

潜在蒸散发量估算方法在河南省的适用性分析

邹磊^{1,2}, 夏军^{1,2}, 马细霞³, 曾思栋^{1,2}

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072; 3. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 利用 FAO56-PM 法计算潜在蒸散发时气象资料往往不易满足。针对该问题, 本文研究了辐射法、温度法和基于温度及辐射资料的 RBF 神经网络预测模型。以 FAO56-PM 法计算值为标准, 比较分析了 Priestley-Taylor 法、Hargreaves 法、Mc Cloud 法以及 Makkink 法在河南省五个典型地区 (安阳、新乡、郑州、驻马店、信阳) 的适用效果。并以新乡地区为例评价了校正参数后各估算方法和基于温度及辐射资料的 RBF 神经网络预测模型的适用性。结果表明, Makkink 法在五个典型地区估算的潜在蒸散发量误差较小, 其余方法误差较大。校正参数后, 各估算方法在新乡地区的估算结果均得到明显改进, 具有较好的地区适用性。基于温度及辐射资料的 RBF 神经网络预测模型具有较高的预测精度, 可应用于潜在蒸散发量的估算和预测。

关键词: 潜在蒸散发量; 温度法; 辐射法; RBF 神经网络; 河南省

中图分类号: P426.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2014)03-0017-07

1 引言

蒸散发是水文循环的重要环节, 准确地测定和估算蒸散发对气候干湿状况分析^[1]、农业灌溉管理以及提高区域水资源利用效率^[2,3]等具有十分重要的现实意义。因此, 蒸散发的估算对于一个地区的发展意义重大。潜在蒸散发量 (PET) 是实际蒸散发量 (AET) 的理论上限, 准确估计 PET 是计算 AET 的关键。

目前常用的估算 PET 的方法大致可以分为五种类型: 综合法、温度法、辐射法、水量平衡法和质量传导法^[4]。联合国粮农组织 (FAO) 推荐的潜在蒸散发标准估算法是 Penman-Monteith (PM) 公式^[5], 但是 PM 公式中需要气温、气压、湿度、太阳辐射等诸多气象资料, 在数据缺乏地区难以使用, 实际应用中也因资料数据过多不够方便灵活, 这在很大程度上限制了该公式的使用。因此有必要研究简单且精度满足要求的 PET 估算法 (如温度估算法、辐射估算法、基于基础资料的人工神经网络) 来代替 PM 法。国内外对此开展了较多的研究, 如 Xu 和 Singh 根据加拿大两个气象站的历史数据, 选取 7 种基于温度的蒸散发量估算法进行了评估比较^[6]; 左德鹏等评估了 7 种基于气温的潜在蒸

量估算法在我国西北干旱地区的适用性^[6]; 刘宏伟等评价了 Hargreaves 法与 Penman-Monteith 在太湖流域的适用性^[7]; 赵捷等比较了 6 种基于辐射的潜在蒸散发量估算法在我国黑河流域的适用性^[8]; Trajkovic^[9]建立了仅利用温度数据的 RBF 人工神经网络模型, 应用表明具有较高的模拟精度; 徐俊增等^[10]、蒋任飞等^[11]构建了气象资料不足条件下参考作物蒸发蒸腾量的 BP 人工神经网络预测模型, 获得了较高的计算精度。

根据河南省五个典型地区气象站 1959~2010 年共 52 年的气象资料, 利用 Priestley-Taylor 法 (PT)、Makkink 法 (Mak)、Hargreaves 法 (HAR)、Mc Cloud 法 (M-C) 计算了潜在蒸散发量; 以 PM 公式计算的潜在蒸散发量为标准, 分析了估算方法在河南省的应用效果, 并建立了基于温度及辐射资料的 RBF 神经网络预测模型。文中以新乡地区为例, 结合经验公式与预测模型, 比较分析了校正后的估算方法和 RBF 神经网络预测模型的适用性, 为河南省潜在蒸散发的研究提供了参考。

2 研究区域及数据

采用河南省五个典型地区气象站 (安阳、新乡、郑州、驻马店、信阳) 1959~2010 年共 52 年的逐日实测气

收稿日期: 2013-10-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51339004, 51279140, 51279139)

作者简介: 邹磊 (1990-), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zzu_zoulei@163.com

