO – 56 推荐的作物系数法^[13-19]等。前两种方法的求解过程需要的参数较多,相对复杂。PENMAN^[20]模型是 1948 年 PENMAN 利用空气动力学和能量平衡原理建立的,1965 年,MONTEITH^[19]为更准确估算 ET_c ,在 PENMAN 模型中添加冠层阻力,建立了 Penman – Monteith (PM) 模型,联合国粮农组织^[21] (Food and agricultural organization, FAO) 又将 PM 模型标准化,提出参考作物蒸散量 (Reference crop evapotranspiration, ET_0),并利用 ET_0 基于作物系数法估算 ET_c 。作物系数法分为单作物系数法^[22-24]和双作物系数法^[25-27],前者把作物蒸腾和土壤蒸发的综合影响结合到单作物系数 (K_{cs}) 中,后者则用表征作物蒸腾的基础作物系数 (K_{cb}) 和

表征土壤蒸发的系数 (K_e) 来表示双作物系数 (K_{cd}),故而将土壤蒸发和作物蒸腾分开。大量研究表明,作物系数法对蒸散量的估算精确度较好,如金菊良等^[28]利用遗传算法对不同水分胁迫下大豆的单作物系数进行率定,得出单作物系数法估算的大豆蒸散量 ET_c 与实测蒸散量 (ET_{cm}) 有较好的一致性。文治强等^[29]通过对覆膜情况下水量平衡分析,表明双作物系数法能够很好地模拟春小麦的耗水规律和耗水结构。ROSA 等^[30]在双作物系数法的基础上开发了 SIMdualKc 模型,结果表明该模型对农田蒸散发的模拟较好^[31-32]。根据前人的研究,作物蒸散发受当地气候情况、覆盖条件和作物种类影响较大,FAO – 56 推荐的单、双作物系数法亦对地区和作物种类的响应较大,在不同地区、不同作物上应用时需严格校正。此外,以往的研究中作物系数法在砂石覆盖条件下冬小麦蒸散发过程中的应用相对较少。

基于陕西杨凌地区遮雨棚下 2014—2015 和 2015—2016 两年度砂石覆盖条件下冬小麦蒸散发观测试验,本文利用 PM 模型和单、双作物系数法对砂石覆盖条件下冬小麦蒸散量进行估算,并对其在砂石覆盖条件下的适用性进行评价,为揭示砂石覆盖条件下的蒸散量变化规律提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况及气象要素的变化规律

试验在陕西杨凌西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院进行。该区地理坐标为 34°20'N、108°24'E,平均海拔为 506 m,属大陆暖温带湿润季风气候。试验区气象数据由国家在杨凌设立的一般气象观测站提供。2014—2015 和 2015—2016 两年度冬小麦生育期内逐日气象数据见图 1。由图 1 可知,两年度生育期内日平均气温呈现先减小后增大的趋势,生育期内平均气温分别为 9.47℃ 和 9.18℃;两年度太阳辐射呈现递增趋势,生育期内太阳辐射均值分别为 12.34、12.15 MJ/(m²·d);两年度平均风速呈现递增趋势,生育期内风速均值分别

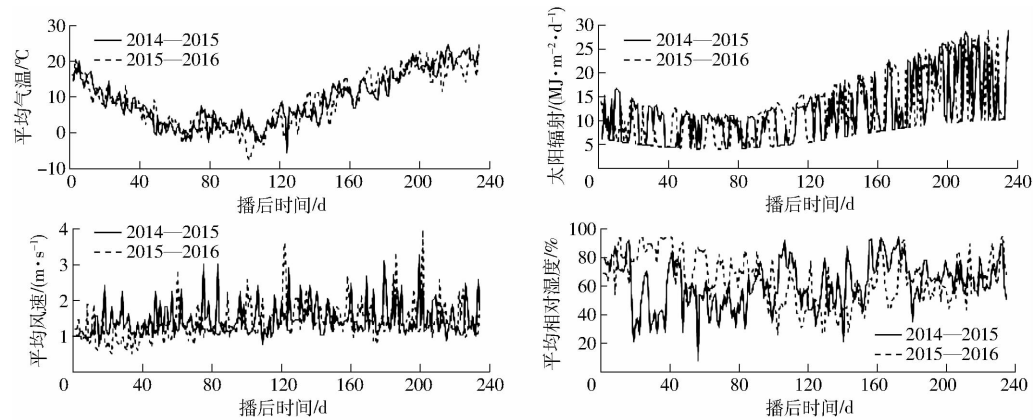


图 1 两年度冬小麦生育期内的逐日气象要素

Fig. 1 Daily meteorological elements in two growth seasons of winter wheat

为 1.47、1.39 m/s;两年度相对湿度的变化范围分别为 7%~94%、25%~95%,生育期内平均相对湿度分别为 60.5%、64.3%。

1.2 试验系统及测定项目

试验系统由可活动的遮雨棚、水箱、土箱、MH sensor 称重传感器、CR 1000 型数据采集器、扩展板、秤盘支座和太阳能供电系统组成。晴天遮雨棚不遮盖土箱,有降雨时遮盖。称重传感器量程为 300 kg,精度为 ±0.02% F.S。试验土箱由 10 mm 厚的透明有机玻璃制成,规格为 50 cm×50 cm×50 cm,箱底均匀分布直径为 5 mm 的小孔,箱底垫有滤纸以防土壤漏出。

分别自杨凌农田表层 0~30 cm 及渭河滩采集 塿土和用于上层覆盖的砂石。经自然风干、碾压、研磨、去除杂物后,塿土过孔径 2 mm 筛;砂石过孔径 8 mm 筛。将过筛后的塿土以容重 1.40 g/cm³ 分层装入土箱,装土深度为 45 cm。在 5~10 cm 深度处所用土壤预先与肥料混匀,施用肥料为尿素(N:46%)和复合肥(N:16%,P₂O₅:44%),设计施氮量 420 kg/hm²,氮磷比例为 7.0:5.6。装土完成后将土箱置于安装了称重传感器的秤盘支座上,每个土箱连同称重传感器及数采视为一个中型蒸渗仪,MH sensor 称重传感器每 10 s 采集一次数据。初始灌水量为 160 mm,使土箱达到田间持水量,之后当土箱平均含水率小于田间持水率的 80% 时进行灌水,每次灌水量均为 30 mm。

