

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.02.011

基于天气预报的参考作物腾发量预报方法比较

徐俊增^{1,2}, 刘文豪¹, 刘博弈¹, 吕玉平¹, 卫琦^{1,2}, 廖林仙¹, 魏征³

(1. 河海大学农业工程学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100038)

摘要:以常州站点为例,收集了 2000—2017 年历史气象观测数据和 2011—2015 年历史天气预报数据,以 FAO56-PM 公式的估算结果为对照,分别对 Hargreaves-Samani 模型、多元回归模型与傅立叶分析模型进行率定和验证,并以 2016-04-21 至 2017-10-24 逐日 1~7 d 天气预报数据为依据,分析评价 3 种率定模型的 ET_0 预报精度。结果表明:率定后的 MR 模型在 1 d、4 d、7 d 预见期的平均绝对误差为 0.751 mm/d,准确率为 87.2%,预报精度均优于 HAR 模型与 FA 模型;均方根误差除在 3 d 预见期时略高于 HAR 模型外,其他预见期均最小。考虑到天气预报准确率随预见期增加而降低,建议预见期不宜大于 3 d。进一步在季节尺度下的精度比较显示,MR 模型在各季节 1~3 d 预见期的预报精度均高于 HAR 模型与 FA 模型,总体预报精度最高。因此,建议采用 MR 模型对常州站点进行 ET_0 预报。

关键词:参考作物腾发量;天气预报;Hargreaves-Samani 模型;多元回归;傅立叶分析; ET_0 预见期中图分类号:S161.4 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2019)02-0156-07

Comparison of three reference crop evapotranspiration forecasting methods based on weather forecast data

XU Junzeng^{1,2}, LIU Wenhao¹, LIU Boyi¹, LYU Yuping¹, WEI Qi^{1,2}, LIAO Linxian¹, WEI Zheng³
(1. College of Agricultural Engineering, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: This study took the Changzhou site as an example, and collected the historical data of meteorological observation during 2000—2017 and the historical data of weather forecast during 2011—2015. We calibrated the Hargreaves-Samani model, the Multiple Regression model and the Fourier analysis model by using the ET_0 calculated by historical meteorological data based on the FAO56-PM formula, and applied these three methods to the daily ET_0 prediction based on the weather forecast for the next one to seven days during the period from April 21, 2016 to October 24, 2017. The results showed that the MR models had the highest prediction accuracy overall with the lowest δ_{MAE} (0.751 mm/d) and the highest δ_{AAC} (87%) during the forecast periods of 1 d, 4 d, and 7 d, except that δ_{RMSE} was slightly higher than the HAR model during the forecast period of 3 d. In view of the fact that the accuracy of the weather forecast decreases with the increase of forecast period, it is suggested that the forecast period of Changzhou station should not be longer than three days. Further comparison on the accuracy of seasonal scale showed that the

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0403202); 江苏水利科技项目 (2016068); 2016 年度江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划 (KYZZ16_0290)

作者简介: 徐俊增 (1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事节水灌溉与农田生态效应研究。E-mail: xjz481@hhu.edu.cn

引用本文: 徐俊增, 刘文豪, 刘博弈, 等. 基于天气预报的参考作物腾发量预报方法比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 156-162.
XU Junzeng, LIU Wenhao, LIU Boyi, et al. Comparison of three reference crop evapotranspiration forecasting methods based on weather forecast data[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 156-162.

prediction accuracy of the MR model during the forecast periods from 1 d to 3 d in each season is higher than those of HAR model and FA model. Overall, the MR model has the highest prediction accuracy and should be used for ET_0 prediction at the Changzhou site.