象资料,包括平均气压、平均气温、日照时数、日最低和最高气温等,各地区气象站点的基本信息见表1。

表1 各气象站点基本信息
Table 1 The basic information of the meteorological stations

站点	安阳	新乡	郑州	驻马店	信阳
经度(E)	114°2'	113°5'	113°3'	114°1'	114°3'
纬度(N)	36°3'	35°18'	34°43'	33°2'	32°8'
海拔/m	62.9	73.2	110.4	82.7	114.5
多年平均降水量/mm	606.1	656	641	870	1100
多年日平均气温/°C	13.2	14	14.1	15	15.2

3 研究方法

3.1 潜在蒸散发量估算方法简介

采用 FAO56-PenmanMonteith 法作为研究参照方法,并同时运用辐射法和温度法中应用广泛的几个公式(Priestley-Taylor、Hargreaves、Mc Cloud 以及 Makkink)

对潜在蒸散发量进行计算,以探讨各估算方法在河南省的适用性,为未来河南省潜在蒸散发量估算方法的选择提供一定的参考。各估算方法的计算公式如下为^[5,12-15]:

$$PET_{PM} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \frac{900 \gamma U_2 (e_a - e_d)}{T + 273}}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

$$PET_{HAR} = 0.0023 \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} (T_a + 17.8) \frac{R_a}{\lambda} \quad (2)$$

$$PET_{M-c} = K \times W^{1.8T} \quad (3)$$

$$PET_{PT} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - G)}{\lambda} \quad (4)$$

$$PET_{Mak} = 0.61 \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (5)$$

式(1)、(2)中:PET为潜在蒸散发量;T为平均温度;K、W和α为经验系数,分别取0.254、1.07和1.26,其余各项意义及计算方法见表2^[5,16,17]。

表2 计算参数及其计算公式
Table 2 The calculation parameters and formulas

参数	公式
Δ为温度-饱和水汽压关系曲线T处斜率,kPa/°C	$\Delta = \frac{4098 e_a}{(T + 237.3)^2}$
e_a 为饱和水汽压,kPa	$e_a = 0.611 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)$
R_n 为净辐射,MJ/(m ² ·d)	$R_n = R_{ns} - R_{nl}$
R_{ns} 为净短波辐射,MJ/(m ² ·d)	$R_{ns} = 0.77 \times (0.25 + 0.5n/N) R_a$
R_{nl} 为净长波辐射,MJ/(m ² ·d)	$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{ks}^4 + T_{kn}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_d}) (0.1 + 0.9 \frac{n}{N})^*$
R_s 为太阳辐射,MJ/(m ² ·d)	$R_s = (a + b \frac{n}{N}) R_a^{**}$
n为实际日照时数,h;N为最大可能日照时数,h	$N = 7.4 W_s$
W_s 为日照时数角,rad;ψ为地理纬度,rad	$W_s = \arccos[-\tan(\psi) \tan(\delta)]$
δ为日倾角(太阳磁偏角),rad	$\delta = 0.409 \sin(0.0172J - 1.39)$
R_a 为大气边缘太阳辐射,MJ/(m ² ·d)	$R_a = 37.6 d_r (W_s \sin \psi / \sin \delta + \cos \psi / \cos \delta \sin W_s)$
G为土壤热通量,MJ/(m ² ·d)	$G = 0.38 (T_a - T_{d-1})$
γ为湿度表常数,kPa/°C;P为气压,kPa	$\gamma = 0.00163 P / (2.501 - (2.361 \times 10^{-3}) \cdot T)$
U_2 为2m高处风速,m/s	$U_2 = 4.87 \cdot u_d / \ln(67.8h - 5.42)$

注:* 式中的 $\sigma = 4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{K}^4 \text{d})$,为 Stefan-Boltzmann 常数。

** 式中的a,b 参考文献[5]的推荐值,分别为0.25和0.5。

3.2 RBF神经网络模拟方法

RBF神经网络是一种典型的三层前向网络,由输入层、隐含层和输出层组成,在RBF网络中,隐含层节点通过基函数执行一种非线性变化,将输入空间映射到一个新的空间,输出层节点则在该新的空间实现线性加权组合。RBF网络中最常用的基函数是高斯函数,即对于任意的输入向量 $X \in R^N$ (R^N 为输入样本集),它定义为:

$$R_i(x) = \exp[-\|X - C_i\|^2 / (2\sigma_i^2)] \quad i=1, 2, \dots, N_r \quad (6)$$

