

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.007

邯郸市永年区不同 PM 修正模型麦田蒸散模拟对比

周 炜¹,王洪峰²,栾清华³,高 翔¹,张海生¹,王利书¹

(1. 河北工程大学河北省智慧水利重点实验室,河北 邯郸 056038;
2. 邯郸市气象服务中心,河北 邯郸 056005; 3. 河海大学农业科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要: 为探究不同 PM 修正模型在邯郸市永年区麦田的结构适应性、模拟准确性,以田间水量平衡计算结果为参照,分别选取了 3 种不同结构形式的 PM 修正模型命名为 PM-1、PM-2 和 PM-3 模型,模拟了永年区冬小麦关键生长期(4—5 月)内的农田蒸散,并对比评价其模拟效果。结果表明:模拟精度方面,PM-1 模型模拟的决定性系数和整体评价指标的平均值最高,分别为 0.773 和 3.105,而 PM-3 模型模拟的两个指标最低,分别为 0.701 和-2.904;PM-1 模型时间分布均衡度最高,PM-2 模型最低;3 种修正模型各具优点和局限性,对永年区蒸散模拟 PM-1 模型更具适应性。
关键词: PM 修正模型;麦田蒸散;土壤水分;模拟精度;时间均衡度
中图分类号: S161.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)06-0047-11

Simulation comparison of wheat field evapotranspiration with different PM models in Yongnian District of Handan City

ZHOU Wei¹, WANG Hongfeng², LUAN Qinghua³, GAO Xiang¹, ZHANG Haisheng¹, WANG Lishu¹
(1. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. Handan Meteorological Service Centre, Handan 056005, China;
3. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to illustrate the structural adaptability, precision and accuracy of different PM correction models in wheat fields of Yongnian District of Handan City, the field evapotranspiration during key growth stages (from April to May) of winter wheat was simulated respectively through PM-1, PM-2 and PM-3, and simulation results were compared with the water balance results. The results show that the simulated evapotranspiration precision of PM-1 is the highest, of which the corresponding R^2 and GPI values are 0.773 and 3.105 respectively; the precision of PM-3 is the lowest, of which the corresponding R^2 and GPI are 0.701 and -2.904 respectively. The temporal distribution equilibrium of PM-1 simulated evapotranspiration is the best and that of PM-2 is the worst. These PM correction models have their own advantages and limitations, and PM-1 is more suitable for the evapotranspiration simulation of Yongnian District. The results can supply reference to the disclosure of wheat-fields evapotranspiration law in key growth stages and provide basis for the inversion and revision of remote sensing evapotranspiration in large scale.
Key words: PM correction models; wheat field evapotranspiration; soil moisture; simulation precision; temporal equilibrium

农田蒸散(evapotranspiration, ET)是农田作物蒸腾和土壤蒸发的总和,是土壤-植物-大气系统(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)中水分交换的关键过程^[1],也是可同时影响农田水量平衡过程和能量平衡过程的唯一要素^[2]。农田蒸散的模拟和观测一直是农田水利学、水文学、土壤学、生态学、气象学等相关学科的重要研究内容,对于农田旱情监测、节水灌溉、提高作物水分生产力有重要的意义^[3]。目前,农田蒸散测定方法主要有水量平衡法、光合作用仪法、热量法、蒸渗仪法、涡度相关法、波文比-能量平衡法、大孔径

基金项目: 国家自然科学基金(51879066);河北省自然科学基金(E2019402468)
作者简介: 周炜(1995—),男,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zw13007615818@163.com
通信作者: 栾清华(1978—),女,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: carol97011202@163.com
引用本文: 周炜,王洪峰,栾清华,等. 邯郸市永年区不同 PM 修正模型麦田蒸散模拟对比[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6): 47-57.
ZHOU Wei, WANG Hongfeng, LUAN Qinghua, et al. Simulation comparison of wheat field evapotranspiration with different PM models in Yongnian District of Handan City[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(6): 47-57.

激光闪烁仪法、遥感法等^[4-6];农田蒸散模拟方法有 Penman-Monteith (PM) 模型法^[7-9]、Shuttleworth -Wallace (SW)模型法、Clumping (C)模型法等^[4]。其中,PM 模型是1965 年 Monteith 在 Penman 模型^[5]考虑能量平衡和水汽扩散理论的基础上,引入冠层阻力建立的估算蒸散的模型^[10];之后,因其较明确的物理理论依据、较高的计算精度和较强的适用性成为在蒸散研究中应用最多的模型^[11]。然而,该模型在计算下垫面蒸散时,未区分土壤蒸发和植株蒸腾,将其概化为一个单源大叶蒸腾模型^[12]。显然,在农田自然生态系统中,即使作物封垄,作物蒸腾成为总蒸散的主要分量,土壤蒸发仍然不可忽略^[13]。因此,研究者们为提高模拟精度,应用不同原理考虑并添加土壤蒸发,形成了不同形式的 PM 修正模型,其中比较经典的有基于分割可用能量为冠层吸收和土壤吸收的 PM 修正模型^[14-16](简称 PM-1 模型),基于分割地表为块状的冠层覆盖和土壤裸露的 PM 修正模型^[12](简称 PM-2 模型),使用双作物系数法,基于分割单作物系数为基础作物系数和土壤蒸发系数的 PM 修正模型^[17](简称 PM-3 模型)。

以往有关蒸散模型的模拟效果对比较多关注于不同模型之间的对比,如张方敏等^[18-21]对 PM、Hargreaves、Makkink、Priestley-Taylor 等不同蒸散模型进行了对比,结果表明 PM 模型具有较强的适用性;而同种模型不同修正结构下的模拟效果对比关注较少。由于不同类型的 PM 修正模型计算原理不同,同一条件和区域的蒸散模拟结果必然存在差异,而其在不同区域、不同农田下的适用性需要进一步研究。

本文以邯郸市永年区为研究区,基于区域农田种植现状,在空间上选择多个典型试验麦田,采用 PM-1 模型、PM-2 模型和 PM-3 模型分别模拟冬小麦关键生长期农田的蒸散并以麦田水量平衡结果为参照,检验蒸散模拟的效果,以期科学管理农田水分、制定合理灌溉制度提供参考。

