

基于温度资料的参考作物蒸发蒸腾量计算方法

丁加丽^{1,2}, 彭世彰¹, 徐俊增^{1,3}, 缴锡云¹, 罗玉峰¹

(1. 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;
2. 南通市水利局 江苏 南通 226006; 3. 河海大学水利水电工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 针对利用 FAO56-PM 法计算参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 时气象资料需求往往不易满足的问题, 研究了温度法及基于温度资料的 BP 人工神经网络预测模型. 以 FAO56-PM 法 ET_0 计算值为标准, 比较分析了 Hargreaves 法、改进的 Thornthwaite 法、简化的 FAO56-PM 法以及 Mc cloud 法在我国湿润气候区的应用效果, 评价了校正后的温度法以及基于温度资料的 BP 人工神经网络预测模型在该气候区的适用性. 结果表明, 在 ET_0 较小时, Hargreaves 法、改进的 Thornthwaite 法和简化的 FAO56-PM 法计算值较 FAO56-PM 法偏大, 在 ET_0 较大时较 FAO56-PM 法偏小; 改进后的 Thornthwaite 法与 FAO56-PM 法最为接近, Mc cloud 法与 FAO56-PM 法的计算结果差异最大; 除 Mc cloud 法外, 校正后的温度法检验合格率较高, 具有较好的地区适用性; 基于温度资料的 BP 人工神经网络预测模型具有较高的预测精度, 结果好于校正后的 Thornthwaite 法和 Mc cloud 法, 可应用于只有温度资料时湿润气候区 ET_0 的预测.

关键词 参考作物蒸发蒸腾量; 温度法; BP 人工神经网络预测模型; 湿润气候区

中图分类号 S161.4 **文献标识码** A **文章编号** :1000-198X(2007)06-0633-05

参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 是作物需水量计算的关键因子, 对灌溉系统的设计和水资源管理有重要意义. 研究表明, 无论在干旱地区还是湿润地区, FAO-56 Penman-Monteith(FAO56-PM)法的计算精度都是最高的^[1-2], 因此被认为是 ET_0 计算的标准化方法和 ET_0 实测资料缺乏地区评价其他方法的标准^[3-6]. 然而, FAO56-PM 法需要太阳辐射、风速、空气温度等诸多气象观测资料, 限制了该方法的广泛应用^[4-5]. 因此, 有必要研究简单且精度满足要求的 ET_0 计算方法来代替 FAO56-PM 法.

尽管基于温度资料的 ET_0 计算方法(以下简称温度法)被认为是 ET_0 计算方法中精度较低的一类方法^[3-5], 但该方法只要求最高和最低温度, 因此在实际应用中仍具有重要意义. 国内外对温度法研究较多, 但不同气候条件下的研究结果差异较大^[3-7]. Irmak 等^[3]在佛罗里达湿润地区的研究表明, Hargreaves 和 Samani 法(以下简称 Hargreaves 法)计算结果较 FAO56-PM 法偏大, Mc cloud 法在所有温度法中计算结果最差. Pereira 等^[5]研究美国干旱气候下的改进的 Thornthwaite 法(以下简称 Thornthwaite 法)计算结果较实测值偏低 60%. Trajkovic^[4]研究表明, 欧洲南部湿润地区, 简化的 FAO56-PM 法计算结果在 Palic 和 Nis 站较 FAO56-PM 法增大 34.5% 和 19%, 在 Belgrade 站减小 7.8%. Hargreaves 法月值计算结果增大 5% ~ 27%, Thornthwaite 法月值计算结果偏低 8.5% ~ 19.3%. 目前, 国内针对温度法的研究还较少^[6-7]. 刘晓英等^[6]研究表明, 在我国华北地区, Hargreaves 法与 FAO56-PM 法计算结果最为吻合, Thornthwaite 法计算效果最差. 王新华等^[7]研究认为在我国西北干旱地区, Hargreaves 法计算结果较 FAO56-PM 法偏低, 年值相对偏差为 -0.8% ~ 8.1%.