式中: $R_i(x)$ 为隐层第i个单元的输出; X 为N维输入矢量, $X = \{X_p | X_p \in R^N, p=1, 2, \dots, K\}$; C_i 为隐层第i个单元高斯函数的中心点; σ_i 为第i个隐节点的归一化参数,即该隐节点的宽度; N_r 为隐层的节点数;p表示样本数。

3.3 评估分析方法

为了对分析结果做出客观的评价,文中采用平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)以及相关系数(R)作为四种估算方法与PM法计算结果差异的评价指标,MAE、MRE越接近0,R越接近1,差异越小。各评

价指标公式及参数的具体含义如下:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (AE_i - E_i)}{n} \quad (7)$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{MAE}{E_i}}{n} \quad (8)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (AE_i - \overline{AE})(E_i - \overline{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (AE_i - \overline{AE})^2 \sum_{i=1}^n (E_i - \overline{E})^2}} \quad (9)$$

式中: n 为计算个数; AE 、 E 为检验潜在蒸发量和参照潜在蒸发量; \overline{AE} 、 \overline{E} 为检验潜在蒸发量和参照潜在蒸发量的平均值。

4 结果分析

4.1 原始参数计算结果分析

4.1.1 潜在蒸散发量年值序列分析

图1给出了五个典型地区PM法与四种估算方法估算PET年值的过程对比。表3列出了四种估算方法与PM法估算逐年PET的误差分析结果。

结合图1和表3,对于文中PET的计算结果进行定性和定量分析,探究估算方法在河南省的适用性。

由图1明显看出,信阳地区各估算方法计算结果相较其余地区与PM法偏差较大,且其PM法计算的PET相较其余地区低。总体来看,温度法的计算结果明显大于辐射法。HAR法、M-C法和Mak法的计算结果都高于PM法。PT法的计算结果整体低于PM法。HAR法相对M-C法与PM法的偏差幅度较大。Mak法相对PT法与PM法吻合程度较好,曲线增减变化趋势较接近。PT法在五个地区的计算结果存在低估现象,曲线在PM线的下方。表3中的数据显示,HAR法和M-C法的计算结果与PM法的偏差较大,分别较后者高出277.78~353.97mm/a和148.97~325.98mm/a,但HAR法与PM法计算结果的相关系数较高。结合图1可以看出,HAR法和PM法的增减趋势和峰值点较一致。PT法和Mak法相对于PM法的偏差较小,除信阳地区Mak法的计算偏差稍大,其余地区Mak法与PM法的计算结果十分接近。

通过上述分析,四种方法在估算河南省五个典型

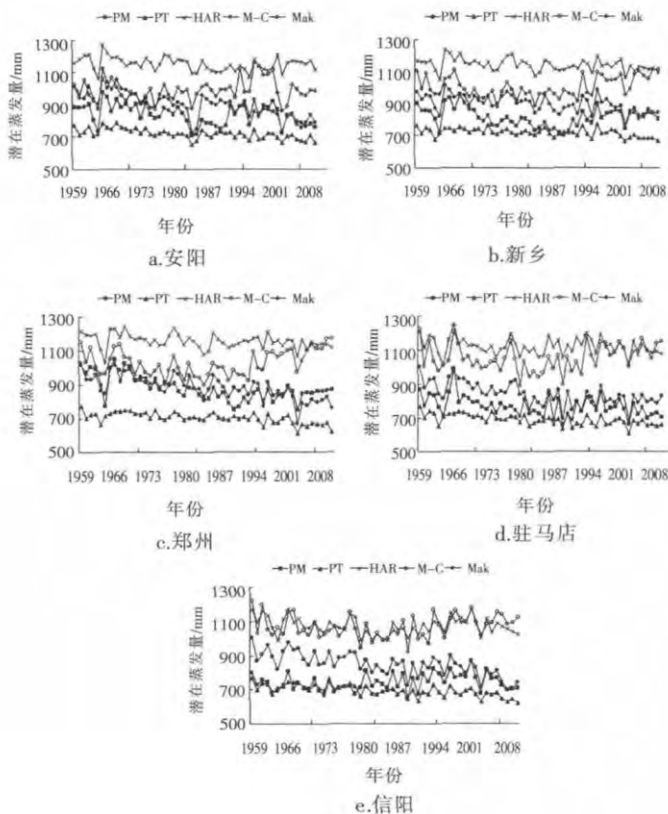


图1 Penman-Monteith法与四种估算方法估算PET的 annual 变化比较
Fig.1 Comparison of annualPET estimated by the Penman-Monteith and other four methods