1 研究区与数据采集

1.1 研究区概况

河北省邯郸市永年区(36°35'N ~ 36°56'N, 114°20'E ~ 114°52'E)位于邯郸市主城区的北部及东北部(图 1),辖 17 个乡镇,总面积 761.72 km²。全区地势西高东低,西部为低山丘陵,东部为平原;属温暖带湿润大陆性季风气候,多年平均降水量为 520 mm 左右,年平均气温为 10 ~ 21℃,年平均日照时数为 2 464 h,年平均相对湿度为 67%,雨热同期,利于农业粮食生产发展。经调研,永年区内耕地面积为 5.29 万 hm²,占整个永年区面积的 69%,且绝大多数为冬小麦-夏玉米轮作,一年两熟,其分布见图 1(a)。灌溉方式主要是地下水井灌,少部分采用地表渠灌。综上,永年区在气候条件、作物轮作及灌溉制度方面均具有邯郸市县域的典型特征,故选取永年区为研究区,并在中东部 9 个乡镇的 10 块典型麦田开展研究。选取的麦田基本信息如表 1 所示,位置分布如图 1(b)所示,10 块麦田的土壤质地为粉砂质壤土或粉砂质黏壤土,均为冬小麦-夏玉米轮作,在关键生长期均井灌 1 ~ 2 次,且灌溉时间总体较为一致,这些均具有永年区农田耕作管理的普遍特性。

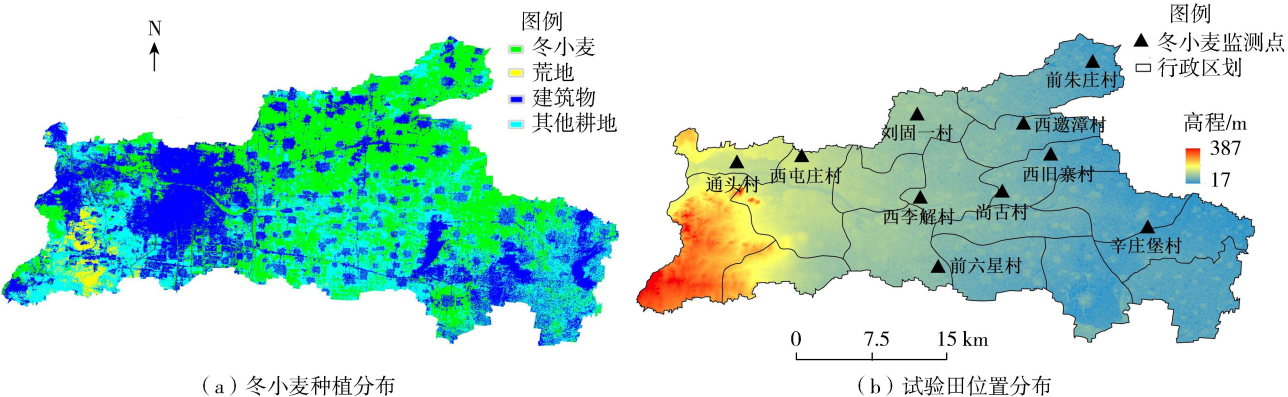


图 1 研究区麦田分布
Fig. 1 Distribution of wheat fields

1.2 数据采集与计算

1.2.1 土壤含水量数据

土壤含水量数据采集依托连续的现场土壤墒情试验。为更好地获取不同空间的区域农田蒸散分布特

表 1 试验田基本信息
Table 1 Information of experimental fields

试验田	所属村落	所属乡镇	经度	纬度	试验田面积/hm ²	土壤质地
A	辛庄堡村	辛庄堡乡	114°46'49"E	36°45'58"N	0.33	粉砂质壤土
B	前六星村	西苏镇	114°35'39"E	36°43'52"N	0.13	粉砂质壤土
C	西屯庄村	临洺关镇	114°28'23"E	36°49'45"N	0.13	粉砂质黏壤土
D	通头村	西阳城乡	114°24'56"E	36°49'25"N	0.13	粉砂质壤土
E	刘固一村	刘汉乡	114°34'32"E	36°51'58"N	0.13	粉砂质黏壤土
F	西李解村	讲武镇	114°34'42"E	36°47'33"N	0.27	粉砂质壤土
G	尚古村	讲武镇	114°39'04"E	36°47'52"N	0.27	粉砂质壤土
H	西邀漳村	大北汪镇	114°40'12"E	36°51'29"N	0.33	粉砂质壤土
I	西旧寨村	曲陌乡	114°41'39"E	36°49'50"N	0.33	粉砂质黏壤土
J	前朱庄村	正西乡	114°43'53"E	36°54'46"N	0.27	粉砂质壤土

征,根据区域冬小麦种植分布(图 1)情况,使用 TRME-PICO-T3 TDR 剖面土壤水分测量系统(包含传感器、读表、测管)于冬小麦关键生长期即 2019 年 4 月 16 日至 5 月 27 日对表 1 所示的 10 块试验田进行监测,监测频次为 2 日一测。依据文献[22]中有关华北地区冬小麦关键生长期主要根系分布在 1 m 深度的研究成果,监测深度为 0~90 cm,分 7 层(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~70 cm、70~90 cm)测量。监测仪器精度为±0.01%,为校验仪器,在监测前人工土钻采集 10~20 cm、30~40 cm、50~70 cm 层的土样,另采用称重烘干法获取含水量数据并与仪器监测同期数据进行比对。比对结果表明,监测数据较称重烘干数据相对误差低于 5%,说明该仪器适用于永年区开展土壤墒情监测。

1.2.2 关键土壤水分参数

田间持水量(θ_{FC})和凋萎含水量(θ_{WP})是 PM 模型对比分析中较为关键的两个土壤水分参数,也是两个比较抽象化的概念。选择环刀法获取土壤样品,开展土壤颗粒分析试验,获得土壤颗粒级配并进行经验估算。参考陈晓燕等^[23-24]的研究结果计算各监测点的 θ_{FC} 和 θ_{WP} :

$$\theta_{FC_1} = -2.3533 + 0.06926w_{sa} + 0.12811w_{si} + 1.69426w_{cl} \tag{1}$$

$$\theta_{WP} = 0.0025w_{cl} + 0.0339 \tag{2}$$

式中: w_{sa} 为砂粒质量分数,%; w_{si} 为粉粒质量分数,%; w_{cl} 为黏粒质量分数,%。为进一步减小不确定性,再将 θ_{FC} 经验公式^[24]结果与式(1)进行比较:

$$\theta_{FC_2} = 0.0125w_{cl} + 0.0232 \tag{3}$$

1.2.3 气象和灌溉数据

气象数据采用永年气象站(站号为 53895)日尺度实测数据,包括平均气温(T)、最高气温(T_{max})、最低气温(T_{min})、平均相对湿度(H)、最小相对湿度(H_{min})、10 m 高平均风速(u_{10})、日照时数(n)以及降水量(P)。经实地调研,灌溉量数据可依据当地灌溉时长及管道出水流量计算,流量由流速仪测定。关键生长期温度、湿度及降雨灌溉量变化如图 2 所示。

