

夏玉米蒸散优化参数模型及参数敏感性分析

彭记永^{1,2}, 杨光仙^{1,2}

(1. 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 河南 郑州 450003;

2. 河南省气象科学研究所, 河南 郑州 450003)

摘要: 分别采用 2 种不同的冠层阻力模型和土壤阻力模型, 组合成 4 种 Shuttleworth – Wallace(S – W) 模型, 模拟夏玉米农田灌浆期的逐时蒸散量, 以涡度相关法观测蒸散量为实测值检验模型改进的效果, 找出最优冠层阻力模型和土壤阻力模型, 并分析最优 S – W 模型对各阻力参数的敏感性。结果表明: 李俊改进型有效叶面积指数冠层阻力模型和 Sellers 土壤阻力模型组合的 S – W 模型模拟效果最好, S – W 模型估算玉米田蒸散的精度显著提高, 蒸散发模拟值与实测值的相关系数、一致性指数更接近 1, 蒸散发模拟的相对误差和均方根误差变小。敏感性分析表明, 在计算各个阻力参数模型中, S – W1 模型估算蒸散发对冠层阻力最敏感, 其次是土壤阻力和有效叶面积指数; 采用改进型有效叶面积指数冠层阻力模型和 Sellers 土壤阻力参数模型组合后, 在一定程度上提高了模型精度, 提高了计算准确率。

关键词: Shuttleworth – Wallace 模型; 蒸散发; 有效叶面积指数; 冠层阻力; 土壤阻力; 玉米田

中图分类号: S161.4 **文献标志码:** A

Improvement of evapotranspiration models in summer maize field and its sensitivities analysis to the resistance parameters

PENG Ji-yong^{1,2}, YANG Guang-xian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agrometeorological Services and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou, Henan 450003, China; 2. Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: Four Shuttleworth – Wallace (S – W) models were used to simulate hourly evapotranspiration (ET) in the grain filling stage of summer maize by different canopy resistance models and soil surface resistance model. In order to determine the optimum model of canopy resistance and soil surface resistance, the effect of the improved model was measured by eddy correlation method of evapotranspiration. The sensitivity of the optimal resistance parameters was also analyzed. The results showed that the improved S – W model had the best simulation results. After S – W model was improved, the accuracy of estimation of maize field evapotranspiration was significantly improved. The correlation coefficient and the consistency index of ET simulated and measured values were close to 1, and the relative error and root mean square error of ET simulation became smaller. Sensitivity analysis showed that the canopy resistance was the most sensitive parameter, the second was the soil surface resistance, and the third was the effective leaf area index. To a certain degree, the model precision was improved by using the improved effective leaf area index canopy resistance model and the soil surface resistance model, which can improve the accuracy of the model calculation.

Keywords: shuttleworth-wallace model; evapotranspiration; canopy resistance; effective leaf area index; soil resistance; maize field

农田蒸散是地表水循环的重要组成部分, 包括土壤蒸发和植物蒸腾两部分^[1-2]。农田蒸散的准确计算不仅有助于指导农田灌溉和提高水分利用效率, 而且在研究作物与大气的相互作用中扮演着重

要角色^[3-4]。随着科学技术的进步, 在农田蒸散模型研究方面, 学者们发展了各种蒸散模型^[5-9], 比较著名的有 Penman – Montith(P – M)单源模型和 Shuttleworth – Wallace(S – W)双源蒸散模型。与 P – M 模

型相比, S-W 模型将作物蒸腾和土壤蒸发分开计算, 考虑了作物与裸土的阻力差异, 提高了蒸散发的计算精度, 弥补了 Penman - Monteith 公式在计算稀疏冠层时的缺陷^[10-11]。Kato^[12]比较了 S-W 模型与其他蒸散模型的差异, 认为 S-W 模型具有较好的模拟效果。赵丽雯^[13]估算了西北黑河中游荒漠绿洲农田玉米生长季实际蒸散量, 表明 S-W 模型能较好地估算研究区的蒸散量, 并能有效区分农田作物蒸腾和土壤蒸发。刘绍民^[14]以涡度相关法的实测资料为标准, 对多种蒸散量测定和估算方法进行了对比分析, 结果表明 S-W 模型对各类阻抗较为敏感。贾红^[15]利用 S-W 模型对夏玉米农田的蒸散模拟发现, 模型分别对冠层阻力参数和土壤阻力参数最为敏感。S-W 模型中土壤和冠层阻抗参数涉及植被结构、生理特征及土壤水分等因子, 这些参数的获取本身就存在复杂性, 无法由实验仪器直接观测得到。关于阻力参数模型的研究多停留在半定量的经验公式上, 而且参数化方案和数值计算方法也存在缺陷。因此, 蒸散发的模拟精度往往不能满足实际需求, 需要进行更为系统全面的评估、检验和对模型进行改进。

玉米抽雄 - 成熟期是决定穗粒数、籽粒增重等玉米产量因素和品质的重要时期, 同时也是对水分最敏感的时期, 需水量约占全生育期的 50% 左右^[16-17]。本文采用 S-W 模型, 以夏玉米农田抽雄 - 成熟期涡度相关法测定的蒸散为参照, 对不同冠层阻力和土壤阻力公式的 S-W 模型模拟蒸散的效果进行比较, 并对各阻力参数的敏感性进行分析, 以期找到最适合本地区的参数模型, 为夏玉米农田蒸散模拟提供较为便捷的途径。为河南地区夏玉米田优化灌溉, 提高土壤作物水分利用效率, 夏玉米高产稳产提供帮助。