表3 PM法与四种估算方法估算逐年PET的结果分析
Table 3 Analysis of the results of annual PET estimated by the Penman-Monteith and other four methods

地区	计算方法	平均绝对误差	平均相对误差	相关系数
安阳	PT	120.26	14%	0.71
	HAR	313.42	38%	0.68
	M-C	151.03	18%	0.43
	Mak	70.13	8%	0.71
新乡	PT	96.23	12%	0.47
	HAR	327.55	41%	0.69
	M-C	189.62	24%	0.58
郑州	Mak	86.28	11%	0.61
	PT	175.76	19%	0.57
	HAR	277.78	31%	0.73
驻马店	M-C	148.97	17%	0.36
	Mak	46.64	5%	0.72
	PT	78.93	10%	0.72
信阳	HAR	353.97	46%	0.84
	M-C	285.48	37%	0.53
	Mak	73.47	9%	0.79
信阳	PT	54.61	7%	0.35
	HAR	330.25	44%	0.57
	M-C	325.98	44%	0.55
	Mak	106.02	15%	0.37

地区的 PET 时存在不同程度的偏差。对于五个典型地区的 PET 估算,辐射法计算结果稍优于温度法,其中 Mak 法与 PM 法的吻合程度最好。

4.1.2 潜在蒸散发量月值序列分析

为了更加准确评估四种估算方法在河南省的适用性以及潜在蒸散发量在年内的变化规律,因而对潜在蒸散发量进行月值序列分析。

四种估算方法与 PM 法在五个典型地区估算的多年月平均 PET 的对比见图 2。四种估算方法与 PM 法估算多年月平均 PET 的误差分析结果见表 4。

表4 四种估算方法与PM法估算月平均PET的结果分析

Table 4 Analysis of the results of mean monthly PET estimated by the Penman-Monteith and other four methods

地区	计算方法	平均绝对误差	平均相对误差	相关系数
安阳	PT	13.17	33%	0.98
	HAR	26.11	43%	0.97
	M-C	37.28	52%	0.82
	Mak	9.32	22%	0.98
新乡	PT	11.54	32%	0.99
	HAR	27.30	44%	0.98
	M-C	37.88	53%	0.83
	Mak	8.33	21%	0.98
郑州	PT	16.67	36%	0.98
	HAR	23.14	30%	0.98
	M-C	39.30	54%	0.83
	Mak	7.28	10%	0.97
驻马店	PT	9.64	30%	0.99
	HAR	29.33	49%	0.99
	M-C	38.30	53%	0.86
	Mak	11.45	28%	0.93
信阳	PT	8.28	27%	0.99
	HAR	27.52	56%	0.99
	M-C	38.35	53%	0.87
	Mak	9.07	29%	0.98

由图 2 可以看出,四种估算方法在五个典型地区所得曲线的相对位置较一致,具有相似的规律特征。温度法计算的月值序列中只有 HAR 法与 PM 法接近,且增减变化趋势和峰值出现的时间都与 PM 法较一致,5~9 月存在明显的高估现象,其曲线整体在 PM 法之上。M-C 法的月值系列相对 PM 法表现出较大的差异:夏季明显偏高,其余月份都稍低,曲线陡涨陡落,变化幅度大,其峰值出现时间(7 月)要比 PM 法(6 月)滞后一个月,与温度出现峰值的时间一致。相较温度法而言,辐