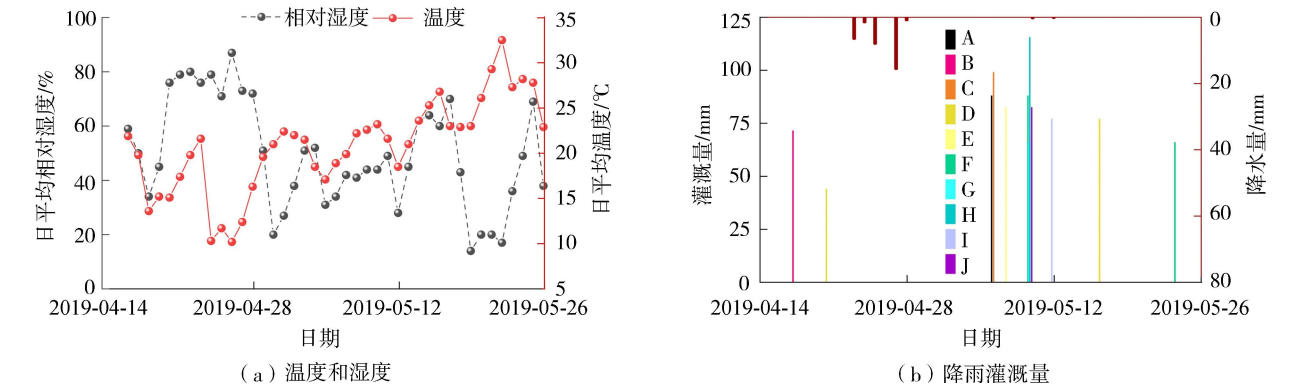


图 2 温度、湿度及降雨灌溉量
Fig.2 Temperature, humidity, precipitation and irrigation

1.2.4 作物生长指标

作物生长指标包括冬小麦生育阶段划分、植被覆盖度(f_c)和叶面积指数(leaf area index, LAI),如表2所示。生育阶段划分采用文献[25]的划分方式, LAI 通过MODIS 遥感影像提取(MOD13A1,产品数据是NDVI 植被指数,空间分辨率为1 000 m,时间分辨率为16 d)。 f_c 与LAI有较强的相关性,可通过关联公式经验推算:

$$f_c = 1.005[1 - \exp(-0.6l)]^{1.2} \tag{4}$$

式中 l 为叶面积指数。计算结果与文献[25]基本一致。经多次调研,各监测点农民种植习惯较为一致,且整个监测期小麦生长差异较小。在各田内用卷尺人工测量5个2 m×2 m的代表点,并数出代表点内小麦株数以计算种植密度,结果显示种植密度差异并不显著。故概化监测期内各田的 f_c 和LAI相同。生育阶段之间的作物生长指标采用线性内插。

2 模型与评价方法

2.1 PM 模型法

2.1.1 模型基本原理

PM 修正模型以 Penman-Monteith 公式为基础,是大叶假设下的单源结构形式,计算公式如下:

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p(e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \tag{5}$$

其中

$$r_a = 208/u_2$$

式中: E 为蒸散量,mm; λ 为蒸发潜热; Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率,KPa/℃; R_n 为表面净辐射,MJ/m²; G 为土壤热通量,MJ/m²; ρ 为空气密度,kg/m³; C_p 为空气定压比热,MJ/(kg·℃); $e_s - e_a$ 为饱和水汽压差,KPa; γ 为干湿表常数,KPa/℃; r_a 为空气动力学阻力,s/m; r_c 为冠层阻力,s/m; u_2 为2 m 高平均风速。

PM 模型模拟分直接计算和间接计算两种方式:①直接模拟蒸散时需要计算 r_c ,可采用Jarvis 等^[26-27]提出的公式,即

$$r_c = \frac{r_{\min}}{l_e} (F_1 F_2 F_3 F_4)^{-1} \tag{6}$$

其中

$$F_1 = 1.583R_n/(197.8108 + R_n) \quad F_2 = (\theta_{90} - \theta_{WP})/(\theta_{FC} - \theta_{WP})$$

$$F_3 = 1 - 0.061(e_s - e_a) \quad F_4 = 1 - 0.0016(T_0 - T)^2$$

式中: $r_{\min}$ 为最小气孔阻力,对于冬小麦取85 s/m; l_e 为有效叶面积指数,基于不同LAI的大小计算,采用李俊等^[28]的研究结果; F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 分别为辐射^[11]、土壤水分、空气湿度、温度影响因子; θ_{90} 为0~90 cm 内的平均土壤含水量; T_0 为参考叶温,一般取25℃^[28]。②间接模拟蒸散时不需要特别计算 r_c ,直接采用FAO56 定义下参考作物的 $r_c=70$ s/m,但需要进一步确定作物系数 K 。 Δ 、 R_n 等参数的确定可参考相关文献^[29]。

2.1.2 模型修正策略

单源的结构形式不区分植被蒸腾和土壤蒸发,模型只在植被冠层郁闭的情况下模拟效果较好;双源的结构形式将冠层和土壤划分为两个相互独立又相互作用的源汇,将蒸散用植被蒸腾 E_c 和土壤蒸发 E_s 之和表示,即

$$E = E_c + E_s \tag{7}$$

通过进一步参数化的方式改善模型模拟效果。不同的参数引入和划分原理,产生PM 模型不同的双源修正结构。

a. PM-1 模型结构形式引入冠层透过率 τ 将可用能量分割为冠层利用的能量和土壤利用的能量,同时引入土壤蒸散系数 f 确定 E_s ,从而将 E 分离为 E_c 和 E_s 两部分^[14]:

$$\lambda E_c = \frac{\Delta(1 - \tau)(R_n - G) + \rho C_p(e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \tag{8}$$

