

高邮灌区参考作物腾发量预报模型研究

刘梦¹, 仇锦先², 张秭媛³, 王洁⁴, 丁奠元², 刘博^{2*}

(1.扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225002; 2.扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 3.江苏省水资源服务中心, 南京 210029; 4.扬州市水利局, 江苏 扬州 225009)

摘要:【目的】探索高邮灌区的参考作物腾发量 (ET_0) 预报方法, 提升灌溉预报精度。【方法】基于高邮灌区 2003—2017 年实测气象数据及 2016—2017 年气温预报数据, 以 FAO-56 Penman-Monteith (PM) 计算的 ET_0 为基准, 将气温预报数据代入率定后的 Blaney-Criddle (BC)、Hargreaves-Samani (HS)、McCloud (MC) 和简化的 PM (PMT) 模型, 比较不同模型的 ET_0 预报精度。【结果】基于上述 4 种模型进行 ET_0 预报时, 1—7 d 预见期的平均均方根误差分别为 1.07、1.00、1.16、0.99 mm/d, 绝对误差平均值分别为 0.85、0.74、0.94、0.75 mm/d, 相关系数平均值分别为 0.79、0.81、0.76、0.81。【结论】HS 和 PMT 模型的预报精度最好, 优于 BC 和 MC 模型, MC 模型的预报精度最差。建议采用率定后的 HS 和 PMT 模型对高邮灌区 ET_0 进行预报。

关键词: 参考作物腾发量; 气温预报; 灌溉

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023439

刘梦, 仇锦先, 张秭媛, 等. 高邮灌区参考作物腾发量预报模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 28-33, 49.

LIU Meng, QIU Jinxian, ZHANG Liyuan, et al. Predictive models for reference evapotranspiration in Gaoyou irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 28-33, 49.

0 引言

【研究意义】2020 年中国水资源公报显示, 我国农业用水量为 3 612.4 亿 m^3 , 占总用水量的 62.1%^[1]。合理制定灌溉决策, 减少农业用水量, 是缓解我国水资源短缺的重要手段。合理评估作物需水量是制定灌溉决策的基础, 然而作物需水量难以直接测定, 通常采用参考作物腾发量 (ET_0) 与作物系数相乘来间接估算。因此, 准确预报 ET_0 对于实现精准灌溉、提高灌溉管理水平和水资源利用效率具有重要意义^[2-4]。

【研究进展】国内外已开展了大量 ET_0 预报研究, 预报方法主要分为直接法和间接法^[5-6]。直接法主要通过分析历史 ET_0 数据在时间序列上的变化规律, 从而预测未来 ET_0 , 这类方法适用于中长期灌溉决策。茆智等^[7]通过分析历史数据与 ET_0 的年内变化规律, 提出了均值修正法; Trajkovic 等^[8]利用人工神经网络模型对塞尔维亚 7 个站点的 ET_0 进行了预报; Ferreira

等^[9]利用人工神经网络、支持向量机算法估算了巴西 203 个站点的 ET_0 。随着天气预报数据的精度和预见期的提高, 目前围绕 ET_0 预报研究的重点逐步转向间接法^[10], 即以气象预报数据为输入, 结合预报模型对逐日 ET_0 进行预报, 这类预报方法可以及时反映作物需水情况, 便于实时调整灌溉策略, 更适用于制定短期灌溉决策。Feng 等^[11]利用 Hargreaves 模型及温度数据, 估算了四川盆地 ET_0 ; Liu 等^[12]比较了 5 种组合模型、6 种辐射模型和 5 种温度模型在半干旱地区的精度; Yang 等^[13]利用简化的 FAO-56 Penman-Monteith (PMT) 模型进行了 ET_0 预报。由于气温预报数据最易获取, 同时预报精度相对较高, 因此基于气温的 ET_0 预报模型应用最为广泛。【切入点】高邮灌区是江苏省重要的粮食主产区, 灌区存在水资源匮乏、引水不畅等问题, 导致部分农田水分亏缺, 水资源供需矛盾突出。因此, 有必要针对高邮灌区开展 ET_0 预报研究, 对于缓解灌区供需矛盾、保障粮食安全具有重要意义。然而, 目前仍缺乏高邮灌区 ET_0 预报研究。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究选取目前广泛应用的 BC、HS、MC 和 PMT 模型预报高邮灌区 ET_0 , 比较 4 种模型的预报精度, 提出最适用于高邮灌区的 ET_0 预报模型, 为灌区灌溉预报、水资源调度与管理提供依据。

收稿日期: 2023-09-19 修回日期: 2024-01-02

基金项目: 国家自然科学基金 (52079119); 江苏省水利厅科技合作项目 (JSZC-320000-HYGS-C2023-00472); 江苏省高等学校基础科学研究面上项目 (21KJB210021)