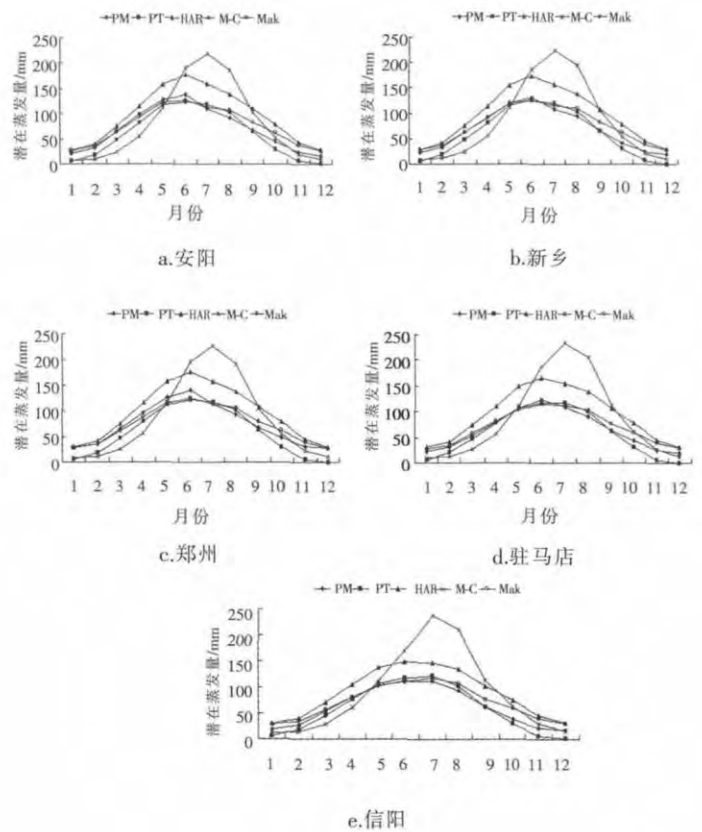


图 2 Penman-Monteith 法与四种估算方法估算 PET 的多年均值变化比较

Fig.2 Comparison of the mean monthlyPET estimated by the Penman-Monteith and other four methods

射法的月值序列与 PM 法吻合程度较高。PT 法在 7~9 月较 PM 法计算结果偏高,其余月份偏低,尤其在冬季的偏差较大。Mak 法月值序列与 PM 法吻合程度最高,曲线位置十分接近,在 1~6 月有略微的偏低,而在 7~12 月稍高。四种方法中,Mak 法与 PM 法的拟合程度最高,无显著差异的月份较其余三种估算方法要多,其次是 PT 法和 HAR 法,整体趋势与 PM 法保持一致。M-C 法与 PM 法相差较大,吻合程度在四种方法中为最低。表 4 中的数据显,除 M-C 法外,其余三种估算方法与 PM 法的相关系数都较高,维持在 0.97 左右,M-C 法与 PM 法的相关系数维持在 0.85 左右。平均绝对误差相对年值序列的结果都减小,平均相对误差较年值序列的结果增大,除 Mak 法在 20%左右,其余三种方法均在 30%以上。辐射法中月值序列的平均绝对误差和平均相对误差较温度法低,表明辐射法的计算结果优于温度法。

综上所述,由潜在蒸散发量年值序列和月值序列分析可得,在河南省进行潜在蒸散发量估算时,辐射法计算结果要稍优于温度法,其与 PM 法的偏差较小,相关系数高,能够反映出潜在蒸散发量的变化趋势。文中

四种估算方法以 Mak 法为最优。

4.2 参数修正

由年值和月值序列分析可得,各估算方法计算月值序列与 PM 法的相关系数很高,因此可以依据各方法与 PM 法计算所得逐月值间的相关性进行参数修正,从而提高计算序列的估算精度。本文以新乡地区为例阐述上述修正方法。各估算方法与 PM 法在新乡地区计算所得逐月值的相关关系如图 3 所示。

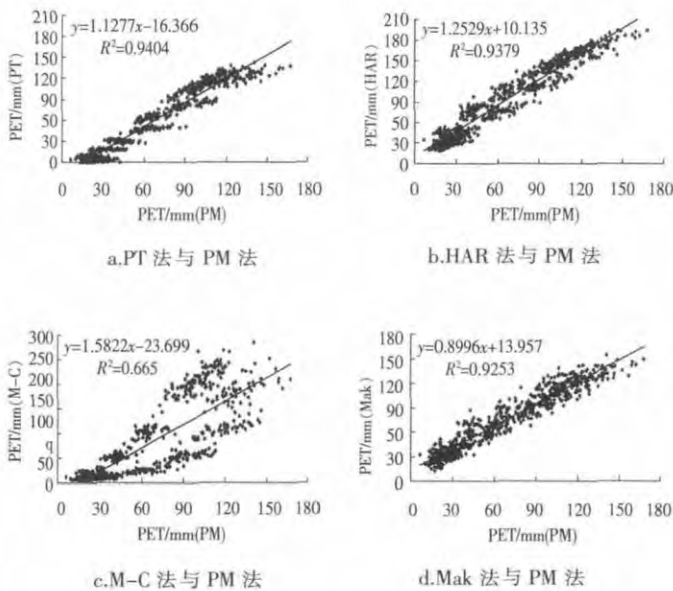


图 3 四种估算方法估算的逐月 PET 与 PM 法结果的相关关系

Fig.3 Relationship between the monthly PET estimated results of the Penman-Monteith and other four methods