表2 冬小麦生育阶段划分、植被覆盖度及叶面积指数

Table 2 Growth stages, coverage and leaf area index of winter wheat

监测日期	生育阶段	植被覆盖度	叶面积指数
4月16日	拔节期	0.517 0	1.424 9
4月24日	挑旗期	0.665 8	2.060 5
5月07日	抽穗期	0.831 3	3.204 0
5月20日	开花期	0.825 7	3.150 2
5月27日	灌浆期	0.895 0	3.975 2

$$\lambda E_s = \frac{f\Delta\tau(R_n - G)}{\Delta + \gamma} \quad (9)$$

其中

$$\tau = \exp(-kl_e)$$

式中 k 为辐射的衰减系数,设为 0.6。 τ 根据 Beer 定律求解; f 参考了文献[16]的研究结果。

b. PM-2 模型结构形式引入 f_c 将地表分割为块状,冠层覆盖地表利用 r_c 确定 E_c ,土壤裸露地表引入参数土壤表面阻力 r_s 确定 E_s ,从而将 E 分离为 E_c 和 E_s 两部分^[12]:

$$\lambda E_c = \frac{\Delta f_c R_n + f_c \rho C_p (e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (10)$$

$$\lambda E_s = \frac{\Delta(1 - f_c)(R_n - G) + (1 - f_c)\rho C_p (e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)} \quad (11)$$

其中

$$r_s = \exp(8.4 - 5.9m_s) \quad m_s = (\theta_{10} - \theta_{WP})/(\theta_{FC} - \theta_{WP})$$

式中 m_s 为土壤湿度指数,用 θ_{10} 计算。

c. PM-3 模型结构形式为双作物系数法的结构形式。区别于 PM-1 模型和 PM-2 模型,PM-3 模型是蒸散的间接模拟模型,是单作物系数法的改进形式。PM-3 模型结构形式引入基础作物系数 K_{cb} 和土壤蒸发系数 K_e ,将单作物系数 K 分割,从而将 E 分离为 E_c 和 E_s 两部分^[2]:

$$E = (K_s K_{cb} + K_e) E_0 \quad (12)$$

其中

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

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

$$K_e = K_r(K_{cb,\text{full}} - K_{cb}) \quad K_{cc} = 1 - \exp(-kl_e)$$

$$K_{cb,\text{full}} = 1 + 0.1h + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(H_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

$$K_r = \begin{cases} 1 & 9 \leq \theta_{10} < \theta_{FC} \\ 1 - \frac{9 - \theta_{10}}{9 - 0.5\theta_{WP}} & 0.5Q_{WP} < \theta_{10} < 9 \\ 0 & 0 < \theta_{10} \leq 0.5\theta_{WP} \end{cases}$$

式中: K_s 为水分胁迫系数,等同于 F_2 ; E_0 为参考作物蒸散量; K_{cc} 为冠层覆盖度系数; $K_{c,\min}$ 为裸土最小作物系数,取 0.1; $K_{cb,\text{full}}$ 为作物完全覆盖地表时的最大基础作物系数; h 为冬小麦关键生长期平均高度,取 1 m; K_r 为土壤蒸发衰减系数,用 θ_{10} 计算。

2.2 水量平衡法

冬小麦关键生长期的农田蒸散量利用水量平衡法计算^[29]:

$$E = P + I - D + C \pm \Delta W \quad (13)$$

式中: P 为降水量, mm; I 为灌溉量, mm; D 为深层渗漏量, mm; C 为地下水由毛管上升的水量, mm; ΔW 为土壤水蓄变量, mm。考虑研究区冬小麦关键生长期主要根系分布的深度^[22]及土壤含水量的测定情况,取 ΔW 的土壤层深度为 90 cm。由于区域地下水埋深为 20 ~ 60 m,考虑日尺度下 90 cm 土壤层深度范围内水量平衡的实际情况, D 和 C 可忽略不计。

2.3 评价指标选取

从精度和分布均衡度两个层面选取指标评价 PM-1 模型、PM-2 模型、PM-3 模型的蒸散模拟效果。

a. 精度评价以水量平衡法计算的 2 日蒸散量作为参照值,采用平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE)、标准均方根误差 (NRMSE)、决定性系数 (R^2)、一致性指数 (AI) 及整体评价指标 (GPI)^[30-31] 作为评价指标。平均绝对误差反映模拟值误差的实际情况;均方根误差反映模拟值与参照值之间的偏差;标准均方根误差是均方根误差的归一化处理,指标越小表示模拟效果越好;决定性系数和一致性指数分别反映模拟值与参照值之间相关性是否显著和离散程度及相对偏差;整体评价指标是对上述指标的综合处理,针对各指标的不同反映层面与优势进行最后的综合评价,指标越大表示模拟效果越好。

b. 分布均衡度评价采用信息熵指标,可描述和判断蒸散在分布上的有序与无序、规则与杂乱、均匀与悬殊,公式可参考文献[32]。计算 10 块麦田关键生长期 2 日蒸散量的时间信息熵,评价 3 种 PM 模型模拟的蒸散在时间分布上的均衡度,熵值越大表示模型模拟蒸散分布越均匀。

3 结果与分析

3.1 关键土壤水分参数确定及分析

鉴于田间持水量对 PM 模型分析的重要性,选用经验公式(1)(3)相互对比验证的方式来确定 10 个监测点的相应土壤水分参数值。图 3 为两种不同经验公式计算的田间持水量情况,结果表明两者相差不大,且在不同监测点的空间变化具有一致性;式(1)较式(3)计算的量值略高 2%~3%,相对误差在 4.76%~7.43%,表明式(1)在永年区计算 θ_{FC} 适用,可作为模型土壤水分参数的输入。所有监测点的田间持水量值在 43.6%~24.14%,其中监测点 F 黏粒含量最少, θ_{FC} 最低,持水性差,监测点 E 则与之相反,持水性好, θ_{FC} 最高。所有监测点的凋萎含水量在 8.78%~5.76%,与田间持水量的变化规律一致。

3.2 蒸散模拟结果评价

3.2.1 蒸散特性及精度评价

3 种 PM 模型模拟及水量平衡计算的各监测点 2 日蒸散量变化过程如图 4 所示。图 4 可反映各监测点在关键生长期的蒸散均呈现波动中有所上涨的演变规律。大部分监测点在该过程中存在 7~9 轮的波动,水量平衡计算结果的趋势线斜率在 1~1.5 之间;相比之下,监测点 D 波动轮数减少且波动幅度明显更大,监测点 E 波动轮数增多且波动幅度偏小。各监测点出现蒸散最大峰值的日期不尽相同,大致分别在 5 月 1 日、5 月 17 日、5 月 21 日左右出现,总体都集中在抽穗-灌浆期,区域中部地区监测点 G 的峰值出现更早。整体而言,抽穗-灌浆期相较于拔节-抽穗期平均 2 日蒸散量均有一定程度的提升,而监测点 D 和 H 蒸散量较高,监测点 F 和 E 的蒸散量较低。