作者简介: 刘梦 (1994-), 女, 初级工程师, 硕士, 主要从事农田水利规划研究。E-mail: 373832607@qq.com

通信作者: 刘博 (1992-), 男, 讲师, 博士, 主要从事农田生态水文研究。E-mail: boliu@yzu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

1 材料与方法

1.1 研究区概况

高邮灌区地处江苏省中部里下河地区,位于南水北调东线工程源头段,灌区总面积 649 km²,有效灌溉面积 393 km²,耕地面积 421 km²。灌区粮食作物以水稻和小麦为主,经济作物主要有油菜、蔬菜、胡桑、大豆,为典型的南方平原灌区。灌区用水主要为农业用水。高邮灌区属于亚热带湿润气候区,2 m 高度处年平均风速为 1.8 m/s,年平均气温为 15.1 ℃,年平均降水量为 1 037 mm。灌区内气象站位置如图 1 所示。



图1 高邮灌区示意图

Fig.1 Sketch map of Gaoyou irrigation district

1.2 数据来源

历史气象数据获取自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>),本研究收集了高邮站 2003 年 1 月 1 日—2017 年 12 月 31 日的逐日最低气温、最高气温、日照时间、相对湿度及风速。气温预报数据来自中国天气网 (<http://www.weather.com.cn>),本研究抓取了高邮 2016 年 1 月 1 日—2017 年 12 月 31 日、预见期为 1—7 d 的最高气温和最低气温数据。

1.3 ET_0 计算方法

1.3.1 FAO-56 Penman-Monteith 公式

FAO-56 Penman-Monteith (PM) 公式由联合国粮农组织 (FAO) 于 1998 年提出,具有较高的普适性和扎实的理论基础,因此目前应用最为广泛。由于 ET_0 无法实测,本研究以 PM 公式计算出的 ET_0 值为基准,分析 ET_0 预报值的偏差程度,PM 公式为^[14]:

$$ET_{0,PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \quad (1)$$

式中: $ET_{0,PM}$ 为采用 PM 公式计算得到的参考作物腾发量 (mm/d); Δ 为饱和水汽压-气温曲线斜率 (kPa/℃); R_n 为净辐射量 (MJ/(m² d)); G 为土壤热通量 (MJ/(m² d)); γ 为湿度表常数 (kPa/℃); T

为平均气温 (℃); u_2 为 2 m 高度处风速 (m/s); e_s 为饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa)。

1.3.2 ET_0 预报模型

1) BC 模型

BC 模型假设在土壤水分充足时, ET_0 与时段内平均气温和最大可能白昼时间占全年最大可能白昼时间的百分比有关,计算式如下^[15-16]:

$$ET_{0,BC} = p(0.46T + 8.13), \quad (2)$$

式中: $ET_{0,BC}$ 为采用 BC 模型计算得到的参考作物腾发量 (mm/d); p 为日最大可能白昼时间占全年最大可能白昼时间的百分比 (%),与日序数、纬度相关。

2) HS 模型

HS 模型只需输入最高气温和最低气温,计算式如下^[17-18]:

$$ET_{0,HS} = 0.408C \cdot R_a \cdot (T_{\max} - T_{\min})^E \cdot \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right), \quad (3)$$

式中: $ET_{0,HS}$ 为采用 HS 模型计算得到的参考作物腾发量 (mm/d); R_a 为大气顶太阳辐射量 (MJ/(m² d)),与日序数、纬度有关; $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别为日最高气温和最低气温 (℃); C 、 E 为系数,存在区域变异性,需要进行地区校正。

3) MC 模型

MC 模型最早被用来计算草地潜在腾发量,计算式为^[12]:

$$ET_{0,MC} = K_{MC} \cdot W^{1.8T}, \quad (4)$$

式中: $ET_{0,MC}$ 为采用 MC 模型计算得到的参考作物腾发量 (mm/d); K_{MC} 和 W 为系数,默认值分别为 0.254 和 1.07,需要进行地区校正。

4) PMT 模型

PMT 模型为简化的 PM 模型,将太阳辐射量和实际水汽压简化为与温度相关的函数,风速取为定值 2 m/s,其计算式为^[13]:

$$R_s = K \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \cdot R_a, \quad (5)$$

$$e_a = 0.6108 \exp \frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}, \quad (6)$$

式中: R_s 为太阳辐射量 (MJ/(m² d)); R_a 为大气顶太阳辐射量 (MJ/(m² d)); Hargreaves^[19]建议 K 在内陆和沿海地区分别取值 0.16 和 0.19,本研究基于高邮站点实测辐射数据校正了 K ,值取为 0.18。

