

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.032

基于蒸渗仪的冬小麦-夏玉米 ET 估算模型特征参数研究

蔡甲冰¹ 汪玉莹^{1,2} 刘玉春²

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 河北农业大学城乡建设学院, 保定 071001)

摘要: 为快速准确估算农田蒸散量, 利用 24 个群集式蒸渗仪, 在国家节水灌溉北京工程技术研究中心大兴节水灌溉试验站进行了两年的灌溉试验, 获得冬小麦-夏玉米生育期的日内冠气温差和实际日蒸散量 (ET_a) 等数据, 对不同水分处理下的 S-I 蒸散量估算模型进行率定及验证, 并分析模型特征参数 a 、 b 的变化规律及两者的差异。结果表明: 冬小麦的 S-I 模型特征参数 a 在日间随时间变化先增大、后减小, 在严重水分胁迫处理时 a 为负值、且数值较小, 其余灌溉处理时参数 a 由正值逐渐变化至负值; 不同灌水处理 b 均为负值, 充分灌溉处理时 b 在日间随时间变化逐渐增大, 严重水分胁迫处理时 b 相对较大, 日间变化趋势不稳定。水分胁迫对夏玉米模型参数的影响程度低于冬小麦, 特征参数 a 均为正值, 参数 b 均为负值, 且随时间变化逐渐增大; 水分胁迫处理时 b 变化范围明显小于其他两个处理, 干旱处理特征参数日间变化较大。冬小麦与夏玉米不同处理之间模型参数 a 、 b 变化差异较大, 但冠层温度和空气温度差 $T_c - T_a$ 与日蒸散量和日净辐射量差 $ET_d - Rn_d$ 间拟合精度都在 13:00 时最高, 此时充分灌溉冬小麦和夏玉米的模型参数 a 、 b 分别为 1.082、-1.127 和 1.588、-1.363。利用率定的 S-I 模型计算冬小麦和夏玉米主要生育期 ET_d 与实测 ET_a 之间的决定系数 R^2 均在 0.7 以上, 均方根误差 RMSE 均小于 0.89 mm/d, 一致性系数 d 均在 0.9 以上。尤其是充分灌溉处理的数据间 R^2 和 d 均较高, RMSE 小于其他处理, 说明水分胁迫影响模型的估算精度, S-I 模型能够更准确地估算水分胁迫较少农田的蒸散量。

关键词: 冬小麦; 夏玉米; S-I 模型; 特征参数; 蒸渗仪

中图分类号: S161.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0285-11 OSID: 

Feature Parameters of Evapotranspiration Estimation Model for Winter Wheat and Summer Maize Based on Lysimeter Monitoring System

CAI Jiabing¹ WANG Yuying^{1,2} LIU Yuchun²

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China
2. Institute of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: Accurate and rapid estimation of evapotranspiration in farmland is significant for precise irrigation management and optimal allocation of water resources. Based on 24 cluster lysimeters, irrigation experiments of winter wheat and summer maize were carried out in 2019–2020, in Daxing Water-saving Irrigation Experimental Station of IWHR, Beijing. Daily data of crop canopy temperatures (T_c) and air temperatures (T_a), and daily evapotranspiration measured by lysimeter (ET_a) were observed, to calibrate and validate the named S-I model, which was simple and valid to estimate field crops ET. Then the changes and values of feature parameters of S-I model, a and b , were analyzed and concluded for winter wheat and summer maize, respectively. Results showed that for winter wheat, the characteristic parameter a of the S-I model was increased firstly and decreased subsequently with time change in day. In the case of severe water stress, a was negative and the value was small, and in the case of other irrigation treatments, a was positive and gradually changed to negative. The characteristic parameter b in different irrigation treatment was negative. The parameter b of adequate irrigation treatment was gradually

收稿日期: 2020-12-18 修回日期: 2021-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679254, 51979286)

作者简介: 蔡甲冰(1976—), 女, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: caijb@iwhr.com

通信作者: 刘玉春(1971—), 女, 副教授, 博士, 主要从事农业水土工程理论与技术研究, E-mail: liuyuchun5@163.com

increased with time changes in the day, while the value of severe water stress treatment was relatively large, and the trend in day was unstable. For summer maize, the effect of water stress on model parameters was lower than that of winter wheat. The characteristic parameter a was positive, while the parameter b was negative, which was gradually increased with time. The variation range of parameter b under water stress treatment was significantly smaller than that under other two treatments. The characteristic parameters of drought treatment was changed greatly within days. Model parameters a and b varied greatly between winter wheat and summer maize under different treatments, but the fitting accuracy of (canopy temperature T_c – air temperature T_a) and (daily evapotranspiration ET_d – daily net radiation Rn_d) was the highest at 13:00. At this time, model parameters a and b of full irrigation were 1.082 and –1.127 for winter wheat, 1.588 and –1.363 for summer maize, respectively. The determination coefficient (R^2) and consistency coefficient d were above 0.7 and 0.9 between the model ET_d and measured ET_a during the growth period of winter wheat and summer maize, while the values of root mean square error (RMSE) were less than 0.89 mm/d. As a contrast, the values of R^2 and d in the full irrigation treatment were both higher, and the RMSE was lower than that in other treatments, indicating that water stress affected the estimation accuracy of the model, and the S – I model could be better to estimate the crop evapotranspiration under less water stress.

Key words: winter wheat; summer corn; S – I model; feature parameter; lysimeter

0 引言

我国农业用水占全国总用水量的 70% 左右,水资源短缺是农业可持续发展面临的重大挑战。而节水灌溉是农业发展的必然趋势^[1],对保障我国粮食安全、生态安全和农业可持续发展具有重要意义^[2]。作物需水量(腾发量,Evapotranspiration,ET)是制定合理灌溉制度的基础,也是进行区域水资源规划不可缺少的参数,因此有关研究一直备受关注^[3]。利用蒸渗仪测定蒸散量可以直接对作物和土体的水分变化进行连续测量,受外界影响较小,是进行蒸发、渗漏研究较为准确的方法^[4],因此广泛应用于农田水分蒸散特征和作物耗水规律^[5-7]的研究中,为农田灌溉制度的完善提供精准数据。

红外测温技术具有测量时间短、近距离测量误差小、可连续观测等优点^[8]。作物冠层温度是进行干旱监测和灌溉决策的指标^[9],也是良好的尺度联结和尺度转换的指标。研究表明,作物蒸散量与冠层温度或冠气温差之间关系密切,基于能量平衡原理,可利用冠层温度估算作物蒸散量^[10-12],并进行精度灌溉决策^[13-14]。JACKSON 等^[15]提出以冠层-空气温度差估算作物日蒸散量的模型,SEGUIN 等^[16]对模型进行改进,得到更为简单、测量参数较少的 ET 估算模型(简称 S – I 模型)。多年来许多研究者利用 S – I 模型在不同地区对不同作物进行了参数率定和数据验证,讨论和确定了模型中关键特征参数 a 、 b ,并应用该模型进行农田日蒸散量的估算^[17-21]。然而,农田在不同水分状况下,作物蒸散发过程是不同的,受环境的影响程度也不同,因此其模型特征参数可能产生差异,但目前不同水分处理下有关 S – I