Key words: evapotranspiration of referencing crop; weather forecast; Hargreaves-Samani model; multiple regression; Fourier Analysis; ET_0 forecast period

参考作物腾发量 ET_0 是水资源与灌溉管理的重要数据^[1], ET_0 的准确预报对于制定作物灌溉制度与实时灌溉调度具有重要意义。目前国内外大多基于时间序列或者历史数据开展 ET_0 预报,常用的方法有4类:经验公式法^[2-3]、时间序列法^[4]、灰色模型^[5]以及智能算法^[6-8]。随着天气预报精度的提高,公共天气预报数据作为重要数据来源被逐渐应用于 ET_0 预报,常用的方法包括简化的 Penman-Monteith 公式^[9-10]、逐日均值修正法^[11]、傅立叶分析(FA)模型^[12]、Hargreaves-Samani(HAR)模型^[13-15]和神经网络模型^[16-18]等。FA模型较逐日均值修正模型的预报精度高,可方便地嵌入灌溉预报系统,具有较强的适应性^[12]。徐俊增等^[19]通过结合公共天气预报数据与季节变化特征提出了日 ET_0 预报的多元回归(MR)模型。刘梦等^[20]在漳河灌区利用 HAR 模型进行了 ET_0 预报,计算结果与 FA056-PM(PM)公式的计算结果具有较高的相关性($R>0.9$)。目前研究多为基于天气预报的单一 ET_0 预报方法,多方法之间的比较仍不多见。开展 ET_0 预报多方法比较,可以验证不同方法在不同空间与时间尺度上的适用性,为建立 ET_0 的预报系统提供参考价值。

HAR、MR、FA 模型由于复杂度低、输入因子(均以最高气温、最低气温以及天气类型作为变量)少的优点,得到广泛的应用,但基于公共天气预报数据的 3 种 ET_0 预报方法的比较仍未见报道。因此,本文以江苏常州站为例,收集常规气象数据与天气预报数据,评价分析 HAR、MR 和 FA 模型在不同预见期的 ET_0 预报精度,研究结果对基于天气预报数据开展作物需水预报和实时灌溉决策具有重要参考价值。

1 数据与方法

1.1 数据来源

以常州站点(120.0°N,31.8°E)为例,在中国气象科学共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)收集了 2000 至 2017 年的历史气象数据,在天气网(<http://www.tianqi.com/>)收集了 2011—2015 年的逐日天气预报数据和 2016-4-21 至 2017-10-24 逐日 1~7 d 的天气预报数据。历史气象资料数据包括:气压 P_a 、风速 U 、最高气温 $T_{\max}$ 、最低气温 $T_{\min}$ 、平均相对湿度 H_R 、日照时数 n 、降雨量 P 等。天气预报数据及信息包括:最高气温、最低气温及天气类型。以同期 PM 公式^[3]计算得到的 ET_0 为对照,开展模型参数的率定(2000—2010 年数据)和验证(2011—2015 年数据),2016-04-21 至 2017-10-24 逐日未来 1~7 d 天气预报数据用于模型的 ET_0 预报精度评价。

1.2 研究方法

1.2.1 HAR 模型

HAR 模型公式为

$$ET_{0,\text{HAR}} = 0.408a(T_{\text{mean}} + b)\Delta_{\text{TR}}^c R_a \tag{1}$$

式中: R_a ——大气天顶辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; T_{mean} ——每日平均气温, $^{\circ}\text{C}$; Δ_{TR} ——日较差; b ——系数,取 17.8; a, c ——率定参数,原始值分别取 0.002 3、0.5。

1.2.2 FA 模型

采用傅立叶级数的二阶展开公式进行 ET_0 预报^[12]:

$$ET_{0t} = \psi_t \left\{ \overline{ET_0} + \sum_{i=1}^2 \left[a_i \cos\left(\frac{2\pi it}{365}\right) + b_i \sin\left(\frac{2\pi it}{365}\right) \right] \right\} \tag{2}$$

式中: ET_{0t} —— t 日 ET_0 预报值, mm/d ; t ——日序数,取值为 1, 2, 3, ..., 365; ψ_t ——天气类型修正系数,根据不同天气类型的 ET_0 值与同日多年平均 ET_0 值之比事先求得^[11],本文选取晴、云、阴、雨 4 种基本天气类型,其余组合天气类型系数均依先后顺序以 3:1 权重组合确定。 $\overline{ET_0}$ ——站点多年日平均值, mm/d ; a_i, b_i ——傅立叶级数二阶分量的系数, i 对应傅立叶级数展开的阶数,本研究利用 1stopt 的回归求解功能计算。