1.4 模型校正

基于温度的 ET_0 预报模型具有地区变异性,在开展 ET_0 预报前对其进行地区校正可显著提高预报精度^[10,20]。由于没有 ET_0 实测数据,本研究以实测气象数据代入 PM 公式的计算值 ($ET_{0,PM}$) 为基准,以 2003—2012 年作为率定期,对 BC、HS、MC 和

PMT 模型进行率定。经 2013—2015 年验证后, 将率定的参数应用于 2016—2017 年预报期。对于 HS 模型和 MC 模型, 由于其本身包含地区变异性的参数, 故采用最小二乘法率定参数。对于 BC 模型和 PMT 模型, 使用线性回归法开展地区校正, 校正式如下^[10,20]:

$$ET_{0,PM}=a+b\cdot ET_{0,e}, \quad (7)$$

式中: $ET_{0,PM}$ 为采用 PM 公式计算得到的参考作物腾发量 (mm/d); $ET_{0,e}$ 为原模型计算得到的参考作物腾发量 (mm/d); a 、 b 为校正系数。

1.5 精度评价

选取均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE)、相关系数 (r) 和纳什效率系数 (NSE) 对模型的校正结果、气温及 ET_0 预报精度进行评价。各指标计算方法详见文献[5-6]。

表 1 各模型参数率定结果

Tab.1 Calibration results for different models

参数	BC 模型		HS 模型		MC 模型		PMT 模型	
	a	b	C	E	K_{MC}	W	a	b
率定值	0.733 4	0.823 5	0.002 2	0.525 2	1.270 3	1.026 3	0.091 0	0.979 9

图 2 为验证期各模型的 ET_0 计算值 ($ET_{0,BC}$ 、 $ET_{0,HS}$ 、 $ET_{0,MC}$ 和 $ET_{0,PMT}$) 与 PM 公式的 ET_0 计算值 ($ET_{0,PM}$) 的拟合散点图。各模型验证期 ET_0 计算值与 $ET_{0,PM}$ 的线性回归斜率分别为 0.95、0.97、0.96 和 0.95, 表明 4 种模型的 ET_0 计算值略小于 $ET_{0,PM}$, 这与人^[21]研究结果相似。对于 HS 和 PMT 模型, 散点较为均匀地分布在 $y=x$ 线两侧; 对于 BC 和 MC 模型, 当 $ET_{0,PM}$

2 结果与分析

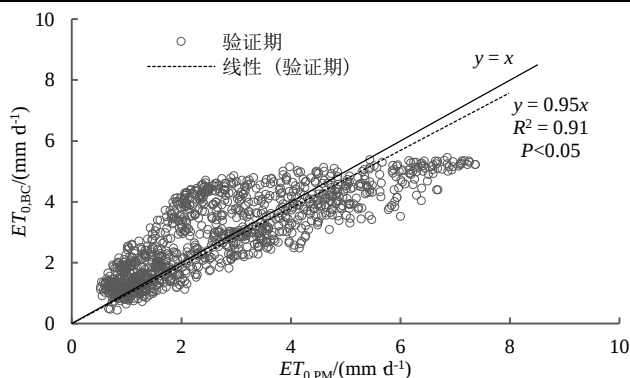
2.1 模型校正结果

4 种模型的参数率定结果见表 1。HS 模型的参数 C 和 E 率定结果分别为 0.002 2 和 0.525 2, 与 FAO 推荐值 0.002 3 和 0.5 较为接近。对于 MC 模型, 参数 K_{MC} 的率定结果与默认值相差较大, 参数 W 的率定结果与默认值较为接近。BC 模型的参数 b 率定结果小于 1 且参数 a 较大, 表明 BC 模型在率定前会高估 ET_0 , 但当 ET_0 较小时存在低估风险; PMT 模型的参数 b 率定结果接近 1, 参数 a 略大于 0, 表明该模型率定前、后的 ET_0 较为接近。表 2 显示了各模型率定前、后的评价指标值, 总体来看, 率定后模型的计算精度有所提升, 其中 HS 和 PMT 模型率定前、后的评价指标值接近, 表明这 2 个模型的结构适用于研究区 ET_0 的估算。

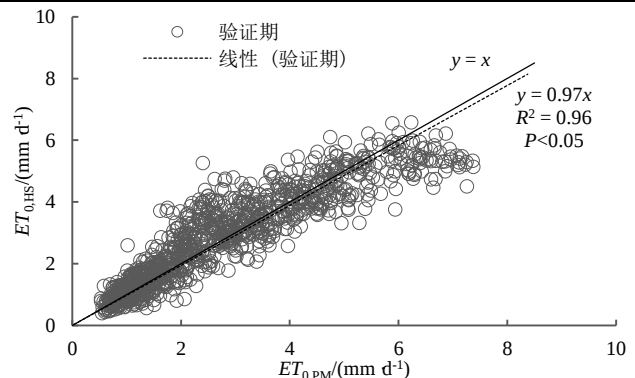
表 2 模型率定前、后预报精度评价指标值

Tab.2 Statistics results of forecast accuracy before and after calibration for different models