模型特征参数的变化研究尚未见报道。

华北平原以冬小麦-夏玉米复种连作为主要种植模式,是中国重要的粮食生产基地^[22-25]。本文利用 24 个群集式蒸渗仪,以冬小麦-夏玉米在不同水分处理下的冠层温度和日蒸散量为数据源,对不同水分处理下冬小麦和夏玉米的 S – I 模型进行参数率定和验证,并分析不同水分处理下模型特征参数的差异,获取适用于华北平原的冬小麦-夏玉米连作模式下农田蒸散量估算模型,为精准 ET 估算提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设置

试验于 2019—2020 年在国家节水灌溉北京工程技术研究中心大兴节水灌溉试验站开展。不同灌溉试验处理布置在 12 个称重式蒸渗仪和 12 个固定式蒸渗仪内,其中固定式蒸渗仪尺寸(长×宽×深)为 2 m×2 m×3.5 m,称重式蒸渗仪为 2 m×2 m×2.3 m。测坑编号北边为 N,南边为 S,固定式蒸渗仪为 NF 和 SF,称重式蒸渗仪为 NW 和 SW,由西向东依次编号为 1~6,见图 1。

冬小麦试验期间利用挡雨棚遮挡自然降雨,在 24 个测坑设置 6 种水分处理、每个处理 4 个重复,分别控制各小区的灌水量。表 1 为冬小麦试验设置情况和实际灌溉量,本文 ET 计算和详细试验观测在冬小麦返青后的主要生育阶段内展开。由于夏季玉米蒸发量大耗水较多,试验期间不做挡雨处理,使其接收自然降雨、不足部分用人工灌溉补充。为保证各测坑初始含水率尽量一致和玉米顺利出苗,在播种前进行一次灌水(90 mm)。在 24 个测坑设置 3

种水分处理、每个处理 8 个重复,M1 处理完全不灌溉,接收自然降雨生长;M2、M3 处理在生育期中,当计划湿润层(前期 0 ~ 60 cm,中后期 0 ~ 100 cm)体

积含水率分别达到田间持水量的 60%、70% 时进行补充灌水。2019—2020 年夏玉米生育期实际灌溉量和降雨量如表 2 和图 2 所示。

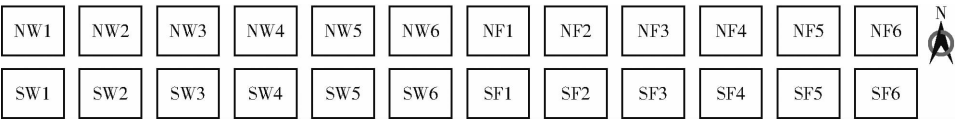


图 1 24 个蒸渗仪分布示意图

Fig. 1 Distribution schematic of 24 lysimeters

表 1 冬小麦试验处理与灌溉量

Tab.1 Irrigation treatments and irrigation amount for winter wheat in 2019—2020								mm
处理			返青-拔节期	拔节-抽穗期	抽穗-灌浆期			
	播前灌 (2019	冬灌 (2019 年	(2019 年 3 月	(2019 年 4 月	(2019 年 5 月	收获期 (2019		
	年 10 月 18	11 月 15 日、	26 日—4 月 15	16 日—5 月 7	8 日—6 月 1	年 6 月 8 日、	总计	
	日、2020 年 10	2020 年 11 月	日、2020 年 3	日、2020 年 4	日、2020 年 5	2020 年 6 月	位置	
月 14 日)	17 日)	月 31 日—4 月	月 25 日—5 月	月 7 日—6 月	11 日)			
			24 日)	6 日)	1 日)			
W1	67.5	90.0	67.5		75.0		300.0 NW1/NW4/NF1/NF3	
W2	67.5	90.0	67.5	75.0			300.0 NW2/NW3/NF2/NF4	
W3	67.5	90.0	67.5	67.5	75.0		367.5 NW5/NW6/NF5/NF6	
W4	67.5	90.0			75.0		232.5 SW1/SW6/SF5/SF6	
W5	67.5	90.0	75.0	67.5			300.0 SW2/SW4/SF3/SF4	
W6	67.5	90.0		75.0			232.5 SW3/SW5/SF1/SF2	

表 2 夏玉米灌溉处理和灌水量

Tab.2 Irrigation control and treatments for summer maize in 2019—2020							mm
日期	M1	M2	M3	日期	M1	M2	M3
2019-06-13	90	90	90	2020-06-16	90	90	90
2019-07-03		90	90	2020-07-13		75	75
2019-07-25		120	120	2020-07-21			110
2019-08-16			110	2020-07-24		140	
2019-08-22		140		2020-08-01			110
2019-08-28			110	2020-08-08		140	
2019-09-08		140	110	2020-09-08			110
				2020-09-17			110
合计	90	580	630	合计	90	445	605

1.2 观测项目

利用手持红外测温枪,在作物生育期内每个晴朗天气 10:00—16:00 间隔 0.5 h 观测作物冠层温

度;每次用红外测温枪顺时针沿蒸渗仪小区 8 个方位监测数据并记录此时的空气温度。

称重式蒸渗仪测量土体总质量,采集间隔为 2 h。蒸渗仪土壤含水率用内置 Hydra Probe II 型土壤水分传感器测定,间隔为 10、30 min。其中,非称重式蒸渗仪监测的土壤深度分别为 10、20、40、60、100、150、210、240、270、300、330 cm,称重式蒸渗仪内分别为 10、20、40、60、100、150、210、240 cm。

实验站安装有 TRM-ZS1 型自动气象站,数据采集间隔 30 min,包括空气温度、相对湿度、风向、风速、太阳辐射/净辐射、降雨量等。

冬小麦按不同生育期干旱控制灌水量;夏玉米则关注每天土壤含水率变化,达到灌水下限时进行灌溉。

用规格为 5 000 mL 的量杯记录各蒸渗仪小区渗漏量,每天 08:00、20:00 各记录一次。

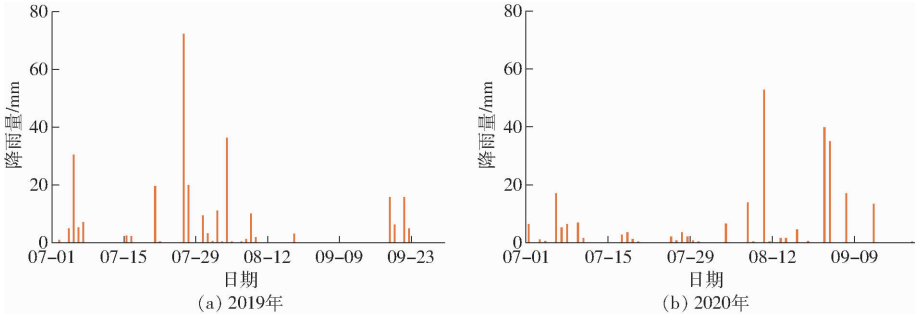


图 2 2019—2020 年夏玉米生育期降雨量分布

Fig. 2 Rainfall distribution during summer maize growth seasons in 2019—2020

1.3 计算方法与模型

试验区域称重式蒸渗仪可以直接根据质量变化计算日蒸散量 (ET_a)。在非称重式蒸渗仪小区,则利用基于称重式蒸渗仪不同灌水处理推求出的实际作物系数 K_c 和土壤水分胁迫指数 K_s ,从而根据单作物系数法计算其相同试验处理下的作物日蒸散量。由此得到作物全部生育期的实测 ET_a 。在此基础上进行 S-I 模型计算结果的率定和验证,以及相关特征参数的确定。

