

▪ 作物水肥高效利用 ▪

文章编号: 1672-3317(2023)02-0001-08

利用叶面积指数和气象因子修正双作物 系数估算夏玉米蒸散量

姚婷月^{1,2}, 王怡宁^{3*}, 石磊韬^{1,2}, 尼玛扎西⁵, 周超⁴, 鞠琴¹, 王振龙⁴

(1.河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

2.浙江水文新技术开发经营公司, 杭州 310000; 3.南京水利科学研究院, 南京 210029;

4.安徽省(水利部淮委)水利科学研究院 五道沟水文水资源实验站, 安徽 蚌埠 233000;

5.西藏自治区水文水资源勘测局 阿里水文水资源分局, 西藏 阿里 850032)

摘要:【目的】准确估算夏玉米作物蒸腾(T_r)与土壤蒸发(E_s)。【方法】本研究基于FAO-56推荐的双作物系数模型,应用五道沟水文实验站叶面积指数(LAI)、气象因子以及土壤水分实测数据,对模型中的基础作物系数(K_{cb})和土壤蒸发系数(K_e)进行动态修正,并基于Penman-Monteith(P-M)模型,确定参考作物蒸散量(ET_0),进而估算夏玉米实际蒸散量(ET_c),并以2018、2019年大型蒸渗仪实测 ET_c 对估算值进行精度评价。【结果】修正后的双作物系数法估算夏玉米蒸散量较为准确,2018年夏玉米全生育期 ET_c 估算与实测的日均值分别为4.89 mm/d和4.66 mm/d,2019年分别为5.72 mm/d和5.67 mm/d。应用修正双作物系数法估算夏玉米日 ET_c 的决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、模型效率系数(E_{ms})、平均绝对误差(AAE),2018年分别为0.89、0.98 mm/d、0.86和0.73 mm/d,2019年分别为0.89、0.76 mm/d、0.89和0.58 mm/d。【结论】因此,修正后的双作物系数法能够较为准确的估算夏玉米蒸散量,该研究可为淮北平原农田水分精准管理提供科学依据。

关键词: 蒸散估算; 双作物系数法; 叶面积指数; 气象因子; 夏玉米; 蒸渗仪

中图分类号: P33

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022007

OSID:



姚婷月, 王怡宁, 石磊韬, 等. 利用叶面积指数和气象因子修正双作物系数估算夏玉米蒸散量[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 1-8.

YAO Tingyue, WANG Yining, SHI Leitao, et al. Modifying the Dual Crop Coefficients with Leaf Area Index and Meteorological Factors to Improve the Estimated Evapotranspiration from Maize Fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 1-8.

0 引言

蒸散发(Evapotranspiration, ET_c)主要由作物蒸腾(T_r)和土壤蒸发(E_s)组成,是唯一既出现在地表能量平衡又出现在水量平衡中的要素^[1-2]。【研究进展】国内外估算作物蒸散量的方法主要有:P-M直接模型^[3]、波文比法、作物系数模型(FAO-56)等。作物系数法分为2种:单作物系数法和双作物系数法,其中双作物系数法能区分计算 T_r 与 E_s ,能评估降水、灌溉和覆膜等对土壤水分的影响^[4-5],对作物 ET_c 的估算更为精确^[6-7],并且已经在不同地区的各种作物上得到了广泛应用。冯禹等^[8]基于改进

后的双作物系数法对2012、2013年寿阳站旱作玉米 ET_c 进行估算,发现改进后的双作物系数模型能分别计算作物蒸腾与土壤蒸发,对旱作玉米蒸散量的估算较为准确。闫浩芳等^[9]引入作物系数(LAI)修正FAO双作物系数法,对江苏省镇江市温室黄瓜蒸散量进行估算,得出双作物系数法估算温室黄瓜精度较高,对研究温室环境的控制具有重要意义。Ding等^[10]以覆膜条件下的玉米为研究对象,对双作物系数法进行修正,发现修正后的双作物系数法对玉米蒸散发的模拟效果较好,指出FAO-56推荐的作物系数在某些地区需根据不同气候条件加以修正。李丰琇等^[11]基于双作物系数法对新疆滴灌夏玉米蒸散发进行模拟与估算,发现实测值与模拟值吻合度较高。Shrestha等^[12]利用双作物系数法,研究了覆膜藤蔓的蒸散量,实现对作物蒸腾和土壤蒸发的分别估算,取得了良好的模拟效果,发现采用FAO-56推荐的作物系数易高估农田的土壤蒸发。

收稿日期: 2022-01-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3201104); 国家自然科学基金项目(52179013)

作者简介: 姚婷月(1998-),女,浙江嘉兴人。硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: 1246293932@qq.com

通信作者: 王怡宁(1992-),女,安徽蚌埠人。工程师,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: wyn6563@163.com

目前, 利用双作物系数法估算作物 ET_c 的相关研究较多^[7,13], 但对淮北平原夏玉米 ET_c 的研究几乎没有。由于气候、作物生长状况、土壤质地等诸多因素都会影响作物系数的取值, 因此, 确定当地的作物系数需依据当地实测资料进行修正^[2]。【切入点】本研究于 2018、2019 年在五道沟实验站进行, 基于夏玉米叶面积指数、气象因子以及土壤含水率实测资料, 运用 LAI 与作物冠层覆盖度系数 (K_{cc}) 动态模拟 K_{cb} , 运用 LAI 修正 K_c 。【拟解决的关键问题】并采用修正后的双作物系数模型对淮北平原夏玉米蒸散量进行估算, 对其适用性进行评估, 以期为实现淮北平原精准灌溉提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018、2019 年在蚌埠市五道沟水文实验站进行, 海拔 19.7 m^[14], 作物以夏玉米、夏大豆和冬小麦为主^[15-16], 地下水埋深年变幅为 1~3 m, 站内设有降水径流、潜水蒸发与蒸散发、人工降水、灌溉排水、水文气象全要素、作物与水关系 6 大研究内容。该地区属暖温带半湿润季风气候, 夏季炎热多雨, 冬季干旱少雨。降水量年际变化大, 多年平均降水量为 913 mm, 汛期为 6—9 月, 全年约 65% 的降水发生在该时期。多年平均蒸发量为 1 183.3 mm, 多年平均气温为 15.3 °C, 研究区土壤平均体积质量为 1.4 g/cm³, 适宜作物生长的土壤质量含水率为 18%~25%, 田间持水率为 28%~30%, 凋萎含水率为 10%~12%, 土壤饱和含水率为 38%~40%, 淮北平原区砂姜黑土分布广泛, 约占土壤总面积的 54%。