模型	率定期						验证期					
	RMSE/(mm d ⁻¹)		MAE/(mm d ⁻¹)		NSE		RMSE/(mm d ⁻¹)		MAE/(mm d ⁻¹)		NSE	
	原模型	率定后	原模型	率定后	原模型	率定后	原模型	率定后	原模型	率定后	原模型	率定后
BC	1.81	0.95	1.54	0.76	-0.19	0.67	1.94	0.97	1.67	0.77	-0.36	0.66
HS	0.64	0.63	0.47	0.47	0.85	0.85	0.67	0.67	0.49	0.49	0.84	0.84
MC	2.20	1.06	1.61	0.82	-0.76	0.63	2.30	0.99	1.58	0.82	-0.92	0.64
PMT	0.62	0.61	0.45	0.44	0.86	0.87	0.64	0.64	0.45	0.45	0.85	0.85



(a) $ET_{0,BC}$ 与 $ET_{0,PM}$



(b) $ET_{0,HS}$ 与 $ET_{0,PM}$

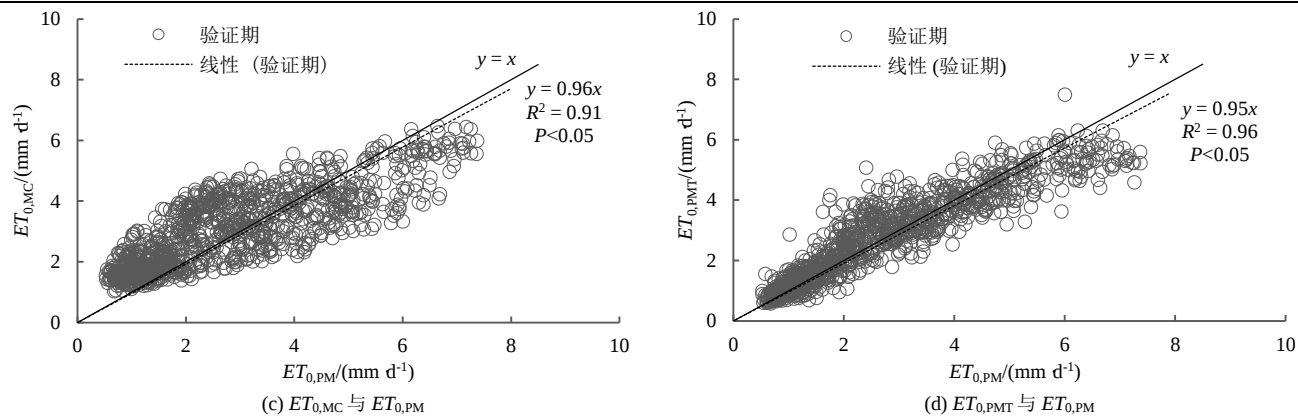


图 2 各模型验证期 ET_0 计算值与 $ET_{0,PM}$ 拟合情况
Fig.2 Relationship between the calculated ET_0 from different forecast models and the $ET_{0,PM}$

2.2 气温预报精度

表 3 为最低气温和最高气温预报精度的评价指标。随着预见期的增加,最低气温和最高气温的 $RMSE$ 和 MAE 逐渐增加, r 逐渐减小,表明气温预报精度随预见期的增加而降低。最低气温的 $RMSE$ 和 MAE 明显小于最高气温,1—7 d 预见期的最低气温和最高气温的平均 $RMSE$ 分别为 1.85 °C 和 3.03 °C,平均 MAE 分别为 1.42 °C 和 2.37 °C。最低气温的 r 高于最高气温,1—7 d 预见期最低气温和最高气温的平均 r 分别为 0.98 和 0.95,表明最低气温的预报精度高于最高气温。结合以往文献标准^[5,22],高邮灌区气温预报结果可以用于 ET_0 预报。

表 3 气温预报精度评价指标

Tab.3 Statistics results of temperature forecast accuracy

预见期/d	最低气温			最高气温		
	$RMSE/^\circ C$	$MAE/^\circ C$	r	$RMSE/^\circ C$	$MAE/^\circ C$	r
1	1.38	1.04	0.99	2.76	2.17	0.96
2	1.57	1.16	0.99	2.86	2.25	0.95
3	1.65	1.21	0.98	2.93	2.31	0.95
4	1.68	1.30	0.98	3.07	2.39	0.95
5	1.87	1.49	0.98	3.08	2.41	0.95
6	2.05	1.61	0.98	3.13	2.47	0.94
7	2.73	2.15	0.96	3.36	2.60	0.94
平均值	1.85	1.42	0.98	3.03	2.37	0.95