选取冬小麦品种小偃 22,每个土箱定苗 100 粒,待出苗后均匀覆盖砂石。塿土上层设 4 个均匀覆盖砂石处理,砂石覆盖量分别为 0、23、46、69 kg/m²,相应厚度分别为 0、1.4、2.8、4.2 cm;共有 4 个处理,每个处理重复 3 次,详见表 1。两年度播种日期分别为 2014 年 10 月 17 日和 2015 年 10 月 14 日,收获日期分别为 2015 年 6 月 6 日和 2016 年 6 月 1 日。

表 1 冬小麦砂石覆盖试验处理				
Tab.1 Sand-gravel mulching treatments for winter wheat experiments				
处理	W0	W23	W46	W69
砂石覆盖量/(kg·m ⁻²)	0	23	46	69
对应覆盖厚度/cm	0	1.4	2.8	4.2

1.3 研究方法

1.3.1 PM 模型

PM 模型是一种经典估算 ET_c 模型^[19],其计算公式为

$$ET_{cPM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{\rho c_p D}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}$$

(1)

式中 ET_{cPM}——PM 模型模拟的蒸散量,mm/d
R_n——净辐射,MJ/(m²·d)
G——土壤热通量,MJ/(m²·d)
Δ——水汽压曲线斜率,kPa/K
D——空气饱和水汽压差,kPa
ρ——空气密度,kg/m³
γ——温度计常熟,kPa/K
c_p——定压比热容,取 1.013×10⁻³ MJ/(kg·K)
r_a——冠层阻力,s/m
r_c——空气动力学阻力,s/m

1.3.2 单作物系数法

冬小麦生长阶段分为生长初期、快速生长期、生长中期和生长后期^[33]。不同生长阶段的单作物系数法估算的蒸散量(ET_{cs})有差别,对应的单作物系数 K_{cs}亦会变化,单作物系数法把作物的各种特征和土壤蒸发的综合影响结合到一个系数中。计算式为

$$K_{cs,i} = ET_{cs,i} / ET_{0,i}$$

(2)

式中 ET_{cs}——单作物系数法估算的蒸散量,mm/d
ET₀——参考作物腾发量,mm/d

i ——不同生长阶段(生长初期 $i = 1$ 、生长中期 $i = 2$ 、生长后期 $i = 3$)

采用 FAO - 56 推荐的标准方法 Penman - Monteith 模型计算 ET_0 ^[21], 计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

(3)

式中 T ——2 m 高处的气温,℃

u_2 ——2 m 处的风速,m/s

e_s ——饱和水汽压,kPa

e_a ——实际水汽压,kPa

1.3.3 双作物系数法

双作物系数法生长阶段的划分与单作物系数法一致。该方法中 K_{cd} 为表征作物蒸腾的基础作物系数(K_{cb})与表征土壤蒸发的系数(K_e)的和,该方法考虑了土壤蒸发在灌水和降雨下的影响。即

$$ET_{cd} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0$$

(4)

式中 ET_{cd} ——双作物系数法估算的蒸散量,mm/d

K_s ——土壤水分胁迫系数(无量纲),本试验为充分灌溉, $K_s = 1$

(1)基础作物系数 K_{cb} 计算

FAO - 56 推荐的冬小麦基础作物系数 $K_{cbini} = 0.15$, $K_{cbmid} = 1.15$, $K_{cbend} = 0.3$ 。在冬小麦生长的中期和后期,若日最小相对湿度 $RH_{min} \neq 45\%$ 或 $u_2 \neq 2$ m/s,且 $K_{cb} > 0.45$ 时, K_{cbmid} 和 K_{cbend} 需要进行修正

$$K_{cb} = K_{cb(Table)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)](h/3)^{0.3}$$

(5)

式中 h ——冬小麦生长中期或后期的平均株高,m

(2)土壤蒸发系数 K_e 计算

在灌水后,蒸发速率很大, K_e 达到最大值。之后土壤水分逐渐蒸发直到 K_e 很小,甚至为 0。 K_e 的计算为

$$K_e = K_r(K_{cmax} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{cmax}$$

(6)

式中 K_r ——表层土壤蒸发累积深度的蒸发减小系数(无量纲)

f_{ew} ——裸露与湿润土壤的比值(无量纲)

K_{cmax} ——作物系数最大值

(3)修正系数的计算

砂石覆盖条件下基于双作物系数法估算 ET_c 需要利用实测的 ET_{cm} 对 4 个生长阶段 ET_c 依次进行修正,修正系数 A 表示为

$$A_i = ET_{cm,i} / ET_{cd,i}$$

(7)

式中 A_i ——某生长阶段 ET_{cd} 的修正系数

i ——不同生长阶段(生长初期 $i = 1$ 、快速生长期 $i = 2$ 、生长中期 $i = 3$ 、生长后期 $i = 4$)

1.3.4 误差评价指标

采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和纳什效率系数(NSE)对单、双作物系数法及 PM 模型估算冬小麦蒸散量准确度进行评价,以单作物系数法估算结果为例,评价指标的计算公式依次为

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{j=1}^n (ET_{cm,j} - \overline{ET_{cm}})(ET_{cs,j} - \overline{ET_{cs}}) \right]^2}{\sum_{j=1}^n (ET_{cs,j} - \overline{ET_{cs}})^2 \sum_{j=1}^n (ET_{cm,j} - \overline{ET_{cm}})^2}$$

(8)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (ET_{cm,j} - ET_{cs,j})^2}$$

(9)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (ET_{cs,j} - ET_{cm,j})^2}{\sum_{j=1}^n (ET_{cm,j} - \overline{ET_{cm}})^2}$$

(10)