1.2 试验设计及资料选取

试验以砂姜黑土区种植的夏玉米 (登海 618) 为研究对象, 玉米实际蒸散量由五道沟大型称质量式蒸渗仪测得, 蒸渗仪 (型号 FR101A) 土柱横截面积 4.0 m², 高度 4.0 m, 土壤体积含水率 1 h 测量 1 次, 其他数据每 10 min 记录 1 次。站内设有高精度气象站, 每 10 min 记录 1 次风速、净辐射、空气湿度等气象数据。2018 年夏玉米于 6 月 24 日播种, 10 月 8 日收获; 2019 年于 6 月 18 日播种, 9 月 28 日收获。资料选取 2018 年 6 月 24 日—10 月 8 日和 2019 年 6 月 18 日—9 月 28 日蒸渗仪数据及同期气象数据。蒸渗仪内夏玉米种植株距约为 32 cm, 行距约为 55 cm, 种植密度为 267 株/hm²。夏玉米以土壤养分测定为基础, 根据玉米吸肥规律、产量水平、土壤供肥能力、肥料养分量和利用率等多种因素确定施肥方案, 一般高产田每生产 100 kg 籽粒施用氮 (N) 3 kg, 磷 (P₂O₅) 1~1.5 kg, 钾 (K₂O) 2 kg 计算需肥量。

相关研究表明^[17-18], 淮北平原砂姜黑土区地下水埋深年变幅为 1~3 m, 结合实验站蒸渗仪的地下水埋深特点, 本次研究资料选取地下水埋深为 1 m 和 3 m 的夏玉米实测资料 (3 m 的资料用于验证)。2018、2019 年夏玉米全生育期内均未灌溉, 仅接受自然降水。

1.3 生长阶段划分

根据依据 FAO 建议的生长阶段划分方法和试验区每日采集的作物生长图像, 将 2018、2019 年夏玉米各生长阶段划分如表 1 所示。

表 1 夏玉米生长阶段划分

时间	初期	发育期	中期	后期
2018 年	0624—0715	0716—0820	0821—0912	0913—1008
时间/d	22	36	23	26
2019 年	0618—0710	0711—0814	0815—0906	0907—0928
时间/d	23	35	23	22

1.4 参考作物蒸散量

利用 FAO P-M 公式计算日 ET_0 , 计算式为^[19]:

$$ET_0 = \frac{0.408A(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

各参数解释见文献[15-17]。

1.5 叶面积指数

选取蒸渗仪内具有代表性的 5 株玉米 (长势均匀, 无病虫害), 使用 Yaxin-1242 的叶面积仪测定叶面积, 每 7 天测量 1 次, 中间值采用线性插补得到。叶面积指数即为单位土地面积上的玉米叶片总面积与土地面积的比值。玉米株高每 7 天用卷尺测量 1 次, 中间值进行插补得到。

夏玉米生育期内 LAI 随播种后天数 (DAS) 的变化曲线见图 1 所示。由图 1 可知, 2 a 的 LAI 变化趋势相似, LAI 在播种后前 20 d 缓慢增长, 在 20~50 d 内增速变大, 2018 年在第 59 天达到最大值 (3.62 m²/m²), 2019 年在第 56 天达到最大值 (3.38 m²/m²), 在作物生长后期快速减小。

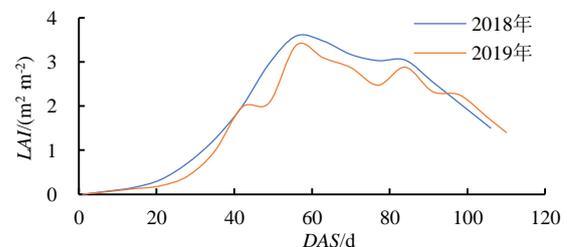


图 1 叶面积指数

Fig.1 Leaf area index

2 模型概述

2.1 FAO 双作物系数模型

将作物系数 K_c 分为: 基础作物系数 K_{cb} 和土壤蒸发系数 K_e , K_{cb} 用来描述作物蒸腾, K_e 体现了土壤

蒸发强度短期内增加对 ET_c 的影响^[20]。计算式为^[21]：

$$ET_c = K_c ET_0 = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0, \quad (2)$$

式中： ET_c 为作物蒸散量（mm）； ET_0 为参考作物蒸散量（mm）； K_s 为水分胁迫系数。

水分胁迫系数计算式为：

$$K_s = \begin{cases} 1 & D_r \leq RAW \\ \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} & D_r > RAW \end{cases}, \quad (3)$$

式中： D_r 为根系层中消耗的水量（mm）； TAW 为根系中的总有效水量（mm）； RAW 为根系中易被吸收利用的水量（mm）。

K_s 反映根区土壤含水率不足时对作物蒸腾的影响，2018、2019年夏玉米在生长过程中水分供应充足，故本文 $K_s=1$ 。

2.2 基础作物系数 (K_{cb})