2.3 ET_0 预报精度

图 3 为 4 种模型 ET_0 预报值($ET_{0,BC}$ 、 $ET_{0,HS}$ 、 $ET_{0,MC}$ 和 $ET_{0,PMT}$)与 PM 公式计算值($ET_{0,PM}$)的季节变化。4 种模型预报值与 $ET_{0,PM}$ 的季节变化趋势基本吻合,且 1 d 预见期的吻合程度明显高于 4 d 和 7 d 预见期。10 月—次年 2 月,MC 模型的 ET_0 预报值偏大,而其他 3 种模型的预报精度较高;3—9 月,当 $ET_{0,PM}$ 值过大或过小时,各模型预报效果均较差,这可能是由于 4 种模型的气象输入要素仅为气温,而 ET_0 还与太阳辐射量、风速和湿度有关^[21]。MC 模型在 10 月—次年 2 月存在高估现象,这是因为在 MC 模型中 $ET_{0,MC}$ 与平均气温具有指数关系,当气温较低时, $ET_{0,MC}$ 随气温降低的速度较慢,因而 $ET_{0,MC}$ 存在高估,

而其他几个模型在一定程度上考虑了辐射项,如 BC 模型考虑了日最大可能白昼时间,HS 模型考虑了大气顶太阳辐射量,PMT 模型则估算了太阳辐射量。MC 模型这一特性也使得其在气温较高时可以较好地模拟 ET_0 的高值,但 MC 模型总体精度仍然较差。3—9 月,天气变化较为复杂,当饱和水汽压差较低或较高时,只有 PMT 模型考虑了饱和水汽压差,因而 PMT 模型可以在一定程度上捕捉较高或较低的 ET_0 。

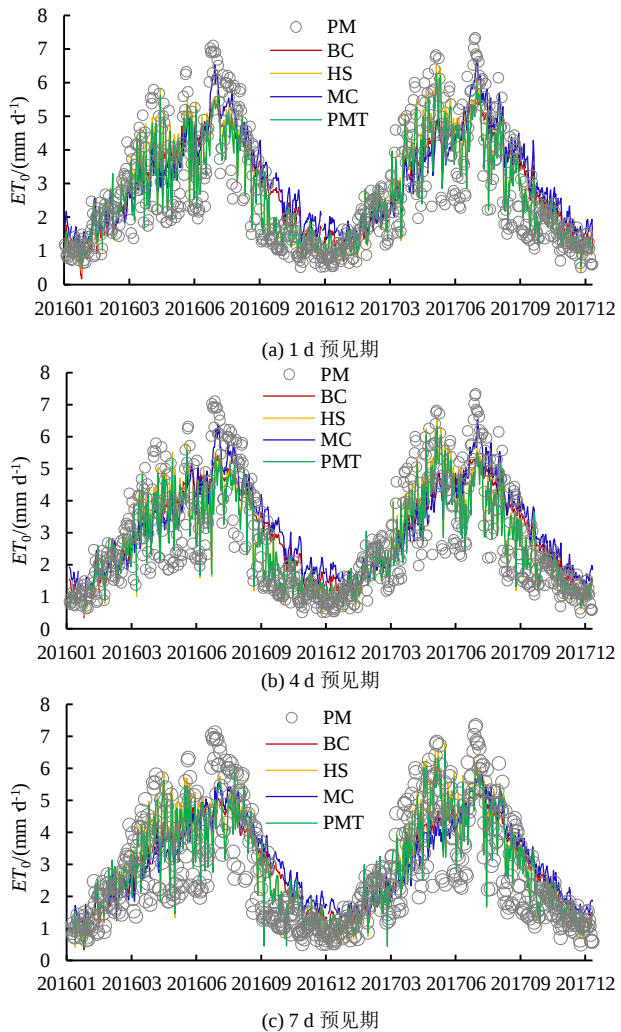


图 3 各模型 ET_0 预报值与 PM 公式计算值的逐日变化过程
Fig.3 Daily variations of forecast ET_0 from different models and the ET_0 calculated by the PM model

表 4 为各模型 1—7 d 预见期 ET_0 预报精度的评价指标, 随着预见期的增加, 各模型的 $RMSE$ 和 MAE 增大, r 减小, 表明各模型 ET_0 预报精度随预见期的增加而降低。BC、HS、MC 和 PMT 模型 1—7 d 预见期的平均 $RMSE$ 分别为 1.07、1.00、1.16、0.99 mm/d, 平均 MAE 分别为 0.85、0.74、0.94、0.75 mm/d, 平均 r 分别为 0.79、0.81、0.76、0.81。PMT 模型和 HS 模型的各项统计指标十分接近, 且 $RMSE$ 和 MAE 最低, r 最高。根据综合评价法 (在有 3 个统计指标的情况下, 当某一模型有 2 个或 3 个统计指标最优, 认为该模型最佳), PMT 模型和 HS 模型的预报精度并列最高, 而 BC 和 MC 模型预报精度相对较低。1—7 d 预见期 PMT 和 HS 模型预报精度十分接近, 明显高于其他 2 种模型。