在不同的监测点蒸散模拟中,PM-2 模型结构下蒸散模拟点相对更多地低于水量平衡蒸散曲线,而 PM-3 模型结构下蒸散模拟点则更多地高于水量平衡蒸散曲线,并且 PM-3 模型结构存在过高的蒸散估算点,表现在监测点 B 的拔节-抽穗期和监测点 H 的抽穗-灌浆期较为明显。由图 4 直观而言,整体 PM-1 模型的模拟点与水量平衡蒸散曲线更接近,相比而言,更适用于研究区。

为进一步量化体现 3 种模型的模拟效果,10 个监测点不同模拟评价结果如表 3 所示。模拟结果从平均水平来看,PM-1 模型的 MAE、RMSE、NRMSE 均是三者最小, R^2 、AI 均是三者最大,说明 PM-1 模型在各指标反映层面均达到误差最小、拟合度最高、效果最优;其次是 PM-2 模型,除 NRMSE 和 AI,其余指标结果均优于 PM-3 模型。

就不同监测点的模拟效果而言,PM-1 模型模拟结果的 MAE、RMSE、NRMSE 均在监测点 D 的精度最差, R^2 、AI 分别在监测点 C 和 G 的精度最差。PM-2 模型模拟结果的 MAE、RMSE、NRMSE 最差值与 PM-1 模型相同,而 R^2 和 AI 表现最差的分别在监测点 B 和 D。PM-3 模型模拟结果的 MAE、RMSE、NRMSE 均在监测点 H 的精度最差;其 R^2 和 AI 均在监测点 B 的精度最差。综上可知,不同 PM 模型在永年区蒸散模拟均具有较好的适应性,但整体相比而言,PM-1 模型在不同评价指标的精度上均优于 PM-2 模型和 PM-3 模型。

在上述分项评价指标的基础上,采用 GPI 对 3 种模型的整体模拟精度进行排名,GPI 越大,排名越靠前,模拟效果越好,结果见表 3。PM-1 模型模拟结果在监测点 G 和 J 中具有更优的精度表现,PM-2 模型和 PM-3 模型的模拟结果最优的两个监测点分别为 H 和 I、C 和 D。整体比较而言,PM-1 模型的模拟结果在大多数监测点中的排名均最靠前,表明整体上 PM-1 模型较 PM-2 模型和 PM-3 模型具有精度上的优势,能够更适用于区域内多个不同典型麦田的蒸散模拟。

此外,对于 PM-2 模型和 PM-3 模型的模拟结果而言,在 A、B、I、H、G 和 B 这 6 个监测点中 PM-2 模型的

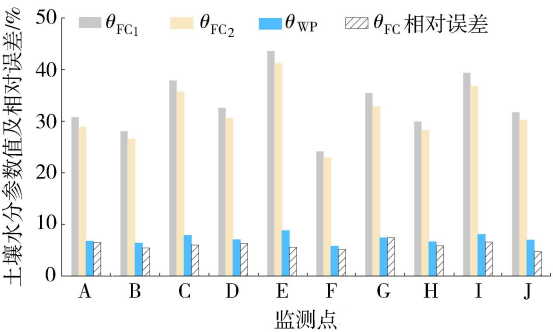


图 3 关键土壤水分参数
Fig.3 Key parameters of soil moisture

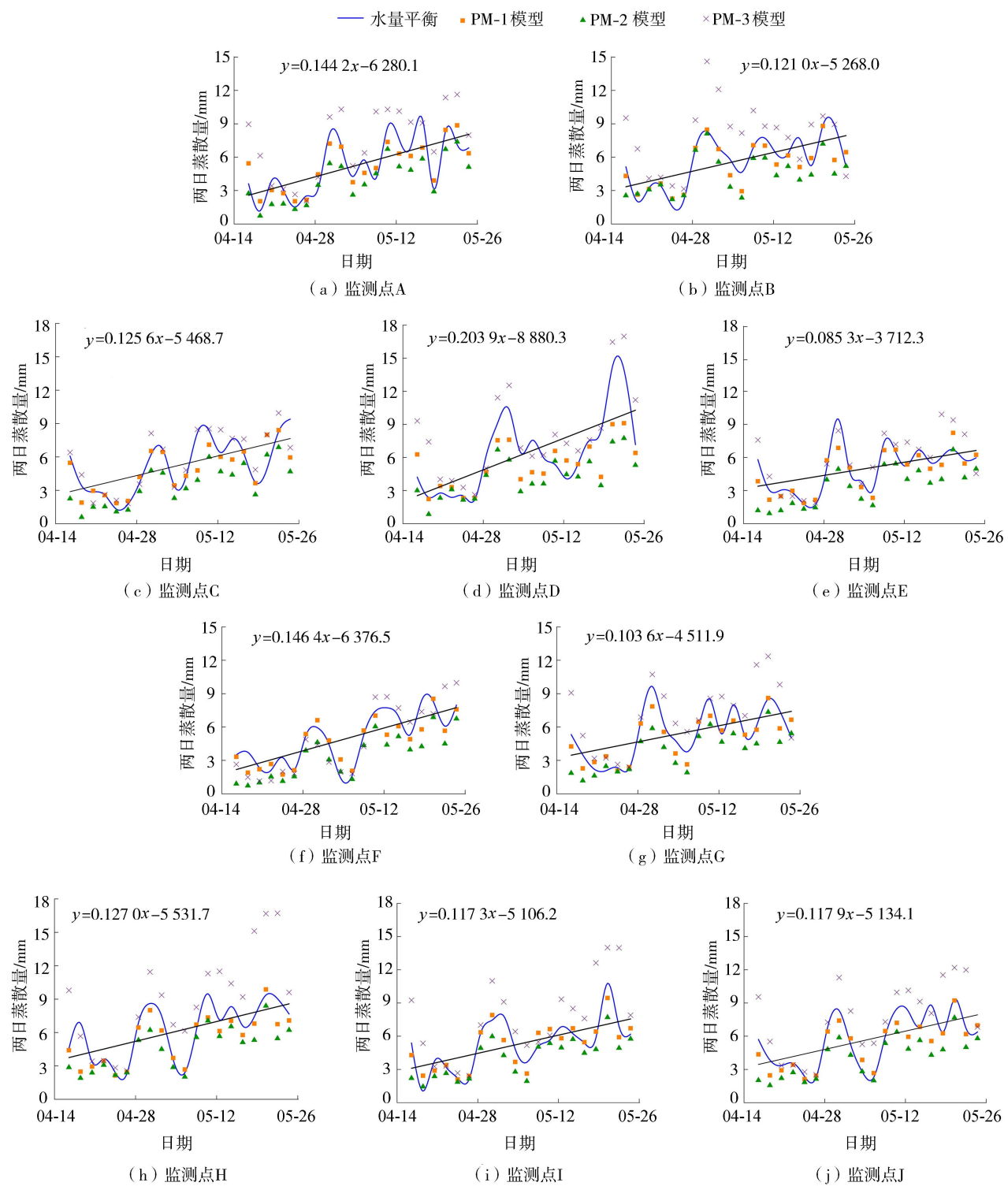


图 4 各监测点蒸散模型模拟值与水量平衡计算值比较

Fig. 4 Comparison of simulated evapotranspiration and water balance results in various monitoring point