依据图 3 中的线性回归方程,对各估算方法的逐月计算值进行修正,提高各估算方法计算结果与 PM 法的相关性,增大 R 值。在相关性提高的基础上再进行缩放比例修正,从而减小估算结果与 PM 法的偏差。

4.3 校正参数后计算结果分析

经参数修正后年潜在蒸散发量计算结果随时间变化如图 4 所示。

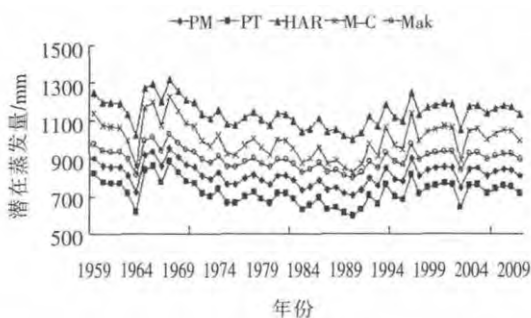


图 4 修正后四种估算方法与 PM 法估算 PET 年际变化比较

Fig.4. Comparison of annualPET estimated by the Penman-Monteith and other four methods after calibration

由图 4 可得,经逐月修正后各估算方法与 PM 法估算逐年值的变化趋势一致,增减幅度和峰值的时间点一一对应。随后针对各估算方法逐月修正后的序列进行缩放,缩小其与 PM 法之间的偏差。本文选用逐月修正后各估算方法与 PM 法计算所得年值序列间比值的均值作为缩放比例。缩放比例及修正后计算结果的各项统计指标见表 5。

表5 修正参数后四种估算方法与PM法估算逐年PET的结果分析
Table 5 Analysis of the results of annual PET estimated by the Penman-Monteith and other four methods after calibration

地区	蒸发方法	缩放比例	平均绝对误差	平均相对误差	相关系数
新乡	PT	1.131	12.77	1.5%	0.983
	HAR	0.713	5.94	0.7%	0.977
	M-C	0.812	13.27	1.6%	0.981
	Mak	0.904	8.69	1.1%	0.991

由表 5 中各项统计指标可得,四种估算方法与 PM 法的相关系数都维持在 0.98 左右,平均绝对误差和平均相对误差较修正前的结果明显减小。平均绝对误差维持在 13 以内,平均相对误差维持在 1.6% 以内。

4.4 基于温度及辐射资料的 RBF 神经网络预测模型结果分析

神经网络是目前较为成熟也是应用最多的一种非线性函数逼近方法,而 PET 与各气象因素之间有很强的非线性关系^[10-11]。因此,为便于指导生产实践,文中以新乡地区为例考虑建立基于温度及辐射资料的 RBF 神经网络预测模型,分析其模拟精度和预测能力。

选取日最高温度、日最低温度、日平均温度、大气辐射以及日序数作为 REF 神经网络模型的输入,将 PM 法计算结果作为输出。以 1995~1999 年共 5a 逐日气象资料作为基础数据,其中 70% 作为训练样本,30% 作为测试样本。基于 BIC 准则,隐含层的结点个数为 10 个,训练误差平方和为 41.136,相对错误为 17%。根据神经网络的结构性能,增加隐含层的节点个数,可提高网络的预测精度。经过多次训练比较,确定隐含层节点数为 31 个,训练误差平方和为 21.13,相对错误为 8.5%。

选择 2000 年的气象数据资料对网络进行检验,得到逐日潜在蒸散发量 PM 法计算所得值与 RBF 预测值的效果图,如图 5 所示。

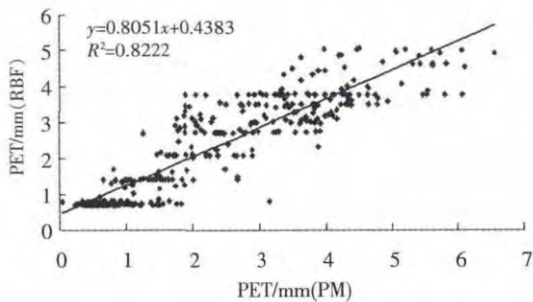


图5 基于温度及辐射资料的RBF神经网络预测模型预测结果
Fig.5 The predicted result of the temperature and radiation data-based RBF neural network model