表 4 各模型 1—7 d 预见期统计指标

Tab.4 Statistics results of different models for lead time 1—7 d

统计指标	预见期/d	BC	HS	MC	PMT
$RMSE/$ (mm d ⁻¹)	1	1.05	0.93	1.14	0.93
	2	1.06	0.95	1.15	0.94
	3	1.07	0.98	1.16	0.98
	4	1.08	1.03	1.17	1.03
	5	1.07	1.02	1.17	1.02
	6	1.08	1.00	1.18	1.00
	7	1.09	1.09	1.18	1.07
	平均值	1.07	1.00	1.16	0.99
$MAE/$ (mm d ⁻¹)	1	0.83	0.69	0.92	0.70
	2	0.84	0.71	0.93	0.72
	3	0.85	0.73	0.94	0.74
	4	0.85	0.77	0.94	0.77
	5	0.85	0.74	0.95	0.75
	6	0.85	0.75	0.95	0.75
	7	0.87	0.80	0.96	0.79
	平均值	0.85	0.74	0.94	0.75
r	1	0.80	0.84	0.77	0.84
	2	0.79	0.83	0.76	0.83
	3	0.79	0.82	0.76	0.82
	4	0.79	0.80	0.76	0.80
	5	0.79	0.80	0.76	0.80
	6	0.78	0.81	0.75	0.81
	7	0.78	0.79	0.74	0.79
	平均值	0.79	0.81	0.76	0.81

3 讨论

在对各模型的 ET_0 预报精度进行比较时, 尽管 4 种模型的气象输入要素均为气温, 但由于不同模型结构的差异, 其预报精度也存在差异。PMT 模型根据气温估算了饱和水汽压差和太阳辐射量, 且在模型中采用了定值为 2 m/s 的风速^[10,13], 模型的物理结构更

为完备。高邮灌区年平均风速为 1.8 m/s, 与模型采用的定值十分接近。HS 和 BC 模型考虑了大气顶太阳辐射量和日最大可能白昼时间, 相比 MC 模型更为完备。以往研究表明, HS 模型在不同气候区均具有较好的预报精度^[10,21]。BC 模型和 MC 模型的结构简单, 通过地区校正后, 其精度仍明显低于 PMT 和 HS 模型, 应考虑模型结构优化, 如冯浩等^[23]对 BC 模型进行了改进, 改进后的模型在陕西关中地区取得了较好的预报结果。总体而言, 在高邮灌区, PMT 模型和 HS 模型的 ET_0 预报精度最高, BC 模型次之, MC 模型预报精度最差。

由于 4 种模型的气象输入要素仅为气温, 模型的预报误差主要来自 2 个方面, 一是模型本身的结构误差^[2,21], 主要体现在当其他气象要素处于极限状态时, ET_0 预报精度会下降。例如, 2016 年 5 月 3 日, 1 d 预见期的最高气温和最低气温与实测气温相差小于 1 °C, 但当日实际风速达到了 4.1 m/s, 日照时间达到了 12.2 h, 导致各模型 ET_0 预报值比实际值低 1.6~2.3 mm/d。另一方面主要是由于气温预报不准确会导致模型预报结果与 $ET_{0,PM}$ 相差较大。例如, 2017 年 8 月 29 日, 实际最低、最高气温分别为 23.3、27.8 °C, 而 1 d 预见期的最低和最高气温分别为 26 °C 和 35 °C, 导致各模型 ET_0 预报值比实际值高 2.2~2.9 mm/d。

基于温度的 ET_0 计算模型是目前广泛使用的 ET_0 预报方法之一, 其优点在于气温预报数据精度较高, 且模型输入简单。本研究比较了 4 种基于温度的 ET_0 预报模型在高邮灌区的表现, 发现高邮灌区最优预报模型为 HS 模型和 PMT 模型。然而, 温度法只输入气温数据, 即使经过地区校正, 其预报精度在极限气象状态时表现仍较差。公共天气预报还提供天气类型和风力等级数据, 可以通过解析法将天气类型和风力等级转化为太阳辐射量和风速^[6,24-25], 从而提高模型精度。也有研究表明, 基于天气类型或风力等级估算的太阳辐射量和风速精度较低^[10,13], 反而可能影响预报精度。例如, Yang 等^[13]指出相比基于天气预报估算的风速, 使用 2 m/s 的固定风速或当地多年平均风速可以获得更准确的 ET_0 预报值。因此, 未来有必要权衡天气预报精度与 ET_0 模型, 对 ET_0 预报模型进行改进。