1 资料与方法

1.1 试验站点基本情况

试验地点在河南省郑州农业气象试验站(34°43'N, 113°39'E, 海拔 110.4 m)试验田内进行。该试验站位于华北平原南部, 属于暖温带大陆性气候, 年平均气温 14.9℃, 多年平均降水量 670.0 mm 左右。土壤为沙壤土、微碱性, 0~10 cm 平均土壤容重 1.30 g·cm⁻³, 田间持水量 22.8%, 凋萎湿度 4.1%, 常年地下水埋深 > 2.0 m。农业生产以冬小麦和夏玉米 1 年 2 季轮作为主, 其中夏玉米生长期为 6 月上旬 - 9 月下旬。2008 年夏玉米生长季, 播种品种为杂交玉米、中熟品种‘郑单 958’, 播种到成熟期天数为

94 d, 总降水量 369.1 mm, 较历年同期偏少 61.7 mm, 日照时数 1 178.7 h, 较历年同期偏少 195.0 h, 为历史正常年份。

1.2 通量相关系统

通量观测系统采用美国 Campbell Scientific 公司的涡动协方差系统, 主要包括 1 套梯度观测系统和 1 套涡度观测系统。涡动协方差系统仪架设高度为 3 m, 主要包括 CSAT3 三维超声风速仪、LI7500 CO₂/H₂O 分析仪、净辐射传感器和土壤热通量板。

1.3 通量数据处理方法

实验选取 2008 年 8 月 - 9 月夏玉米生育期的通量观测数据, 共 35 d。按照中国气象局下发《近地层通量观测数据格式》和《近地层通量观测业务规范(试行)》进行仪器维护和通量数据下载。利用 EdiRe 通量数据处理软件, 并参照通量资料处理的一般标准, 对半小时通量数据进行野点剔除、坐标轴旋转和 WPL 变换处理, 并对异常数据进行剔除^[18-22]。对由于降水、断电等因素造成的数据缺失以及剔除异常数据之后的数据序列, 采用不同的方法进行插补^[23-28], 形成完整的通量序列。

1.4 作物观测

夏玉米观测, 按照《中国气象局农业气象观测规范(上卷)》进行密度、株高、叶面积、生物量测量^[29]。根据实测叶面积指数, 结合逻辑斯迪克模型进行逐日叶面积指数模拟^[30-32]。

$$LAIL = \frac{LAI_{max}}{1 + e^{-(10.5038 - 23.5066DS + DS^2)}} \quad (1)$$

其中: LAIL 为逻辑斯迪克模拟叶面积指数; DS 为归一化积温。

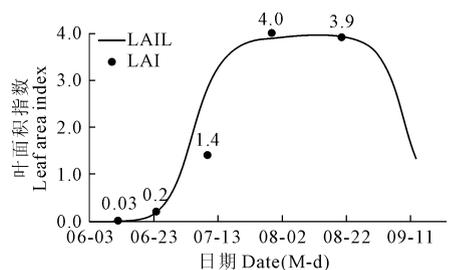


图 1 叶面积指数模拟值与实测值对比

Fig. 1 Leaf area index simulation values compared with the measured values

1.5 模型描述

Shuttleworth 和 Wallace 研究了稀疏覆盖条件下土壤表面的蒸散量, 在假设作物冠层为均匀覆盖的条件下, 建立了由植被和植被覆盖下的土表两部分组成的双源模型^[33]。

$$\lambda ET = C_c PM_c + C_s PM_s \quad (2)$$

$$PM_s = \frac{\Delta(R_n - G) + [\rho C_p D - \Delta r_a^s (R_n - R_n^s)] / (r_a^a + r_a^s)}{\Delta + \gamma [1 + r_s^s / r_a^a + r_a^s]} \quad (3)$$

$$PM_c = \frac{\Delta(R_n - G) + [\rho C_p D - \Delta r_a^c (R_n - G)] / (r_a^a + r_a^c)}{\Delta + \gamma [1 + r_s^c / r_a^a + r_a^c]} \quad (4)$$

式中, R_n 为冠层表面净辐射 ($W \cdot m^{-2}$); G 为土壤热通量 ($W \cdot m^{-2}$); ρ 为空气密度 ($kg \cdot m^{-3}$); C_p 为空气比热 ($1012 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$); D 为空气饱和水汽压差 (hPa); γ 为干湿表常数 ($0.67 hPa \cdot K^{-1}$); Δ 为饱和水汽压—温度曲线斜率 ($hPa \cdot K^{-1}$); R_n^s 为土壤表面净辐射 ($W \cdot m^{-2}$); r_s^c 为冠层阻力 ($s \cdot m^{-1}$); r_s^s 为土壤表面阻力 ($s \cdot m^{-1}$); r_a^c 为冠层内边界阻力 ($s \cdot m^{-1}$); r_a^a 为作物冠层高度与参考高度间空气动力学阻力 ($s \cdot m^{-1}$); r_a^s 为地表与冠层高度间空气动力学阻力 ($s \cdot m^{-1}$)。