从“作物需水量计算指南” (FAO-56)中查出推荐的基础作物系数，分别为： $K_{cbini(tab)}=0.15$ ， $K_{cbmid(tab)}=1.15$ ， $K_{cbend(tab)}=0.50$ 。

根据当地实测数据，对 K_{cbmid} 和 K_{cbend} 进行修正。若日最小相对湿度的平均值 $RH_{min} \neq 45\%$ 或2 m高处的日平均风速 $U_2 \neq 2$ m/s，且 $K_{cb} > 0.45$ 时，推荐的 $K_{cbmid(tab)}$ 、 $K_{cbend(tab)}$ 需进行修正，计算式为^[21]：

$$K_{cb} = K_{cb(tab)} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}, \quad (4)$$

式中： h 为该生长阶段作物的平均株高（m）； RH_{min} 为空气的最小相对湿度（%）； $K_{cb(tab)}$ 为FAO-56推荐的参考基础作物系数； U_2 为2 m高处的日平均风速。

为更准确估算夏玉米 ET_c 的动态变化，本文引入冠层覆盖度系数 K_{cc} 计算动态 K_{cb} ，计算式为^[8, 22]：

$$K_{cb} = K_{c,min} + K_{cc}(K_{cb,full} - K_{c,min}), \quad (5)$$

$$K_{cb,full} = \min(1.0 + 0.1h, K_{max}) +$$

$$[0.04(U_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}, \quad (6)$$

式中： $K_{c,min}$ 为裸土最小作物系数，本文取0.1^[8]； K_{cc} 为冠层覆盖度系数； $K_{cb,full}$ 为作物完全覆盖地表时的最大基础作物系数； K_{max} 为作物系数最大值，取值为1.2^[8, 21]。

K_{cc} 的计算需要引入叶面积指数 LAI 。

$$K_{cc} = 1 - e^{-\kappa LAI}, \quad (7)$$

式中： κ 为辐射的冠层衰减系数，本文取 $\kappa=0.7$ ^[8]。

2.3 土壤蒸发系数 (K_e)

农田土壤蒸发是发生在作物的间隙或冠层下的， K_e 反映了降水或灌溉后地表湿润使土壤蒸发强度短期内增加对 ET_c 的影响^[20]。当土壤表面较湿润时， K_e 取到上限 $K_{c,max}$ ，随着土壤表面逐渐变干，蒸发逐渐衰减^[23]，此时 K_e 的计算式为^[21]：

$$K_e = K_r(K_{c,max} - K_{cb}) \leq f_{ew} \cdot K_{c,max}, \quad (8)$$

式中： $K_{c,max}$ 为 K_c 的上限，即降水或灌溉后 K_c 的最大值； K_r 为土壤蒸发衰减系数； f_{ew} 为发生蒸发土壤与总土壤面积的比值，即土壤有效蒸发部分（%）。

$K_{c,max}$ 的计算式为^[21]：

$$K_{c,max} = \max \left(\left\{ 1.2 + \left[\frac{0.04(U_2 - 2)}{-0.004(RH_{min} - 45)} \right] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \right\}, \{K_{cb} + 0.05\} \right), \quad (9)$$

式中： h 为作物生长阶段内平均冠层高度（m）。

土壤蒸发可分为2个阶段：第一阶段（即能量限制阶段）：土壤水分较充足，此时 $K_r=1$ 。第二阶段（即蒸发递减阶段）：土壤水分逐渐较少，当累积蒸发深度 $D_e \geq REW$ （可蒸发深度）时，此时衰减系数 K_r 的计算方法见文献^[21]，本文 K_r 计算中所需土壤水分数据由蒸渗仪实测取得。

式（8）中 f_{ew} 的计算式为^[21]：

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w), \quad (10)$$

式中： $1 - f_c$ 为裸露土壤平均比值； f_w 为降水湿润土壤的比例。

式（10）中 f_c 的计算式为^[21]：

$$f_c = \left[\frac{K_{cb} - K_{c,min}}{K_{c,max} - K_{c,min}} \right]^{(1+0.5h)}. \quad (11)$$

为了准确估算土壤蒸发的动态变化，本文运用 LAI 计算动态 f_c ^[24-25]：

$$f_c = 1.005 \left(1 - e^{-0.6LAI} \right)^{1.2}. \quad (12)$$

2.4 误差评价指标

采用决定系数 (R^2)、均方根误差 ($RMSE$)、模型效率系数 (E_{ns})、平均绝对误差 (AAE)，对修正双作物系数法模拟夏玉米 ET_c 进行适用性分析，计算式为：

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Y_i - X_i)^2}, \quad (14)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2}, \quad (15)$$

$$AAE = \frac{\sum_{i=1}^m |X_i - Y_i|}{m}, \quad (16)$$

式中： Y_i 为修正的双作物系数法估算的第 i 日 ET_c 值； X_i 为大型称质量式蒸渗仪实测的第 i 日 ET_c 标准值； \bar{Y} 与 \bar{X} 为分别为 Y_i 与 X_i 的平均值； m 为样本个数。 R^2 和 E_{ns} 越接近1，表明模型吻合度越好； $RMSE$ 和 AAE 越小，说明模型偏差越小。

3 结果与分析

3.1 气象数据生育期内的变化

图2为2018、2019年夏玉米整个生育期气象要

素的变化,一般来说,蒸散发与降水、气温和风速均呈正相关关系。由图 2 (a) 可知 2018、2019 年夏玉米生育期内降水量充沛,生育期内降水量最大值分别出现在 2018 年 6 月 27 日与 2019 年 8 月 10 日,降水量分别为 225.3 mm 与 111.2 mm; 气温在整个生育期内波动不大,2018、2019 年生育期内平均气