式中 $ET_{cm,j}$ ——第 j 天实测的蒸散量,mm/d

$ET_{cs,j}$ ——单作物系数法估算的第 j 天的蒸散量,mm/d

$\overline{ET_{cm}}$ —— $ET_{cm,j}$ 的平均值,mm/d

$\overline{ET_{cs}}$ —— $ET_{cs,j}$ 的平均值,mm/d

n ——样本数

其中, R^2 和 NSE 越接近 1, RMSE 越小,表示估算准确度越高。PM 模型和双作物系数法的估算准确度相关评价指标与单作物系数法类似。

1.4 改进单、双作物系数法技术路线

图 2 为改进单、双作物系数法的技术路线图。由图 2 可得,改进的单作物系数法:由 FAO - 56 推荐得 $K_{cs} = ET_{cm} / ET_0$,可以求出不同砂石覆盖量下的单作物系数 K_{cs} ,再利用各生长阶段的单作物系数 K_{cs} 与砂石覆盖量(M_{SGA})建立关系式,由此关系式可以求出不同砂石覆盖量下各同生长阶段的单作物系数 K_{cs} ,单作物系数与 ET_0 乘积即可估算冬小麦蒸散量。改进的双作物系数法:根据 FAO - 56 所给的双作物系数法基本计算方法,计算出双作物系数与

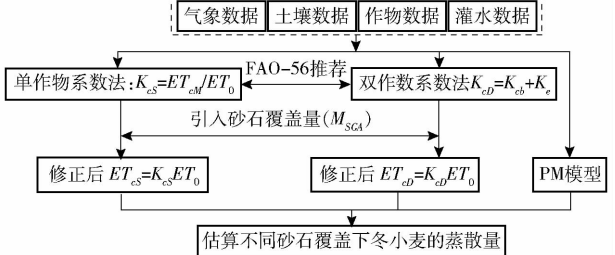


图 2 改进单、双作物系数法技术路线图

Fig.2 Improvement road map of single and dual crop coefficient approaches

ET_0 相乘得到估算的冬小麦蒸散量 ET_{cd} ,再利用各生长阶段 ET_{cm} 与估算 ET_{cd} 作商,得到不同砂石覆盖量下各生长阶段的修正系数 A ,将各生长阶段修正系数 A 与 M_{sga} 建立关系式,利用此关系式可以得不同砂石覆盖量下的双作物系数 K_{cd} ,与 ET_0 相乘可估算冬小麦蒸散量。

2 结果与分析

2.1 冬小麦全生育期内的 ET_0

基于实测的气象数据得 2014—2015 及 2015—2016 年冬小麦生育期内逐日 ET_0 的变化,如图 3 所示。

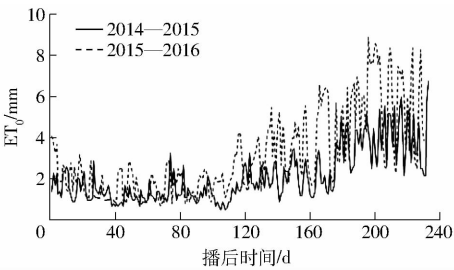
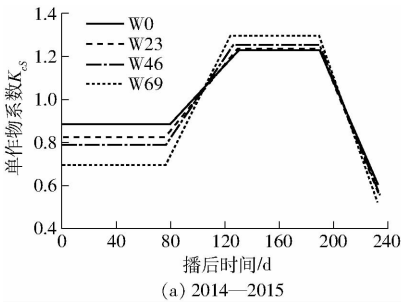


图3 两年度 ET_0 的逐日变化

Fig.3 Daily variations of ET_0 in two years

图 3 中,两年度 ET_0 前期波动均较小,但播后 110 d 后变幅增大,且第 1 年的 ET_0 增幅较第 2 年小,两年度冬小麦生育期总 ET_0 分别为 513.5、



(a) 2014—2015

725.1 mm。

2.2 冬小麦生长阶段划分

根据实际观测数据,将冬小麦生育时期划分为 4 个生长阶段,如表 2 所示。

表2 不同砂石覆盖量下冬小麦生长阶段划分

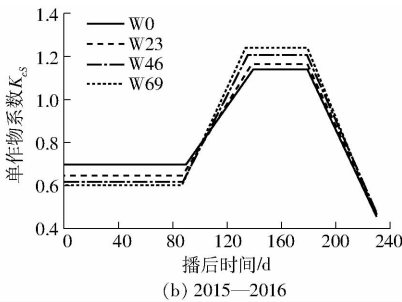
Tab.2 Growth stages of winter wheat under different sand – gravel mulching amounts d

年度	处理	生长 初期	快速 生长期	生长 中期	生长 后期	生育 期
2014—2015	W0	80	50	60	43	233
	W23	79	49	62	43	233
	W46	78	48	64	43	233
	W69	77	47	66	43	233
2015—2016	W0	90	50	40	51	231
	W23	89	49	42	51	231
	W46	88	48	44	51	231
	W69	87	47	46	51	231

由表 2 可知,砂石覆盖可以缩短冬小麦生长初期和快速生长期,而延长生长中期,对生长后期无影响。由于遮雨棚下温度较高,故而冬小麦生育期均比大田提前。

2.3 单作物系数法

应用冬小麦不同生长阶段的 ET_{cm} 及 ET_0 的比值计算两年度冬小麦在各生长阶段的单作物系数 K_{cs} ,如图 4 所示。



(b) 2015—2016

图4 两年度单作物系数变化曲线

Fig.4 Curves of single crop coefficient in two years

图 4 中,两年度冬小麦 K_{cs} 在各生长阶段的变化规律相同,但在不同砂石覆盖量下 K_{cs} 不同。生长初期,随着砂石覆盖量的增加, K_{cni} 逐渐减小。由于砂石覆盖抑制土壤蒸发,且生长初期冬小麦生长缓慢,因此, K_{cni} 较对照小。两年度砂石覆盖量 0 ~ 69 kg/m²的 K_{cni} 变化范围分别为 0.70 ~ 0.89、0.60 ~ 0.70;进入快速生长期, K_{cs} 迅速增加,且随着砂石覆盖量的增大, K_{cs} 的增长速率加快,于是不同砂石覆盖量条件下的 K_{cs} 曲线相交,交点后,随着砂石覆盖量的增加, K_{cs} 递增;在生长中期, K_{cmid} 随着砂石覆盖量的增加而增大。这是因为在生长中期,冬小麦蒸腾起主导作用,覆盖处理比不覆盖处理长势好,蒸散发增

