doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.064

不同阻力模型在夏玉米蒸散模拟中的应用性评价

胡　建[1]　刘跃磊[1]　马　荣[1]　郑　静[2,3]　范军亮[4]　赵　璐[5]　姜守政[5]

(1. 四川农业大学水利水电学院, 雅安 625014; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299;
3. 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610299;
4. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
5. 四川大学水力学与山地河流工程国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 蒸散发(ET)涵盖了土壤、植物和大气间的水分交换,是水循环和能量平衡中的关键环节。冠层阻力(r_c)和气孔阻力(r_s^c)是影响 ET 准确性的重要阻力参数。本研究选用两种阻力模型 Katerji－Perrier(KP)、Todorovic(TD)对 P－M 模型和 S－W 模型在中国西北地区夏玉米田 ET 模拟的适用性进行了评价。基于 2015—2018 年田间试验数据利用最小二乘法对阻力模型关键参数进行了校准和验证。结果表明,KP 模型在 P－M 模型和 S－W 模型中表现优于 TD 模型,SW－KP 模型 ET 模拟精度最高,决定系数 R^2 均值为 0.816,均方根误差 RMSE 均值为 0.79 mm/d;PM－KP 模型在夏玉米苗期对 ET 低估仅为 0.86%,SW－KP 模型在拔节期、吐丝期和乳熟期表现最佳,R^2 为 0.718±0.071,RMSE 为(0.85±0.11) mm/d;模型敏感性分析显示,KP 模型 r_c、r_s^c 对净辐射(R_n)和饱和水汽压差(VPD)变化最为敏感,在 TD 模型中对空气温度(T_a)最为敏感,T_a 变化±20%时 r_c、r_s^c 变化超过 10%;PM－KP 模型中 ET 对 R_n 最敏感,降低 20%时 ET 减少 19.69%,PM－TD 模型中对 T_a 的敏感性最高,T_a 变化±20%时 ET 变化约 30%。在 S－W 耦合模型中,ET 对环境变量的敏感性由大到小依次为 R_n、T_a、土壤含水率(SWC)、VPD,R_n 变化±20%时 ET 变化超过 20%。通过最小二乘法校正的 KP 模型精度更高,PM－KP 模型适用于苗期 ET 模拟,SW－KP 模型在夏玉米拔节期、吐丝期和乳熟期模拟的 ET 精度更高。本研究可为玉米不同生育阶段 ET 模拟提供更优模型组合形式,为半干旱地区夏玉米田耗水量精量计算和灌溉制度制定提供理论依据。

关键词: 夏玉米; 蒸散量; Penman－Monteith 模型; Shuttleworth－Wallace 模型; 冠层阻力; 气孔阻力

中图分类号: S161.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)11-0658-09　　**OSID**:

Evaluation of Application of Different Resistance Models in Summer Maize Evapotranspiration Simulation

HU Jian[1]　LIU Yuelei[1]　MA Rong[1]　ZHENG Jing[2,3]　FAN Junliang[4]　ZHAO Lu[5]　JIANG Shouzheng[5]

(1. *College of Water Resources and Hydropower, Sichuan Agricultural University, Ya'an* 625014, *China*
2. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu* 610299, *China*
3. *Key Laboratory of Mountain Surface Growth and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Chengdu* 610299, *China*
4. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
5. *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu* 610065, *China*)

Abstract: Evapotranspiration (ET), which covers the exchange of water between soil, plants and the atmosphere, is a key link in the water cycle and energy balance. Canopy resistance (r_c) and stomatal resistance (r_s^c) are important resistance parameters that affect the accuracy of ET. Two resistance models, Katerji－Perrier(KP) and Todorovic(TD) were selected to evaluate the applicability of P－M model and S－W model for ET simulation in summer maize fields in Northwest China. Based on the field experiment data from 2015 to 2018, the key parameters of the resistance model were calibrated and verified by least square method. The results showed that KP model performed better than TD model in P－M model and

收稿日期: 2024－12－10　修回日期: 2025－04－25

基金项目: 四川农业大学专业发展支持计划项目(2221998094)、四川省科技计划项目(2023YFN0024)、成都东部新区科技创新研究计划项目(2024－DBXQ－KJYF008)和中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所科研项目(IMHE－ZYTS－08)

作者简介: 胡建(1979—),男,副教授,主要从事农业水土资源与环境研究,E-mail: hjsicau@126.com

通信作者: 姜守政(1995—),男,副研究员,主要从事节水灌溉理论与新技术研究,E-mail: jiangshouzheng@scu.edu.cn

S－W model. The SW－KP model had the highest ET simulation accuracy, with mean value of coefficient of determination R^2 of 0.816 and mean value of root mean square error (RMSE) of 0.79 mm/d. The underestimation of ET by PM－KP model in summer maize seedling stage was only 0.86%, while the performance of SW－KP model was the best at the stage of ascending, spinning and milking, with R^2 ranging of 0.718 ± 0.071 and RMSE ranging of (0.85 ± 0.11) mm/d. Model sensitivity analysis showed that r_c and r_s^c in KP model were most sensitive to changes in net radiation (R_n) and saturated vapor pressure difference (VPD). In the TD model, the air temperature (T_a) was the most sensitive. When T_a changed ±20%, r_c and r_s^c changed more than 10%. In PM－KP model, ET was the most sensitive to R_n, and the sensitivity to T_a was 19.69% when T_a was reduced by 20%. In PM－TD model, ET was the most sensitive to T_a, and ET changed by about 30% when T_a changed by ±20%. In the S－W coupling model, the sensitivity of ET to environmental variables, ranked from high to low was R_n, T_a, soil moisture content (SWC), VPD, and the change of ET exceeded 20% when R_n changed ±20%. The KP model corrected by the least square method had higher accuracy, the PM－KP model was suitable for ET simulation at seedling stage, and the SW－KP model had higher accuracy for ET simulation at summer maize's articulation stage, spinneret stage and milk ripening stage. The research result can provide a better model combination form for ET simulation at different growth stages of maize, and provide a theoretical basis for accurate calculation of water consumption and establishment of irrigation system in summer maize fields in semi-arid areas.