本文根据 2002 ~ 2003 年气象资料, 利用 Hargreaves 法、Thornthwaite 法、简化的 FAO56-PM 法和 Mc cloud 法计算了 ET_0 日值; 以 FAO56-PM 法计算结果为参考, 分析了温度法在我国湿润地区的应用效果, 并建立了基于温度资料的 BP 人工神经网络预测模型. 根据 2004 年气象资料, 分析校正后的温度法和 BP 人工神经网络预测模型在该气候区的适用性, 为我国湿润气候区参考作物蒸发蒸腾量的研究提供参考.

1 材料与方法

1.1 气象数据

气象数据来自江西省余江县气象站(28°15'N ,116°55'E),该地区年平均温度 17.2 ~ 18.1℃ ,大于 10℃ 积温为 5 627.6℃ ;无霜期为 262.1 d ,年均日照为 1 852.4 h ,日照时数百分率 42% ,太阳辐射为 4 523 MJ/cm² ,年降水量为 1 752.1 mm ,为典型的中亚热带湿润气候区.

1.2 研究方法

目前 ,国内外采用较多的温度法主要有 :

a. Hargreaves 法^[2,6] :

ET₀ = 0.002 3 1/λ (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_{mean} + 17.8) R_a (1)

其中 T_{mean} = 1/2 (T_{max} + T_{min}) (2)

式中 :λ——汽化潜热 ,MJ/kg ;R_a——大气辐射 ,MJ/(m² · d) ;T_{max} ,T_{min}——日最高、最低气温 ,℃.

b. Thornthwaite 法^[4,5] :

ET₀ = { 16 C (10 T_{ef}/I)^a 0℃ ≤ T_{ef} ≤ 26℃ (3)

其中 T_{ef} = 0.5 K (3 T_{max} - T_{min}) (4)

a = 6.75 × 10⁻⁷ I³ - 7.71 × 10⁻⁵ I² + 1.791 2 × 10⁻² I + 0.492 39 (5)

式中 :C——将计算时段由月转为日的系数 ,C = N/360 ;I——热量指数 ,I = ∑_{n=1}¹² (0.2 T_n)^{0.514} ,其中 T_n 为月平均温度 ,℃ ;T_{ef}——有效温度 ,℃ ;K——常数 ,K = 0.72.

c. 简化的 FAO56-PM 法^[4].将 FAO56-PM 式中的 R_s 和 e_d 视为温度的函数 ,并假设 U₂ = 2 m/s ,得到简化的 FAO56-PM 法.

R_s = K (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a (6)

e_d = 0.610 8 exp (17.27 T_{min} / (T_{min} + 237.3)) (7)

式中 :R_s——太阳辐射 ,MJ/(m² · d) ;e_d——实际水汽压差 ,kPa ;K——调整系数 ,内陆地区 K = 0.16 ,沿海地区 K = 0.19.

d. Mc cloud 法^[6] :

ET₀ = KW^{1.8T} (8)

式中 :K ,W——常数 ,K = 0.254 ,W = 1.07 ;T——日平均温度 ,℃.

1.3 统计参数

用均方误差来评价 4 种温度法计算结果与 FAO56-PM 法计算结果间的差异 ,计算公式表示为

RMSE = √ (∑_{i=1}^N (c_{s,i} - c_{t,i})² / (N - 1)) (9)

式中 :RMSE——均方误差 ,mm/d ;c_{s,i}——FAO56-PM 法计算的 ET₀ 值 ,mm/d ;c_{t,i}——其他方法计算的 ET₀ 值 ,mm/d.

2 结果与分析

2.1 温度法计算结果分析

温度法计算结果如图 1 所示. Hargreaves 法、Thornthwaite 法以及简化的 FAO56-PM 法与 FAO56-PM 法计算结果较一致. 其中 ,ET₀ 较小时 (< 5 mm/d) ,Hargreaves 法计算结果较 FAO56-PM 法偏大约 0.01 ~ 2.7 mm/d ,在