大。两年度砂石覆盖量 0 ~ 69 kg/m²的 K_{cmid} 变化范围分别为 1.23 ~ 1.30、1.14 ~ 1.24;生长末期与快速生长期相反, K_{cend} 逐渐减小,但差异不大。两年度砂石覆盖量 0 ~ 69 kg/m²的 K_{cend} 变化范围分别为 0.66 ~ 0.59、0.40 ~ 0.48。

将两年度同一生长阶段单作物系数 K_{cs} 取平均值与砂石覆盖量 M_{sga} (kg/m²)做拟合,发现冬小麦不同生长阶段 K_{cs} 与砂石覆盖量 M_{sga} 有很好的线性关系(图 5)。

由图 5 可知,冬小麦不同生长阶段 K_{cs} 与砂石覆盖量 M_{sga} 拟合度均很好。 K_{cni} 和 K_{cend} 均随着砂石覆盖量的增加呈递减趋势,而 K_{cmid} 则呈现递增

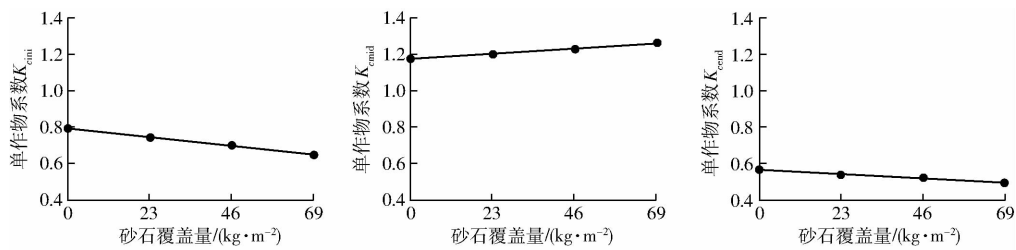


图5 冬小麦不同生长阶段单作物系数随砂石覆盖量的变化关系

趋势。得到适用于砂石覆盖条件下的统一关系式

$$K_{cS,i} = a_i M_{SGA} + b_i \tag{11}$$

式中 $K_{cS,i}$ ——第 i 个生长阶段的单作物系数
 a_i 、 b_i ——第 i 个生长阶段的拟合参数,见表3

由表3可知,决定系数 R^2 均不小于 0.965,因此式(11)适用性较好。基于表3的参数得到适用于砂石覆盖条件下的 ET_c 与 K_{cS} 和砂石覆盖量 M_{SGA} 的通用公式,即

$$ET_{cS,i} = (a_i M_{SGA} + b_i) ET_0 \tag{12}$$

从而在日气象数据和砂石覆盖量已知的情况下,初估冬小麦在不同生长阶段的 ET_c 值。

表3 冬小麦不同生长阶段单作物系数的拟合参数

Tab.3 Fitting parameters of single crop coefficient at different growth stages of winter wheat

参数	生长初期	生长中期	生长末期
a_i	-2×10^{-3}	1.2×10^{-3}	-1×10^{-3}
b_i	0.791	1.180	0.567
R^2	0.976	0.965	0.978

2.4 双作物系数法

利用 FAO-56 的双作物系数法可基于日气象数据计算式(5)、(6)得出 $K_{cb} + K_e$ 即双作物系数 K_{cd} 。2014—2015 及 2015—2016 两年度冬小麦双作物系数随时间的变化情况如图6所示。

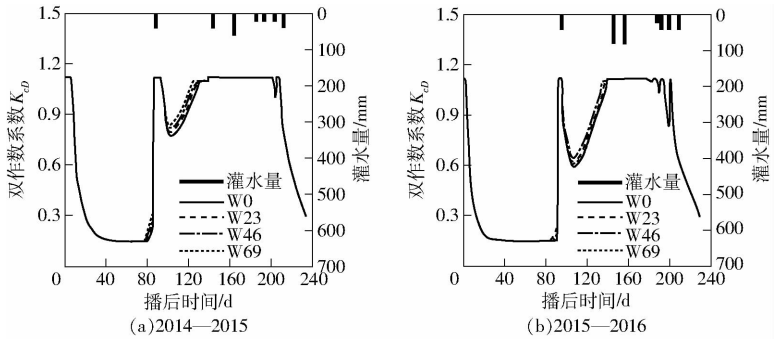


图6 两年度双作物系数变化曲线

Fig.6 Curves of dual crop coefficient in two years

由图6可知,两年度各生长阶段冬小麦 K_{cd} 在不同砂石覆盖量下差异不大。由于在生长初期冬小麦生长差异不大,且初始灌水量相同,所以不同砂石覆盖量下的 K_{cd} 在各生长初期相同;进入快速生长期, K_{cd} 在灌水后增大,由于覆盖处理的快速生长期较对照短,所以 K_{cd} 随着砂石覆盖量的增加而增大;生长中期冬小麦 K_{cd} 达到最大值;进入生长后期, K_{cd} 逐渐

减小。

由于双作物系数法不涉及具体地区或具体覆盖方式下的计算,所以图6中不同砂石覆盖量下的 K_{cd} 差异不大,因而需要根据 ET_{cm} 对计算的 ET_{cd} 进行修正。引入修正系数 A (式(7)),将两年度各生长阶段 A 的平均值与砂石覆盖量 M_{SGA} 进行拟合,发现用线性关系可很好地表达其关系(图7)。

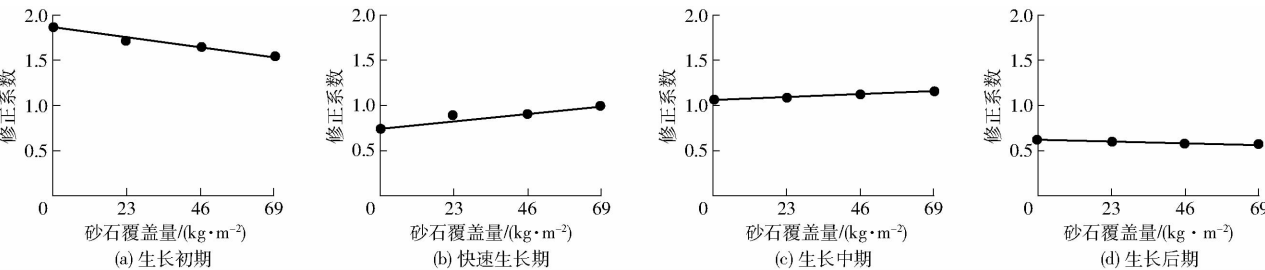


图7 双作物系数的修正系数随砂石覆盖量的变化关系

Fig.7 Correction coefficient of dual crop coefficient under different sand-gravel mulching amounts