Key words: summer maize; evapotranspiration; Penman－Monteith model; Shuttleworth－Wallace model; canopy resistance; stomatal resistance

0　引言

农田生态系统的实际蒸散发(Evapotranspiration,ET)由土壤蒸发(E)和作物蒸腾(T)共同组成[1],是土壤-植物-大气连续体(Soil－plant－atmosphere continuum,SPAC)进行水分动态交换的重要环节之一[2]。精确估算作物 ET 可为研究农田水分利用率、优化灌溉制度及农业水资源管理提供依据。

目前,蒸散量的测定方法包括利用水文学原理测定的水量平衡法、水分运动通量法及蒸渗仪法;利用微气象学测定的空气动力学法、涡度相关法(EC 法)及波文比能量平衡法(BREB 法);利用植物生理学测定的示踪法、蒸腾室法、气孔计法、植株液流法等[3-4]。此外,利用多种模型模拟计算 ET 应用较为广泛,如单源 Penman－Monteith(P－M)模型、双源 Shuttleworth－Wallace (S－W)模型等。P－M 模型是估算 ET 最常用的方法,其将下垫面视为一个整体,未区分土壤蒸发和植被蒸腾的不同过程[5]。S－W 模型是在 P－M 模型基础上建立的,将土壤蒸发和作物蒸腾分开计算,考虑了作物和土壤的阻力差异,估算精度更高[6]。

冠层阻力(r_c)和气孔阻力(r_s^c)分别为 P－M 模型和 S－W 模型估算 ET 的重要参数。两者受叶片部位、叶片层次、土壤湿润状况以及冠层内空气动力学特性等因素的影响[7]。随着各种阻力模型的出现,针对其在蒸散模拟中的适用性研究成果较多。郭仲英等[8]分别评价了最小二乘法校正后的 Jarvis 模型(JA)、耦合的表层阻力模型(CO)、GA 模型、Katerji－Perrier 模型(KP)及 FAO56－PM 模型在 P－M 模型中的模拟精度;李玲[9]将 KP 模型、Stannard(ST)模型、Leuning(RL)模型等 10 种阻力模型与 P－M 模型耦合,不同生长季采用不同耦合模型以提高对玉米 ET 的模拟效果;李璐等[10]分别将 JA 模型、Kelliher－Leuning 模型(KL)应用到 S－W 模型中发现,两种耦合模型对 ET 响应程度均较好。

众多关于阻力模型适用性研究多用于 P－M 模型反推的阻力进行验证,但在稀疏作物种植及大多数作物生育前期 E 占 ET 比例较大[11]。玉米冠层在生育期内逐渐趋于闭合,两种 ET 模型的结合应用,可以更好地响应夏玉米田 ET 的动态变化。本研究分别评价 Katerji－Perrier 模型、Todorogvic 模型在 P－M 模型和 S－W 模型的适用性,分生育期选择耦合模型,以提高对夏玉米生长季 ET 模拟精度,为半干旱地区夏玉米作物蒸散发过程和提高灌溉水分利用效率提供理论和实践依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

田间试验于 2015—2018 年在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室节水站(34°18′N,108°24°E)进行。该地区气候属半湿润偏干旱气候,年平均气温 12.9℃,蒸发皿蒸发量为 1 500 mm。试验区土壤为粉质粘壤土,田间持水率为 0.33 cm^3/cm^3,凋萎含水率为 0.15 cm^3/cm^3,饱和

含水率为 0.46 cm^3/cm^3,土壤干容重为 1.4 g/cm^3。夏玉米种植品种为郑单 958,于 6 月中旬播种,9 月下旬收获,各生育期划分具体时间如表 1 所示。玉米生长生育期内无明显虫病害,以尿素(180 kg/hm^2)、过磷酸钙(120 kg/hm^2)和氯化钾(60 kg/hm^2)为基肥外无额外施肥,无灌溉。

表 1 生育期划分

Tab.1 Growth stage division

生育期	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
苗期	6 月 17—23 日	6 月 16—22 日	6 月 16—24 日	6 月 18—24 日
拔节期	6 月 24 日—7 月 20 日	6 月 23 日—7 月 17 日	6 月 25 日—7 月 19 日	6 月 25 日—7 月 21 日
吐丝期	7 月 21 日—8 月 15 日	7 月 18 日—8 月 12 日	7 月 20 日—8 月 14 日	7 月 22 日—8 月 16 日
乳熟期	8 月 16 日—9 月 30 日	8 月 13 日—9 月 30 日	8 月 15 日—9 月 30 日	8 月 17 日—9 月 30 日

1.2 气象数据监测和土壤含水率测定

最高气温(T_{max})及最低气温(T_{min})、风速(U_2)、日降雨量(P)及相对湿度(RH)由距离试验点 30 m 的杨凌国家气象观测站每 1 h 记录 1 次。太阳总辐射(R_s)利用鲍文比能量平衡系统(BREB 型,Campbell Scientific Inc,美国)每 1 h 获取 1 次。空气水汽压差(VPD)根据平均气温和相对湿度数据计算[12]。土壤含水率(SWC)由土壤水分传感器(ech20 - 5te 型,Decagon Devices,美国)每隔 15 min 监测 1 次,并使用干燥法定期校准和验证。

1.3 叶面积指数测定

叶面积指数(LAI)在玉米生长季每 5 ~ 10 d 观测 1 次,随机选取 3 株代表性植物,其总绿叶面积由叶长与最大叶宽相乘并乘以转换因子 0.75 计算得到[13],然后用单株总绿叶面积除以单株占地面积得到 LAI。本研究中需应用日尺度 LAI,因此根据观测 LAI 与玉米播后日(DAS)间关系,建立 LAI 和 DAS 的拟合方程($LAI = aDAS^b \exp(-0.077DAS)$),其中 a 和 b 为拟合系数)[14]。

1.4 液流速率和土壤蒸发量

使用热平衡液流系统(Dynamax Houston,TX,美国)监测 3 株具有代表性玉米茎部第 2 节间的液流速率。液流传感器以硅胶为绝缘材料,并用铝箔包裹。采用 WANG 等[15]提出的校准方程对测量的液流速率进行校正,将 3 株玉米平均日液流速率乘以单株玉米平均地面面积,从而将玉米单株液流速率提升为林分蒸腾速率(T)。为了精确计算整个生长季的总 T,采用校正后的作物系数结合参考作物蒸散量(ET_0)弥补未测定茎液流量的空缺。

土壤蒸发量采用聚氯乙烯管自制的微渗仪(高度 20 cm;直径 10.5 cm)[16],分别在种植行和相邻的两行间布置 1 个。考虑降雨对微渗计的影响,本研究与 WANG 等[17]研究相似,假设雨天土壤蒸发量为零。