1.3.1 蒸渗仪实际日蒸散量

(1) 称重式蒸渗仪

由称重系统获取蒸渗仪总质量,根据前后的质量差计算每天实际蒸散量。不考虑生长季内地表径流量、地下水补给量的影响,根据水量平衡方程计算 ET_a ,计算式为

$$ET_a = \Delta W + P + I + D \tag{1}$$

式中 ET_a ——作物实际蒸散量,mm
 ΔW ——阶段储水量差值,mm
 P ——阶段降雨量,mm
 I ——阶段灌溉量,mm
 D ——阶段渗漏量,mm

参照 FAO-56 中推荐的生长阶段时间,确定和计算冬小麦-夏玉米各生长阶段天数。根据 Penman-Monteith 方程计算每日参照作物蒸散量 (ET_0),计算式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \tag{2}$$

式中 ET_0 ——参照作物蒸散量(腾发量),mm/d
 R_n ——作物表面净辐射,MJ/(m²·d)
 G ——土壤热通量,MJ/(m²·d)
 T ——平均气温,℃
 U_2 ——2 m 高处平均风速,m/s
 e_s ——饱和水汽压,kPa
 e_a ——实际水汽压,kPa
 Δ ——水汽压曲线斜率,kPa/℃
 γ ——湿度计常数,kPa/℃

由式(1)计算试验设置中称重式蒸渗仪小区中充分灌溉处理下的作物实际日蒸散量 ET_a ,再利用单作物系数法和式(2)计算作物系数 K_c (即 ET_a/ET_0),其中快速生长期和生育后期 K_c 由生育阶段时间线性插值得到。试验期内作物生育阶段和作物系数 K_c 的实际计算值见表 3。

(2) 非称重式蒸渗仪

在称重式蒸渗仪实测值的基础上,来确定非称

表 3 冬小麦-夏玉米生育阶段时间和 K_c
Tab.3 Days of growth stages and K_c values for winter wheat - summer maize

冬小麦主要生育期	时间/d	K_c	夏玉米生育阶段		
			时间/d	K_c	
返青期	20	0.40	生育初期	17	0.35
快速生长期	27	0.40~1.10	快速生长期	29	0.35~1.40
生长中期	27	1.10	生育中期	34	1.40
生长后期	11	0.15	生育后期	25	0.65

重式蒸渗仪的日蒸散量。充分灌溉处理可由上述计算的 K_c 直接用单作物系数法确定;非充分灌溉处理,可用称重式蒸渗仪实测 ET_a 与 ET_0K_c 的比值得出不同处理的土壤水分胁迫系数 K_s ,以此计算其他同处理小区作物实际日蒸散量,公式为

$$ET_a = K_c K_s ET_0 \tag{3}$$

1.3.2 基于 S-I 模型的作物蒸散量

作物日蒸散量与日净辐射和冠气温差有着密切的关系,文献[14-15]在基于冠气温差估算作物日蒸散量的方法上进行改进,计算公式为

$$ET_d - Rn_d = a + b(T_c - T_a) \tag{4}$$

式中 ET_d ——S-I 模型计算日蒸散量,mm/d
 Rn_d ——日净辐射,mm/d
 T_c ——冠层温度,℃
 T_a ——空气温度,℃
 a 、 b ——经验系数,与作物类别、风速、辐射等因素相关,需要根据作物和本地的条件进行率定和验证

1.4 统计参数

利用 2019 年试验获得数据对模型进行特征参数率定,并在 2020 年进行重复试验,所测得数据对 2019 年得到的模型进行验证。为检验模型精度,采用决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、一致性系数 d 来对实测值和模型计算值进行评价。

2 结果与分析

采用称重式蒸渗仪和非称重式蒸渗仪测量作物实际日蒸散量 (ET_a);通过手持红外测温仪观测作物在不同水分条件下的冠层温度和相关环境因子,并利用 S-I 模型来计算作物蒸散量 (ET_d)。通过对比分析冬小麦-夏玉米不同水分条件下两种方法计算的作物日蒸散量差异的基础上,率定 S-I 模型特征参数,从而获得其农田蒸散量估算模式。

2.1 冬小麦-夏玉米不同处理实际日蒸散量变化

2.1.1 冬小麦主要生育期不同处理 ET_a 变化

由实际情况和蒸渗仪观测数据,根据水量平衡方程和单作物系数法确定 2019 年(4 月 1 日—6 月

5 日)和 2020 年(3 月 26 日—6 月 11 日)冬小麦返青后主要生育期的 ET_a 。图 3 为冬小麦主要生育期内不同水分处理实际日蒸散量 ET_a 变化过程。将冬小麦不同水分处理分为 3 组,其中 W3 处理为充分灌溉处理,2019 年和 2020 年主要生育期总蒸散量最大分别为 361、396 mm;W1、W2 和 W5 总灌水量相同且设置一个生育阶段缺水,2019、2020 年 3 个处理

主要生育期内总蒸散量分别为 311、325、340 mm 和 332、354、358 mm;W4、W6 总灌水量相同,均为两个生育阶段缺水但缺水的时期不同,生育期内发生严重水分胁迫,2019、2020 年主要生育期 ET_a 分别为 270、266 mm 和 305、297 mm;2020 年主要生育期蒸散量均大于 2019 年,但实际日蒸散量最大值较 2019 年略小。

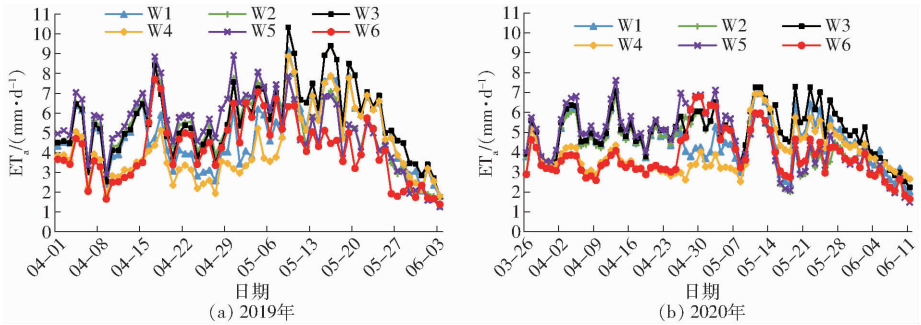


图 3 2019—2020 年冬小麦主要生育期不同灌溉处理 ET_a 变化曲线

Fig. 3 Changes of ET_a during main growth stages of winter wheat in 2019—2020

由图 3 可知,小麦主要生育期内 ET_a 呈现先升高再降低的趋势,几次峰值出现在灌水后。生育前期随着生长和气温的升高, ET_a 逐渐增大;生育中期除阴雨天气外日蒸散量均较大;生育后期随叶片变黄, ET_a 下降变小。不同处理之间 ET_a 有显著差别,含水率高的处理 ET_a 大于含水率低的处理。充分灌溉处理与缺水处理 ET_a 差值较大,2019 年最大为 95 mm,2020 年为 99 mm;对比 W1、W2 和 W5 处理可以发现,当生育期灌水量相同时,缺水生育阶段不同也会使总蒸散量有较大差异,其中 W1 处理主要生育期总蒸散量最小,说明拔节-抽穗期对水分较为敏感,这一时期缺水会引起总蒸散量减少较多。