由图7可知,冬小麦不同生长阶段 K_{cd} 的修正系数 A 与砂石覆盖量 M_{SGA} 的拟合度在各个生长阶段均很好。在生长初期和生长后期, A 随着砂石覆盖量呈递减趋势,而在快速生长期和生长中期呈递增趋势。得到适用于砂石覆盖条件下的统一关系式为

$$A_i = c_i M_{SGA} + d_i \tag{13}$$

式中 c_i 、 d_i ——第 i 个生长阶段的拟合参数,见表4

表4 双作物系数的修正系数的拟合参数
Tab.4 Fitting parameters of correction coefficient of dual crop coefficient

参数	生长初期	快速生长期	生长中期	生长后期
c_i	-4.7×10^{-3}	3.2×10^{-3}	1.4×10^{-3}	-7×10^{-4}
d_i	1.853	0.749	1.050	0.621
R^2	0.973	0.914	0.989	0.972

从表4可知决定系数 R^2 均不小于0.914,由砂石覆盖条件下的 ET_c 与 K_{cd} 关系可得出修正公式

$$ET_{cd,i} = (c_i M_{SGA} + d_i) K_{cd,i} ET_0 \tag{14}$$

基于式(14)可以计算不同砂石覆盖量下的冬小麦在不同生长阶段的 ET_{cd} 。

2.5 PM模型、单作物系数法和双作物系数法的对比

利用上述 K_{cs} 和 K_{cd} 分别与 ET_0 相乘对两年度冬小麦日 ET_c 进行模拟,结果如图8所示。

由图8可知,两年度的PM模型和单、双作物系数法估算的 ET_c 与 ET_{cm} 具有相似的变化趋势,单、双作物系数法估算的 ET_c 与 ET_{cm} 数值上比PM模型更接近。2014—2015年度中、全生育期,PM模型均低估了 ET_c 。在播后80 d之前,PM模型和单、双作物系数法估算的 ET_c 与 ET_{cm} 接近度由高到低依次为 ET_{cs} 、 ET_{cd} 、 ET_{cpm} ,由于双作物系数法在灌水后土壤蒸发呈现逐渐减小趋势,因此计算的 ET_{cd} 偏小, ET_{cs} 较 ET_{cd} 更接近 ET_{cm} ;而在播后80~130 d和190~233 d, ET_{cd} 较 ET_{cs} 更接近 ET_{cm} ,这是因为双作物系数法考虑了灌水影响,计算的 ET_c 整体上更为准确;播后130~190 d, ET_{cs} 和 ET_{cd} 均与 ET_{cm} 非常接近,这是由于此阶段冬小麦到达生长旺盛期,蒸散量较大,以最大且稳定的 K_c 生长。2015—2016年度与2014—2015年度有相同规律。

图9对比了3种方法估算 ET_c 与实测值的散点图。对比3种方法,两年度中,与1:1接近程度由高到低依次为 ET_{cs} 、 ET_{cd} 、 ET_{cpm} , ET_{cpm} 比 ET_{cm} 偏低, ET_{cs} 比 ET_{cm} 偏高, ET_{cd} 更接近 ET_{cm} 。

利用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和纳什效率系数(NSE)对PM模型和单、双作物系数法估算不同砂石覆盖量下冬小麦 ET_c 的准确度度进行

评价,具体值列于表5中。从表5中可以看出,两年度PM模型和单、双作物系数法均可以准确地估算 ET_c ,且随着砂石覆盖量的增加,估算结果准确度增加。两年度双作物系数法的 R^2 均大于单作物系数法和PM模型,说明 ET_{cd} 能更好地描述 ET_{cm} 的逐日变化;两年度的RMSE由大到小依次为PM模型、单作物系数法、双作物系数法,说明 ET_{cd} 更接近 ET_{cm} 的平均值;两年度PM模型和单作物系数法的NSE均在0~1的范围内,表明估算接近平均水平,但估算逐日变化误差较大。而双作物系数法的NSE接近于1,表明该法估算结果准确,可信度更高。综上所述,PM模型和单、双作物系数法均可以估算冬小麦蒸散量,但双作物系数法更优。

3 讨论

单、双作物系数法在国内已有不少应用。在单作物系数法的研究中,卢晓鹏等^[34]发现计算的玉米 ET_{cs} 与 ET_{cm} 十分接近,具有很好的相关性。SHAHROKHIA等^[35]研究表明单作物系数法对小麦和玉米的逐日 ET_c 模拟较好。LÓPEZ-URREA等^[36]通过蒸渗仪得到的洋葱的单作物系数 $K_{cini} = 0.65$, $K_{cmid} = 1.20$, $K_{cend} = 0.75$,与FAO-56推荐值相似。以往研究均表明单作物系数法能够准确地估算作物 ET_c ,与本研究对 $M_{SGA} = 0$ 条件下冬小麦 ET_c 的结果有一定相似性,本研究利用不同生长阶段单作物系数与砂石覆盖量建立关系式计算得到的单作物系数能够准确地估算不同砂石覆盖量下的冬小麦 ET_c ,且两年度冬小麦 ET_{cs} 决定系数 R^2 的范围分别为0.77~0.80、0.73~0.76,模拟精度较高。但两年度下当砂石覆盖量由0到69 kg/m²时, K_{cini} 变化范围为0.70~0.89、0.60~0.70, K_{cmid} 变化范围为1.30~1.23、1.24~1.14, K_{cend} 变化范围为0.59~0.66、0.40~0.48,这与FAO-56推荐值有一定差异,说明应用FAO-56标准方法时需谨慎并结合当地气候及覆盖条件考虑。