1.2.3 MR 模型

逐月建立以月平均 ET_0 乘以天气预报实时修正系数的逐日 ET_0 预报模型:

$$ET_{0j,t} = \overline{ET_{0j}}\psi_{j,t} = \overline{ET_{0j}}(AI_{WCLt} + BT_{max} + CT_{min} + D)$$
 (3)

式中: $ET_{0j,t}$ ——由回归预报方法得到的每日 ET_0 (j 为月序数)。 $\overline{ET_{0j}}$ ——基于历史气象数据由 PM 公式计算得到的某月内的日均 ET_0 ; A 、 B 、 C 、 D ——率定系数; I_{WCLt} ——天气类型指数,根据天气类型参数表^[19]选取; ψ_{jt} ——实时校正系数,基于历史数据率定。

1.3 预报精度评价指标

采用平均绝对误差 δ_{MAE} 、均方根误差 δ_{RMSE} 、相关系数 R 和准确率 δ_{AAC} 等统计指标评价不同模型的 ET_0 预报精度。 δ_{MAE} 与 δ_{RMSE} 计算公式见文献[14],准确率指 ET_0 预报误差在 1.5 mm/d 以内的天数占总预报天数的百分比^[21]。相关系数 R 的公式如下:

$$R = \frac{\sum_{m=1}^n (ET_{OP,m} - \overline{ET_{0,P}})(ET_{OPM,m} - \overline{ET_{OPM}})}{\sqrt{\sum_{m=1}^n (ET_{OP,m} - \overline{ET_{OP}})^2 \sum_{m=1}^n (ET_{OPM,m} - \overline{ET_{OPM}})^2}}$$
 (4)

式中: $ET_{OP,m}$ ——样本 m 的 ET_0 预报值; $ET_{OPM,m}$ ——PM 公式基于气象数据的实测值; m ——预报样本序数; $\overline{ET_{OP}}$ ——模型预报值; $\overline{ET_{OPM}}$ ——PM 公式计算值序列的均值。

2 结果与分析

表 1 MR 模型参数率定结果与误差统计指标

Table 1 Calibrated parameters and statistical errors of the MR model

月份	率定后模型参数				$\delta_{RMSE}/$ (mm · d ⁻¹)	R
	A	B	C	D		
1	0.586 27	0.024 40	-0.005 54	0.577 61	0.211	0.760
2	0.806 61	0.029 72	0.016 82	0.333 79	0.211	0.851
3	0.778 17	0.023 02	0.019 01	0.156 59	0.197	0.871
4	0.785 29	0.021 98	0.011 96	0.035 03	0.146	0.916
5	0.810 09	0.020 62	0.015 94	-0.189 69	0.116	0.942
6	0.857 12	0.024 08	0.002 60	-0.132 50	0.096	0.959
7	0.876 98	0.004 06	0.030 42	-0.362 19	0.069	0.976
8	0.786 40	0.012 31	0.023 01	-0.378 76	0.076	0.970
9	0.781 96	0.013 79	0.014 98	-0.080 17	0.100	0.943
10	0.702 08	0.012 40	0.018 44	0.076 96	0.142	0.883
11	0.737 29	0.006 43	0.032 43	0.256 71	0.218	0.771
12	0.681 41	0.007 70	0.017 75	0.562 48	0.269	0.643

2.1 预报模型参数率定

MR 模型参数率定结果及其在率定期的误差统计见表 1。HAR 模型的参数率定值与原模型推荐系数略有差异,其中 a 值(0.002 2)有所减小,而 c 值(0.514)则正好相反。进一步分析各模型在率定期的预报精度可以看出,率定后 HAR 模型在率定期的 δ_{RMSE} 和相关系数 R 分别为 0.684 mm/d 和 0.915,满足精度要求。傅立叶分析法预报模型系数经率定后: a_1 、 a_2 分别为-1.89527、-0.02689; b_1 、 b_2 分别为-0.09281、0.05771。率定过程 δ_{RMSE} 为 0.321 mm/d, R 为 0.973,精度维持在较高水平。多元回归预报模型率定过程中 δ_{RMSE} 范围为 0.069 ~ 0.269 mm/d,平均值为 0.154 mm/d,不同月份误差不同,6—9 月误差均低于 0.100 mm/d。 R 在不同月份呈现较大差别,1 月、11 月、12 月 R 值偏低,最小为 0.643,最大为 0.771;4—9 月 R 值较高,最小为 0.916。总体来看,3 种预报模型 ET_0 预报精度较高,可用于实际预报。