2.1.2 夏玉米生育期不同处理 ET_a 变化

和冬小麦类似,由蒸渗仪观测数据,根据水量平衡方程和单作物系数法计算了 2019 年(7 月 1 日—9 月 25 日)和 2020 年(7 月 14 日—9 月 22 日)夏玉米主要生育期 ET_a ,如图 4 所示。其中 M1 处理整个生育期仅接收自然降雨,发生严重水分胁迫,M2 处理以田间持水率的 60% 为灌水下限,M3 为充分灌

溉。从图中可以看出,夏玉米生育期内 ET_a 变化范围较大,最大达到 10 mm/d 以上,最高峰值出现在灌水后。苗期日蒸散量较小,快速生长期气温高需水量大, ET_a 较大;2019 年 8 月初由于连续阴雨天气 ET_a 较小;生育后期叶片变黄,作物需水量小, ET_a 较小。M1、M2、M3 处理主要生育期总蒸散量分别为 381、557、582 mm,M2、M3 处理总蒸散量相差不大,严重水分胁迫的 M1 处理明显小于充分灌溉 M3 处理,差值达 201 mm。2020 年由于天气原因 6 月底进行玉米播种,在玉米生育期内多阴雨天气,主要生育期总蒸散量较 2019 年小很多, ET_a 变化幅度较 2019 年大;M1、M2、M3 处理主要生育期总蒸散量分别为 295、403、464 mm,严重水分胁迫的 M1 处理与充分灌溉 M3 处理差值达 169 mm。

2.2 基于 2019 年蒸渗仪实测 ET_a 的 S-I 模型特征参数率定

2.2.1 冬小麦不同处理 S-I 模型特征参数率定

在冬小麦主要生育期内由各个处理中蒸渗仪实测数据计算出 ET_a ,根据气象站观测数据计算得到日净辐射 Rn_d ,然后用 10:00—16:00 之间每个时刻

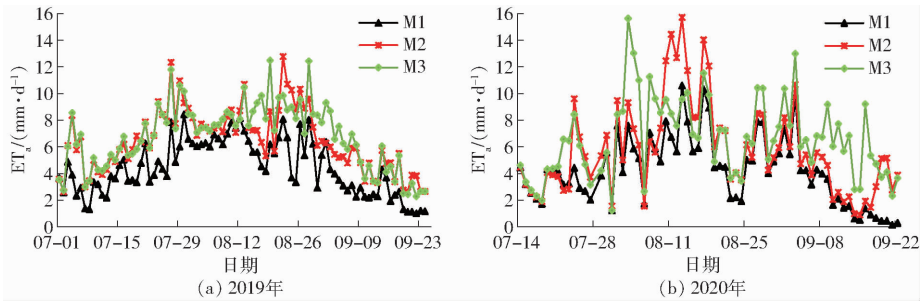


图 4 2019—2020 年夏玉米生育期不同处理 ET_a 变化曲线

Fig. 4 Changes of ET_a during main growth stages of summer maize in 2019—2020

实测的冠气温差($T_c - T_a$)分别与 $ET_a - Rn_d$ 作线性回归分析。在此基础上,通过拟合方程得到 S-I 模型中特征参数 a 、 b 。表 4 为冬小麦不同处理下

10:00—16:00 每小时 $T_c - T_a$ 与 $ET_a - Rn_d$ 拟合方程的决定系数 R^2 , 以及所得到的特征参数 a 、 b 。图 5 是以充分灌溉处理(W3)为例二者拟合图。

表 4 冬小麦不同处理 S-I 模型特征参数 a 、 b 及拟合方程决定系数 R^2

Tab.4 Feature parameters of S-I model and R^2 of fitted regression equation for different treatments of winter wheat		时刻						
处理	参数	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
W1	a	0.837	1.138	1.277	1.211	0.831	0.188	-0.446
	b	-1.215	-1.254	-1.186	-1.119	-1.101	-1.090	-1.070
	R^2	0.728	0.778	0.804	0.816	0.771	0.752	0.739
W2	a	0.911	1.209	1.261	1.025	0.534	-0.232	-0.825
	b	-1.356	-1.360	-1.253	-1.198	-1.191	-1.113	-1.057
	R^2	0.669	0.696	0.747	0.757	0.735	0.681	0.664
W3	a	1.071	1.147	1.170	1.082	0.634	-0.078	-0.520
	b	-1.250	-1.213	-1.167	-1.127	-1.102	-1.092	-1.057
	R^2	0.763	0.798	0.814	0.830	0.813	0.799	0.773
W4	a	-0.258	-0.144	-0.035	-0.032	-0.274	-0.744	-0.977
	b	-0.966	-0.944	-0.833	-0.790	-0.792	-0.761	-0.703
	R^2	0.682	0.745	0.754	0.787	0.764	0.717	0.703
W5	a	1.493	1.560	1.434	1.134	0.686	0.071	-0.553
	b	-1.388	-1.366	-1.178	-1.119	-1.090	-1.089	-1.041
	R^2	0.762	0.796	0.799	0.801	0.775	0.780	0.771
W6	a	-0.126	-0.072	-0.007	-0.114	-0.383	-0.782	-1.038
	b	-0.942	-0.906	-0.828	-0.781	-0.803	-0.783	-0.778
	R^2	0.725	0.739	0.773	0.779	0.764	0.745	0.756

注:冬小麦各处理样本数 $n=45$ 。

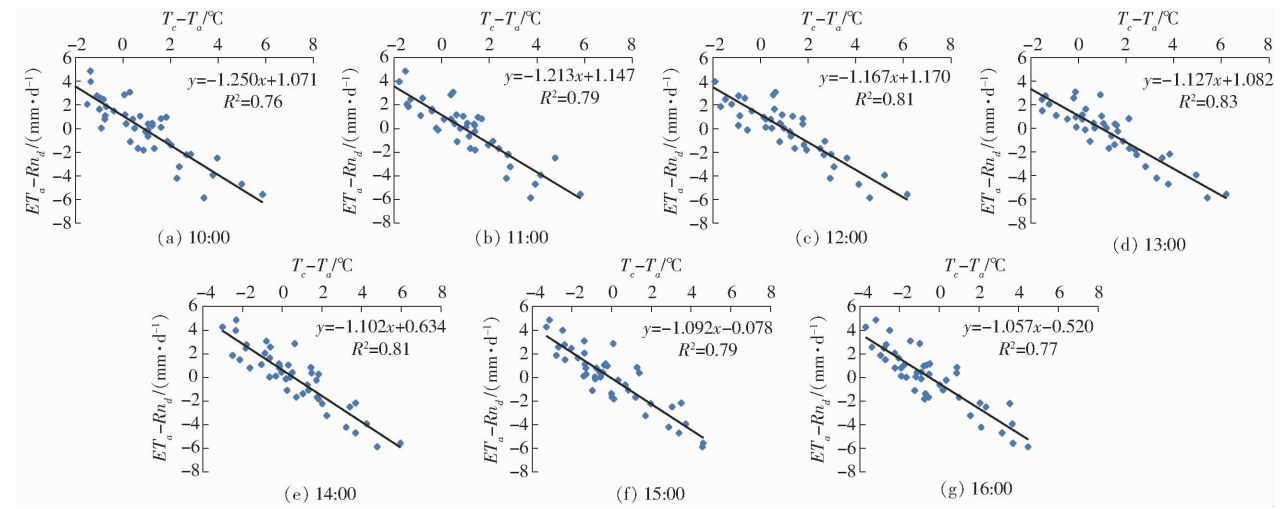


图 5 冬小麦充分灌溉处理(W3) $T_c - T_a$ 与 $ET_a - Rn_d$ 的关系

Fig.5 Relationships between $T_c - T_a$ and $ET_a - Rn_d$ of winter wheat for full irrigation treatment (W3)