在双作物系数法的研究中,ZHAO等^[37]模拟了华北平原冬小麦和夏玉米的 ET_c ,发现模拟的土壤蒸发与实测值的均方根误差分别为0.37 mm/d(冬小麦)和0.49 mm/d(夏玉米),模型能很好地模拟冬小麦和夏玉米 ET_c ;冯禹等^[38]利用实测叶面积指数动态估算基础作物系数 K_{cb} ,修正土壤蒸发系数 K_e ,得到改进的双作物系数模拟旱作玉米 ET_c ,结果表明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 ET_c 。邱让建等^[39]研究表明双作物系数法估算温室番茄耗水量平均标准误差为0.55 mm/d,平均绝对误差为0.44 mm/d,均

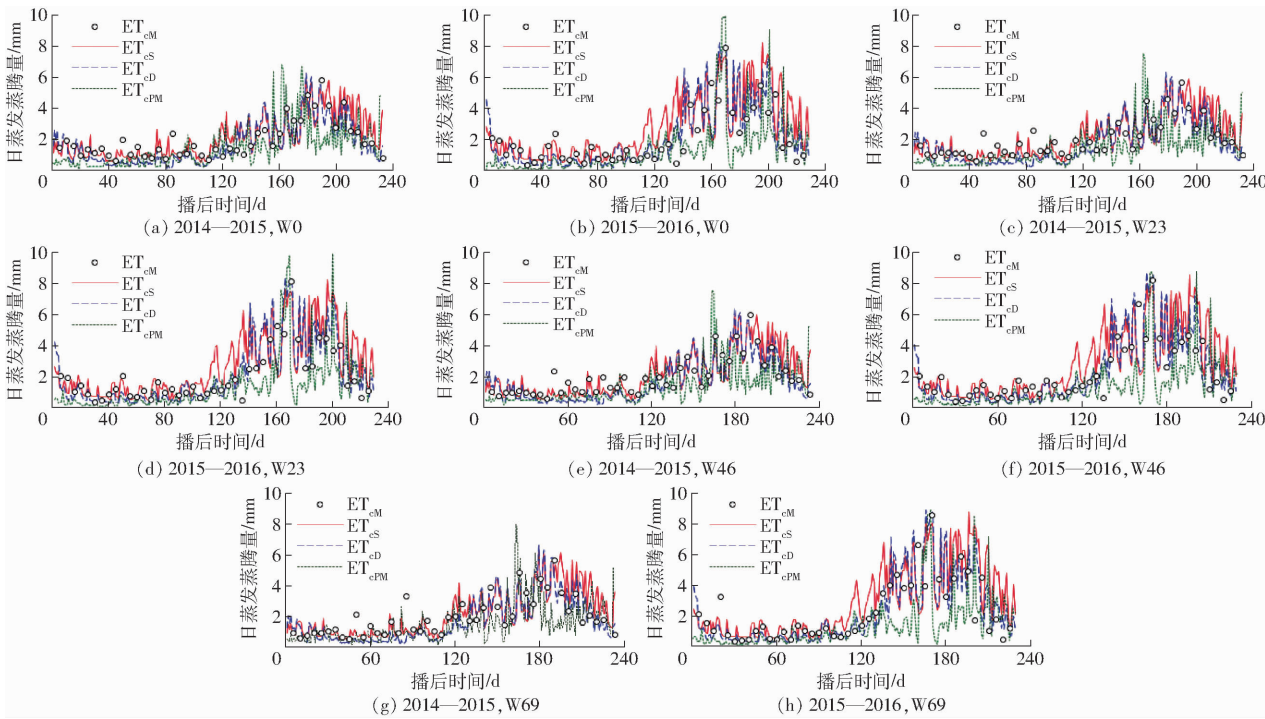


图 8 不同砂石覆盖量下冬小麦蒸散发模拟值与实测值的对比

Fig. 8 Comparisons of simulated and measured evapotranspiration values of winter wheat under different sand – gravel mulching amounts

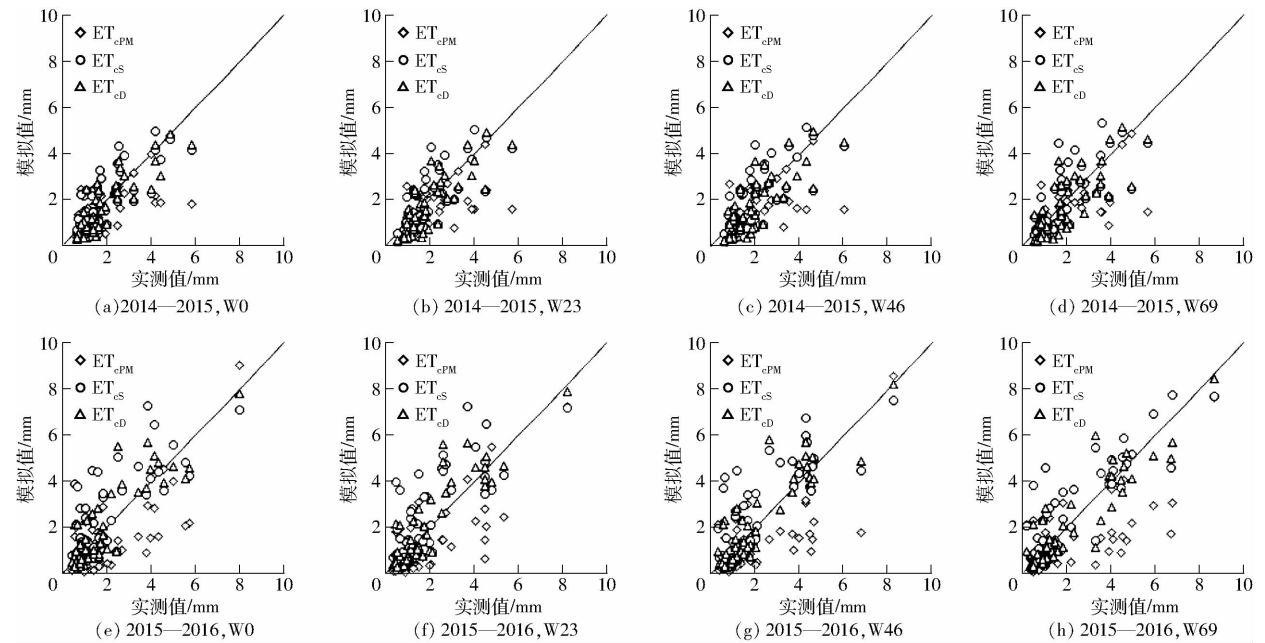


图 9 不同砂石覆盖量下冬小麦 ET_c 模拟值与实测值散点图

Fig. 9 Scatter plots of simulated and measured ET_c of winter wheat under different sand – gravel mulching amounts