排名比 PM-3 模型靠前, 剩余 4 个监测点则 PM-3 模型的排名靠前。从总体模拟更优的数量上看, PM-2 模型比 PM-3 模型更好, 从空间分布而言, PM-2 模型模拟在研究区的东部和中部麦田精度较好, 而 PM-3 模型的较优结果更多地分布于研究区的西部麦田。

3.2.2 时间分布均衡度评价

为了对比分析 3 种 PM 模型模拟的蒸散在时间分布的均衡度, 计算各麦田关键生长期 2 日蒸散量的时间信息熵值, 如图 5 所示。熵越大, 不确定性越强, 变量分布越趋于均匀^[32]。由图 5 可见, 所有监测点中

表3 各监测点蒸散模拟精度比较

Table 3 Precision comparison of simulated evapotranspiration in various monitoring point

监测点	模型	MAE/mm	RMSE/mm	NRMSE	R^2	AI	GPI	排名
A	PM-1	0.937	1.116	0.215	0.805	0.937	3.615	1
	PM-2	1.444	1.723	0.433	0.828	0.859	-0.216	2
	PM-3	2.229	2.848	0.384	0.595	0.767	-4.824	3
B	PM-1	0.808	1.162	0.220	0.746	0.917	3.357	1
	PM-2	1.371	1.824	0.409	0.596	0.798	-0.078	2
	PM-3	2.485	3.007	0.383	0.514	0.692	-6.327	3
C	PM-1	0.902	1.439	0.294	0.650	0.881	0.033	2
	PM-2	1.860	2.239	0.633	0.634	0.765	-5.862	3
	PM-3	0.913	1.279	0.220	0.791	0.929	0.135	1
D	PM-1	1.758	2.320	0.436	0.715	0.825	0.915	1
	PM-2	2.329	3.054	0.721	0.727	0.721	-3.579	3
	PM-3	1.929	2.442	0.302	0.789	0.895	0.006	2
E	PM-1	0.697	0.937	0.199	0.800	0.938	2.859	1
	PM-2	1.646	2.000	0.594	0.666	0.753	-3.405	3
	PM-3	1.151	1.526	0.263	0.710	0.874	0.000	2
F	PM-1	0.781	1.092	0.236	0.795	0.933	2.352	1
	PM-2	1.617	1.880	0.553	0.794	0.829	-3.156	3
	PM-3	1.194	1.407	0.292	0.808	0.936	-0.048	2
G	PM-1	0.857	1.027	0.203	0.816	0.792	5.022	1
	PM-2	1.608	1.918	0.490	0.732	0.819	-0.594	2
	PM-3	1.653	2.217	0.313	0.738	0.713	-0.795	3
H	PM-1	0.902	1.340	0.247	0.784	0.913	4.296	1
	PM-2	1.619	2.003	0.440	0.760	0.816	-0.060	2
	PM-3	2.847	3.726	0.420	0.685	0.713	-8.319	3
I	PM-1	0.801	0.959	0.186	0.816	0.946	3.801	1
	PM-2	1.309	1.668	0.410	0.765	0.835	-0.036	2
	PM-3	2.241	2.997	0.398	0.667	0.735	-6.189	3
J	PM-1	0.786	1.117	0.214	0.805	0.930	4.797	1
	PM-2	1.592	1.989	0.485	0.739	0.799	-0.459	2
	PM-3	1.984	2.521	0.332	0.716	0.791	-2.679	3
平均值	PM-1	0.923	1.251	0.245	0.773	0.901	3.105	1
	PM-2	1.640	2.030	0.517	0.724	0.799	-1.745	2
	PM-3	1.836	2.397	0.331	0.701	0.805	-2.904	3

PM-1 模型的信息熵值均高于 PM-2 模型和 PM-3 模型,表明 PM-1 模型模拟的蒸散比 PM-2 模型和 PM-3 模型模拟的蒸散在时间分布上更趋于均匀,有序度更高;在监测点 B、D、F、H、I 中 PM-2 模型的信息熵值高于 PM-3 模型,其余 5 个监测点 PM-3 模型高于PM-2 模型。从 10 个监测点的信息熵平均值分析,PM-1 模型、PM-2 模型和 PM-3 模型分别为 4.204 bit、4.158 bit、4.167 bit,也表明 PM-1 模型模拟蒸散在时间分布上具有更高的均衡度,而 PM-2 模型和 PM-3 模型在时间分布均衡度上较接近,其中 PM-2 模型略差。

3.3 讨论

本文 3 种模型都是对 PM 修正模型的修订,不同的修订参数和方式势必造成结果的差异。由式(5)可知,PM 模型中等式右侧分子中的第一项 $\Delta(R_n-G)$ 是可用能量的量化,第二项 $\rho C_p(e_s-e_a)/r_a$ 是空气干燥能力的描述,而分母中是通过地表阻力表示其他环境因子对蒸散的影响^[33]。分母一致的情况下,分子中的可用能量项数值往往远大于空气干燥能力项数值(研究区 2019 年整个小麦关键期可用能量项数值约为空气干燥能力项数值的 116 倍),空气干燥能力项基本处于可忽略

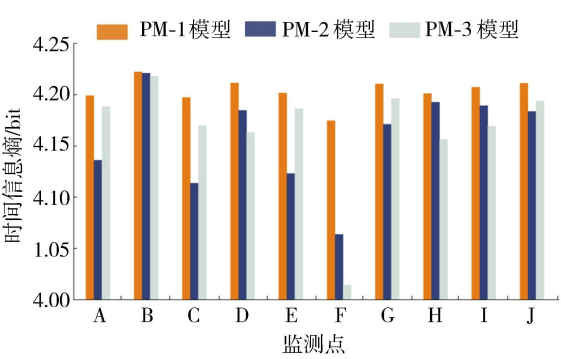


图5 蒸散时间均衡度对比

Fig.5 Temporal comparison of evapotranspiration equilibrium

的地位。PM-1 模型正是利用该特点,抓主要项、舍次要项,采用对可用能量的分割计算 E_c 和 E_s ,相比 PM-2 模型,模型结构更简约、计算较方便且不失准确性;PM-2 模型在计算 E_c 和 E_s 时分割整个地表,均考虑了对空气干燥能力的表达,相比 PM-1 模型,模型物理意义构成更完整;PM-3 模型在分母计算上明显区别于 PM-1 模型和 PM-2 模型,固定地表阻力为 70 s/m 后模型阻力参数的确定易化而通用性变强,但由于最终依赖于一个综合系数对参考作物蒸散进行修订和转化,因而需要对准确获取该系数提高要求。