由表 4 可看出,不同处理之间模型参数 a 、 b 变化范围不同,但 R^2 最高值都出现在 13:00。W1 ~ W6 处理参数 a 变化范围分别为 $-0.446 \sim 1.277$ 、 $-0.825 \sim 1.261$ 、 $-0.520 \sim 1.170$ 、 $-0.977 \sim -0.032$ 、 $-0.553 \sim 1.560$ 、 $-1.038 \sim -0.007$,其中 W1、W2、W5 和充分灌溉处理(W3)参数 a 均由正值变为负值,W4 和 W6 处理参数 a 则是全为负值且变化范围小于其他 4 个处理。W1 ~ W6 处理的特征参

数 b 变化范围分别为 $-1.254 \sim -1.070$ 、 $-1.360 \sim -1.057$ 、 $-1.250 \sim -1.057$ 、 $-0.966 \sim -0.703$ 、 $-1.388 \sim -1.041$ 、 $-0.942 \sim -0.778$,6 个处理参数 b 均为负值;W1、W2、W5 和充分灌溉处理(W3)参数 b 均小于 -1 ,而 W4 和 W6 处理参数 b 均在 $-1 \sim -0.7$ 之间。可见,灌水量最小的 W4 和 W6 处理的特征参数明显与其他不同。

不同处理之间特征参数变化趋势也有明显差异。

6 个处理参数 a 都随时间变化先增大再减小, W4 处理拐点出现在 13:00, W5 处理拐点出现在 11:00, 其余处理拐点均出现在 12:00。参数 b 在 W3 和 W5 处理随时间逐渐增大, W1 和 W2 处理先增大再减小, 灌水量最小的 W4 和 W6 处理参数 b 随时间先增大再减小而后再增大, 拐点出现在 14:00。由此可见, 水分胁迫对 S-I 模型参数有显著影响, 其值与无水分胁迫处理的日内变化趋势、变化范围有差别。

表 5 夏玉米不同处理 S-I 模型特征参数率定值及回归方程决定系数 R^2

处理 参数		时刻						
		10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
M1	a	1.458	1.489	1.428	1.487	1.417	1.154	0.816
	b	-1.397	-1.361	-1.286	-1.274	-1.242	-1.227	-1.178
	R^2	0.718	0.716	0.712	0.737	0.699	0.686	0.688
M2	a	2.088	2.151	2.117	1.804	1.373	0.928	0.585
	b	-1.599	-1.391	-1.294	-1.257	-1.249	-1.244	-1.242
	R^2	0.764	0.795	0.801	0.807	0.797	0.781	0.775
M3	a	1.770	1.890	1.876	1.588	1.047	0.642	0.333
	b	-1.687	-1.539	-1.426	-1.363	-1.325	-1.318	-1.303
	R^2	0.783	0.792	0.818	0.823	0.820	0.822	0.817

注:夏玉米各处理样本数 $n=45$ 。

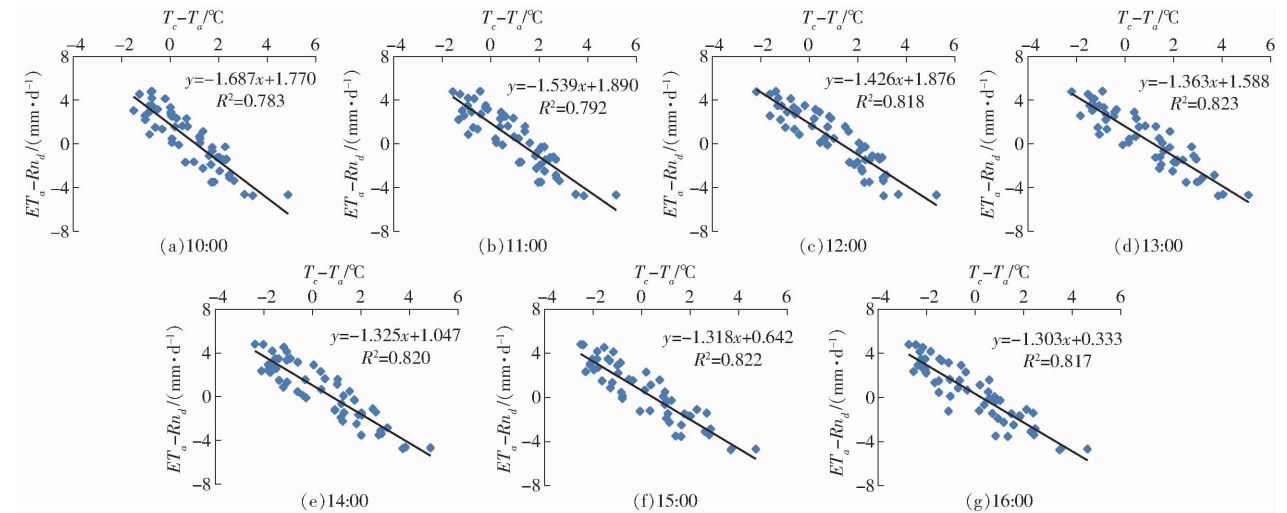


图 6 夏玉米充分灌溉处理 (M3) T_c-T_a 与 ET_a-Rn_d 关系

Fig. 6 Relationships between T_c-T_a and ET_a-Rn_d of summer maize for full irrigation treatment (W3)

从表 5 可以看出, 不同处理之间模型参数 a 、 b 变化范围不同, 但 R^2 最高值都出现在 13:00。M1、M2、M3 处理参数 a 均为正值, 变化范围分别为 0.816 ~ 1.489、0.585 ~ 2.151、0.333 ~ 1.890, 其中 M1 处理变化范围较小。参数 b 在 M1、M2、M3 处理下变化范围分别为 -1.397 ~ -1.178、-1.599 ~ -1.242、-1.687 ~ -1.303, 均为负值。可见极旱 M1 处理参数 a 、 b 均小于同一时刻的 M2、M3 处理。

不同处理参数变化趋势较为相似, 3 个处理参数 b 都随日内时间变化逐渐增大。参数 a 略有不同,

2.2.2 夏玉米不同处理 S-I 模型特征参数率定
与冬小麦计算过程类似, 以蒸渗仪观测数据为基础, 将夏玉米整个生育期一天中 10:00—16:00 之间每个时刻的冠气温差 (T_c-T_a) 分别与 ET_a-Rn_d 作线性回归分析, 得到回归方程, 推求 S-I 模型中玉米特征参数 a 、 b 。表 5 为 3 个处理拟合结果和回归方程决定系数 R^2 , 图 6 为充分灌溉处理 (M3) 的数据拟合图。

同, M2、M3 处理参数 a 随时间先增大再减小, 拐点出现在 13:00; 极旱的 M1 处理参数 a 先增大再减小再增大最后一直减小, 两次拐点出现在 10:00 和 13:00。