温分别为 26.3 °C 与 26.0 °C。从图 2 (b) 可知夏玉米整个生育期内风速波动较大,生育期内风速最大值分别出现在 2018 年 8 月 17 日与 2019 年 8 月 11 日,降水量分别为 4.8 m/s 与 4.2 m/s; 相对湿度在整个生育期内波动不大。

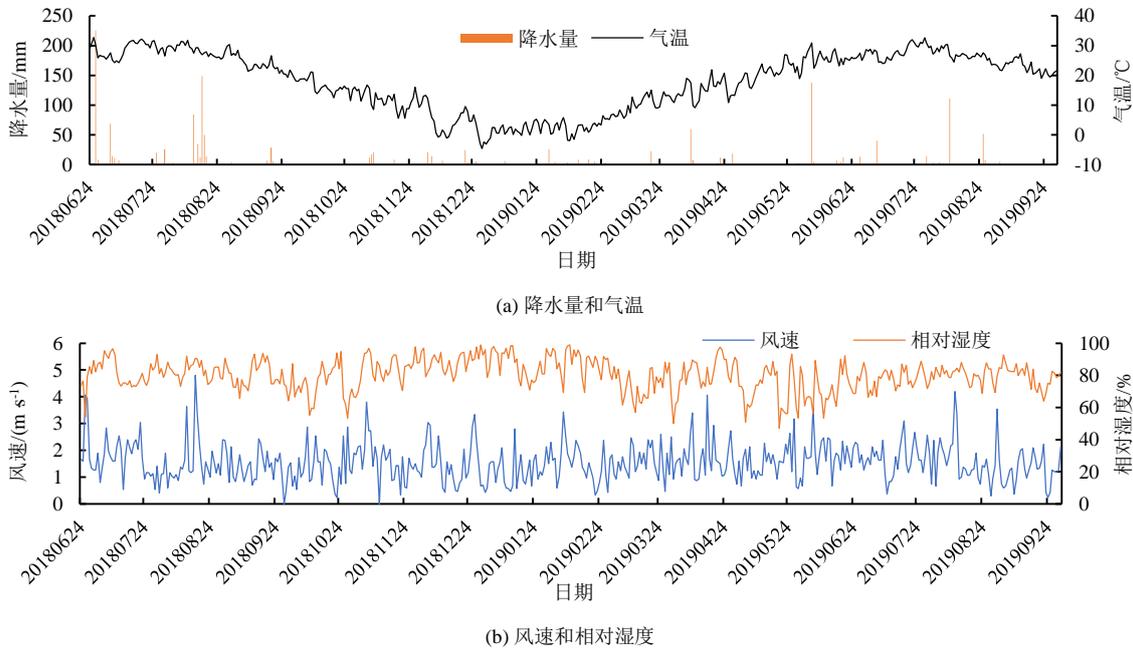


图 2 气象因素生育期内的变化

Fig.2 Changes in meteorological factors during growing seasons

3.2 夏玉米作物系数变化

夏玉米生育期内作物系数变化过程见图 3 所示。作物系数 K_c 是作物在生育期内受作物蒸腾和土壤蒸发共同影响的结果,在整个生育期内呈动态变化过程^[13]。由图 3 可知,基础作物系数 (K_{cb}) 在作物生长初期较小,随着夏玉米的快速生长, K_{cb} 在发育期呈线性快速增长趋势,在中期达到最大值,在后期

随着夏玉米叶片衰老以及 LAI 的减小, K_{cb} 逐渐减小。由于作物生长初期 LAI 较小,裸土面积较大,土壤蒸发系数 (K_e) 在初期较高,在发育期和中期,随着夏玉米 LAI 的增大使地面覆盖率增大,裸土面积减小, K_e 逐渐减小,在后期变化幅度不大,且每次降水后由于土壤湿润, K_e 也会随之增大,即每次降水后 K_e 都会发生一次波动。

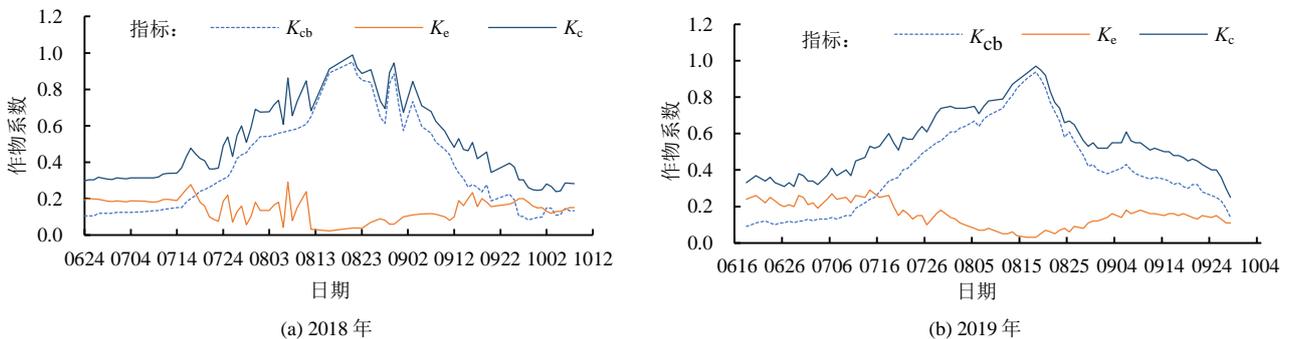


图 3 夏玉米生育期内作物系数变化过程

Fig.3 Seasonal variations of crop coefficient during summer maize growing seasons

3.3 夏玉米蒸散变化

夏玉米生育期内 ET_c 估算值和实测值日变化对比结果如图 4 所示。由图 4 可知, ET_c 的估算值与实测值总体变化趋势较为一致,估算值相对接近于实测值。不同生育期蒸散估算误差见表 2 所示,由表 2 可知,2018 年初期、发育期、中期、后期和全生育