C_c 和 C_s 分别为作物冠层和土壤表面的系数, 其计算如下:

$$C_c = \frac{1}{1 + \frac{R_c R_a}{R_s (R_c + R_a)}} \quad (5)$$

$$C_s = \frac{1}{1 + \frac{R_s R_a}{R_c (R_s + R_a)}} \quad (6)$$

式中, R_a 、 R_c 、 R_s 分别为:

$$R_a = (\Delta + \gamma) r_a^a \quad (7)$$

$$R_c = (\Delta + \gamma) r_a^c + \gamma r_s^c \quad (8)$$

$$R_s = (\Delta + \gamma) r_a^s + \gamma r_s^s \quad (9)$$

1.6 参数的确定

1.6.1 冠层阻力的确定 冠层阻力是冠层导数的倒数, 本文具体计算采用 Jarvis^[34] 和 Noilhan 等^[35] 提出的参数化模型, 则夏玉米农田冠层阻力 r_s^c , 采用如下参数化方案:

$$r_s^c = \frac{1}{LAI_e} \frac{r_{min}}{F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4} \quad (10)$$

式中: LAI_e 为冠层有效叶面积指数, 计算方法参照李俊^[36] 改进型有效叶面积指数方法进行:

$$LAI_e = \begin{cases} LAI & LAI \leq 2 \\ 2 + \frac{LAI - 2}{3} & LAI > 2 \end{cases} \quad (11)$$

F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 分别为净辐射 R_n ($W \cdot m^{-2}$)、饱和水汽压差 D (hPa)、气温 T ($^{\circ}C$) 和土壤容积含水量 θ ($cm^3 \cdot cm^{-3}$) 的响应函数。

$$F_1 = \frac{\frac{r_{min}}{r_{max}} + f}{1 + f} \quad (12)$$

$$f = 0.55 \frac{2Q_t}{Q_{cri} LAI} \quad (13)$$

$$F_2 = \frac{\theta - \theta_w}{\theta_f + \theta_w} \quad (14)$$

$$F_3 = 1 - \beta(e_s - e_a) \quad (15)$$

$$F_4 = 1 - 0.0016(T_0 - T_a)^2 \quad (16)$$

式子, r_{min} 、 r_{max} 表示最小和最大气孔阻力, 此处夏玉米取值为 $120 s \cdot m^{-1}$ 和 $2400 s \cdot m^{-1}$; Q_t 是到达冠层顶端太阳辐射 ($W \cdot m^{-2}$); Q_{cri} 为冠层辐射临界值, 取 $100 W \cdot m^{-2}$; θ_w 为根层土壤含水量; θ_f 为田间持水量; θ_w 为凋萎含水量 ($cm^3 \cdot cm^{-3}$); e_s 、 e_a 分别表示饱和水汽压和实际水汽压 (kPa); β 为系数, 取值 $0.061 kPa^{-1}$; T_a 为气温 ($^{\circ}C$); T_0 为冠层温度。

1.6.2 土壤表面蒸发阻力参数的确定 土壤表面蒸发阻力参数最早由 Monteith 有植被的地表蒸发阻力的概念发展而来, 国内外学者进行了大量研究, 提出了许多理论的和经验的计算公式^[37-44]。但是由于土壤表面蒸发的复杂性, 至今 r_s^s 的理论研究没有取得重大进展, 各种经验公式之间差别较大, r_s^s 在地表湿润时为几十 $s \cdot m^{-1}$ 到地表风干时达几千 $s \cdot m^{-1}$, 很难满足实用要求^[45]。本文选取应用较为广泛的 Lin and Sun^[46-47]:

$$r_s^s = b_1 \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}}\right)^{b_2} + b_3 \quad (\text{适用于 } \frac{\theta}{\theta_{sat}} > 0.45) \quad (17)$$

和 Sellers^[48] 的经验函数:

$$r_s^s = \exp(8.206 - 4.255 \frac{\theta}{\theta_{sat}}) \quad (18)$$

进行对比分析。

其中, 经验系数 b_1 、 b_2 、 b_3 分别为 3.5、2.3、33.5, θ 为 0 ~ 10 mm 深度土壤含水量值和 θ_{sat} 为饱和含水量。

1.6.3 其他阻力参数的确定 冠层内边界阻力 r_a^c 、作物冠层高度与参考高度间空气动力学阻力 r_a^a 和地表与冠层高度间空气动力学阻力 r_a^s 采用 Shuttleworth and Gurney^[49] 提出的关系式计算。

1.7 模型验证和敏感性分析

本文以涡度相关系统每 30 min 测定的蒸散量 (ET) 作为参照, 分别将修改前后的 S-W 模型计算出的 ET 与其进行比较, 用以检验模型的模拟效果。在评价模型的模拟精度时除了使用斜率 (slope)、截距 (intercept)、相关系数 (r)、均方根误差 (RMSE) 等, 还引入了标准均方根误差 (NRMSE) 和一致性指数 (IoA) 等指标评价模拟效果^[50-51]。

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (19)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (20)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \quad (21)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (22)$$

式中, P_i 为模拟值; O_i 为测量值; \bar{O} 为平均实测值; n 为模拟值或实测值个数。

模拟值与实测值的 MAE 和 $NRMSE$ 越小、 IoA 越大, 表明误差越小, 模型的预测性越好。标准均方根误差用于说明数据的离散程度, 无量纲, $NRMSE$ 越接近 0 说明数据越集中, 模型的模拟效果越好。一致性指数 IoA 是均方误差与可能误差的比率, 取值在 0 ~ 1 之间, 1 代表模拟值与实测值完全一致, 0 表示完全不一致。