2.2 预报模型验证

基于 2011—2016 年逐日天气预报数据评价 HAR 模型、MR 模型和 FA 模型的 ET_0 预报精度。结果表明,当 ET_0 值较小时,3 种模型预报值与 PM 公式计算值的拟合优度较高,而随着 ET_0 值的增大,其拟合优度逐渐下降(图 1)。HAR、MR、FA 模型拟合的 0 截距回归线的斜率分别为 0.957 2、0.905 5、0.889 6,相关系数 R 分别为 0.850 6、0.874 1、0.812 2。可以看出 HAR 与 MR 模型在 PM 公式计算值高于 6 mm/d 时分布较为离散,且预报值偏低,而 FA 模型在 PM 公式计算值为 5 mm/d 以上时就呈现出此现象,致使模型预报精度有所下降。

各模型在验证期的 ET_0 预报精度(表 2)表明,与 PM 公式计算结果相比,各模型在验证期内预报的 ET_0 总量均存在不同程度的偏差。其中 FA 模型的预报偏差最大,预报值偏低 4.44%;MR 模型与之相近,低估了 4.22%;而 HAR 模型则高估了 2.04%。在预报精度评价指标方面,各模型预报准确率(δ_{AAC})均保持在 90% 以上,且 MR 模型的准确率最高,为 94.18%。此外,HAR、MR、FA 模型在验证期的 δ_{MAE} 分别为 0.567 mm/d、

0.534 mm/d、0.601 mm/d; δ_{RMSE} 分别为 0.781 mm/d、0.559 mm/d、0.759 mm/d。综合各模型在验证期的预报精度评价指标,可以发现 MR 模型准确度最高,各项误差均最小,HAR 模型表现均优于 FA 模型。

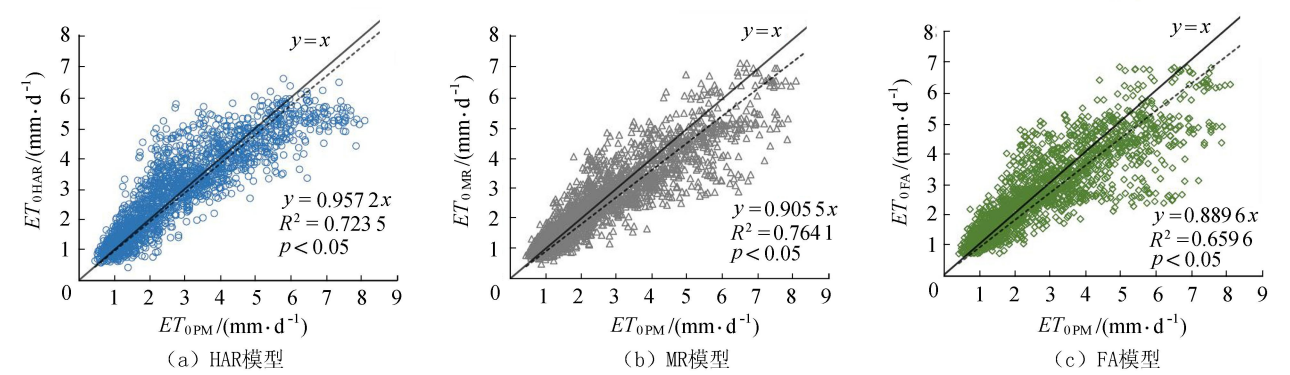


图 1 验证期 ET_0 预报值与 PM 公式计算值对比

Fig.1 Comparison between predicated ET_0 and calculated ET_0 by FAO56-PM

2.3 3 种模型不同预见期 ET_0 预报精度评价

基于 2016-04-21—2017-10-24 期间逐日 1~7 d 的天气预报数据,分别采用 3 种模型进行不同预见期(1 d、4 d、7 d)的 ET_0 预报。总体上,1 d、4 d、7 d 预见期各模型 ET_0 预报值与 PM 公式计算值的变化趋势相似(图 2),预报值与计算值的一致性随预见期的增加而减小,1 d 预见期拟合度最佳,7 d 预见期拟合度最差。