1.5 蒸散模型

1.5.1 Penman - Monteith(P - M)模型

单源 Penman - Monteith(P - M)模型表达式见文献[18],其中零平面位移取 0.63 倍植株平均高度,动量传输粗糙度常数取 0.13 倍植株平均高度[19]。

1.5.2 Shuttleworth - Wallace(S - W)模型

双源 Shuttleworth - Wallace(S - W)模型表达式见文献[20 - 21],其中夏玉米消光系数取 0.41[22],作物冠层高度到参考高度的空气动力学阻力、地表到冠层高度的空气动力学阻力计算公式见文献[23],边界层平均阻力设为 50 s/m[24],土壤表面蒸发阻力采用 ZHU 等[25]提出的经验公式。

1.6 阻力模型

1.6.1 Katerji - Perrier 模型(KP)

KP 模型表达式见文献[26],其中经验参数通过实测数据进行校准。

1.6.2 Todorogvic 模型(TD)

TD 模型表达式见文献[27]。

1.7 模型性能评价与敏感性分析

1.7.1 模型性能评价

采用决定系数(R^2)和一致性指数(IA)评价两组数据密切程度,均方根误差(RMSE)和相对平均偏倚误差(MBE)评价模拟值准确性。

1.7.2 敏感性分析

通过对各环境因子分别增减 10% 和 20% 后得到的 r_c 或 r_s^c 及 ET,与 2015—2018 年实测数据对比获得 P - M 耦合模型和 S - W 耦合模型对环境变量的敏感性分析。

2 结果与分析

2.1 夏玉米田环境因子及叶面积指数变化

2015—2018 年夏玉米全生育期内总降水量 P、SWC、空气温度(T_a)、ET_0、空气水汽压差(VPD)、U_2、净辐射(R_n)及 LAI 的逐日变化如图 1 所示。2015—2018 年玉米生育期 P 分别为 274.20、274.20、292.80、417.00 mm,日降雨量最大值分别为 41.70、64.40、37.90、84.50 mm(图 1a)。SWC 变化趋势明显受到 P 的影响,有降水后,SWC 会明显上升(图 1a、1b)。在玉米生育期 T_a 变化范围在 15 ~ 35℃之间,在 7、8 月达到峰值(图 1b)。ET_0 在生育

期内先升高后降低，峰值主要集中在 7、8 月，其变化范围在 1.00 ~ 8.00 mm/d（图 1b）。VPD 整体呈先上升后下降趋势，在 2017 年波动最大，最大值和最小值分别为 2.86、0.04 kPa。U_2 在玉米生育期内没有明显季节性变化。2015—2018 年 R_n 在玉米生育期内变化趋势近似，基本处于 5.00 ~ 20.00 MJ/(m²·d)，在 7 月中旬至 8 月中旬达到一个较高水平，随后呈现下降趋势（图 1c）。LAI 自玉米拔节期开始显著增加，在吐丝期达到最大值，2015—2018 年分别为 3.91、5.47、3.78、4.31 m²/m²，乳熟期开始下降，LAI 平均值为 2.22、3.13、2.12、2.44 m²/m²（图 1d）。

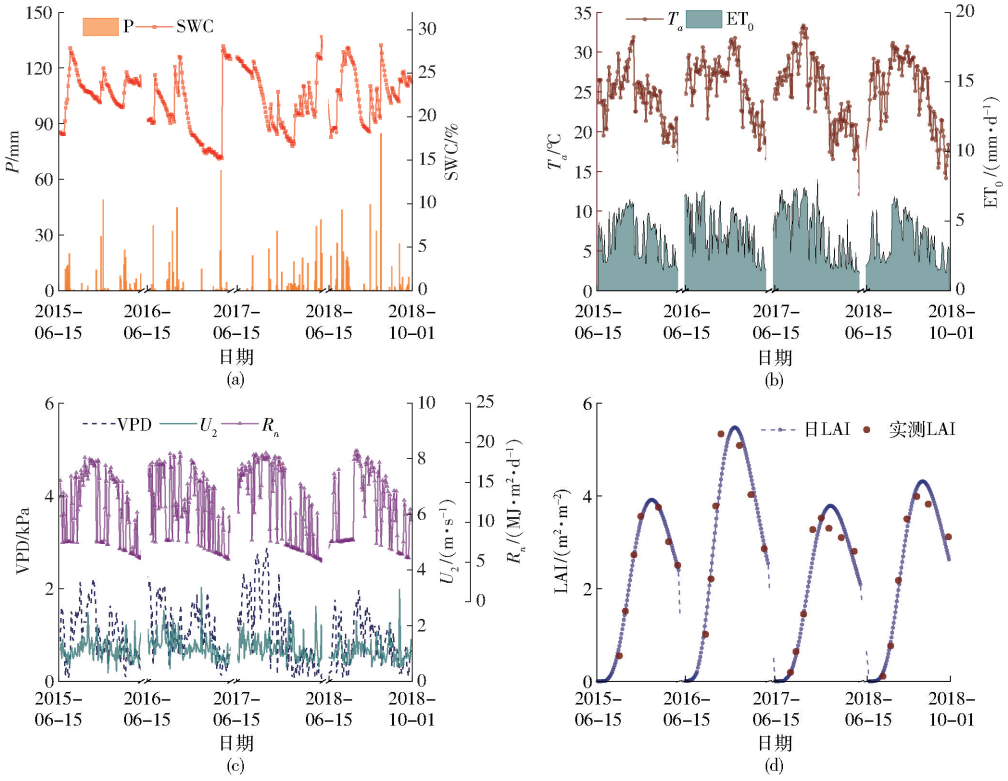


图 1　生育期内 P、SWC、T_a、ET$_0$、R_n、VPD、U_2、LAI 逐日变化

Fig. 1　Diurnal changes of P, SWC, T_a, ET$_0$, R_n, VPD, U_2 and LAI during reproductive period