表 2 双源模型玉米地蒸散量精度验证

Table 2 Accuracy of simulated evapotranspiration by S - W1, S - W2, S - W3 and S - W4 models of summer maize

模型 Model	相关系数 r	斜率 Slope	截距 Intercept	绝对误差 ABSE	均方根误差 RMSE	标准均方根误差 NRMSE	一致性指数 IA
S - W1	0.918**	0.752	0.008	0.055	0.091	0.622	0.954
S - W2	0.919**	0.676	0.005	0.071	0.116	0.793	0.888
S - W3	0.938**	0.721	0.003	0.061	0.099	0.675	0.885
S - W4	0.935**	0.652	0.001	0.081	0.127	0.870	0.902

注: ** 在 0.01 水平上显著相关。

Notes: ** Correlation is significant at the 0.01 probability level.

分析表明(表 2), 四个模型模拟值与实测值的相关系数均大于 0.918 ($P < 0.01$)。四个模型的斜率在 0.652 ~ 0.752 之间, 均小于 1, 模拟值较实测值小, 截距均小于 0.01。绝对误差在 0.055 ~ 0.081 之间, 均方根误差在 0.091 ~ 0.127 之间, 标准均方根误差在 0.622 ~ 0.870 之间, 误差均以 S - W1 模型最小。一致性指数在 0.885 ~ 0.954 之间。

对比分析发现, 当冠层阻力参数一致, 采用不同的土壤阻力参数模型时。S - W1 和 S - W2 两者相关系数差别不大, 分别为 0.918、0.919, S - W3 和 S - W4 两者相关系数较前两者有一定的提升, 分别为 0.938、0.935。说明 Cardiol 冠层阻力参数在一定

2 结果分析

2.1 双源模型对比分析

选取李俊改进型(L1)和 Cardiol^[52](L2)叶面积指数冠层阻力模型, 以及 Sellers(S1)等和 Lin and Sun(S2)两种土壤阻力参数模型, 组成 4 个双源模型 S - W1, S - W2, S - W3, S - W4。对四个模型的相关性和误差进行分析, 从而找出最优化的模型参数。

表 1 改进阻力参数双源模型

Table 1 Improvement of the resistance parameters of S - W models

双源模型 Shuttleworth-wallace model	冠层阻力模型 Canopy resistance	土壤阻力模型 Soil resistance
S - W1	L1	S1
S - W2	L1	S2
S - W3	L2	S1
S - W4	L2	S2

模拟结果表明: S - W1、S - W2、S - W3 和 S - W4 模型模拟的每 30 min 玉米地 ET 均与实测 ET 吻合较好(表 2、图 2、图 3)。从图 4 可以看出, 从 8 月 1 日—9 月 4 日, 4 个模型斜率都小于 1, 但 S - W1 模型效果较好, 拟合直线更接近 1:1 线。

程度上提高了模型的相关性。通过斜率分析发现, S - W1 和 S - W3 斜率分别为 0.752、0.721, 两者斜率差别不明显, S - W2 和 S - W4 较前两者有一定程度的降低, 分别为 0.676、0.652。说明 Sellers 土壤阻力参数提高了模拟值的大小。误差分析表明, 绝对误差、均方根误差和标准均方根误差均以 S - W1 为最小, 分别为 0.091、0.622、0.954。一致性指数以 S - W1 最大为 0.954。综合分析, Cardiol 冠层阻力参数在一定程度上提高了模型的相关性, 但是李俊改进型冠层阻力参数和 Sellers 土壤阻力参数模型能够减少模拟误差, 并且一致性指数更大。