期估算 ET_c 值分别为 44.70、141.24、139.61、85.37、410.92 mm, 实测 ET_c 值分别为 42.14、142.36、122.64、84.02、391.16 mm; 2019 年估算值分别为 64.53、182.21、136.26、102.87、485.87 mm, 实测值分别为 63.59、185.31、136.00、96.87、481.77 mm。由此可见,在 2018、2019 年夏玉米全生育期,

双作物系数法均高估 ET_c ，其中在快速发育期均低估 ET_c ，在生育初期、中期和后期均高估 ET_c 。全生育期双作物系数法高估 ET_c 的原因主要为：偶有大风

天气会把少数几株玉米吹倒，导致实际测得的蒸散发会有偏低的情况。

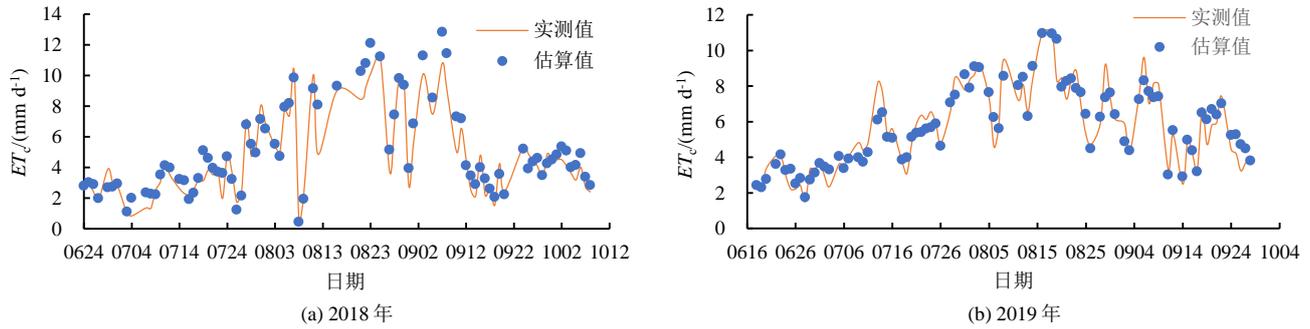


图4 夏玉米生育期内实测和估算蒸散量对比

Fig.4 Seasonal variations of measured and simulated evapotranspiration during summer maize growing seasons

表2 不同生育期蒸散估算误差

Table 2 Estimation error of evapotranspiration in different growing stages

年份	阶段	估算值/mm	实测值/mm	R^2	$RMSE/(mm\ d^{-1})$	E_{ns}	$AAE/(mm\ d^{-1})$
2018	初期	44.70	42.14	0.95	0.56	0.95	0.47
	发育期	141.24	142.36	0.88	0.91	0.89	0.68
	中期	139.61	122.64	0.93	1.62	0.81	1.29
	后期	85.37	84.02	0.79	0.65	0.80	0.58
	全生育期	410.92	391.16	0.89	0.98	0.86	0.73
2019	初期	64.53	63.59	0.96	0.52	0.96	0.42
	发育期	182.21	185.31	0.83	0.78	0.83	0.62
	中期	136.26	136.00	0.88	0.95	0.87	0.69
	后期	102.87	96.87	0.85	0.72	0.84	0.59
	全生育期	485.87	481.77	0.89	0.76	0.89	0.58

2018 年初期、发育期、中期、后期和全生育期双作物系数法估算夏玉米 ET_c 的 R^2 分别为 0.95、0.88、0.93、0.79 和 0.89； $RMSE$ 分别为 0.56、0.91、1.62、0.65 mm/d 和 0.98 mm/d； E_{ns} 分别为 0.95、0.89、0.81、0.80 和 0.86； AAE 分别为 0.47、0.68、1.29、0.58 mm/d 和 0.73 mm/d。2019 年初期、发育期、中期、后期和全生育期的 R^2 分别为 0.96、0.83、0.88、0.85 和 0.89； $RMSE$ 分别为 0.52、0.78、0.95、0.72 mm/d 和 0.76 mm/d； E_{ns} 分别为 0.96、0.83、0.87、0.84 和 0.89； AAE 分别为 0.42、0.62、0.69、0.59 mm/d 和 0.58 mm/d。以上结果均表明，修正后的双作物系数法能较好地模拟夏玉米生育期内蒸散量变化。

本文认为修正后的双作物系数法估算夏玉米蒸散量的误差来源主要有：① LAI 与株高每 7 天测量 1 次，对中间值进行插值可能与实际值有一定偏差；② 大型称质量式蒸渗仪在降水天气由于土壤扰动，边界效应增强，会造成实际蒸散量的测量误差；③ 玉米生长期间偶有大风天气使得有几株玉米被吹倒，使得叶面积总和减少，造成了一定误差。

3.4 作物蒸腾与土壤蒸发

夏玉米全生育期内作物蒸腾 (T_r) 与土壤蒸发 (E_s) 变化见图 5 所示。由式 (2) 可计算出作物蒸

腾量和土壤蒸发量。2018 年夏玉米全生育期 ET_c 的估算值为 410.92 mm，其中 T_r 和 E_s 总量分别为 298.94 mm 和 111.98 mm，分别占 ET_c 总量的 72.75% 和 27.25%；2019 年夏玉米全生育期 ET_c 的估算值为 485.87 mm，其中 T_r 和 E_s 总量分别为 350.57 mm 和 135.30 mm，分别占 ET_c 总量的 72.15% 和 27.85%，由此可见，在全生育期内夏玉米蒸散是以作物蒸腾为主的。