2.2　基于两种阻力模型的 P－M 模型 ET 模拟值与实测值对比

2.2.1　P－M 耦合模型模拟的 ET 与实测值对比

P－M 耦合模型模拟的日 ET 与实测值对比分析如图 2a（图中 ET$_{PM-KP}$ 表示 PM－KP 模型模拟的 ET，其他类推）、图 3 和表 2 所示。2015—2018 年，PM－KP 模型 ET 模拟值与实测值 R^2 为 0.783 ± 0.062，RMSE 为（1.17 ± 0.59）mm/d，而 PM－TD 模型 ET 模拟值与实测值 R^2 为 0.560 ± 0.100，RMSE 为（1.47 ± 0.27）mm/d。PM－KP、PM－TD 模型模拟的 ET 对实测值分别平均低估 28.60%、37.40%，其中 PM－KP 模型在 2016 年对 ET 低估最小，为 10.51%，而在 2018 年对 ET 低估最大，为 51.73%；PM－TD 模型在 2015—2017 年对 ET 低估均超过 30%（2015 年为 38.12%、2016 年为 33.82%、2017 年为 35.02%），2018 年则低估 40.80%。

2.2.2　不同生育期 P－M 耦合模型模拟的日 ET 与实测值对比

P－M 耦合模型对夏玉米不同生育期 ET 的模拟性能如图 4a、4b 和表 3 所示。PM－KP、PM－TD 模型在苗期分别对 ET 低估 0.86%、12.13%，RMSE 均小于 0.60 mm/d。在拔节期、吐丝期和乳熟期，PM－KP 模型对 ET 平均低估 25.53%，尤其在吐丝期低估较大，为 33.13%，RMSE、MBE 分别为 1.86 mm/d、

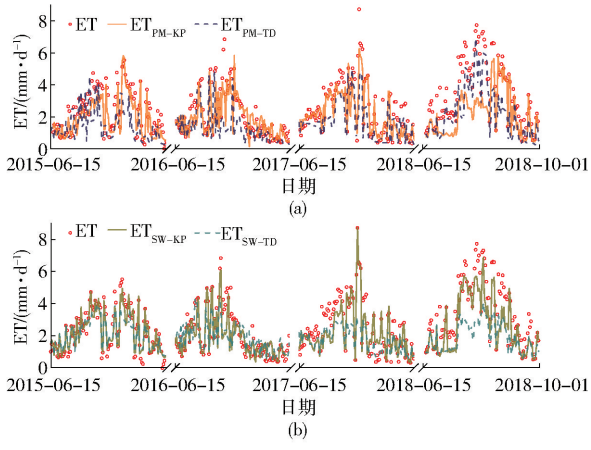


图 2　不同耦合模型模拟的日 ET 与实测值变化曲线

Fig. 2　Variation curves of daily ET values simulated by different coupling models and measured values

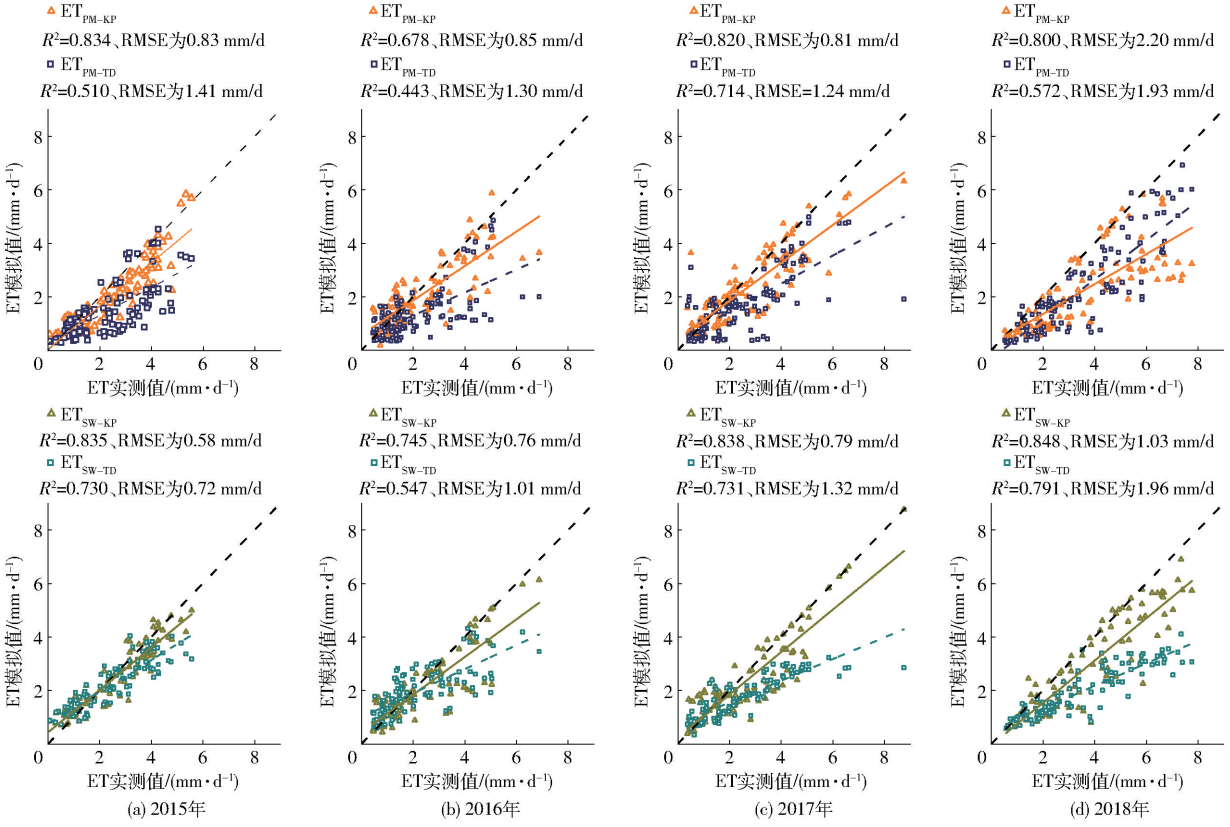


图 3 不同耦合模型日 ET 模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of daily ET simulation values and measured values of different coupling models

表 2 不同耦合模型 ET 模拟值与实测值对比统计结果

Tab. 2 Comparison of statistical results between simulated and measured values of ET in different coupling models

模型	年份	IA	MBE
PM－KP	2015	0.962	－0.255
	2016	0.968	－0.105
	2017	0.978	－0.159
	2018	0.863	－0.517
PM－TD	2015	0.899	－0.380
	2016	0.900	－0.342
	2017	0.937	－0.345
	2018	0.914	－0.408
SW－KP	2015	0.987	－0.005
	2016	0.975	－0.089
	2017	0.980	－1.055
	2018	0.980	－0.196
SW－TD	2015	0.980	－0.090
	2016	0.952	－0.087
	2017	0.928	1.194
	2018	0.898	－0.441