4 结论

1) 天气预报中最低气温的预报精度高于最高气温, 两者的预报精度均随预见期的增加而降低, 1—7 d 预见期最低气温和最高气温预报值与实测值的 r 均值不低于 0.95, 可应用于 ET_0 预报。

2) 对于高邮灌区, PMT 模型和 HS 模型的预报

精度并列最高,HS模型相比PMT模型结构更加简单,BC模型和MC模型预报精度相对较差。因此,推荐高邮灌区采用PMT或HS模型进行 ET_0 预报。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 水利部水资源管理司. 2020 年度《中国水资源公报》[J]. 水资源开发与管理, 2021, 19(8): 2.
- [2] 刘梦, 罗玉峰, 汪文超, 等. 基于天气预报的漳河灌区参考作物腾发量预报方法比较[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 156-162.
LIU Meng, LUO Yufeng, WANG Wenchao, et al. Comparison of three reference crop evapotranspiration forecasting methods based on short-term weather forecast in Zhanghe irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(19): 156-162.
- [3] FENG Yu, PENG Yong, CUI Ningbo, et al. Modeling reference evapotranspiration using extreme learning machine and generalized regression neural network only with temperature data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 136: 71-78.
- [4] FAN Junliang, WU Lifeng, ZHENG Jing, et al. Medium-range forecasting of daily reference evapotranspiration across China using numerical weather prediction outputs downscaled by extreme gradient boosting[J]. Journal of Hydrology, 2021, 601: 126 664.
- [5] CHANG Xiaomin, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al. Forecast of daily reference evapotranspiration using a modified daily thornthwaite equation and temperature forecasts[J]. Irrigation and Drainage, 2019, 68(2): 297-317.
- [6] LIU Bo, LIU Meng, CUI Yuanlai, et al. Assessing forecasting performance of daily reference evapotranspiration using public weather forecast and numerical weather prediction[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125 547.
- [7] 茆智, 李远华, 李会昌. 逐日作物需水量预测数学模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(3): 253-259.
MAO Zhi, LI Yuanhua, LI Huichang. Study of mathematic model for forecasting daily crop evapotranspiration[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1995, 28(3): 253-259.
- [8] TRAJKOVIC S, TODOROVIC B, STANKOVIC M. Forecasting of reference evapotranspiration by artificial neural networks[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(6): 454-457.
- [9] FERREIRA L B, DA CUNHA F F, DE OLIVEIRA R A, et al. Estimation of reference evapotranspiration in Brazil with limited meteorological data using ANN and SVM: A new approach[J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 556-570.
- [10] YANG Yang, LUO Yufeng, WU Conglin, et al. Evaluation of six equations for daily reference evapotranspiration estimating using public weather forecast message for different climate regions across China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 222: 386-399.
- [11] FENG Yu, JIA Yue, CUI Ningbo, et al. Calibration of Hargreaves model for reference evapotranspiration estimation in Sichuan basin of southwest China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 181: 1-9.
- [12] LIU Xiaoying, XU Chunying, ZHONG Xiuli, et al. Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement[J]. Agricultural Water Management, 2017, 184: 145-155.
- [13] YANG Yang, CUI Yuanlai, BAI Kaihua, et al. Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the reduced-set Penman-Monteith model and public weather forecasts[J]. Agricultural Water Management, 2019, 211: 70-80.
- [14] ALLEN R, PEREIRA L, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56: Rome, Italy, FAO, 1998.
- [15] BLANEY H F, CRIDDLE W D. Determining consumptive use and irrigation water requirements[M]. Washington: U.S. Dept. of Agriculture, 1962.
- [16] NEWTON I H, TAREKUL ISLAM G M, ISLAM A S, et al. A conjugate application of MODIS/Terra data and empirical method to assess reference evapotranspiration for the southwest region of Bangladesh[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(6): 223.
- [17] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96-99.
- [18] AWAL R, HABIBI H, FARES A, et al. Estimating reference crop evapotranspiration under limited climate data in west Texas[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020, 28: 100 677.
- [19] HARGREAVES George. Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in north America and Europe[R]. Logan, Utah: Department of Biology and Irrigation Engineering, Utah State University, 1994.
- [20] 丁加丽, 彭世彰, 徐俊增, 等. 基于温度资料的参考作物蒸发蒸腾量计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(6): 633-637.
DING Jiali, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Calculation method for reference crop evapotranspiration based on temperature data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(6): 633-637.
- [21] 罗玉峰, 李思, 彭世彰, 等. 基于气温预报和 HS 公式的参考作物腾发量预报[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(11): 987-992.
LUO Yufeng, LI Si, PENG Shizhang, et al. Forecasting reference crop evapotranspiration based on temperature forecast and Hargreaves-Samani equation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(11): 987-992.
- [22] ZHANG Lei, CUI Yuanlai, XIANG Zhao, et al. Short-term forecasting of daily crop evapotranspiration using the 'K_c-ET₀' approach and public weather forecasts[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2018, 64(7): 903-915.
- [23] 冯浩, 刘匡, 褚晓升, 等. 基于 Blaney-Criddle 方法估算潜在蒸散量的评价与校准[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 159-167.
FENG Hao, LIU Xia, CHU Xiaosheng, et al. Evaluation and calibration of Blaney-Criddle method for estimating potential evapotranspiration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 159-167.
- [24] CAI Jiabing, LIU Yu, LEI Tingwu, et al. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 145(1/2): 22-35.
- [25] LIN En, QIU Rangjian, CHEN Mengting, et al. Assessing forecasting performance of daily reference evapotranspiration: A comparative analysis of updated temperature penman-monteith and penman-monteith forecast models[J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130 317.