夏玉米不同生育期作物蒸腾与土壤蒸发占比见表 3 所示。在作物生长初期，由于植株较矮且叶片较小，夏玉米郁闭度较小，作物地表裸露面积较大，土壤蒸发占主导地位，土壤蒸发量大于作物蒸腾量，2018 年和 2019 年初期 E_s 约占总 ET_c 的 60.02% 和 65.53%；在发育期和中期，由于株高和 LAI 均逐渐增大，裸土面积较小，故土壤蒸发较小，作物蒸腾占主导地位；在后期由于作物叶片逐渐枯萎，作物蒸腾的主导地位减弱。这与部分研究^[5, 8-9, 11]结果较为一致。本文夏玉米在初期时 E_s/ET_c 的值比冯禹等^[8]研究结果减小 10% 左右，经分析，这可能与夏玉米的种植密度有关，本文中夏玉米的种植密度更大，导致土壤裸露面积更小，根系密度更大，故土壤蒸发占比相应较小。

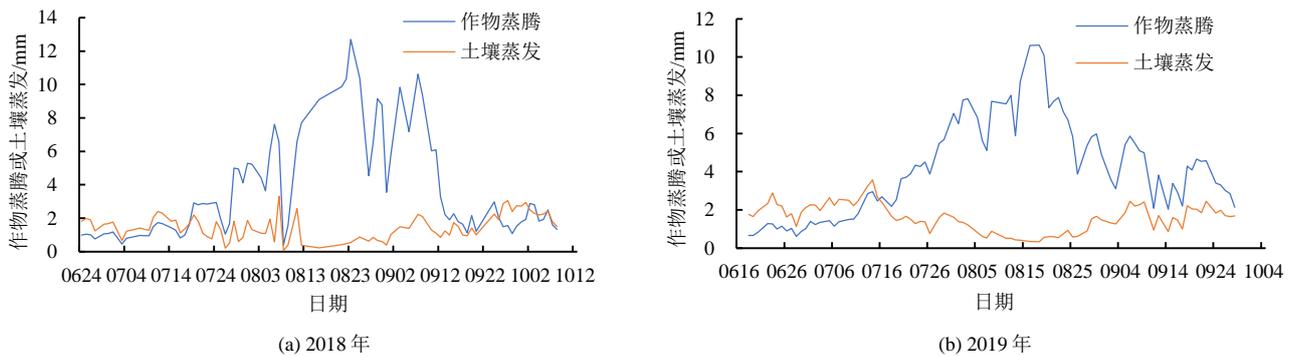


图5 夏玉米生育期内作物蒸腾与土壤蒸发变化

Fig.5 Changes of crop transpiration and soil evaporation during summer maize growing seasons

表3 不同生育期作物蒸腾与土壤蒸发

Table 3 Crop transpiration and soil evaporation in different growing stages

年份	阶段	T_v /mm	E_s /mm	T_v/ET_c /%	E_s/ET_c /%
2018	初期	18.84	28.28	39.98	60.02
	发育期	103.39	32.76	75.94	24.06
	中期	133.20	16.86	88.76	11.24
	后期	43.51	34.08	56.08	43.92
	全生育期	298.94	111.98	72.25	27.75
2019	初期	22.24	42.28	34.47	65.53
	发育期	141.48	40.73	77.65	22.35
	中期	117.92	18.34	86.54	13.46
	后期	68.93	33.94	67.01	32.99
	全生育期	350.57	135.30	72.15	27.85

3.5 不同地下水埋深下的模型适用性检验

为进一步评价模型对不同地下水埋深情况下夏玉米蒸散量的估算精度, 本文选取同种土质 3 m 地下水埋深的夏玉米实测蒸散数据进行验证。3 m 埋深下夏玉米生育期 ET_c 估算值和实测值日变化对比结果见图 6 所示。结果表明, 2018 年夏玉米全生育期估算 ET_c 的 R^2 、 $RMSE$ 、 E_{ns} 和 AAE 分别为 0.93、0.62 mm/d、0.94 和 0.57 mm/d; 2019 年分别为 0.93、0.55 mm/d、0.92 和 0.44 mm/d, 模型在埋深为 1 m 与 3 m 时模拟精度均较好, 满足精度要求, 可用于不同地下水埋深夏玉米蒸散量预测。

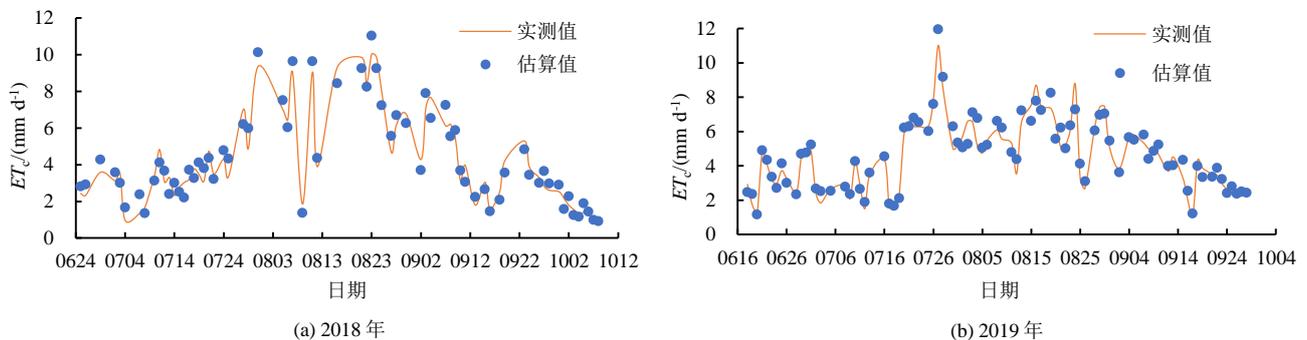


图6 夏玉米生育期内实测和估算蒸散量对比

Fig.6 Seasonal variations of measured and simulated evapotranspiration during summer maize growing seasons

