

▪ 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量的模拟效果较好,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

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。

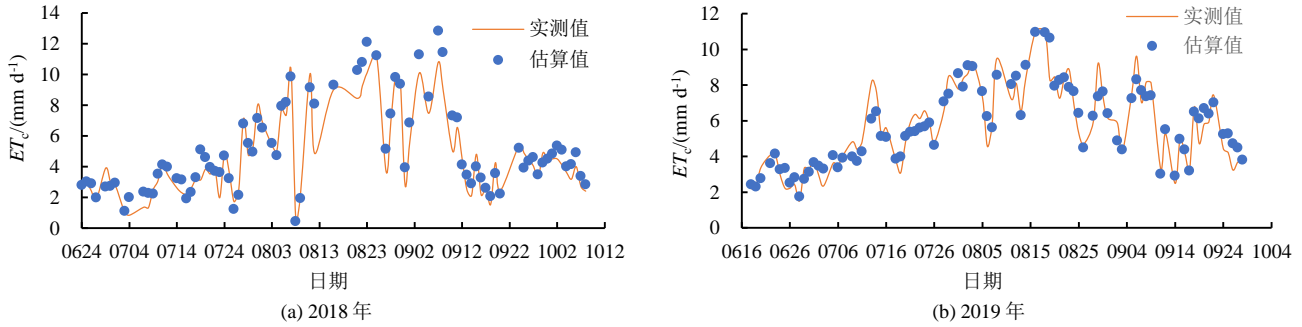


图4 夏玉米生育期内实测和估算蒸散量对比

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。

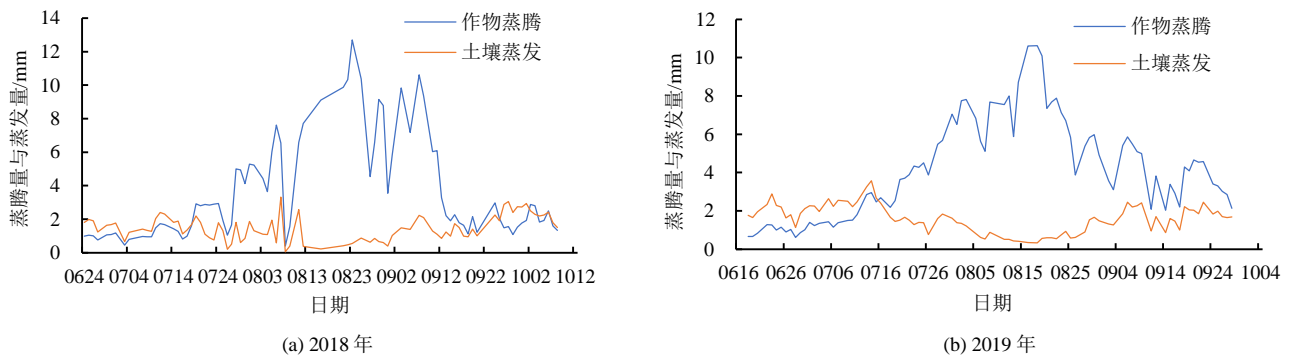


图5 夏玉米生育期内作物蒸腾与土壤蒸发变化

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

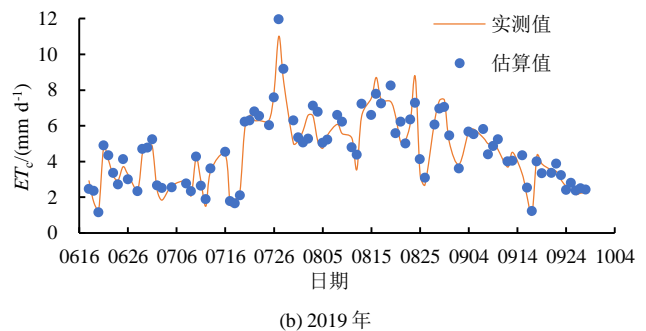
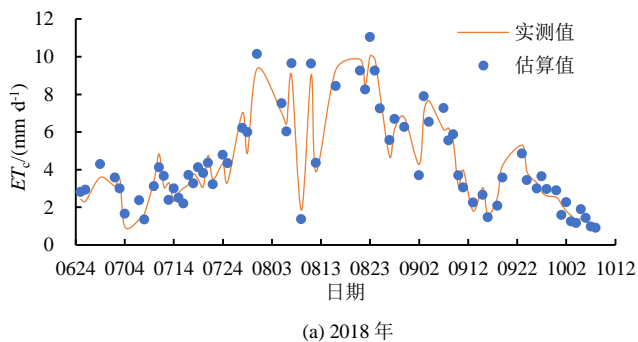


图6 夏玉米生育期内实测和估算蒸散量对比

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 年中 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。

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。

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 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 埋深下分别为 0.93、0.55 mm/d、0.92 和 0.44 mm/d。两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 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 埋深下分别占 ET_c 的 71.03% 和 28.97%。2019 年 1 m 埋深下作物蒸腾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