2.3 基于 2020 年蒸渗仪实测 ET_a 的 S-I 模型特征参数验证

2020 年灌溉试验处理与 2019 年类似, 利用本年度试验观测数据对 2019 年模型率定参数进行校核。根据表 4、5 所得的特征参数, 利用 S-I 模型和生育期观测数据计算每日 ET_d , 并结合 2020 年称重

式蒸渗仪实测数据 ET_a , 对其进行验证。

2.3.1 冬小麦不同处理 S-I 模型特征参数验证

2020 年冬小麦试验过程因疫情原因, 缺失 12:00 和 13:00 的作物冠层温度观测数据, 因此每日只对 10:00、11:00、14:00、15:00 和 16:00 5 个时间点进行验证和校核, 可利用的有效数据为 36 d。表 6 为上述 5 个时间点模型计算 ET_d 和蒸渗仪实测 ET_a 之间拟合关系的统计参数, 图 7 为以冬小麦 W3 处理为例二者之间关系散点图。

可见, 6 个处理模型计算 ET_d 和蒸渗仪实测 ET_a 之间的决定系数 R^2 均在 0.7 以上, 说明基于 2019 年获取数据建立的模型能够较好估算 ET_a 。各个处理均方根误差 RMSE 均小于 0.89 mm/d, 一致性系数 d 均在 0.9 以上, 进一步说明利用模型估算的 ET_d 较为准确。由表 6 可知, 灌水量最小的 W4 和 W6 处理决定系数 R^2 和一致性系数 d 小于其他处理, 均方根误差 RMSE 大于其他处理。总体来看, W3 处理决定系数 R^2 和一致性系数 d 均较高, 均方根误差 RMSE 小于其他处理, 说明水分胁迫影响模型估算精度, 利用 S-I 模型估算蒸散量的适用性在充分灌溉处理时优于水分胁迫处理。

2.3.2 夏玉米不同处理 S-I 模型特征参数验证

2020 年夏季降雨较多, 晴朗天气较少, 可利用的有效数据为 31 d。表 7 为 2020 年夏玉米 10:00—

表 6 冬小麦不同处理 S-I 模型计算 ET_d 和蒸渗仪实测 ET_a 回归参数

Tab.6 Regression parameters between ET_a measured by lysimeter and ET_d calculated by S-I model for winter wheat

处理	参数	时刻				
		10:00	11:00	14:00	15:00	16:00
W1	R^2	0.898	0.894	0.893	0.911	0.887
	RMSE/(mm·d ⁻¹)	0.619	0.633	0.688	0.616	0.691
	d	0.967	0.965	0.958	0.966	0.959
W2	R^2	0.873	0.853	0.869	0.864	0.848
	RMSE/(mm·d ⁻¹)	0.654	0.702	0.664	0.692	0.723
	d	0.965	0.959	0.965	0.962	0.958
W3	R^2	0.868	0.882	0.892	0.879	0.889
	RMSE/(mm·d ⁻¹)	0.624	0.569	0.571	0.573	0.591
	d	0.960	0.966	0.967	0.966	0.963
W4	R^2	0.765	0.766	0.787	0.780	0.810
	RMSE/(mm·d ⁻¹)	0.737	0.736	0.716	0.727	0.685
	d	0.943	0.949	0.952	0.951	0.959
W5	R^2	0.885	0.886	0.879	0.866	0.878
	RMSE/(mm·d ⁻¹)	0.726	0.670	0.710	0.724	0.698
	d	0.956	0.963	0.957	0.956	0.959
W6	R^2	0.850	0.827	0.813	0.838	0.847
	RMSE/(mm·d ⁻¹)	0.770	0.823	0.886	0.773	0.734
	d	0.944	0.936	0.924	0.944	0.950

注: 冬小麦各处理样本数 $n=36$ 。

16:00 模型计算 ET_d 和蒸渗仪实测 ET_a 拟合关系的统计参数, 图 8 为以夏玉米不缺水的 M3 处理为例二者之间关系的散点图。

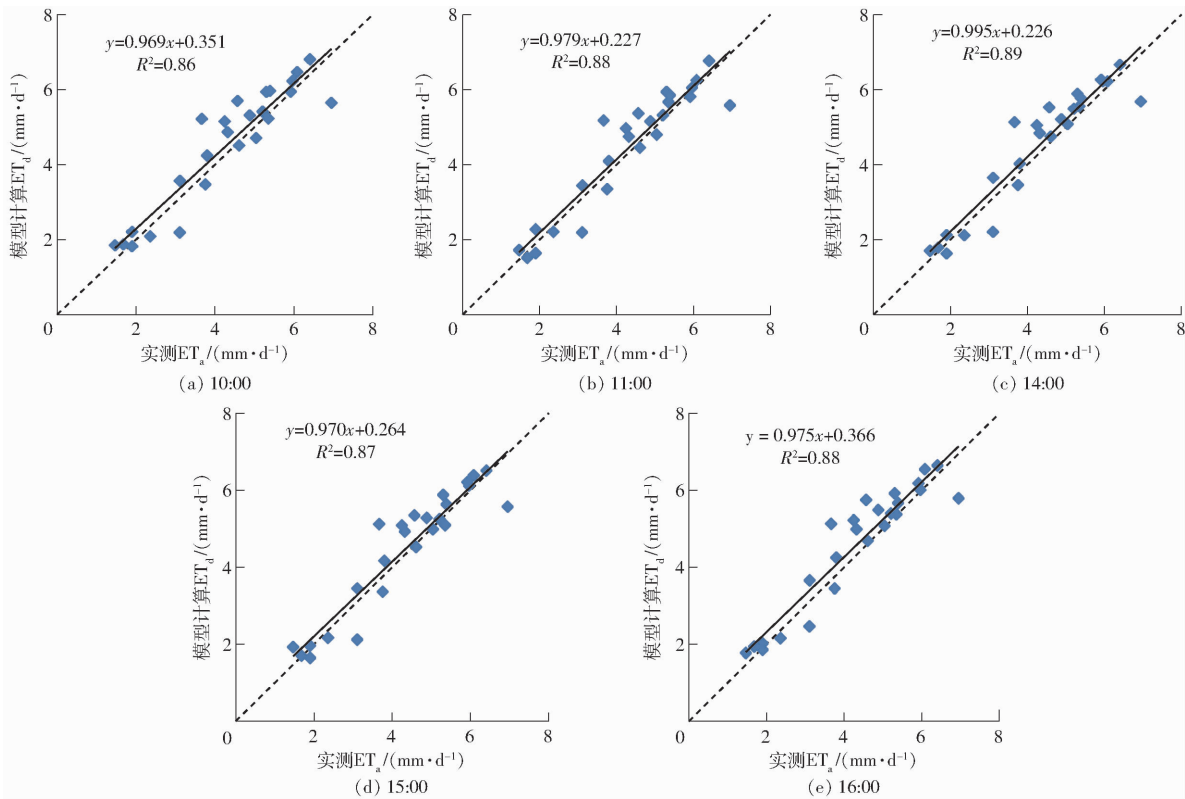


图 7 冬小麦充分灌溉处理(W3)模型计算 ET_d 与蒸渗仪实测 ET_a 对比

Fig.7 Comparison between ET_d calculated and ET_a measured by lysimeter of winter wheat for W3 treatment