－0.311；PM－TD 模型对 ET 平均低估 37.77%，在乳熟期低估 48.86%，RMSE、MBE 分别为 2.07 mm/d、－0.600。在苗期、拔节期和乳熟期，PM－KP 模型对 ET 的模拟表现优于 PM－TD 模型，但在吐丝期，PM－TD 模型能更佳，其 ET 模拟值与实测值的 R^2、RMSE、MBE 分别为 0.557、1.73 mm/d、－0.420。

2.3 基于两种阻力模型的 S－W 模型 ET 模拟值与实测值对比

2.3.1 S－W 耦合模型模拟的日 ET 与实测值对比

S－W 耦合模型模拟的日 ET 与实测值对比分析如图 2b、图 3 和表 2 所示。2015—2018 年，SW－KP 模型性能最优，其 ET 模拟值与实测值 R^2 为 0.816 ± 0.042、RMSE 为（0.79 ± 0.16）mm/d。SW－KP、SW－TD 模型模拟的 ET 普遍低于实际观测值，在 2015—2016 年低估较小，分别平均低估 7.25%、8.90%，其中 SW－KP 模型在 2015 年对 ET 低估最小，为 5.53%，RMSE、MBE 分别为 0.58 mm/d、－0.005，在 2018 年低估最大，为 19.62%，RMSE、MBE 分别为 1.03 mm/d、－0.196。相比之下，SW－TD 模型 2016 年对 ET 低估最小，为 8.76%，而在 2018 年则低估 40% 以上。

2.3.2 不同生育期 S－W 耦合模型模拟的日 ET 与实测值对比

S－W 耦合模型在夏玉米不同生育期对 ET 的模拟性能如图 4c、4d 和表 3 所示。SW－KP、SW－TD 模型在苗期对 ET 分别高估 2.18%、13.15%，而在拔节期、吐丝期和乳熟期，SW－KP、SW－TD 模型对 ET 分别平均低估 14.76%、26.43%。SW－KP 模型在拔节期对 ET 低估较大，其 ET 模拟值与实测值

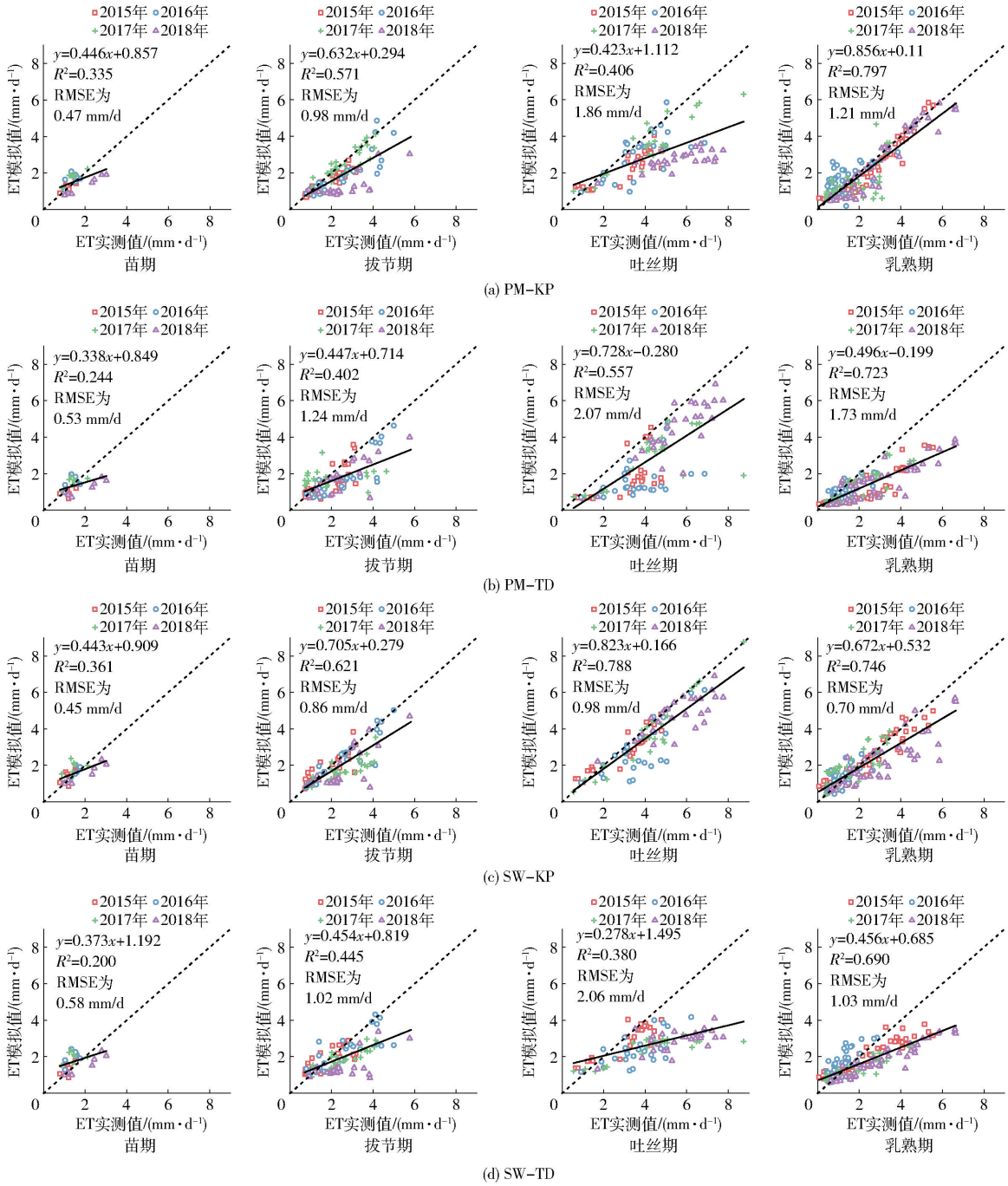


图 4　各个耦合模型在玉米不同生育期的 ET 模拟值与实测值比较

Fig. 4　Comparison of ET simulation values and measured values of each coupling model in different growth stages of maize

的 R^2、IA、RMSE、MBE 分别为 0.621、0.971、0.86 mm/d、−0.184；SW－TD 模型在除苗期外其他生育阶段均对 ET 低估 20% 以上，其中吐丝期低估 36.49%，R^2 为 0.380，RMSE 为 2.06 mm/d。