(下转第 49 页)

summer maize under subsurface drip irrigation. **【Method】** The experiment was conducted in a wheat-maize rotation field. The irrigation treatments for the winter wheat were 2 580 m³/hm² (W1), 2 240 m³/hm² (W2), 2 020 m³/hm² (W3), 1 560 m³/hm² (W4). For the summer maize, the irrigation treatments were 1 306 m³/hm² (W1), 1 088 m³/hm² (W2), 814 m³/hm² (W3), 650 m³/hm² (W4). For each irrigation treatment, there were two nitrogen fertilizations for the two crops: 180 kg/hm² (F1) and 100 kg/hm² (F2). During the experiment, we measured soil moisture, nitrogen content, dry mass of the shoots and grain yield of the two crops at different growth stages. We also calculated water consumption, water use efficiency, partial nitrogen fertilizer productivity of the two crops to assess the impact of water-nitrogen coupling on these traits. **【Result】** For winter wheat, the W2F1 was the optimal water-nitrogen coupling which gave the highest grain yield. For summer maize, its grain yield increased with irrigation amount for both fertilization treatment. Soil nitrogen residual content was higher in F1 than in F2. With the increase in irrigation amount in the winter wheat field, residual nitrogen content decreased first followed by an increase. In contrast, residual nitrogen content in the maize field peaked in W1 treatment. The partial productivity of nitrogen fertilizer mirrored the yield of both crops. Water consumption of both crops increased with irrigation amount, yet their water use efficiency increased with irrigation amount initially and then declined when irrigation amount exceeded a threshold value. **【Conclusion】** Analysis of irrigation amount, yield and water use efficiency of the two crops indicates that the optimal irrigation amount and nitrogen fertilization for winter wheat and summer maize were 214 mm and 100 kg/hm², and 103 mm and 100 kg/hm² respectively. They can be used as an improved irrigation and fertilization for maize production in the studied region.

Key words: winter wheat; summer maize; water and nitrogen use efficiency; subsurface drip irrigation; yield

责任编辑：白芳芳

(上接第 33 页)

Predictive models for reference evapotranspiration in Gaoyou irrigation district

LIU Meng¹, QIU Jinxian², ZHANG Liyuan³, WANG Jie⁴, DING Dianyuan², LIU Bo^{2*}

(1. Yangzhou Survey, Design and Research Institute Co. Ltd, Yangzhou 225002, China; 2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. Water Resources Service Center of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China; 4. Yangzhou Water Conservancy Bureau, Yangzhou 225009, China)

Abstract: **【Objective】** Gaoyou irrigation district is located at the low reaches of the Yangtze River in northern Jiangsu province, China. To improve its irrigation management, we compared four models for predicting the reference evapotranspiration (ET_0) in the district. **【Method】** The analysis was based on meteorological data measured from 2003 to 2017 and the temperature forecasted from 2016 to 2017 in the district, from which we calculated the ET_0 using the Penman-Monteith (PM) formula recommended by FAO-56. Using these calculated ET_0 , we forecasted its change using the Blaney-Criddle (BC), Hargreaves-Samani (HS), McCloud (MC) and reduced PM (PMT) model, respectively. **【Result】** For forecasting ET_0 1 to 7 days in advance, the average root mean square error of the BC, HS, MC and PMP model was 1.07, 1.00, 1.16, 0.99 mm/d, respectively; their associated average mean absolute error was 0.85, 0.74, 0.94, 0.75 mm/d, respectively; their associated average correlation coefficient with measured data was 0.79, 0.81, 0.76, 0.81, respectively. Overall, the results of HS and PMT model are comparable and both models are superior to other models for forecasting the ET_0 up to 7 days in advance. **【Conclusion】** Among the four models we compared, the HS and PMT models are more accurate for predicting ET_0 change 1-7 days in advance for the Gaoyou irrigation district.

Key words: reference evapotranspiration; temperature forecast; irrigation

责任编辑：韩 洋