4 讨论

研究发现 2018 年和 2019 年初期 K_{cb} 的计算值均比 FAO 推荐的 0.15 大, 中期和后期的 K_{cb} 均比 FAO 推荐 1.15 和 0.5 的小。FAO 推荐夏玉米最大株高为 2 m, 但五道沟地区夏玉米最大株高可达 2.5 m, 在初期玉米株高也比 FAO 推荐的更大, 这也直接导致了初期 K_{cb} 比 FAO 推荐值更大。五道沟地区 1970—2017 年气象要素表明^[26], 1 a 中 7、8、9、10 月的风速相比 6 月呈减小趋势, 约为 1.6~1.8 m/s, 由于降水开始增多, 最小相对湿度呈现增长趋势, 约为 45%~61%, 风速越小, 最小相对湿度越大, 导致 K_{cb} 越小, 这也是导致中期和后期 K_{cb} 比 FAO 推荐值偏小的重要原因。

作物蒸散发实际上是一个动态的过程, 由于作物系数会受到气候、作物生长状况、土壤质地等诸多因素的影响, 本文所用修正的双作物系数法综合考虑了 LAI 、株高、作物郁闭度、地表裸露情况、种植密度、风速、最小相对湿度等各因子对作物蒸腾与土壤蒸发的动态影响, 准确反映了夏玉米不同生长阶段蒸散量的逐日变化过程。与单作物系数法将作物蒸腾与土壤蒸发作为一个整体估算作物 ET_c 相比, 双作物系数法对二者分开估算, 模型精度有明显提高。与相关学者利用单作物系数法估算五道沟地区夏玉米蒸散量的结果相比^[15, 18-19], 计算精度有一定幅度的提高 (15%~21%)。虽然单作物系数法也能满足精度要求, 但双作物系数法对作物蒸散量的估算更加精确。本研究基于五道沟实验区大型蒸渗仪群实

测数据, 构建了基于双作物系数的蒸散发模型, 可用于该地区夏玉米蒸散量估算, 不同土壤及空间尺度其双作物系数模型的构建有待进一步研究。

5 结论

1) 修正后的双作物系数模型能较为准确估算各阶段夏玉米 ET_c , 2018 年 1 m 地下水埋深下全生育期估算 ET_c 的 R^2 、 $RMSE$ 、 E_{ns} 和 AAE 分别为 0.89、0.98 mm/d、0.86 和 0.73 mm/d; 3 m 地下水埋深下分别为 0.93、0.62 mm/d、0.94 和 0.57 mm/d; 2019 年 1 m 地下水埋深下全生育期估算 ET_c 的 R^2 、 $RMSE$ 、 E_{ns} 和 AAE 分别为 0.89、0.76 mm/d、0.89 和 0.58 mm/d; 3 m 地下水埋深下分别为 0.93、0.55 mm/d、0.92 和 0.44 mm/d。2 种地下水埋深下的估算值与实测值均较接近, 模型模拟精度较高。

2) 修正后的双作物系数实现了对夏玉米作物蒸腾与土壤蒸发的分别估算, 2018 年 1 m 地下水埋深下作物蒸腾量和土壤蒸发量分别占 ET_c 的 72.75% 和 27.25%。3 m 地下水埋深下分别占 ET_c 的 71.03% 和 28.97%。2019 年 1 m 地下水埋深下作物蒸腾地下水量和土壤蒸发量分别占 ET_c 的 72.15% 和 27.85%。3 m 埋深下分别占 ET_c 的 70.27% 和 29.73%。

3) 与相关学者利用单作物系数法估算五道沟地区夏玉米蒸散量的结果相比^[15, 18-19], 本文计算精度有一定幅度的提高 (15%~21%)。虽然单作物系数法也能满足精度要求, 但双作物系数法对作物蒸散量的估算更加精确。

参考文献:

[1] XU C Y, SINGH V P. 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(1/2/3/4): 105-121.

[2] 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.
ZHANG Baozhong, XU Di, LIU Yu, et al. Review of multi-scale evapotranspiration estimation and spatio-temporal scale expansion[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(6): 8-16.

[3] CARMASSI G, BACCI L, BRONZINI M, et al. Modelling transpiration of greenhouse gerbera (*Gerbera jamesonii* H. Bolus) grown in substrate with saline water in a Mediterranean climate[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 156: 9-18.

[4] ZHANG B Z, LIU Y, XU D, et al. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(6): 1 303-1 316.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 90-98.

[9] 闫浩芳, 毋海梅, 张川, 等. 基于修正双作物系数模型估算温室黄瓜不同季节腾发量[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 117-125.
YAN Haofang, WU Haimei, ZHANG Chuan, et al. Estimation of greenhouse cucumber evapotranspiration in different seasons based on modified dual crop coefficient model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 117-125.

[10] DING R S, KANG S Z, ZHANG Y Q, et al. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 127: 85-96.

[11] 李丰琇, 马英杰. 基于双作物系数法的新疆覆膜滴灌夏玉米蒸散量估算[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 268-274.
LI Fengxiu, MA Yingjie. Evapotranspiration estimation of summer maize with plastic mulched drip irrigation based on dual crop coefficient approach in Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 268-274.

[12] SHRESTHA N K, SHUKLA S. Basal crop coefficients for vine and erect crops with plastic mulch in a sub-tropical region[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143: 29-37.

[13] 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.
FAN 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.

[14] 袁宏伟, 崔毅, 蒋高明, 等. 基于大型蒸渗仪和遗传算法的受旱玉米蒸发蒸腾量估算[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 326-335.
YUAN Hongwei, CUI Yi, JIANG Shangming, et al. Estimation of maize evapotranspiration under drought stress based on large-scale lysimeter and genetic algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 326-335.