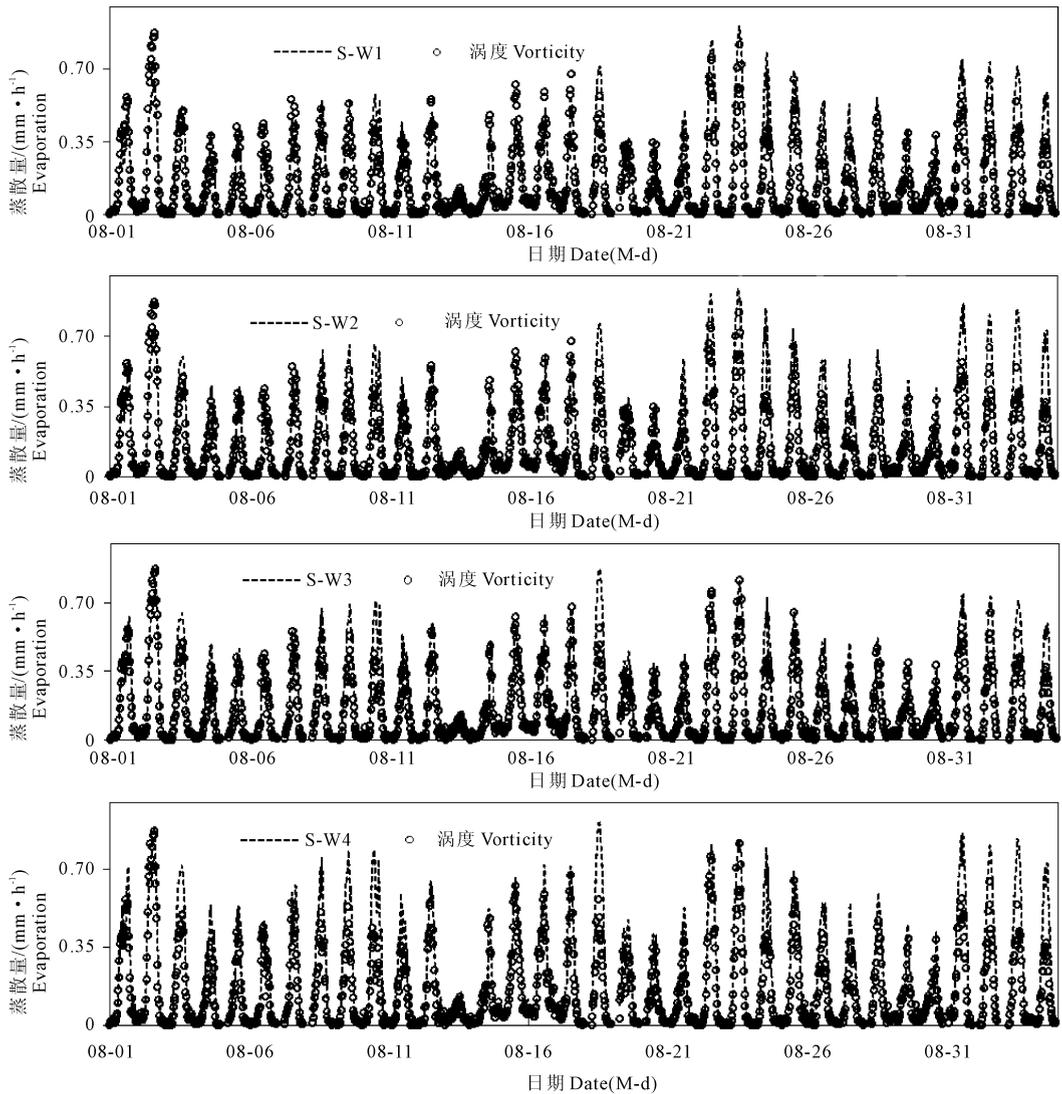


图 2 S-W1、S-W2、S-W3 和 S-W4 模型模拟的每半小时蒸散量与实测值比较

Fig. 2 Comparison of simulated evapotranspiration (ET) for 30 min by different models (S-W1、S-W2、S-W3 and S-W4) with measured ET

从整体上看, S-W1、S-W2、S-W3 和 S-W4 模型蒸散的模拟值与实测值的相关系数差别不大, S-W1 模型一致性指数更接近 1, 并且绝对误差、均方根误差、标准均方根误差均较其他模型小。可以看出 S-W1 模型更接近实测值(图 3), 能够较好地模拟玉米地蒸散日变化趋势。

2.2 模型敏感性分析

选取 S-W1 模型对各阻力参数进行敏感性分析, 结果(表 3)表明: 冠层阻力(r_s^c)对蒸散(ET)和作物蒸腾(T)和棵间土壤蒸发(E)的影响均较大。 r_s^c 每增加 10%, T 减少 7.19%, E 增加 1.24% 左右, ET 减少 4.10%; r_s^c 每降低 10%, T 增加 8.41%, E 减少 1.45%, ET 增加 4.80%。土壤表面阻力(r_s^s)每增加 10%, ET 减少 1.11%; 相反, r_s^s 每减少 10%,

ET 增加 1.2%。 r_s^s 的变化对 T 影响很小, r_s^s 每增减 10%, T 的变化幅度仅在 $-0.20\% \sim 0.2\%$ 左右。 r_s^s 每增加或减少 10%, E 则减少 3.37% 或增加 3.64%。

由表 3 可见, 模型中, 作物冠层高度与参考高度间空气动力学阻力 r_a^a 对 ET 和 T 的影响很小, r_a^a 每增减 10%, ET 和 T 的变化仅在 0.2% 左右。 r_a^a 每增减 10%, E 的变化幅度仅在 $-0.79\% \sim 0.82\%$ 左右。冠层表面边界层阻力(r_a^c)对 ET 、 T 和 E 的影响均很小。 r_a^c 每增减 10%, ET 的变化均小于 0.11%, E 和 T 的变化均小于 0.60%。土壤表面到冠层高度的空气动力学阻力(r_a^s)对 E 影响较大, r_a^s 每增加 10%, E 减少 2.31% 左右; r_a^s 每减少 10%, E 增加 1.74% 左右。 r_a^s 对 ET 和 T 的影响较小, ET 和 T 的变化在

-0.73% ~ 0.18%。有效叶面积指数 (LAI_e) 的变化对 ET 、 T 和 E 均有较明显的影响, LAI_e 增减 10%, T 的变化在 -7.41% ~ 8.19% 之间, E 的变化在