ET_0 较大时($> 5 \text{ mm/d}$)较 FAO56-PM 法偏小 $0.006 \sim 2.29 \text{ mm/d}$,日绝对误差平均值 MRE 、日相对误差平均值 MAE 及均方误差 $RMSE$ 分别为 0.73 mm/d 38.45% 和 0.9 mm/d ,与 Itenfisu 等^[8]利用美国 16 个州 49 个站点气象资料的研究结果一致. Thornthwaite 法与 FAO56-PM 法的线性相关性最好($R^2 = 0.8289$), MRE , MAE 和 $RMSE$ 分别为 0.72 mm/d 36.09% 和 0.88 mm/d .简化的 FAO56-PM 法计算结果虽然与 FAO56-PM 法的线性相关性不高 ,但 MRE , MAE 及 $RMSE$ 均较其他 3 种方法小 ,分别为 0.67 mm/d 34.53% 和 0.86 mm/d .Thornthwaite 法和简化的 FAO56-PM 法具有与 Hargreaves 法相类似的变化规律 ,即在 ET_0 较小时较 FAO56-PM 法计算结果偏大 ,在 ET_0 较大时较 FAO56-PM 法计算结果偏小. Mc cloud 法计算值较 FAO56-PM 法偏大 $0.001 \sim 10.5248 \text{ mm/d}$, MRE 和 MAE 分别为 1.8 mm/d 和 58.1% ,与 FAO56-PM 法的差异最大.

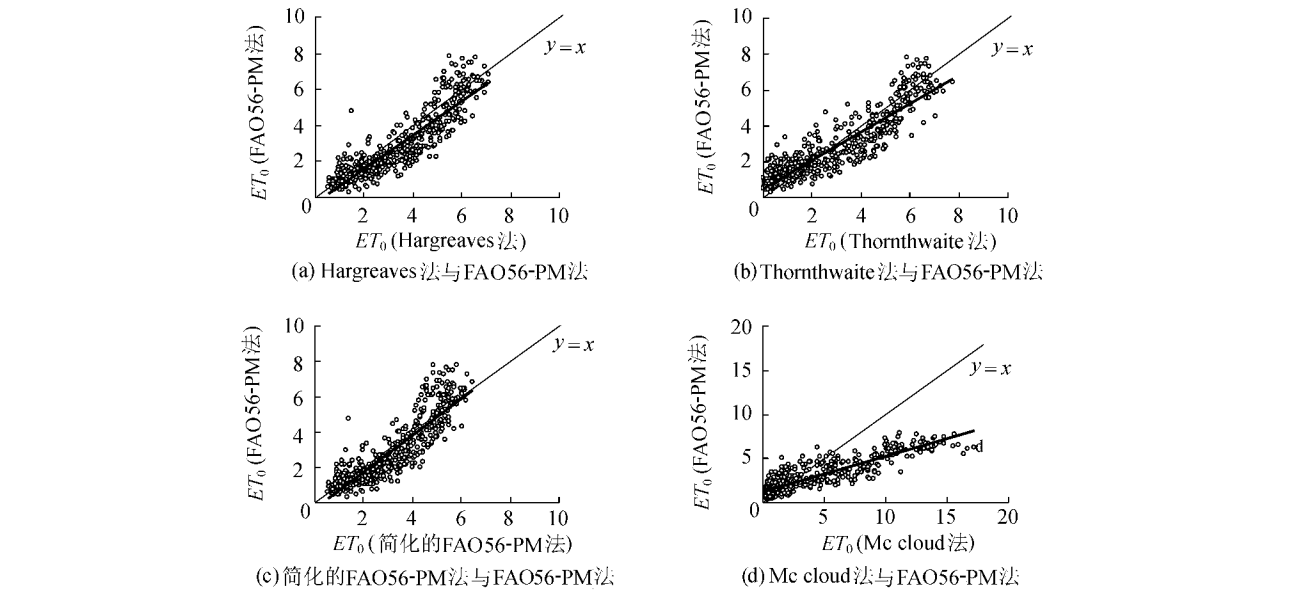


图 1 温度法与 FAO56-PM 法计算结果关系(单位 mm/d)

Fig.1 Relationship between the calculated results of temperature-based methods and FAO56-PM method(unit mm/d)
分析表明 ,各种温度法与 FAO56-PM 法均表现出较好的线性关系($R^2 = 0.7951 \sim 0.8289$).除了 Mc cloud 法($RMSE = 2.74 \text{ mm/d}$) ,Hargreaves 法、Thornthwaite 法以及简化的 FAO56-PM 法与 FAO56-PM 法间误差相对较小($RMSE = 0.86 \sim 0.9 \text{ mm/d}$) ,其中 ,以 Thornthwaite 法与 FAO56-PM 法最为接近.