年度		评价指标	PM 模型				单作物系数法				双作物系数法			
			W0	W23	W46	W69	W0	W23	W46	W69	W0	W23	W46	W69
2014—2015		R^2	0.70	0.71	0.72	0.73	0.77	0.78	0.79	0.80	0.83	0.84	0.86	0.88
		RMSE	0.52	0.50	0.49	0.48	0.43	0.43	0.41	0.39	0.40	0.42	0.44	0.43
		NSE	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.59	0.62	0.65	0.68
2015—2016		R^2	0.72	0.73	0.73	0.74	0.73	0.74	0.75	0.76	0.87	0.88	0.90	0.92
		RMSE	0.50	0.49	0.48	0.47	0.77	0.76	0.74	0.71	0.45	0.44	0.41	0.39
		NSE	0.43	0.44	0.45	0.47	0.18	0.19	0.22	0.35	0.73	0.75	0.77	0.80

较小。其他研究也均表明双作物系数法能够较好地估算作物 ET_c ^[40-43]。本研究得出两年度 $ET_{c,d}$ 与 $ET_{c,m}$ 的 RMSE 分别为 0.40~0.43、0.39~0.45,模拟精度较以往研究提高,表明该方法能够很好地模拟砂石覆盖条件下的冬小麦 ET_c 。

本文基于 FAO-56 推荐的单、双作物系数法,估算冬小麦 ET_c ,其在描述逐日 ET_c 方面有一定适用性;但与以往研究不同的是:①本研究采用蒸渗仪测定砂石覆盖条件下冬小麦 ET_c ,为准确获取实测值提供基础。②以往将单、双作物系数法应用于砂石覆盖条件下 ET_c 估算的研究较少。FAO-56 推荐的单、双作物系数法受地区环境、作物种类影响较大,本研究得到砂石覆盖条件下单、双作物系数法估算 ET_c 的多因素函数关系,利用这些公式可以得到适用于砂石覆盖条件下的冬小麦 ET_c ,但本研究仅涉及

了杨凌地区,后续研究中会将地区范围扩大,提高其模拟的实用性。

4 结论

(1)基于 FAO-56 推荐的单作物系数法,利用不同生长阶段单作物系数与砂石覆盖量建立关系式,得到不同砂石覆盖量下的冬小麦蒸散量计算的通用公式,经模拟表明其适用性较好。

(2)基于实测蒸散量改进了砂石覆盖条件下冬小麦不同生长阶段双作物系数,得到不同砂石覆盖量下的冬小麦蒸散量计算的通用公式,能够准确地估算不同砂石覆盖量下冬小麦不同生长阶段的蒸散量。

(3)对比砂石覆盖条件下 PM 模型和改进的冬小麦单、双作物系数法,双作物系数法用于估算蒸散量比单作物系数法和 PM 模型更优。

参 考 文 献

- 1 SINGH A. Irrigation planning and management through optimization modelling [J]. Water Resources Management, 2014, 28(1): 1-14.
- 2 郭春明,任景全,张铁林,等. 东北地区春玉米生长季农田蒸散量动态变化及其影响因子[J]. 中国农业气象, 2016, 37(4): 400-407.
- 3 GUO Chunming, REN Jingquan, ZHANG Tielin, et al. Dynamic change of evapotranspiration and influenced factors in the spring maize field in Northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(4): 400-407. (in Chinese)
- 4 XU C Y, SING H V. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions [J]. Journal of Hydrology, 2005, 308(1-4): 105-121.
- 5 FENG Y, CUI N, ZHAO L, et al. Comparison of ELM, GANN, WNN and empirical models for estimating reference evapotranspiration in humid region of Southwest China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 536: 376-383.
- 6 原翠萍,张心平,雷廷武,等. 砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 25-28.
- 7 YUAN Cuiping, ZHANG Xinping, LEI Tingwu, et al. Effects of mulching sand and gravel size on soil moisture evaporation [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 25-28. (in Chinese)
- 8 LI X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of Northwest China [J]. Catena, 2003, 52(2): 105-127.
- 9 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): 273-297.
- 10 CAI Yongkun, LI Yi, FENG Hao. Effects of gravel-sand mulching degree and size on soil moisture evaporation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 273-297. (in Chinese)
- 11 赵丹,李毅,冯浩. 砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1058-1068.
- 12 ZHAO Dan, LI Yi, FENG Hao. Dynamics of soil water evaporation from soil mulched with sand-gravels in stripe [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(5): 1058-1068. (in Chinese)
- 13 冯浩,刘晓青,左亿球,等. 砾石覆盖量对农田水分与作物耗水特征的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 155-163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160521&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.021.
- 14 FENG Hao, LIU Xiaoqing, ZUO Yiqiu, et al. Effect of gravel mulching degree on farmland moisture and water consumption features of crops [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 155-163. (in Chinese)
- 15 XIE Z K, WANG Y J, WEI X H, et al. Impacts of a gravel-sand mulch and supplemental drip irrigation on watermelon (*Citrullus lanatus* [Thunb.] Mats. & Nakai) root distribution and yield [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 89(1): 35-44.
- 16 SHUTTLEWORTH W J, WALLACE J. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469): 839-855.
- 17 NORMAN J M, KUSTAS W P, HUMES K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77(3): 263-293.
- 18 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, 33(3): 50-54.
- 19 PAN Yinqin, CAI Huanjie. Comparison of crop water requirements computed by single crop coefficient approach and dual crop coefficient approach [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(3): 50-54. (in Chinese)
- 20 ALLEN R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study [J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1): 27-41.
- 21 ALLEN R G, PEREIRA L S, SMITH 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.
- 22 宿梅双,李久生,饶敏杰. 基于称重式蒸渗仪的喷灌条件下冬小麦和糯玉米作物系数估算方法[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 25-29.
- 23 SU Meishuang, LI Jiusheng, RAO Minjie. Estimation of crop coefficients for sprinkler-irrigated winter wheat and sweetcorn using a weighing lysimeter [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 25-29. (in Chinese)
- 24 KUO S F, HO S S, LIU C W. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan [J]. Agricultural Water Management, 2006, 82(3): 433-451.