-2.64% ~ 0.00%, ET 的变化在 -4.58% ~ 3.54%。

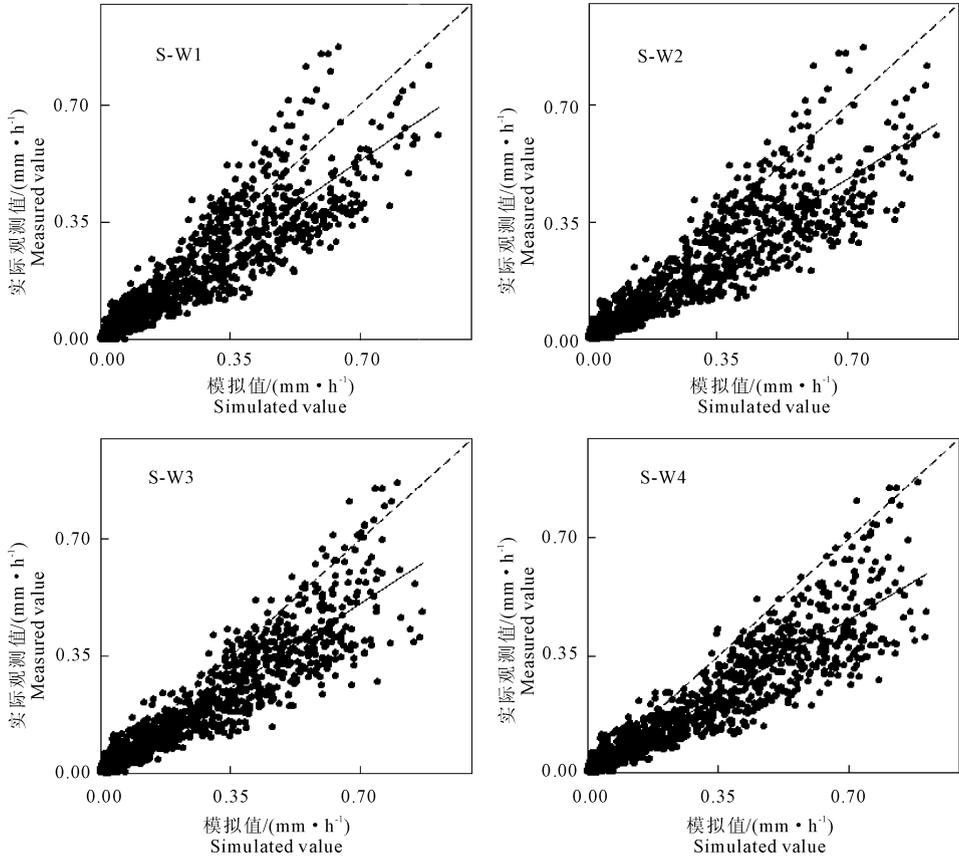


图 3 模拟值与实测值相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of simulated values and measured values

表 3 S-W1 模型阻力参数敏感性分析

Table 3 Sensitivities of simulated evapotranspiration (ET) by using S-W1 models to the changes of parameters in a maize field

阻力参数 Resistance parameter	蒸散发 ET /% Evapotranspiration	蒸腾 T /% Transpiration	蒸发 E /% Evaporation	
r_s^c	+10%	-4.10	-7.19	1.24
	-10%	4.80	8.41	-1.45
r_s^s	+10%	-1.11	0.20	-3.37
	-10%	1.20	-0.22	3.64
r_a^a	+10%	-0.19	0.14	-0.79
	-10%	0.20	-0.15	0.82
r_a^c	+10%	-0.05	-0.08	-0.44
	-10%	0.11	0.59	0.32
r_a^s	+10%	-0.73	-0.08	-2.31
	-10%	0.12	0.18	1.74
LAI_e	+10%	3.54	8.19	-2.64
	-10%	-4.58	-7.41	0.00

3 结 论

以涡度观测数据为基础,研究了夏玉米农田冠层阻力参数和土壤阻力参数,并利用 Shuttleworth - Wallace 模型,对比分析了两种阻力参数模型玉米农田双源蒸散模型特征。结果表明,叶面积指数的改进对提高模型精度很有必要,李俊等改进型有效叶面积指数冠层阻力模型和 Sellers 土壤阻力参数模型在本地区具有较好的模拟效果。

分析了夏玉米生长季抽穗期~成熟期蒸散值与实测值变化特征,S-W 模型估算的蒸散量的日变化趋势与涡度相关法相近,但模拟值较涡度观测值偏小。上述结论与刘斌^[53]在稻田的研究结果相同。并 S-W 模型阻力参数进行了敏感性分析, r_s^c 和 r_s^s 两个阻力参数以及 LAI_e 对模型表现敏感,对 r_a^a 和 r_a^c 表现不敏感,模拟值与实测值有较好的一致性,模拟结果是可以接受的。

4 讨 论

在计算 LAI 时,使用现有的 Logistics 模型,由此带来一定误差,因此叶面积指数模拟的误差会导致 ET 模拟的不准确^[54]。研究表明^[55],需要3年的连续 LAI 观测数据才能使 Logistics 模型最优。因此,需要针对本地区、不同类型植被建立 LAI_e 与 LAI 的函数关系,减少 LAI_e 的计算误差,进一步提高蒸散模型的模拟精度。

由于土壤表面阻力模型较多,大部分是基于经验公式、半经验公式及物理学角度提出的计算方法,研究选择了常用的两种模型进行对比,以找到适合本地区的土壤阻力参数模型。有学者提出^[56],Sun 和 Dolman^[57]提出的经验公式最为准确,目前还没有统一的结论。Villagarcía 等^[58]研究发现,土壤测定深度距表层土壤越近越好,每当测定深度增加0.03 m,总潜热通量的误差范围将超过100%。因此,根据不同深度土壤水分,结合本地区的下垫面特征,进行多种土壤阻力参数模型的对比分析有待于进一步研究。