2.4　敏感性分析

图 5a、5b 为不同 P－M 耦合模型中 r_c 和 ET 对环境变量（R_n、VPD、T_a、SWC）在 ±10% 和 ±20% 变化下的响应特征。在 PM－KP 模型中，r_c 对 VPD 的敏感性最高，降低 20% 时 r_c 增加 4.69%，而对 T_a 的敏感性最低，变化幅度未超过 2%；ET 对 R_n 最敏感，降低 20% 时 ET 减少 19.69%，对 VPD 的敏感性较弱，变化幅度均低于 5%。在 PM－TD 模型中，r_c 和 ET 对 T_a 均表现出较高的敏感性，当 T_a 变化 ±20% 时，r_c 变化超过 10%，ET 波动约 30%；而当 R_n 升高 20% 时，r_c 减少 2.48%，ET 增加 21.46%；VPD 对 r_c 和 ET 的影响较小，VPD 升高 20% 时，r_c 增加 2.32%，ET 仅减少 0.96%。

图 5c、5d 为不同 S－W 耦合模型中 r_s^c 和 ET 对环境变量的响应。在 SW－KP 模型中，r_s^c 对环境变量的敏感性由大到小依次为 R_n、VPD、T_a，但整体影响不显著，R_n 降低 20% 时 r_s^c 仅增加 1.07%，而对 VPD 和 T_a 的敏感性均在 1% 以下。ET 对 R_n 的响应

表 3 不同耦合模型不同生育期 ET 模拟值与实测值对比统计结果

Tab. 3 Comparison of statistical results between simulated and measured values of ET in different coupling models and different growth stages

模型	生育期	IA	MBE
PM－KP	苗期	0.979	－0.008
	拔节期	0.958	－0.250
	吐丝期	0.939	－0.311
	乳熟期	0.912	－0.318
PM－TD	苗期	0.970	－0.120
	拔节期	0.920	－0.370
	吐丝期	0.920	－0.420
	乳熟期	0.733	－0.600
SW－KP	苗期	0.981	0.022
	拔节期	0.971	－0.184
	吐丝期	0.986	－0.137
	乳熟期	0.733	－0.123
SW－TD	苗期	0.972	0.132
	拔节期	0.955	－0.218
	吐丝期	0.918	－0.365
	乳熟期	0.426	－0.210

最为显著，变化幅度约为 20%；其次 T_a、SWC 降低 20% 时 ET 分别减少 16.10%、14.14%；对 VPD 敏感性最低，当 VPD 变化 ±10% 和 ±20% 时，ET 变化均在 1% 以下。在 SW－TD 模型中，r_s^c 对 T_a 的敏感性最高，T_a 降低 20% 时 r_s^c 增加 10.93%，而当 R_n 和 VPD 变化 ±20% 时，r_s^c 变化幅度均在 3% 左右。ET 对 R_n 最为敏感，R_n 降低 20% 时 ET 减少 20.16%，对 VPD 的敏感性均低于 2%。综合来看，在 S－W 耦合模型中 ET 对各环境变量的敏感性由大到小依次为 R_n、T_a、SWC、VPD。

3 讨论

冠层阻力和气孔阻力通过调节叶片与大气间的气体交换，进而影响水分蒸发，是作物蒸散模型中的重要参数。各类阻力模型中含有经验参数，需要实测的 ET 对阻力进行反演[28]。

目前，许多研究通过比较 KP、TD 模型性能，一致得出 KP 模型精度更高[29－31]。同样在本研究中，KP、TD 模型均低估 ET，而校正后的 KP 模型能对夏

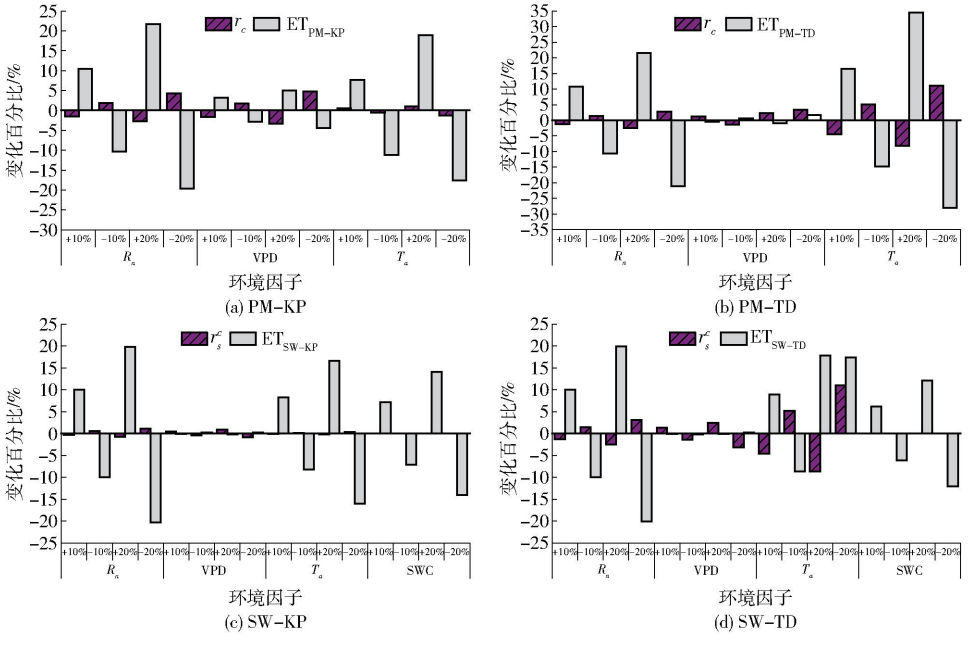


图 5 不同耦合模型对环境变量的敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of environmental variables by different coupling models

玉米田蒸散更好的响应，这与 CHEN 等[11]、WANG 等[30]研究结论相同。而在 YAN 等[29]和闫浩芳等[31]的研究中，两种模型对 ET 均高估，其原因可能是地区气候的差异以及分析的作物不同。KP 模型精度高，源于其对阻力的精确量化[26]，模型中所采用的参数化方法能有效地将阻力与环境变量联系起来；TD 模型建立在理想条件下，未考虑到与土壤和植物水分亏缺相关的变量[27]。