由图5可得RBF神经网络预测模型预测值与PM法计算值拟合关系为 $y=0.8051x+0.4383$ ($R^2=0.822$),相关性较好。另计算得出2000年预测值与PM法计算值的平均绝对误差为0.29,平均相对误差为7.3%,计算精度高于采用原始参数时的各估算方法,且和校正参数后各估算方法的精度接近。表明基于温度及辐射资料的RBF神经网络预测模型精度较高,可应用于新乡地区潜在蒸散发量的预测。特别是在某些年温度及辐射资料残缺的情况下,可用该模型进行插值预测,该方法具有一定的推广使用价值。

5 结论

本文根据五个典型地区1959~2010年共52年的逐日气象资料,采用比较有影响的几种PET估算方法,包括两种辐射法和两种温度法,以世界粮农组织推荐的FAO56-PM法作为参考进行比较分析。以新乡地区为例,对各估算方法进行参数修正,并利用基于温度及辐射资料的RBF神经网络预测模型进行分析研究,得到以下结论:

(1) 参数修正前。五个典型地区中各估算方法与PM法计算所得逐年PET偏差较大,但总体增减趋势较一致。无论是年值序列还是月值序列分析,辐射法要整体优于温度法。辐射法与PM法吻合程度较高,其中以Mak法为最优。温度法和辐射法的共同特点是夏季比PM法计算结果稍高,其它季节尤其是冬季偏低。就潜在蒸散发量的峰值而言,除M-C法的峰值明显滞后于PM法,在7月份达到最大外,其余三种方法与PM法的峰值时间基本保持一致,均在6月份。

(2) 各估算方法通过参数修正后,其估算结果与PM法更加接近,保持了较好的变化趋势和峰值的一致性,高估和低估现象得到明显改善,各项统计数据也更接近PM计算结果。通过对比分析,适用效果最好的为修

正后的Mak法,其余依次为PT法、HAR法和M-C法。

(3) 基于温度及辐射资料的RBF神经网络预测模型预测结果与PM法计算结果具有显著线性相关关系,预测结果与PM法计算结果之间差异较小,可适用于资料不足情况下的插值预测,该方法具有一定的推广使用价值。

参考文献:

- [1] 杨建平,丁永建,陈仁升,等.近50年来中国干湿气候界线的10年际波动[J].地理学报,2002,57(6):655-661.(YANG Jianping, DING Yongjian, CHEN Rensheng, et al. The interdecadal fluctuation of dry and wet climate boundaries in China in recent 50 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2002,57(6):655-661. (in Chinese))
- [2] 赵玲玲,夏军,许崇育,等.水文循环模拟中蒸散发估算方法综述[J].地理学报,2013,68(1):127-136. (ZHAO Lingling, XIA Jun, XU Chongyu, et al. A review of evapotranspiration estimation methods in hydrological models [J]. Acta Geographica Sinica, 2013,68(1):127-136. (in Chinese))
- [3] 刘鑫,宋献方,张应华,等.农业生产活动对黄土高原丘陵沟壑区坡地土壤水分动态的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(5):126-134. (LIU Xin, SONG Xianfang, ZHANG Yinghua, et al. Effect of agricultural activities on soil moisture content at slopeland in hilly and gully region of Loess Plateau [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012,26(5):126-134. (in Chinese))
- [4] Xu C Y, Singh V P. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation [J]. Hydrological Processes, 2001,15(2):305-319.
- [5] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56 [R]. FAO, Rome, 1998, 300: 6541.
- [6] 左德鹏,徐宗学,刘兆飞.基于气温的潜在蒸散发量估算方法在我国西北干旱地区的应用比较[J].干旱区资源与环境,2009,23(10):123-131. (ZUO Depeng, XU Zongxue, LIU Zhaofei. Comparison of temperature-based methods for estimating potential evapotranspiration in the arid region of northwest China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009,23(10):123-131. (in Chinese))
- [7] 刘宏伟,余钟波.用Hargreaves法与Penman-Monteith法计算ET₀——以太湖流域的应用为例[J].水资源保护,2010,26,(1):6-8,20. (LIU Hongwei, YU Zhongbo. Application of Hargreaves and Penman-Monteith equation to estimating ET₀: a case study in Taihu basin [J]. Water Resources Protection, 2010,26,(1):6-8,20. (in Chinese))
- [8] 赵捷,徐宗学,左德鹏,等.基于辐射的潜在蒸散发量估算方法在黑河流域的适用性分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(10):107-114. (ZHAO Jie, XU Zongxue, ZUO Depeng, et al. Radiation-based methods to estimate potential evapotranspiration in the Heihe River basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013,27(10):107-114. (in Chinese))
- [9] Trajkovic S. Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineer-