分析 S-W 模型对各阻力参数的敏感性发现,作物蒸腾对 r_s^c 最敏感,其次为 LAI_e ;土壤蒸发对 r_s^s 最敏感,其次为 r_a^s , LAI_e 和 r_s^c ;蒸散对 r_s^c 最敏感, LAI_e 次之;蒸散、蒸腾和蒸发对 r_a^a 和 r_a^c 最不敏感。本文在夏玉米农田得到的结果与李璐^[59]的研究结果相同,贾红^[60]在水稻田也取得了相同的结果。鉴于 r_s^c 、 LAI_e 和 r_s^s 对 S-W 模型估算的蒸散影响较大,在应用上述模型估算蒸散时,需特别注意这些阻力参数计算公式中经验系数的确定。S-W 模型在不同研究背景条件下、不同作物对象的敏感程度存在差异。一些学者^[61]对西北半干旱区膜覆盖玉米田 S-W 模型蒸散特征研究,并进行了敏感性分析,得出了不同的结论,S-W 模型对 r_a^a 和 r_a^c 均较敏感,对 r_s^c 敏感性适中,对 r_a^s 和 r_s^s 不敏感。原因在于试验是在西北半干旱区膜覆盖条件下进行的,影响了土壤蒸发,从而得到不同的模拟结果。因此,今后研究中利用大型蒸渗仪等直接测量手段,结合涡度相关数据,在相同下垫面情况下,多站点协同观测,进一步验证模拟结果的准确性,并简化阻力参数模型,使得蒸散模型更加具有可比性,是今后的重点。

参 考 文 献:

[1] 赵 华. 不同尺寸蒸渗仪测定农田蒸散量的对比及冠层阻力的模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2015.
[2] 郭晓寅,程国栋. 遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展

[J]. 地球科学进展,2004,19(1):107-114.
[3] 崔晓军,薛昌颖,杨晓光,等. 不同水分处理早稻农田蒸散特征和水分利用效率[J]. 农业工程学报,2008,24(4):49-54.
[4] 汪秀敏. 农田蒸散量测定与计算方法研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.
[5] 吕厚荃,于贵瑞. 几种实际蒸散计算方法在土壤水分模拟中的应用[J]. 资源科学,2001,23(6):85-90.
[6] 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.
[7] Monteith J L. Resistance of a partially wet canopy: Whose equation fails? [J]. Boundary - Layer Meteorology, 1977,12(3):379-383.
[8] Monteith J L. Evaporation and environment[J]. Symposia of the Society for Experimental Biology, 1965,19(19):205-234.
[9] Daamen C C. Two source model of surface fluxes for millet fields in Niger [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997,83(3):205-230.
[10] 米 娜,陈鹏狮,张玉书,等. 几种蒸散模型在玉米农田蒸散量计算中的应用比较[J]. 资源科学,2009,31(9):1599-1606.
[11] 郭 映. 应用 Shuttleworth - Wallace 双源模型对玉米蒸散的研究[D]. 兰州:兰州大学,2015.
[12] Kato T, Kimura R, Kamichika M. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model[J]. Agricultural Water Management An International Journal, 2004,65(3):173-191.
[13] 赵丽雯,赵文智,吉喜斌. 西北黑河中游荒漠绿洲农田作物蒸腾与土壤蒸发区分及作物耗水规律[J]. 生态学报,2015,35(4):1114-1123.
[14] 刘绍民,孙中平,李小文,等. 蒸散量测定与估算方法的对比研究[J]. 自然资源学报,2003,18(2):161-167.
[15] 贾 红,胡继超,张佳宝,等. 应用 Shuttleworth - Wallace 模型对夏玉米农田蒸散的估计[J]. 灌溉排水学报,2008,27(4):77-80.
[16] 刘荣花,赵国强. 现代农业气象服务手册[M]. 北京:气象出版社. 2014:21-25.
[17] 刘战东,肖俊夫,刘祖贵,等. 高产条件下夏玉米需水量与需水规律研究[J]. 节水灌溉,2011,(6):4-6.
[18] 李 春,何洪林,刘 敏,等. China Flux CO₂ 通量数据处理系统与应用[J]. 地球信息科学,2008,10(5):557-565.
[19] 徐自为,刘绍民,宫丽娟,等. 涡度相关仪观测数据的处理与质量评价研究[J]. 地球科学进展,2008,23(4):357-370.
[20] 徐自为,刘绍民,徐同仁,等. 涡度相关仪观测蒸散量的插补方法比较[J]. 地球科学进展,2009,24(4):372-382.
[21] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997,14(3):514-526.
[22] 郭建侠,汴林根,戴永久. 在华北玉米生育期观测的16 m 高度 CO₂ 浓度及通量特征[J]. 大气科学,2007,31(4):695-707.
[23] 孙晓敏,朱治林,许金萍,等. 涡度相关测定中平均周期参数的确定及其影响分析[J]. 中国科学 D 辑,地球科学,2004,34(S2):30-36.
[24] 朱治林,孙晓敏,袁国富,等. 非平坦下垫面涡度相关通量的校正方法及其在 ChinaFLUX 中的应用[J]. 中国科学 D 辑,地球