已有研究表明 ,与 ET_0 综合法、辐射法等相比 ,温度法的计算误差较大 ,且几乎所有的温度法只有在经过地区校正后才可应用于该气候条件下的 ET_0 计算^[3 6] .Trajkoric^[4]采用标准的 FAO56-PM 法对其他经验方法进行校正 ,即建立如下关系方程 :

$$ET_0 = a + bET_{eq}$$

(10)

式中 : ET_0 ——FAO56-PM 法计算结果 , mm/d ; ET_{eq} ——其他经验方法计算结果 , mm/d ; a , b ——校正系数.利用线性回归关系 ,得出 4 种温度法的校对方程 ,校正系数如表 1 所示.

2.2 校对方程的检验

利用 2004 年 7 ~ 10 月(晚稻生长季)气象数据对校正后的温度法进行检验(表 2).除校正的 Mc cloud 法外 ,其他方法计算结果与 FAO56-PM 法比较一致.校正后的 Hargreaves 法、Thornthwaite 法以及简化的 FAO56-PM 法与 FAO56-PM 法的 $RMSE$ 为 $0.31 \sim 0.46 \text{ mm/d}$,统计检验值 $t = 0.0699 \sim 1.0793 < t_{0.05} = 1.6547$,相对误差小于 20% 的合格率达 $91.14\% \sim 97.47\%$ 表明校正后的温度法与 FAO56-PM 法计算结果无显著差异 ,计算精度较高 ,能满足实际生产的需要.

表 1 温度法的校正系数 a 和 b

Table 1 Calibrated coefficients a and b of improved temperature-based methods

温度法	校正系数		相关系数
	a	b	
Hargreaves 法	-0.3093	0.9430	0.942
Thornthwaite 法	0.5326	0.7842	0.918
简化的 FAO56-PM 法	-0.3829	1.0427	0.919
Mc cloud 法	1.1846	0.4025	0.720

表2 校正后温度法与FAO56-PM法计算结果关系及统计分析

Table 2 Relationship and statistical analysis of calculated results of improved temperature-based methods and FAO56-PM method

方 法	ET_{eq}/ET_0	$MAE/(mm \cdot d^{-1})$	$MRE/\%$	$RMSE/(mm \cdot d^{-1})$	合格率/%	t 检验值	样本数
Hargreaves 法	0.995	0.25	6.71	0.31	97.47	0.069 9	79
Thornthwaite 法	1.046	0.39	10.46	0.46	91.14	1.079 3	79
简化的 FAO56-PM 法	0.982	0.29	7.77	0.38	94.94	0.402 6	79
Mc cloud 法	1.000	0.66	18.55	0.80	59.49	0.173 8	79

2.3 基于温度资料的BP人工神经网络预测模型结果分析

由于温度法应用于不同的气候类型时,往往需要针对不同地区进行校正,给实际应用带来不便. Trajkoric^[4]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^[9]、蒋任飞等^[10]构建了气象资料不足条件下的 ET_0 BP人工神经网络预测模型,获得较高的计算精度. 由于BP人工神经网络是目前使用最广泛、发展最成熟的一种神经网络,并已广泛应用于 ET_0 的计算和预测,因此,考虑建立基于温度资料的BP人工神经网络预测模型,分析其模拟精度和预测能力.

选取最大温度、最小温度、平均温度、大气辐射以及日序数为BP人工神经网络预测模型输入变量,输出变量为FAO56-PM法 ET_0 计算结果. 经过多次训练比较后,确定隐含层节点数为8个,即模型的拓扑结构为5个输入单元,8个隐含单元,1个输出单元. 以2002~2003年的气象资料为训练样本(547个),2004年7~10月 ET_0 资料为检验样本(80个),目标结果拟合如图2所示.

BP人工神经网络预测模型预测值与FAO56-PM法计算值拟合关系 $y = 1.1788x - 0.613$ ($R^2 = 0.8799$, $P(F > F_{sig}) < 0.05$), 相对误差小于20%的合格率为92.41%, MAE , MRE 以及 $RMSE$ 分别为0.38 mm/d,9.72%和0.46 mm/d,计算精度高于Thornthwaite法和Mc cloud法. 表明基于温度资料的BP人工神经网络预测模型精度较高,可应用于气象资料缺失地区 ET_0 的预测.