表 2 验证期预报精度评价指标

Table 2 Evaluating index for the precision of each model on the data sets

模型	ET_{0P} 总量/mm	ET_{0P} 总量 偏差/%	统计指标			
			$\delta_{\text{MAE}}/$ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	$\delta_{\text{RMSE}}/$ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	R	$\delta_{\text{AAC}}/\%$
HAR	5 540	2.04	0.567	0.781	0.8506	93.14
MR	5 200	-4.22	0.534	0.559	0.8741	94.18
FA	5 188	-4.44	0.601	0.759	0.8122	91.36

注: ET_{0PM} 总量为 5 429 mm, ET_{0P} 为模型 ET_0 预报值。

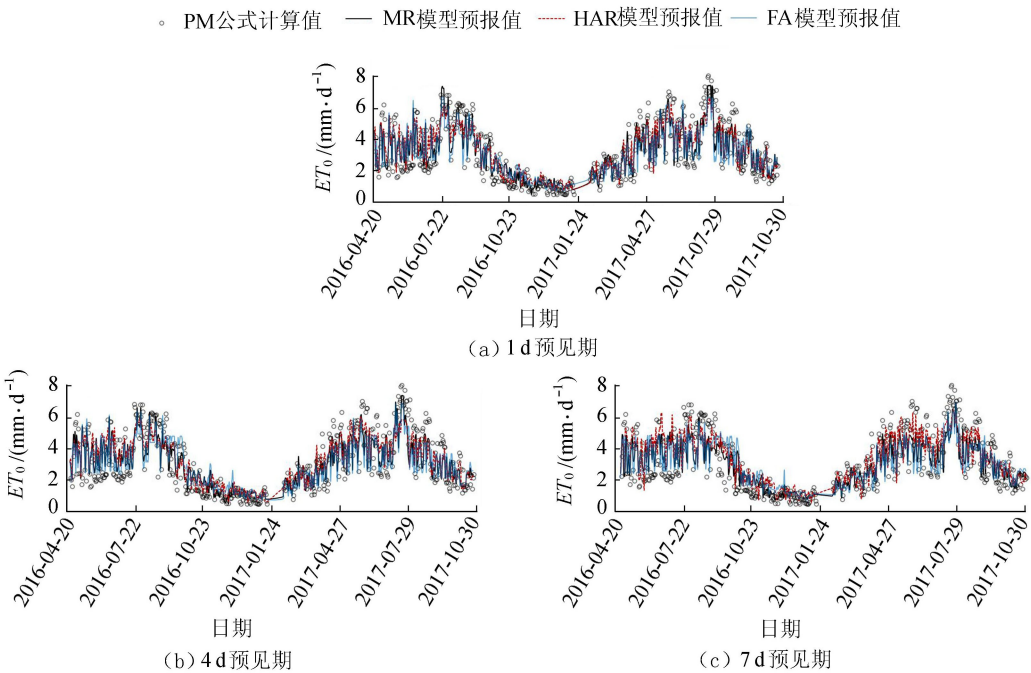


图 2 不同模型 1 d、4 d、7 d 预见期 ET_0 预报值比较

Fig.2 Predicated ET_0 using different models based on the forecast data of 1 d, 4 d, and 7 d forecast period

各模型在不同预见期的 ET_0 预报精度指标(表 3)显示,HAR、MR 和 FA 模型不同预见期的 ET_0 预报精度均维持在较高水平,且 MR 模型在各预见期内平均绝对误差、均方根误差均最小,准确率均最高,预报精度

最好。其余2种预报方法中,HAR模型的 δ_{MAE} 与 δ_{RMSE} 相对于FA模型较低; δ_{AAC} 相对于FA模型较高,预报精度高于FA模型。3种模型1~7d预见期 δ_{MAE} 平均值分别为0.793 mm/d、0.754 mm/d、0.837 mm/d, δ_{RMSE} 平均值分别为1.045、0.968、1.199 mm/d, δ_{AAC} 平均值分别为86.1%、87.4%、82.2%。随着预见期的增长,3种方法的预报精度均有所下降,其中HAR模型、MR模型、FA模型7d预见期的 δ_{AAC} 值较1d预见期的值分别下降了12.3%、12.2%与9.4%,但HAR模型与MR模型在7d预见期内的预报准确度仍保持在80%以上,均优于FA模型。总之,MR模型在3种 ET_0 预报模型中1~7d预见期内平均预报精度最高。