- 科学,2004,34(A02):37-45.
- [25] 刘敏,何洪林,于贵瑞,等. 数据处理方法不确定性对 CO₂ 通量组分估算的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(9):2389-2396.
- [26] 王春林,周国逸,王旭,等. 复杂地形条件下涡度相关法通量测定修正方法分析[J]. 中国农业气象,2007,28(3):233-240.
- [27] Falge E, Baldocchi D D, Olson R, et al. Gap-filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001,107(1):43-69.
- [28] Falge E, Baldocchi D D, Olson R, et al. Gap-filling strategies for long-term energy flux data sets[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001,107(1):71-77.
- [29] 国家气象局. 农业气象观测规范(上卷)[M]. 北京:气象出版社,1993:7-30.
- [30] 林忠辉,项月琴,莫兴国,等. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(4):69-72.
- [31] 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程[J]. 中国农业气象,1986,7(1):14-19.
- [32] 刘铁梅,曹卫星,罗卫红,等. 小麦叶面积指数的模拟模型研究[J]. 麦类作物学报,2001,21(2):38-41.
- [33] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1985,111(469):839-855.
- [34] Jarvis P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 1976,273(927):593-610.
- [35] Noilhan J, Planton S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models [J]. *Monthly Weather Review*, 1989,117(3):536-549.
- [36] 李俊,韩凤明,同小娟,等. 麦田蒸散模型的改进及其对阻力参数的敏感性分析[J]. 中国农业气象,2014,35(6):635-643.
- [37] John L. Monteith. *Principles of Environmental Physics*[M]. London: Edward Arnold, 1973.
- [38] Kim J, Verma S B. Modeling canopy stomatal conductance in a temperate grassland ecosystem[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 1991,55(1):149-166.
- [39] Schulze E D. Relationships among maximum stomatal conductance, ecosystem surface conductance, carbon assimilation rate, and plant nitrogen nutrition: a global ecology scaling exercise[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1994,25(1):629-660.
- [40] 李放,沈彦俊. 地表遥感蒸散发模型研究进展[J]. 资源科学,2014,36(7):1478-1488.
- [41] Sun S F. *Moisture and Heat Transport in a Soil Layer Forced by Atmospheric Conditions*[D]. M. S. Thesis, Dept. of Civil Engineering, USA: University of Connecticut, 1982.
- [42] Camillo P J, Gurney R J, Camillo P J. A resistance parameter for bare-soil evaporation models[J]. *Soil Science*, 1986,141(2):95-105.
- [43] Anadranistakis M, Liakatas A, Kerkides P, et al. Crop water requirement model tested for crops grown in Greece[J]. *Agricultural Water Management*, 2000,45(3):297-316.
- [44] Ács F. A comparative analysis of transpiration and bare soil evaporation[J]. *Boundary - Layer Meteorology*, 2003,109(2):139-162.
- [45] 杨邦杰, Blackwell, Nicholson DF. 土壤表面蒸发阻力模型与田间测定方法[J]. 地理学报,1997,(2):177-183.
- [46] 林家鼎,孙菽芬. 土壤内水分流动、温度分布及其表面蒸发效应的研究——土壤表面蒸发阻力的探讨[J]. 水利学报,1983,(7):1-7.
- [47] Sun Shufen. *Moisture and heat transport in a soil layer forced by atmospheric conditions*[D]: USA: University of Connecticut, 1982.
- [48] Sellers P J, Heiser M D, HALL F G. Relationship between surface conductance and spectral vegetation indices at intermediate (100 m² ~ 15 m²) length scales[J]. *J. Geophys. Res. FIFE special issue*, 1992,(97):19033-19060.
- [49] Shuttleworth W J, Gurney R J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops[J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc*, 1990,116(492):498-451.
- [50] Zhan X, Kustas W P, Humes K S. An intercomparison study on models of sensible heat flux over partial canopy surfaces with remotely sensed surface temperature [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997,58(3):242-256.
- [51] Janssen P H M, Heuberger P S C. Calibration of process - oriented models[J]. *Ecological Modelling*, 1995,83(1):55-66.
- [52] Camillo P J, Gurney R J. A resistance parameter for bare soil evaporation models[J]. *Soil Science*, 1986,141(2):95-105.
- [53] 刘斌,胡继超,张雪松,等. 稻田逐时蒸散量的测定及其模拟方法的比较[J]. 灌溉排水学报,2014,33(4):369-373.
- [54] 麻雪艳,周广胜. 玉米叶面积指数动态模拟的最适野外观测资料[J]. 应用生态学报,2013,24(6):1579-1585.
- [55] 米娜,张玉书,陈鹏狮,等. 玉米农田蒸散过程及其对气候变化的响应模拟[J]. 生态学报,2010,30(3):698-709.
- [56] 高冠龙,张小由,鱼腾飞,等. Shuttleworth - Wallace 双源蒸散发模型阻力参数的确定[J]. 冰川冻土,2016,38(1):170-177.
- [57] Dolman A J. A multiple-source land surface energy balance model for use in general circulation models[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1993,65(93):21-45.
- [58] Villagarcía L, Were A, García M, et al. Sensitivity of a clumped model of evapotranspiration to surface resistance parameterisations: Application in a semi-arid environment [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2010,150(7-8):1065-1078.
- [59] 李璐,李俊,同小娟,等. 不同冠层阻力公式在玉米田蒸散模拟中的应用[J]. 中国生态农业学报,2015,23(8):1026-1034.
- [60] 贾红. 稻田双源蒸散模型研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2008.
- [61] 董军,岳宁,党慧慧,等. 应用修订的 Shuttleworth - Wallace 模型对半干旱区覆膜玉米蒸散的研究[J]. 中国生态农业学报,2016,24(5):674-683.