表 7 夏玉米不同处理 S-I 模型计算 ET_d和蒸渗仪实测 ET_a回归参数

Tab.7 Regression parameters between ET _a measured by lysimeter and ET _d calculated by S-I model for summer maize		时刻						
处理	参数	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
M1	R^2	0.923	0.925	0.927	0.929	0.927	0.910	0.925
	RMSE/(mm·d ⁻¹)	0.603	0.602	0.592	0.579	0.623	0.610	0.594
	d	0.972	0.972	0.972	0.974	0.970	0.971	0.972
M2	R^2	0.980	0.958	0.958	0.974	0.972	0.972	0.966
	RMSE/(mm·d ⁻¹)	0.515	0.680	0.661	0.517	0.537	0.518	0.544
	d	0.990	0.981	0.983	0.989	0.989	0.989	0.988
M3	R^2	0.955	0.960	0.959	0.961	0.953	0.930	0.959
	RMSE/(mm·d ⁻¹)	0.537	0.542	0.544	0.480	0.502	0.612	0.524
	d	0.984	0.984	0.984	0.988	0.986	0.980	0.985

注：夏玉米各处理样本数 $n=31$ 。

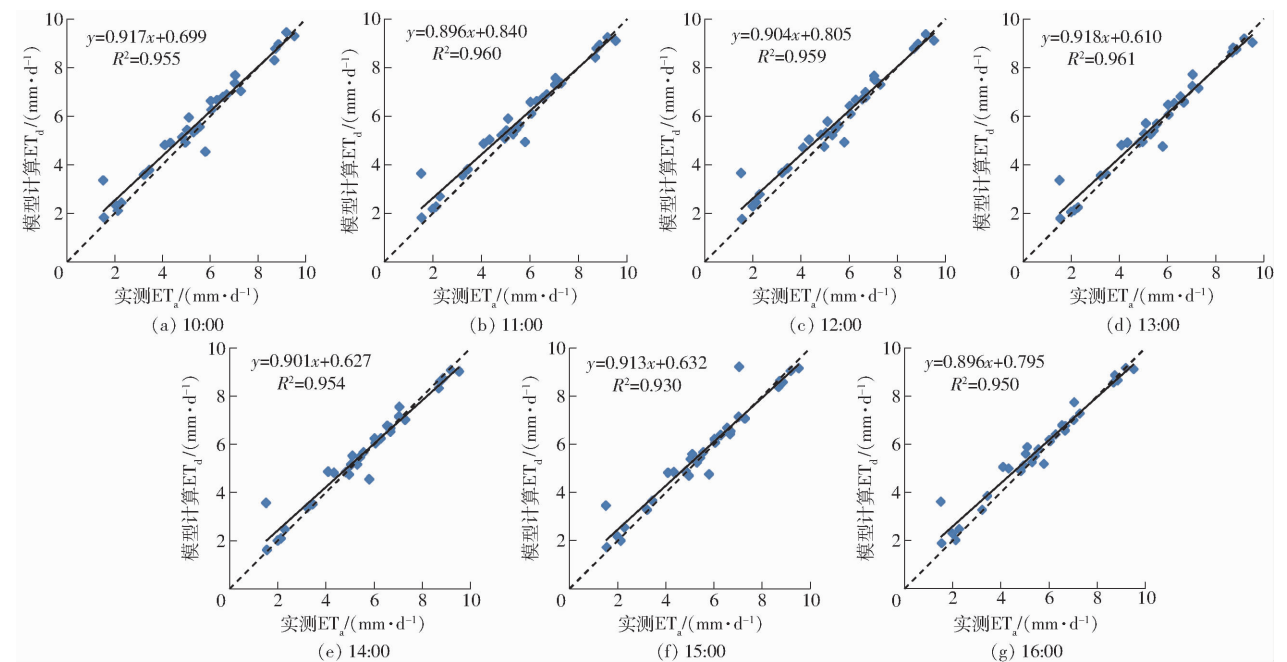


图 8 夏玉米充分灌溉处理(M3)模型计算 ET_d与蒸渗仪实测 ET_a对比

Fig.8 Comparison between ET_d calculated and ET_a measured by lysimeter of summer maize for M3 treatment

可见,夏玉米 M1、M2、M3 处理模型计算 ET_d与蒸渗仪实测 ET_a的决定系数 R^2 变化范围分别为 0.910 ~ 0.929、0.958 ~ 0.980、0.930 ~ 0.961,3 个处理回归系数和 R^2 均在 0.8 以上,说明基于 2019 年获取数据建立的模型能够较好地估算 ET_a。M1、M2、M3 处理模型计算 ET_d和蒸渗仪实测 ET_a的均方根误差 RMSE 均不大于 0.68 mm/d,一致性系数 d 均在 0.9 以上,进一步说明利用模型估算 ET_d较为准确。由表 7 可以看出,极旱的 M1 处理决定系数 R^2 和一致性系数 d 均小于 M2、M3 处理,均方根误差 RMSE 大于 M2、M3 处理,而 M2、M3 处理各统计参数相差不大,说明水分胁迫影响模型估算精度,利用 S-I 模型估算蒸散量更适用于不缺水的情况。

2.4 讨论

由以上冬小麦-夏玉米不同水分条件下不同时

刻的模型特征参数率定和验证可知,不同水分条件下模型参数存在差异,但两种作物的不同处理都在 13:00 精度最高,其中充分灌溉处理精度高于其他处理,说明在本地区 S-I 模型对于充分灌溉处理的适用性优于发生了水分胁迫的其他处理。整体来看,两种作物不同水分处理模型参数率定精度均有待提高,可能是由于实际测量过程中存在人工误差,而天气骤变也会使气象数据存在误差,进而影响率定和验证精度。

对比冬小麦不同水分条件下模型特征参数,总灌溉量相同的处理之间参数也有差异,可能是由于每个生育阶段灌水量不同,发生水分胁迫的时间不同,进而影响模型参数;夏玉米 M2、M3 处理参数差异不大,可能是由于以田间持水率的 60% ~ 70% 为灌水下限是适宜夏玉米生长发育的水分条件,所以

参数差异较小,不同生育阶段灌水量差异对模型参数具体影响有待进一步研究。

冬小麦和夏玉米两种作物之间模型参数 a 、 b 差异较大,可能是由于两种作物生育期存在差异,下垫面条件也有所不同,这进一步说明了模型在不同区域及不同作物上应用时需要提前校核和验证。

3 结 论

(1)冬小麦不同水分处理之间模型特征参数的变化范围和变化趋势均有差异。其中,特征参数 a 在日间随时间变化先增大、后减小,在严重水分胁迫处理时 a 为负值且数值较小,其余灌溉处理时参数 a 由正值变化为负值;特征参数 b 均为负值,充分灌溉处理时参数 b 在日间随时间变化逐渐增大,严重水分胁迫处理时参数 b 先增大、再减小、而后再增大,但生育阶段缺水的两个处理参数 b 相对较大。

(2)水分胁迫对夏玉米模型参数的影响程度低

于冬小麦。特征参数 a 均为正值,参数 b 均为负值,且随时间变化逐渐增大,水分胁迫处理时参数 b 变化范围明显小于其他两个处理,干旱处理时特征参数日间变化较大。

(3)冬小麦与夏玉米不同处理之间模型参数 a 、 b 变化差异较大,但 T_c-T_a 与 ET_d-Rn_d 都在 13:00 拟合精度最高,此时充分灌溉处理时模型参数 a 、 b 分别为:冬小麦 1.082、- 1.127,夏玉米 1.588、- 1.363。