对于研究结果,PM-1 模型相比 PM-2 模型的模拟精度更高,从模型本身公式表达和参数计算过程中究其原因进行探讨:①PM-2 模型相比 PM-1 模型的 E_s 表达更复杂并接近 PM 修正模型原公式,添加代入了更多的气象参数与土壤水分参数,尽管增强了模型的物理意义,但同时也加大了参数误差累积的可能性,其实际结果表明反而降低了 PM-2 模型的模拟精度。②PM-1 模型和 PM-2 模型在 E_c 公式的表达上差别不大,在 E_s 上的明显差别成为最终蒸散模拟结果较为不同的主要原因。在 E_s 的计算中,PM-1 模型和 PM-2 模型分别参考了文献[16]和[12]确定 $f \sim \theta_{10}$ 和 $r_s \sim m_s$ 之间的关系,前者基于华北平原区大量相关数据率定了该关系,而後者的研究区为美国南部大平原,显然 PM-1 模型与本文研究区适配度更高,保证了 PM-1 模型在研究区的模拟精度。

相较 PM-1 模型和 PM-2 模型,PM-3 模型的蒸散模拟值整体偏高,其原因在于 E_0 具有蒸散能力的性质,而计算的综合经验系数对其修正力度不够。具体而言:①相比 PM-1 模型和 PM-2 模型,PM-3 模型缺少辐射、温度影响因子的修正考虑;②修正影响因子在公式中的置放位置至关重要。PM-1 模型和 PM-2 模型针对 r_c 的修正是对计算过程的修正,而 PM-3 模型针对 E_0 的修正,是对计算结果的修正,前者物理成因上的关联更紧密具体,后者存在修正了整个公式中无物理联系的其余参数的可能而产生误差。

4 结 论

a. 由模拟结果的精度对比分析可知,在冬小麦关键生长期,PM-1 模型的农田蒸散模拟精度最高, R^2 和 GPI 的平均值分别可达 0.773 和 3.105;其次是 PM-2 模型, R^2 和 GPI 的平均值分别为 0.724 和 -1.745;PM-3 模型的模拟精度最低, R^2 和 GPI 的平均值分别为 0.701 和 -2.904。

b. 从模拟结果的时间分布均衡度来说,PM-1 模型的信息熵值明显高于 PM-2 模型和 PM-3 模型,具有高均衡度和有序度的特点。

c. PM-1 模型、PM-2 模型和 PM-3 模型各具优势和局限,综合分析表明,PM-1 模型更适应研究区不同典型麦田关键生长期的蒸散模拟,可作为邯郸市永年区蒸散模拟和修订的工具。

参考文献:

[1] 王振龙,范月,吕海深,等. 基于气象-生理的夏玉米作物系数及蒸散估算[J]. 农业工程学报,2020,36(11):141-148. (WANG Zhenlong,FAN Yue,LYU Haishen,et al. Estimation of summer maize crop coefficient and evapotranspiration based on meteorology-physiology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(11):141-148. (in Chinese))

[2] 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. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 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. (in Chinese))

[5] 季永月,陈吉龙,唐青青,等. 基于知识图谱的长江流域内地表蒸散研究进展[J]. 水资源保护,2022,38(2):128-138. (JI Yongyue,CHEN Jilong,TANG Qingqing,et al. Research progress on land-surface evapotranspiration in the Yangtze River Basin based on knowledge mapping[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):128-138. (in Chinese))