[15] 刘明亮, 王振龙, 吕海深, 等. 五道沟地区 1971—2020 年地温月尺度变化及其对气温的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(2): 83-90.
LIU Mingliang, WANG Zhenlong, LYU Haisheng, et al. Change in temperature over the past 50 years at Wudaogou and its influence on soil temperature at different depths[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(2): 83-90.

[16] 王振龙, 刘竹梅, 吕海深, 等. 基于修正遗传算法的夏玉米作物系数及蒸散发估算[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 108-116.
WANG Zhenlong, LIU Zhumei, LYU Haishen, et al. Estimation of summer maize crop coefficient and evapotranspiration based on modified genetic algorithm[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(1): 108-116.

[17] 王怡宁, 张晓萌, 路璐, 等. 通径分析结合 BP 神经网络方法估算夏玉米作物系数及蒸散量[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 109-116.

- WANG Yining, ZHANG Xiaomeng, LU Lu, et al. Estimation of crop coefficient and evapotranspiration of summer maize by path analysis combined with BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(7): 109-116.
- [18] 王振龙, 顾南, 吕海深, 等. 基于温度效应的作物系数及蒸散量计算方法[J]. 水利学报, 2019, 50(2): 242-251.
- WANG Zhenlong, GU Nan, LYU Haishen, et al. Calculation of crop coefficient and evapotranspiration based on temperature effect[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(2): 242-251.
- [19] 左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 等. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 455-461.
- ZUO Depeng, XU Zongxue, LI Jingyu, et al. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration in the Weihe River Basin under future climate change[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 455-461.
- [20] 刘春伟, 吴心语, 邱让建. 采用作物系数法和 PM 模型估算南京地区玉米田蒸发蒸腾量[J]. 节水灌溉, 2016(9): 12-17.
- LIU Chunwei, WU Xinyu, QIU Rangjian. Evaluation of evapotranspiration of maize with crop coefficient and penman-monteith methods in Nanjing[J]. Water Saving Irrigation, 2016(9): 12-17.
- [21] ALLEN R, PEREIRA L, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper56, 1998.
- [22] 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): 1 255-1 264.
- GONG Xuwen, 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): 1 255-1 264.
- [23] 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): 4 016-4 026.
- ZHAO Liwen, JI Xibin. Quantification of transpiration and evaporation over agricultural field using the FAO-56 dual crop coefficient approach: A case study of the maize field in an oasis in the middlestream of the Heihe River Basin in northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19): 4 016-4 026.
- [24] 刘琦. 利用 AquaCrop 模型模拟覆膜春玉米耗水和产量[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- LIU Qi. Simulating water use and yield of plastic film mulched spring maize with aqua crop model[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [25] ZHAO P, KANG S Z, LI S E, et al. Seasonal variations in vineyard ET partitioning and dual crop coefficients correlate with canopy development and surface soil moisture[J]. Agricultural Water Management, 2018, 197: 19-33.
- [26] 王怡宁, 杨秒, 王兵, 等. 五道沟地区“蒸发悖论”及成因探析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 126-133.
- WANG Yining, YANG Miao, WANG Bing, et al. The “evaporation paradox” in Wudaogou area and its underlying mechanisms[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(3): 126-133.

Modifying the Dual Crop Coefficients with Leaf Area Index and Meteorological Factors to Improve the Estimated Evapotranspiration from Maize Fields

YAO Tingyue^{1,2}, WANG Yining^{3*}, SHI Leitao^{1,2}, NiMaZaXi⁵, ZHOU Chao⁴, JU Qin¹, WANG Zhenlong⁴

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Zhejiang Hydrological New Technology Development and Operation Company, Hangzhou 310000, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Wudaogou Hydrology and Water Resources Experimental Station, Water Resources Research Institute of Anhui Province, Bengbu 233000, China; 5. Ali Hydrology and Water Resources Sub-Bureau of

Hydrology and Water Resources Survey of Tibet Autonomous Region, Ngari Prefecture 850032, China)

Abstract: 【Objective】 Evapotranspiration consists of plant transpiration (T_p) and soil surface evaporation (E_s); It is a critical component in the hydrological cycle, often estimated using meteorological and plant data. We present a modified method in this paper to improve its calculation. **【Method】** The method was based on the Penman-Monteith (P-M) equation using the dual crop coefficients as recommended by FAO-56. The methods for calculating the base crop coefficient (K_{cb}) and soil evaporation coefficient (K_e) in the equation are modified using the leaf area index (LAI), meteorological factors and soil water content. The modified model is then used to estimate real evapotranspiration (ET_c) from the reference crop evapotranspiration (ET_0) calculated from the P-M model. We test the model against data measured in 2018—2019 from large scale lysimeters grown with summer maize at the Wudaogou Hydrological Experimental Station in Anhui province. **【Result】** The modified dual crop coefficient model improved the accuracy of the estimated evapotranspiration, with the estimated average daily evapotranspiration being 4.89 mm/d (the measured was 4.66 mm/d) in 2018, and 5.72 mm/day (the measured was 5.67 mm/d) in 2019. The R^2 , $RMSE$, E_{ns} and AAE of the modified model were 0.89, 0.98 mm/d, 0.86 and 0.73 mm/d, respectively, in 2018; and 0.89, 0.76 mm/d, 0.89 and 0.58 mm/d, respectively, in 2019. **【Conclusion】** The modified dual crop coefficient method is robust and improves the accuracy of the estimated evapotranspiration from summer maize fields, compared with the traditional method .

Key words: evapotranspiration estimation; dual crop coefficient method; leaf area index; meteorological factors; summer maize; lysimeter

责任编辑: 赵宇龙