表3 不同模型1~7d预见期 ET_0 预报精度评价指标

Table 3 Evaluation index of ET_0 prediction accuracy in 1-7d forecast period by different models

预见期/d	HAR 模型			MR 模型			FA 模型		
	$\delta_{MAE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{RMSE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{AAC}/\%$	$\delta_{MAE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{RMSE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{AAC}/\%$	$\delta_{MAE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{RMSE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{AAC}/\%$
1	0.659	0.693	92.5	0.613	0.643	92.7	0.725	0.959	85.7
2	0.705	0.812	89.4	0.645	0.715	92.3	0.762	1.032	86.9
3	0.749	0.917	86.9	0.740	0.921	86.7	0.828	1.171	82.3
4	0.818	1.103	86.0	0.762	0.970	88.4	0.840	1.199	83.0
5	0.836	1.162	83.8	0.804	1.064	86.5	0.875	1.247	81.7
6	0.868	1.238	83.7	0.835	1.174	84.6	0.894	1.365	79.8
7	0.913	1.392	80.2	0.879	1.290	80.5	0.938	1.422	76.3

鉴于各模型在1~3d预见期均有较高的预报精度,同时考虑到不同季节最高气温、最低气温差异较大,因此进一步针对各模型在不同季节1~3d预见期的预报精度进行评价(表4)。结果显示:总体上,3种模型在冬季1~3d预见期内预报精度均最高、夏季均最低,表明3种模型在低温条件下的预报表现与适应性优于高温条件;从不同季节来看,各方法在夏季预报精度差异最大(MR模型在1~3d预见期的平均预报准确度较HAR模型高出4.7%、较FA模型高出11.2%)、冬季差异最小,与李郁等^[22]在南京关于HAR模型与PM公式预报精度比较的研究结论相近。除夏季外,HAR与MR模型在其余季节表现接近,FA模型则在春、夏、秋季的预报精度均低于其余2种模型。

表4 不同季节各模型1~3d预见期预报精度评价指标

Table 4 Prediction accuracy of ET_0 in 1-3d forecast period by different models

模型	预见期/ d	春季(3—5月)			夏季(6—8月)			秋季(9—11月)			冬季(12—2月)		
		$\delta_{MAE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{RMSE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{AAC}/\%$	$\delta_{MAE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{RMSE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{AAC}/\%$	$\delta_{MAE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{RMSE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{AAC}/\%$	$\delta_{MAE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{RMSE}/$ (mm·d ⁻¹)	$\delta_{AAC}/\%$
HAR	1	0.627	0.589	94.6	0.953	1.286	80.7	0.507	0.387	98.6	0.317	0.137	100.0
	2	0.672	0.687	93.0	1.020	1.483	76.2	0.547	0.478	96.4	0.323	0.141	100.0
	3	0.737	0.838	91.2	1.078	1.617	74.6	0.568	0.519	94.3	0.336	0.148	100.0
MR	1	0.599	0.575	95.3	0.846	1.086	85.1	0.467	0.376	97.1	0.302	0.136	100.0
	2	0.610	0.577	94.6	0.895	1.243	84.5	0.508	0.428	96.4	0.309	0.143	100.0
	3	0.709	0.781	92.1	1.049	1.604	76.2	0.570	0.541	95.1	0.320	0.149	100.0
FA	1	0.706	0.871	88.4	1.046	1.721	72.9	0.530	0.448	95.7	0.276	0.110	100.0
	2	0.781	0.990	85.4	1.132	1.849	70.7	0.659	0.663	93.0	0.306	0.151	100.0
	3	0.784	1.074	85.0	1.139	1.891	68.5	0.690	0.786	91.4	0.346	0.191	98.6