- ing, 2005,131(4):316-323.
- [10] 徐俊增,彭世彰,张瑞美,等. 基于气象预报的参考作物蒸发蒸腾量的神经网络预测模型 [J]. 水利学报, 2006,37 (3):376-379. (XU Junzeng, PENG Shizhang, ZHANG Ruimei, et al. Neural network model for reference crop evapotranspiration prediction based on weather forecast[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(3): 376-379. (in Chinese))
- [11] 蒋任飞,阮本清,韩宇平,等. 基于BP神经网络的参照蒸腾量预测模型[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005,3(4):308-311. (JIANG Renfei, RUAN Benqing, HAN Yuping, et al. Model for estimating reference evapotranspiration based on BP neural network [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005,3(4):308-311. (in Chinese))
- [12] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985,1(2):96-99.
- [13] McCloud D E. Water requirements of field crops in Florida as influenced by climate [J]. Proc. Soil Sci. Soc. Fla, 1955,15:165-172.
- [14] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972,100(2):81-92.
- [15] Makkink G F. Testing the penman formula by means of lysimeters[J]. Journal of the Institution of Water Engineers, 1957,11:277-288.
- [16] 张瑞美. 二元水循环模式下区域蒸散发时空变化与分项解析 [D]. 南京:河海大学, 2008. (ZHANG Ruimei. Spatio-temporal Variation and Component Analysis of Regional Evapotranspiration under a Dual Water Cycling Mode [D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [17] 刘钰,蔡林根. 参照蒸发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报, 1997,(6):27-33. (LIU Yu, CAI Lingen. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997,(6):27-33. (in Chinese))

Applicability of Potential Evapotranspiration Methods in Henan Province

ZOU Lei^{1,2}, XIA Jun^{1,2}, MA Xixia³, ZENG Sidong^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. College of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: FAO56-PM is the standard method for estimating potential evapotranspiration. However, the meteorological data required by the FAO56-PM method are not always available at a given station. This paper evaluated four existing methods and developed a temperature and radiation data-based RBF neural network model. We compared the performance of two temperature-based methods (Hargreaves method and Mc Cloud method) and two radiation-based methods (Priestley-Taylor method and Makkink method) with the FAO56-PM in five typical areas (Anyang, Xinxiang, Zhengzhou, Zhumadian, Xinyang) in Henan Province, China. The results of uncalibrated methods show that the Makkink method performs well while larger biases occur for the other methods. Calibration methods were performed for the Xinxiang data, the results show that lower error of all the methods compared to the uncalibrated methods. Besides, the temperature and radiation data-based RBF neural network model in Xinxiang is of high precision of prediction, and it can be used for the prediction of evapotranspiration.

Key words: potential evapotranspiration; temperature-based method; radiation-based method; RBF neural network; Henan Province

(上接第 47 页)

Flood and Drought Season Division Based on Set Pair Analysis for Middle and Upper Reaches of Ganjiang River

BAI Hua¹, YANG Xiaoxiao², LU Xianghui¹, ZENG Zhi³

- (1. College of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;
2. Jiangxi Research Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China;
3. Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning and Designing Institute, Nanchang 330099, China)

Abstract: Floods and droughts exist in hilly red soil areas of the South China. The flood and drought season division can be used to control the disaster as a scientific base. This paper, based on maximum 1-day and 3-days and total precipitation and streamflow in 10-days, divided the flood and drought season into the period earlier than the flood period (Feb.1-28), early flood period (Mar.1-31), flood period (Apr.1-Jun.30), late flood period (Jul.1-Sep.10) and drought period (Sep.11-Jan.31 next year) in the middle and upper reaches of the Ganjiang River by set pair analysis. The result is closely to traditional one. So the set pair analysis can be applied to integrated water resources management with a relatively complete theoretical base.

Key words: set pair analysis; connection degree; flood season division; Ganjiang River