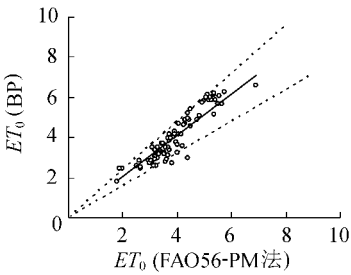


图2 基于温度资料的BP人工神经网络预测模型预测结果(单位 mm/d)

Fig.2 Predicted result of temperature data-based BP artificial neural network model(unit mm/d)

3 结 论

- a. 湿润地区的研究表明,Mc cloud法与FAO56-PM法计算结果差异最大,以Thornthwaite法与FAO56-PM法计算结果最为接近.
- b. 除Mc cloud法外,校正后的温度法检验合格率较高,计算精度较高,具有较好的地区适用性.
- c. 基于温度资料的BP人工神经网络预测模型预测结果与FAO56-PM法计算结果呈显著线性相关,计算精度高于校正后的Thornthwaite法和Mc cloud法. 本研究只基于3年的气象资料,增加气象资料序列长度将会有助于提高温度法和BP人工神经网络预测模型的预测精度.

参考文献:

[1] LECINA S, MARTINEA-COB A, PEREZ P J, et al. Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman-Monteith equation under semiarid condition[J]. Agricultural and Water Management, 2003, 60(3):181-198.

[2] HOSSIN D S, TAHEI Y, VELU R. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environment[J]. Agricultural Water Management, 2004, 64(2):91-106.

[3] IRMAK S, ALLEN R G, WHITTY E B. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratio in Florida[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(5):360-370.

[4] TRAJKORIC S. Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(4):316-325.

[5] PEREIRA A R ,PRUITT W O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration[J]. Agricultural Water Management , 2004 66(3) 251-257.

[6] 刘晓英,李玉中,王庆锁.几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价[J].农业工程学报 2006 22(6) :12-18.

[7] 王新华,郭美华,徐中民.分别利用 Hargreaves 和 PM 公式计算西北干旱区 ET_0 的比较[J].农业工程学报 2006 22(10) :21-25.

[8] ITENFISU D , ELLIOTT R , ALLEN R G et al. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering , 2003 ,129(6) :440-448.

[9] 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.

[10] 蒋任飞,阮本清,韩宇平,等.基于 BP 神经网络的参照蒸发量预测模型[J].中国水利水电科学研究院学报 2005 3(4) :308-311.

Calculation method for reference crop evapotranspiration
based on temperature data

DING Jia-li^{1,2} , PENG Shi-zhang¹ , XU Jun-zeng^{1,3} , JIAO Xi-yun¹ , LUO Yu-feng¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,
Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. Nantong Water Resources Bureau , Nantong 226006 , China ;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : FAO56 Penman-Monteith equation (FAO56-PM) is the standard method for estimating reference crop evapotranspiration (ET_0). However , the meteorological data required by FAO56-PM method are not always available at a given station . In consideration of the above fact , the temperature-based methods were analyzed and the temperature data-based BP artificial neural network model was established . According to the result of FAO56-PM , the performances of four temperature-based methods , i . e . the Hargreaves method , the improved Thornthwaite method , the simplified FAO56-PM method , and the Mc cloud method , used in humid areas in China were compared , and the suitability of the improved temperature-based methods and the BP artificial neural network model to humid areas was evaluated . The result shows that , for relatively low ET_0 , the calculated results ET_0 of the Hargreaves method , the improved Thornthwaite method and the simplified FAO56-PM method are greater than that of the FAO56-PM method ; however the calculated results ET_0 of the FAO56-PM method is relative large for high ET_0 . Moreover , the calculated result of the improved Thornthwaite method is the closest to that of the FAO56-PM method , and the difference between the calculated results of the Mc cloud method and FAO56-PM method is the greatest ; except for the Mc cloud method , the improved temperature-based methods are of high suitability to humid climate with low error . The temperature data-based BP artificial neural network model is of high precision of prediction , and the predicted result of the model is superior to those of the improved Thorthwaite method and the Mc cloud method . Therefore , it can be used for prediction of ET_0 for humid areas only with temperature data .

Key words : reference crop evapotranspiration ; temperature-based method ; BP artificial neural network model ; humid area