[6] 陈晗,黄津辉. 中国南方农田蒸散量实测及其影响因素分析[J]. 水资源保护,2017,33(6):79-86. (CHEN Han,HUANG

- Jinhui. Study on in-situ evapotranspiration measurement and its influential factors in farmland in southern China[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 79-86. (in Chinese))
- [7] 安彬, 肖薇薇. 汉江上游流域潜在蒸散量敏感性分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 59-65. (AN Bin, XIAO Weiwei. Sensitivity analysis of potential evapotranspiration in upper Hanjiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 59-65. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] 付军, 丁志宏, 冯平. 新疆降水量与参考作物腾发量的年际变化特性[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(6): 44-50. (FU Jun, DING Zhihong, FENG Ping. Characteristics of interannual change of precipitation and reference evapotranspiration in Xinjiang area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 44-50. (in Chinese))
- [10] MONTEITH J L. Evaporation and environment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1965: 205-234.
- [11] 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.
- [12] 孙亮, 陈仲新. 应用 Penman-Monteith 公式和土壤湿度指数估算区域地表蒸散[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 101-108. (SUN Liang, CHEN Zhongxin. Estimation of regional evapotranspiration based on Penman-Monteith equation and soil moisture index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 101-108. (in Chinese))
- [13] 莫兴国, 林忠辉, 刘苏峡. 基于 Penman-Monteith 公式的双源模型的改进[J]. 水利学报, 2000(5): 6-11. (MO Xingguo, LIN Zhonghui, LIU Suxia. An improvement of the dual-source model based on Penman-Monteith formula[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(5): 6-11. (in Chinese))
- [14] 李红霞, 张永强, 张新华, 等. 遥感 Penman-Monteith 模型对区域蒸散发的估算[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(4): 457-461. (LI Hongxia, ZHANG Yongqiang, ZHANG Xinhua, et al. Estimation of regional transpiration and evaporation using Penman-Monteith equation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(4): 457-461. (in Chinese))
- [15] 王海波, 马明国. 基于遥感和 Penman-Monteith 模型的内陆河流域不同生态系统蒸散发估算[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5617-5626. (WANG Haibo, MA Mingguo. Estimation of transpiration and evaporation of different ecosystems in an inland river basin using remote sensing data and the Penman-Monteith equation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5617-5626. (in Chinese))
- [16] 段浩, 赵红莉, 蒋云钟. 遥感 Penman-Monteith 模型中土壤含水量与土壤蒸发的关系[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(3): 31-47. (DUAN Hao, ZHAO Hongli, JIANG Yunzhong. Assessment the relationship between soil evaporation and soil moisture using Remote Sensing Penman-Monteith model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 31-47. (in Chinese))
- [17] 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. (in Chinese))
- [18] 张方敏, 申双和, 金之庆. 参考作物蒸散模型对比分析及评价[J]. 气象科学, 2009, 29(6): 749-754. (ZHANG Fangmin, SHEN Shuanghe, JIN Zhiqing. Evaluation on models for reference crop evapotranspiration[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(6): 749-754. (in Chinese))
- [19] LINVOLAK P, 蔡焕杰, QAISAR S, 等. 关中地区夏玉米和冬小麦不同蒸发蒸腾量估算方法的研究[J]. 节水灌溉, 2019(8): 39-47. (LINVOLAK P, CAI Huanjie, QAISAR S, et al. Study on different methods for estimating evapotranspiration of summer maize and winter wheat in Guanzhong Area[J]. Water Saving Irrigation, 2019(8): 39-47. (in Chinese))
- [20] 吕玉平, 徐俊增, 李斌, 等. Priestley-Taylor 和 Hargreaves 公式在高矮两种参考作物上的适应性与率定[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(6): 47-51. (LYU Yuping, XU Junzeng, LI Bin, et al. Calibration of Priestley-Taylor and Hargreaves and its applicability for both alfalfa and grass reference crops[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6): 47-51. (in Chinese))
- [21] 伍海, 夏军, 赵玲玲, 等. 变化环境下 12 种潜在蒸散发估算方法在不同干湿区的适用性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 1-11. (WU Hai, XIA Jun, ZHAO Lingling, et al. Application of 12 potential evapotranspiration estimation methods under changing environments in different arid and humid regions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 1-11. (in Chinese))
- [22] 王庆杰, 王宪良, 李洪文, 等. 华北一年两熟区玉米秸秆覆盖对冬小麦生长的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 192-198. (WANG Qingjie, WANG Xianling, LI Hongwen, et al. Effect of maize straw mulching on winter wheat growth in double cropping area of Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 192-198. (in Chinese))
- [23] 陈晓燕, 陆桂华, 秦福兴, 等. 土壤传递函数法在确定田间持水量中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33

(2):170-172. (CHEN Xiaoyan, LU Guihua, QIN Fuxing, et al. Determination of field capacity with pedo-transfer functions method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2005,33(2):170-172. (in Chinese))

[24] 邢杰. 粘粒含量对砂壤土水分常数的影响[J]. 内蒙古农业科技,2013(6):31-32. (XING Jie. The effects of clay content on soil moisture constant[J]. Inner Mongolia Agricultural Science And Technology,2013(6):31-32. (in Chinese))

[25] 李冰,刘榕源,刘素红,等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报,2012,28(13):160-165. (LI Bing,LIU Rongyuan,LIU Suhong,et al. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, ,2012,28(13):160-165. (in Chinese))

[26] 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.

[27] NOILHAN J,PLANTON S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models[J]. Monthly Weather Review,1989,117(3):536-549.

[28] 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. (LI Jun,HAN Fengming TONG Xiaojuan,et al. Evapotranspiration models for a winter wheat field: the improvements and analyses on their sensitivities to the resistance parameters[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2014,35(6):635-643. (in Chinese))

[29] 梁文清. 冬小麦、夏玉米蒸发蒸腾及作物系数的研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2012.

[30] FAN Junliang,WANG Xiukang, WU Lifeng,et al. New combined models for estimating daily global solar radiation based on sunshine duration in humid regions;a case study in South China[J]. Energy Conversion and Management,2018,156:618-625.

[31] 肖璐,崔宁博,赵璐,等. 西北地区夏玉米不同生育期蒸发蒸腾量模拟模型适用性评价[J]. 灌溉排水学报,2019,38(增刊 2):20-29. (XIAO Lu,CUI Ningbo,ZHAO Lu,et al. Applicability evaluation of evapotranspiration estimate models for different growth stages of summer maize in northwest China [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38 (Sup2): 20-29. (in Chinese))

[32] 王富强,赵乃立,袁建平,等. 基于信息熵原理的东北地区参考作物蒸散量时空特征分析[J]. 水利水电科技进展,2016,36(4):6-12. (WANG Fuqiang, ZHAO Naili, YUAN Jianping, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in northeast China based on information entropy theory [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(4):6-12. (in Chinese))

[33] 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]. Transactions Atmospheric Sciences,2020,43(1):59-75. (in Chinese))

(收稿日期:2022 - 01 - 22 编辑:胡新宇)

(上接第 39 页)

[19] 李致家,孔祥光,朱兆成,等. 河道洪水实时预报的半自适应模型研究[J]. 水科学进展,1998,9(4):367-372. (LI Zhijia, KONG Xiangguang,ZHU Zhaocheng,et al. Half-self adaptive updating Kalman filter model of channel flow routing[J]. Advances in Water Science,1998,9(4):367-372. (in Chinese))

[20] 俞彦,张行南,张鹏,等. 基于 SCS 模型和新安江模型的雨量预警指标综合动态阈值对比[J]. 水资源保护,2020,36(3):28-33. (YU Yan, ZHANG Xingnan, ZHANG Peng, et al. Comparison of comprehensive dynamic threshold of rainfall warning indicators based on SCS model and Xin’ anjiang model [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):28-33. (in Chinese))

[21] REGGIANI P,TODINI E,MEIßNER D. On mass and momentum conservation in the variable-parameter Muskingum method[J]. Journal of Hydrology,2016,543:562-576.

[22] MAZZETTI C. TOPKAPI 模型与应用指南[M]. 刘志雨,翁明华,赵春兰,译. 南京:河海大学出版社,2014.

[23] TODINI E,CIARAPICA L. The TOPKAPI model[M]. Mathematical Models of Large Watershed Hydrology. Michgan: Water Resources Publications,2002:471-506.

[24] REGGIANI P,TODINI E,MEIßNER D. A conservative flow routing formulation:Déjà vu and the variable-parameter Muskingum method revisited[J]. Journal of Hydrology,2014,519:1506-1515.

[25] 柳辉. 解非线性方程的牛顿迭代法及其应用[J]. 重庆工学院学报(自然科学版),2007(8):95-98. (LIU Hui. Newton iteration method for nonlinear equation solutions and its application [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology(Natural Science Edition),2007(8):95-98. (in Chinese))

(收稿日期:2021 - 12 - 16 编辑:胡新宇)