3 讨 论

气温预报误差会导致预报值与PM公式计算结果的相差较大^[14-15, 19]。1~7d气温准确度分析显示,随预见期由1~7d的增长, T_{max} 与 T_{min} 预报准确度^[23](预报误差±2℃以内天数占总天数的百分比)均下降。预见期1~3d的 T_{max} 和 T_{min} 预报准确度分别维持在75.9%~86.7%和75.7%~78.6%,而预见期增大至7d时,其准确率降低至54.1%和63.4%。基于1~3d预见期 T_{max} 与 T_{min} 开展 ET_0 预报,准确度较7d时平均提高9%。由此推出,随着预见期的增长,较低的天气预报准确度可能是造成各模型预报精度降低的主要原因。

MR模型与FA模型分别采用天气类型指数(I_{wcl})与天气类型修正系数将天气类型参数化。由于MR与FA模型中只划分了4种基本天气类型,而实际情况中远不止4种,不免产生误差。可以考虑针对不同天气

类型来分析不同 ET_0 模型的预报精度。

3种预报方法的运行机制不一,这也是导致各模型之间预报精度差异的原因之一。HAR模型仅考虑了温度变量;FA模型仅考虑了天气类型变量;MR模型结合了温度与天气类型变量。在模型率定时,MR模型逐月率定,而HAR模型与FA模型则按季节分别率定,这也是MR模型预报精度较高的原因之一。天气预报信息的日益完善将可能提供模型需要的更多输入变量,MR模型同时具备输入变量较完备与模型复杂程度较低的特点,在 ET_0 预报中有更广的应用前景。

4 结 语

以常州站为例,基于历史气象数据和天气预报数据,以FAO56-PM公式计算结果为对照,开展了HAR、MR和FA模型的率定与验证,进而对3种模型在不同预见期的 ET_0 预报精度进行评价。结果表明,随预见期的增长,3种预报方法的预报精度均呈下降趋势。MR模型在不同预见期(1 d、4 d、7 d)的 δ_{MAE} 均最小, δ_{AAC} 最高, δ_{RMSE} 除在3 d预见期时略高于HAR模型外,其他预见期均最小;不同季节下MR模型1~3 d预见期的预报精度同样高于其余2种方法。因此,MR模型可推荐为该地区的 ET_0 预报方法。随着预见期延长, T_{max} 与 T_{min} 预报准确度也呈下降趋势。基于1~3 d预见期 T_{max} 与 T_{min} 计算的 ET_0 值较7 d时准确度平均提高9%以上,因此 ET_0 预报的预见期以不超过3 d为宜。

参考文献:

- [1] 郭元裕. 农田水利学[M]. 3版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 29-32.
- [2] IRMAK S, ALLEN R G, WHITTY E B. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2003, 129(5): 360-370.
- [3] 黄强, 陈子荣. 多种蒸散发公式在珠江流域的适用性分析[J]. 热带地理, 2014, 34(6): 737-745. (HUANG Qiang, CHEN Zishen. Applicability of evapotranspiration equations for the Pearl River Basin[J]. Tropical Geography, 2014, 34(6): 737-745. (in Chinese))
- [4] MARINO M A, TRACY J C, TAGHAVI S A. Forecasting of reference crop evapotranspiration[J]. Agricultural Water Management, 1993, 24(3): 163-187.
- [5] 迟道才, 王海南, 李雪, 等. 灰色新陈代谢GM(1,1)模型在参考作物腾发量预测中的应用研究[J]. 节水灌溉, 2011(8): 32-35. (CHI Daocai, WANG Hainan, LI Xue, et al. Application of gray metabolism GM(1,1) model for reference crop evapotranspiration prediction[J]. Water Saving Irrigation, 2011(8): 32-35. (in Chinese))
- [6] 彭世彰, 魏征, 徐俊增, 等. 参考作物腾发量支持向量回归机实时预报模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 45-49. (PENG Shizhang, WEI Zheng, XU Junzeng, et al. Real-time forecasting model of reference crop evapotranspiration based on support vector regression machines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 45-49. (in Chinese))
- [7] 王升, 陈洪松, 聂云鹏, 等. 基于基因表达式编程算法的参考作物腾发量模拟计算[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 106-112. (WANG Sheng, CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, et al. Simulation of reference evapotranspiration based on gene-expression programming method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 106-112. (in Chinese))
- [8] 李贤波. 参考作物蒸腾蒸发量的混沌时间序列预测方法研究与应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [9] 张倩, 段爱旺, 王广帅, 等. 基于天气预报的参照作物腾发量中短期预报模型研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 107-114. (ZHANG Qian, DUAN Aiwang, WANG Guangshuai, et al. Middle and short term forecasting models for reference evapotranspiration based on daily weather forecast[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 107-114. (in Chinese))
- [10] 戚颖, 王斌, 黄金柏, 等. CRU数据集在黑龙江省 ET_0 计算中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 367-371. (QI Ying, WANG Bin, HUANG Jinbai, et al. Application of CRU dataset to calculation of ET_0 of Heilongjiang Province[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014, 42(4): 367-371. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 罗玉峰, 崔远来, 蔡学良. 参考作物腾发量预报的傅立叶级数模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6): 45-47,