诸多研究通过对比 P－M 模型和 S－W 模型模拟 ET 的精度，得出 S－W 模型相较于 P－M 模型更具有优势的结论[32]。然而，亦有研究持有相悖观点[33]。在本研究中，S－W 模型在模拟夏玉米田日尺度 ET 上优于 P－M 模型，与 CHEN 等[11]结论一致。在稀疏植被冠层中，必须考虑土壤表面的蒸发作用，S－W 模型综合考量了冠层与土壤间的能量交换过程，并将叶面积指数与土壤水分状况的影响纳入考量，因此该模型更适用于稀疏植被系统[5]。相比之下，P－M 模型将植被冠层简化为单一大叶

结构[34]，仅关注植物表面的蒸腾作用，通常会导致模拟结果偏低。

在敏感性分析中，随着 R_n 增大，冠层导度增大，冠层阻力减小，ET 逐渐增大，故 R_n 与 ET 呈正相关，与李仙岳等[35]研究结论一致；对于 VPD，随着 VPD 增大，作物根部吸收水分速度小于叶片蒸腾作用的增强[36]，叶片气孔会慢慢关闭，进而减少作物的 ET。因此，在某些特定条件下，VPD 和 ET 间呈负相关性，与赵华等[37]结论相同；T_a 对阻力的影响存在一定不确定性，这是由于 T_a 与气孔导度间存在临界点，超过临界点后气孔导度反而会降低，而阻力则会增加[38]；在 S－W 模型中，随着 SWC 提高，植物对水的输送能力会因土壤水分含量的增加而减弱，导致阻力减少，从而使得 ET 上升。因此，SWC 与 ET 间呈正相关关系。

本研究不足之处为仅采用最小二乘法对阻力模型进行参数优化，不能直接反映与其他优化方式的区别；敏感性分析方面，只考虑了 VPD、R_n、T_a 和 SWC 的影响，没有体现其他环境变量。未来将着眼于阻力模型结构改进，采用多站点、多变量对 ET 的模拟精度进行分析。

4　结论

（1）KP、TD 模型在蒸散模型中的应用表明，KP 模型精度均高于 TD 模型，且二者均对实测值低估。其中 SW－KP 模型对 ET 响应最好，其 ET 模拟值与实测值 R^2 均值为 0.814。

（2）在苗期，PM－KP 模型对实测值低估最小；在拔节期、吐丝期和乳熟期，SW－KP 模型表现最优，R^2 均值为 0.741。

（3）在 PM－KP 模型中，r_c 对 VPD 最敏感，ET 对 R_n 最敏感。而在 PM－TD 模型中 r_c 和 ET 均对 T_a 敏感性最高，对 VPD 敏感性最低。在 S－W 耦合模型中，ET 对各环境变量敏感性由大到小均依次为 R_n、T_a、SWC、VPD，KP 模型中 r_s^c 对各环境因子敏感性不显著，变化均在 3% 以下，而在 TD 模型中，r_s^c 对 T_a 最为敏感。

参　考　文　献

[1] 庄淏然，冯克鹏，许德浩. 蒸散分离的玉米水分利用效率变化及影响因素[J]. 干旱区研究，2023，40(7)：1117－1130.
ZHUANG Haoran，FENG Kepeng，XU Dehao. Changes，influencing factors and sensitivity of water use efficiency in maize farmland ecosystems based on evapotranspiration separation in the Ningxia irrigated area[J]. Arid Zone Research，2023，40(7)：1117－1130.（in Chinese）

[2] LI Hongjun，LI Chunqiang，XING Kaicheng，et al. Surface temperature adjustment in METRIC model for monitoring crop water consumption in North China Plain[J]. Agricultural Water Management，2024，291：108654.

[3] 汪明霞，陈晓飞，王铁梁，等. 腾发量的测定和计算方法研究综述[J]. 中国农村水利水电，2006(12)：9－12.
WANG Mingxia，CHEN Xiaofei，WANG Tieliang，et al. Review on the measuring and calculation methodologies of evapotranspiration[J]. China Rural Water and Hydropowe，2006(12)：9－12.（in Chinese）

[4] 胡继超，张佳宝，冯杰. 蒸散的测定和模拟计算研究进展[J]. 土壤，2004，36(5)：492－497.
HU Jichao，ZHANG Jiabao，FENG Jie. Measurement and estimation of evapotranspiration[J]. Soils，2004，36(5)：492－497.（in Chinese）

[5] 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.
GAO Guanlong，ZHANG Xiaoyou，YU Tengfei，et al. Calculation methods of resistances of the Shuttleworth－Wallace model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology，2016，38(1)：170－177.（in Chinese）

[6] 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.
DONG Jun，YUE Ning，DANG Huihui，et al. Estimation of evapotranspiration in maize fields with ground mulching with plastic film in semi-arid areas using revised Shuttleworth－Wallace model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2016，24(5)：674－683.（in Chinese）

[7] 储长树，卢显富，青吉铭. Penman－Monteith 公式中冠层阻抗的合成方法[J]. 南京气象学院学报，1995，18(4)：494－499.
CHU Changshu，LU Xianfu，QING Jiming. Method of scaling for canopy resistance based on Penman－Monteith formula[J]. Transactions of Atmospheric Sciences，1995，18(4)：494－499.（in Chinese）

[8] 郭仲英，吴英楠，李巧珍，等. 六种冠层阻力模型在冬小麦蒸散估算中的应用[J]. 农业工程学报，2022，38(12)：109－117.
GUO Zhongying，WU Yingnan，LI Qiaozhen，et al. Application of six canopy resistance models for estimating winter wheat evapotranspiration[J]. Transactions of the CSAE，2022，38(12)：109－117.（in Chinese）

[9] 李玲. 不同冠层阻力模型在半干旱区玉米生态系统蒸散发的应用研究[D]. 兰州：兰州大学，2024.
LI Ling. Application of different canopy resistance models in evapotranspiration of maize ecosystem in semi-arid areas[D]. Lanzhou：Lanzhou University，2024.（in Chinese）

[10] 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.
LI Lu，LI Jun，TONG XiaoJuan，et al. Application of different canopy resistance models in summer maize evapotranspiration simulation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2015，23(8)：1026－1034.（in Chinese）

[11] CHEN Xi，YU Lianyu，CUI Ningbo，et al. Modeling maize evapotranspiration using three types of canopy resistance models coupled with single-source and dual-source hypotheses—a comparative study in a semi-humid and drought-prone region[J]. Journal of Hydrology，2022，614：128638.