(4)利用 2020 年蒸渗仪实测数据进行了验证,结果表明利用率定的 S-I 模型计算冬小麦和夏玉米生育期 ET_d 与实测 ET_a 之间 R^2 均在 0.7 以上,均方根误差 RMSE 均小于 0.89 mm/d,一致性系数 d 均在 0.9 以上。尤其是充分灌溉处理时 R^2 和 d 均较高,均方根误差小于其他处理,说明水分胁迫影响模型估算精度,S-I 模型能够更准确地估算较少受到水分胁迫的农田 ET。

参 考 文 献

[1] 尚松浩,蒋磊,杨雨亭. 基于遥感的农业用水效率评价方法研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(10):81-92. SHANG Songhao, JIANG Lei, YANG Yuting. Review of remote sensing-based assessment method for irrigation and crop water use efficiency [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 81-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.013. (in Chinese)

[2] 马守臣,张伟强,段爱旺. 不同亏缺灌溉方式对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2019,38(8):9-14. MA Shouchen, ZHANG Weiqiang, DUAN Aiwang. Effects of different deficit irrigation modes on grain yield and water use efficiency of winter wheat [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 9-14. (in Chinese)

[3] 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. SU Meishuang, LI Jiusheng, RAO Minjie. Estimation of crop coefficients for sprinkler-irrigated winter wheat and sweet corn using a weighing lysimeter [J]. Transactions of the CASE, 2005, 21(8): 25-29. (in Chinese)

[4] 王怡宁,朱月灵. 蒸渗仪国内外应用现状及研究趋势[J]. 水文,2018,38(1):81-85. WANG Yining, ZHU Yueling. Parameter adjustment for intubation-type soil moisture monitoring meter [J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(1): 81-85. (in Chinese)

[5] 李杰,吴杨焕,陈锐,等. 基于大型称重式蒸渗仪研究北疆滴灌麦田蒸散量[J]. 作物学报,2016,42(7):1058-1066. LI Jie, WU Yanghuan, CHEN Rui, et al. Measurement of evapotranspiration for drip-irrigated winter wheat using large weighing lysimeter in Northern Xinjiang [J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(7): 1058-1066. (in Chinese)

[6] LOPEZ-URREA R, MARTIN DE S O F, FABEIOR C, et al. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1-2):15-26.

[7] PLOUCEAU J, FREDERIC P, GREGORY B, et al. Actual evapotranspiration and crop coefficients for five species of three-year-old bamboo plants under a tropical climate [J]. Agricultural Water Management, 2014, 137(5):15-22.

[8] 黄凌旭,蔡甲冰,白亮亮,等. 利用作物冠气温差估算农田蒸散量[J]. 中国农村水利水电,2016(8):76-82 HUANG Lingxu, CAI Jiabing, BAI Liangliang, et al. Estimating daily evapotranspiration based on crop temperature and meteorology factors in field [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(8): 76-82. (in Chinese)

[9] KUSTAS W P, NORMAN J M. Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modeling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(12): 2071-2081.

[10] FAVER K L, OTOOLE J, KRIEG D R. Short-term estimation of sorghum evapotranspiration from canopy temperature [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1989, 48(1-2):175-183.

[11] 蔡焕杰,熊运章,邵明安. 计算农田蒸散量的冠层温度法研究[J]. 水土保持研究, 1991(1):57-65. CAI Huanjie, XIONG Yunzhang, SHAO Ming'an. The study of using canopy temperature to estimate evapotranspiration [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1991(1):57-65. (in Chinese)

[12] 王纯枝,宇振荣,毛留喜,等. 基于能量平衡的华北平原农田蒸散量的估算[J]. 中国农业气象, 2008, 29(1):42-46.

- WANG Chunzhi, YU Zhenrong, MAO Liuxi, et al. Evapotranspiration estimation of crop land in North China Plain based on surface energy balance equation[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(1):42–46. (in Chinese)
- [13] 蔡甲冰, 刘钰, 雷廷武, 等. 精量灌溉决策定量指标研究现状与进展[J]. 水科学进展, 2004, 15(4):531–537.
CAI Jiabing, LIU Yu, LEI Tingwu, et al. Review of indices for precision irrigation decision-making [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4):531–537. (in Chinese)
- [14] 蔡甲冰, 刘钰, 许迪, 等. 基于作物冠气温差的精量灌溉决策研究及其田间验证[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(4):262–268.
CAI Jiabing, LIU Yu, XU Di, et al. Design and application of the model for precision irrigation decision-making by adopting infrared crop canopy temperature [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5(4):262–268. (in Chinese)
- [15] JACKSON R D, REGIANTO R J, IDSO S B. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements [J]. Water Resources Research, 1977, 13(3):651–656.
- [16] SEGUIN B, ITIER B. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2):371–383.
- [17] DUNKEL Z, SZENYAN I G. Estimation of areal distribution of evapotranspiration using remotely sensed data during vegetation period in Hungary [J]. Advances in Space Research, 2000, 26(7):1051–1054.
- [18] 郭家选. 基于涡度相关与冠层温度遥感信息的实时农田墒情监测研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
GUO Jiaxuan. A real-time study of monitoring crop and soil water condition based on eddy correlation technique and information of remotely sensed canopy temperature [D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [19] 郭家选, 李玉中, 严昌荣, 等. 华北平原冬小麦农田蒸散量[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12):2357–2362.
GUO Jiaxuan, LI Yuzhong, YAN Changrong, et al. Evapotranspiration of winter wheat field in North China Plain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(12):2357–2362. (in Chinese)
- [20] 张建君. 农田日蒸散量估算方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
ZHANG Jianjun. Estimation of cropland daily evapotranspiration [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009. (in Chinese)
- [21] 蔡甲冰, 张宝忠, 魏征, 等. 河套灌区玉米和向日葵 ET 的 S-I 估算模型关键参数分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8):140–148.
CAI Jiabing, ZHANG Baozhong, WEI Zheng, et al. Key parameter analysis of ET estimating for maize and sunflower in Hetao Irrigation District based on S-I model[J]. Transactions of the CASE, 2019, 35(8):140–148. (in Chinese)
- [22] 张光辉, 费宇红, 王茜, 等. 灌溉农业的地下水保障能力评价方法研究-黄淮海平原为例[J]. 水利学报, 2016, 47(5):608–615.
ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, WANG Qian, et al. Evaluation methodology of groundwater safeguard capacity on agricultural irrigation in the Huang-Huai-Hai Plain [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(5):608–615. (in Chinese)
- [23] 李艳, 刘海军, 黄冠华. 基于 RZWQM 模型的冬小麦-夏玉米水氮管理评价[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6):111–120.
LI Yan, LIU Haijun, HUANG Guanhua. Evaluation of nitrogen and water management in winter wheat – summer maize cropping system in North China Plain using RZWQM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6):111–120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150617&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.017. (in Chinese)
- [24] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(17):3359–3371.
ZHAO Yali, XUE Zhiwei, GUO Haibin, et al. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(17):3359–3371. (in Chinese)
- [25] 黄会平, 曹明明, 宋进喜, 等. 黄淮海平原主要农作物全生育期水分盈亏变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2015(8):138–144.
HUANG Huiping, CAO Mingming, SONG Jinxi, et al. Water budget of main crops during the whole growth period in Huang-Huai-Hai Plain [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015(8):138–144. (in Chinese)