52. (LUO Yufeng, CUI Yuanlai, CAI Xueliang. A Fourier series model for forecasting reference crop evapotranspiration[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005,38(6): 45-47, 52. (in Chinese))

[13] 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. (in Chinese))

[14] XU Junzeng, PENG Shizhang, YANG Shihong, et al. Predicting daily reference evapotranspiration in a humid region of China by the locally calibrated Hargreaves-Samani equation using weather forecast data [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, 14(6): 1331-1342.

[15] LUO Yufeng, CHANG Xiaomin, PENG Shizhang, et al. Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the Hargreaves-Samani model and temperature forecasts[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136(2): 42-51.

[16] PETKOVIC D, GOCICO M, SHAMSHIRBAND S, et al. Particle swarm optimization-based radial basis function network for estimation of reference evapotranspiration[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2016, 125(3/4): 555-563.

[17] 谢梅香,罗玉峰,钱子嘉,等. 基于气温预报和神经网络的参考作物腾发量预报[J]. 节水灌溉, 2015(2): 33-36. (XIE Meixiang, LUO Yufeng, QIAN Zijia, et al. Reference crop evapotranspiration forecasting based on temperature forecasts and neural network[J]. Water Saving Irrigation, 2015(2): 33-36. (in Chinese))

[18] 冯禹,王守光,崔宁博,等. 基于遗传算法优化神经网络的参考作物蒸散量预测模型[J]. 资源科学, 2014, 36(12): 2624-2630. (FENG Yu, WANG Shouguang, CUI Ningbo, et al. Artificial neural networks optimized by genetic algorithms for modeling reference evapotranspiration [J]. Resources Science, 2014, 36(12): 2624-2630. (in Chinese))

[19] XU Junzeng, PENG Shizhang, WANG Weiguang, et al. Prediction of daily reference evapotranspiration by a multiple regression method based on weather forecast data[J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2013, 59(11): 1487-1501.

[20] 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. (in Chinese))

[21] 白凯华. 基于公共天气预报的参考作物腾发量预报与网络发布系统开发[D]. 南京: 河海大学, 2016.

[22] 李郁,陆伟娟,卫琦,等. 不同时间尺度下 Hargreaves 公式计算 ET_0 的精度差异[J]. 中国农村水利水电, 2015(11): 20-23. (LI Yu, LU Weijuan, WEI Qi, et al. Difference in Precision of Hargreaves Equation to Estimating ET_0 under Different Time Scales[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(11): 20-23. (in Chinese))

[23] 中国气象局政策法规司. 中华人民共和国气象法规汇编(2005)[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 493.

(收稿日期:2018-03-30 编辑:高建群)

• 简讯 •

第五届全国桥梁维护与安全学术会议将在南京市召开

为了构建我国桥梁维护与安全领域内的交流平台,促进相关领域工程师、管理者和研究人员的学术交流,提升国内桥梁维护、安全和管理学术水平,由国际桥梁维护与安全协会中国团组主办,河海大学承办的第五届全国桥梁维护与安全学术会议将于2019年4月19—21日在南京市召开。

会议将以“桥梁维护与安全”为主题开展桥梁结构运营安全、桥梁加固技术、桥梁维护设备、桥梁耐久性、桥梁防灾减灾等方面的交流与讨论。

(本刊编辑部供稿)