[12] CAMPBALL G S. Introduction to environmental biophysics[M]. New York：Springer，1998.

[13] MCKEE G A. Coefficient for computing leaf area in hybrid corn1[J]. Agronomy Journal, 1964,56:240 - 241.
[14] ZHENG Jing, FAN Junliang, ZHANG Fucang, et al. Evapotranspiration partitioning and water productivity of rainfed maize under contrasting mulching conditions in Northwest China[J]. Agricultural Water Management,2021,243:106473.
[15] WANG Yueyue,ZHANG Xiao,XIAO Xinhua,et al. An empirical calibration for heat-balance sap-flow sensors in maize[J]. Agronomy Journal,2017,109(3):1122.
[16] BOAST C W, ROBERTSON T M. A "Micro-Lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: description and laboratory evaluation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(4):689 - 696.
[17] WANG Di, WANG Li. Dynamics of evapotranspiration partitioning for apple trees of different ages in a semiarid region of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 191:1 - 15.
[18] MONTEITH J. The state and movement of water in living organisms[J]. Evaporation and Environment,1965,19: 205 - 234.
[19] MONTEITH J L. Principles of environmental physics[J]. Phys. Today, 1974, 27(3):51.
[20] SHUTTLEEWORTHW W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1985,111:839 - 855.
[21] LHOMME J P, MONTES C, JAOB F, et al. Evaporation from heterogeneous and sparse canopies: on the formulations related to multi-source representations[J]. Boundary-Layer Meteorol,2012,144:243 - 262.
[22] 莫兴国,林忠辉,项月琴,等. 玉米群体辐射传输特征[J]. 生态农业研究,2000,8(1):1 - 4.
MO Xingguo, LIN Zhonghui, XIANG Yueqin, et al. Characteristics of incoming radiatioin through maize caopy[J]. Eco-agriculture Research, 2000,8(1):1 - 4. (in Chinese)
[23] SHUTTLEWORTH W J, GURNEY R J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1990,116(492): 497 - 519.
[24] BRISSION N, ITIER B, LHOTEL J C, et al. Parameterisation of the Shuttleworth - Wallace model to estimate daily maximum transpiration for use in crop models[J]. Ecological Modeling,1998,107(2 - 3): 159 - 169.
[25] ZHU Guohui, LI Xiaofeng, SU Yaohua, et al. Simultaneously assimilating multivariate data sets into the two-source evapotranspiration model by Bayesian approach: application to spring maize in an arid region of northwestern China[J]. Geoscientific Model Development, 2014, 7(4): 1467 - 1482.
[26] KATERJI N, PERRIERA, OULID-AÏSSA A K. Exploration au champ et interprétation de la variation horizontale et verticale de la résistance stomatique: cas d'une culture de luzerne (*Médicago sativa* L.)[J]. Agronomie, 1983, 3(9): 847 - 856.
[27] TODOROGVIC M. Single-layer evapotranspiration model withvariable canopy resistance[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1999, 125(5):235 - 245.
[28] NICOLASE, BARRADES V L, ORTUNOM F, et al. Environmental and stomatal control of transpiration, canopy conductance and decoupling coefficient in young lemon trees under shading net[J]. Environmental & Experimental Botany, 2008, 63(1 - 3):200 - 206.
[29] YAN Haofang, ZHOU Yudong, ZHANG Jianyun, et al. Simulation of canopy resistance parameters and latent heat flux of typical crops in southern Jiangsu[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2022, 38(9):7.
[30] WANG Biyu, YAN Haofang, ZHENG Hexiang, et al. Estimation of latent heat flux of pasture and maize in arid region of Northwest China based on canopy resistance modeling[J]. Frontiers in Environmental Science,2024,12:1397704
[31] 闫浩芳,周裕栋,张建云,等. 苏南地区典型作物冠层阻力参数及潜热通量的模拟[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9):101 - 107.
YAN Haofang, ZHOU Yudong, ZHANG Jianyun, et al. Parametrization of canopy resistance and simulation of latent heat fluxes for typical crops in southern Jiangsu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 101 - 107. (in Chinese)
[32] SHAO Mengxuan, LIU Haijun, YANG Li. Estimating tomato transpiration cultivated in a sunken solar greenhouse with the Penman - Monteith, Shuttleworth - Wallace and Priestley - Taylor models in the North China Plain[J]. Agronom, 2022, 12(10):2382.
[33] 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.
LIU Shaomin, SUN Zhongping, LI Xiaowen, et al. A comparative study on models for estimating evapotranspiration[J]. Journal of Natural Resources,2003,18(2):161 - 167. (in Chinese)
[34] 陈镜明,柳竞先,罗翔中. 基于碳水通量耦合原理改进 Penman - Monteith 蒸散发模型[J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 59 - 75.
CHEN Jingming, LIU Jingxian, LUO Xiangzhong. Improving the Penman - Monteith evapotranspiration model based on the coupling principle of carbon and water fluxes[J]. Trans. Atmos. Sci., 2020, 43(1):59 - 75. (in Chinese)
[35] 李仙岳,杨培岭,任树梅,等. 樱桃冠层导度特征及模拟[J]. 生态学报,2008,30(2):300 - 308.
LI Xianyue, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Characteristics and simulation of canopy conductance of cherry[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,30(2):300 - 308. (in Chinese)
[36] 阚飞,岳宁,丁林凯,等. 不同气象条件下陇中玉米农田生态系统水分利用效率研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(10): 116 - 122.
KAN Fei, YUE Ning, DING Linkai, et al. Water use efficiency of maize agroecosystem in Longzhong region under different weathers[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2018,37(10):116 - 122. (in Chinese)
[37] 赵华,申双和,华荣强,等. Penman - Monteith 模型中水稻冠层阻力的模拟[J]. 中国农业气象,2015,36(1):17 - 23.
ZHAO Hua, SHEN Shuanghe, HUA Rongqiang, et al. Simulation of canopy resistance for paddy rice based on Penman - Monteith model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2015,36(1):17 - 23. (in Chinese)
[38] 吴大千,徐飞,郭卫华,等. 中国北方城市常见绿化植物夏季气孔导度影响因素及模型比较[J]. 生态学报,2007, 27(10):4141 - 4148.
WU Daqian, XU Fei, GUO Weihua, et al. Impact factors and model comparison of summer stomatal conductance of six common greening species in cities of Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(10):4141 - 4148. (in Chinese)