- 18 彭世彰, 丁加丽, 茆智, 等. 用 FAO-56 作物系数法推求控制灌溉条件下晚稻作物系数及验证 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 30-34.
PENG Shizhang, DING Jiali, MAO Zhi, et al. Estimation and verification of crop coefficient for water saving irrigation of laterice using the FAO-56 method [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 30-34. (in Chinese)
- 19 MONTEITH J L. Evaporation and environment [J]. Symposia of the Society for Experimental Biology, 1965, 19(19): 205-234.
- 20 PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1948, 193(1032): 120-145.
- 21 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements [J]. FAO Irrigation & Drainage Paper No 56, 1998.
- 22 ABYANEH H Z, VARKESHI M B, GHASEMI A, et al. Determination of water requirement, single and dual crop coefficient of garlic (*Allium sativum*) in the cold semi-arid climate [J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(8): 1050-1054.
- 23 MAJNOONI-HERIS A, SADRAADDINI A A, NAZEMI A H, 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): 1885-1894.
- 24 ODHIAMBO L O, IRMAK S. Evaluation of the impact of surface residue cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration [J]. Agricultural Water Management, 2012, 104: 221-234.
- 25 王志强, 朝伦巴根, 柴建华. 由双作物系数法确定干旱地区人工牧草基本作物系数地区值的研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 102-106.
WANG Zhiqiang, CHAO Lunbagen, CHAI Jianhua. Determination of regional basal coefficient of the grasses in arid area from dual crop coefficient approach [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(3): 102-106. (in Chinese)
- 26 ER-RAKI S, CHEHBOUNI A, BOULET G, et al. Using the dual approach of FAO-56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(11): 1769-1778.
- 27 LIU Y, 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(1): 31-40.
- 28 金菊良, 侯志强, 蒋尚明, 等. 基于单作物系数和遗传算法的受旱胁迫下大豆蒸发蒸腾量估算 [J]. 黑龙江大学工程学报, 2017, 8(1): 1-12.
JIN Juliang, HOU Zhiqiang, JIANG Shangming, et al. Estimation of soybean evapotranspiration under drought stress based on single crop coefficient and genetic algorithm [J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2017, 8(1): 1-12. (in Chinese)
- 29 文治强, 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.
WEN Yeqiang, YANG Jian, SHANG Songhao. Analysis on evapotranspiration and water balance of cropland with plastic mulch in arid region using dual crop coefficient approach [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 138-147. (in Chinese)
- 30 ROSA R D, PAREDES P, RODRIGUES G C, et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. background and computational strategy [J]. Agricultural Water Management, 2012, 103: 8-24.
- 31 QIU R, DU T, KANG S, et al. Assessing the SIMDualKc model for estimating evapotranspiration of hot pepper grown in a solar greenhouse in Northwest China [J]. Agricultural Systems, 2015, 138: 1-9.
- 32 GAO Y, YANG L, SHEN X, et al. 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.
- 33 ALLEN R G, PRUITT W O, WRIGHT J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_0 by the FAO56 Penman-Monteith method [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1): 1-22.
- 34 卢晓鹏, 段顺琼, 马显莹, 等. 单双作物系数法计算玉米需水量的对比研究 [J]. 节水灌溉, 2012(11): 18-21.
LU Xiaopeng, DUAN Shunqiong, MA Xianying, et al. A comparative study between single crop coefficient method and double crop coefficient method in calculation of water requirement of maize [J]. Water Saving Irrigation, 2012(11): 18-21. (in Chinese)
- 35 SHAHROKHIA M, SEPASKHAH A. Single and dual crop coefficients and crop evapotranspiration for wheat and maize in a semi-arid region [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 114(3-4): 495-510.
- 36 LÓPEZ-URREA R, DESANTA OLALLA F M, MONTORO A, et al. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6): 1031-1036.
- 37 ZHAO N, LIU Y, CAI J, 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.
- 38 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.
FENG Yu, CUI Ningbo, GONG Daozhi, et al. Estimating rainfed spring maize evapotranspiration using modified dual crop coefficient approach based on leaf area index [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 90-98. (in Chinese)
- 39 邱让建, 杜太生, 陈任强. 应用双作物系数模型估算温室番茄耗水量 [J]. 水利学报, 2015, 46(6): 678-686.
QIU Rangjian, DU Taisheng, CHEN Renqiang. Application of the dual crop coefficient model for estimating tomato evapotranspiration in greenhouse [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 678-686. (in Chinese)
- 40 PAÇO T, FERREIRA M, ROSA R, et al. The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model versus eddy covariance measurements [J]. Irrigation Science, 2012, 30(2): 115-126.
- 41 CANCELA J, FANDIÑO M, REY B, et al. Automatic irrigation system based on dual crop coefficient, soil and plant water status for *Vitis vinifera* (cv Godello and cv Mencía) [J]. Agricultural Water Management, 2015, 151: 52-63.
- 42 冯禹, 龚道枝, 王罕博, 等. 基于双作物系数的旱作玉米田蒸散估算与验证 [J]. 中国农业气象, 2017, 38(3): 141-149.
FENG Yu, GONG Daozhi, WANG Hanbo, et al. Estimating rainfed maize evapotranspiration using the FAO dual crop coefficient method on the loess plateau [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(3): 141-149. (in Chinese)
- 43 龚雪文, 刘浩, 孙景生, 等. 基于双作物系数法估算不同水分条件下温室番茄蒸发蒸腾量 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1255-1264.
GONG Xuewen, LIU Hao, SUN Jingsheng, et al. Modeling evapotranspiration of greenhouse tomato under different water conditions based on the dual crop coefficient method [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1255-1264. (in Chinese)