

DOI: CNKI: 32-1309/P. 20110313. 2236. 011

Hargreaves 公式的全局校正及适用性评价

胡庆芳^{1,2}, 杨大文¹, 王银堂², 杨汉波¹

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: Hargreaves 公式是计算参考作物腾发量(ET_0)最为简便的经验公式之一, 但目前对于该公式在不同气候类型区域的适用性及误差影响因素尚缺乏系统评价。在月时间尺度上, 以 Penman-Monteith 公式计算的 ET_0 为基准值, 利用洗牌复合形进化算法(SCE-UA), 在中国 105 个气象站对 Hargreaves 公式进行了全局校正。分析了校正后 Hargreaves 公式参数的地区分布规律和影响因素; 同时, 从长系列过程和年内季节性过程两方面, 综合说明了校正后 Hargreaves 公式在中国 7 个区域的适用性; 讨论了影响 Hargreaves 公式计算精度的气象因素。结果表明: 校正后 Hargreaves 公式可以有效提高计算精度, 但计算精度的地区差异仍然比较明显。校正后的 Hargreaves 公式, 对于青藏高原及毗邻区和西南、西北地区大部分站点, 在年内各月均具有较强的适用性; 对于东北、华北和新疆地区, 夏秋季节的计算精度较高, 而在冬春季节计算精度较低; 对于华南地区的绝大多数站点, 仅在年内 2~3 个月份具有较高计算精度。同时, 对于大部分站点, Hargreaves 公式无法有效描述 ET_0 中的空气动力学项是计算误差产生的主要原因。校正后 Hargreaves 公式在年内各月计算精度与空气动力学项占 ET_0 的比例(K)、月平均降水量(P)具有显著相关性。一般而言, K 值越大, Hargreaves 公式计算精度越低; P 越大, Hargreaves 公式计算精度越高。各月计算精度与风速、相对湿度的关系则比较复杂, 在不同区域表现各异。

关键词: 参考作物腾发量; Hargreaves 公式; Penman-Monteith 公式; 洗牌复合形进化算法; 适用性评价

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)02-0160-08

参考作物腾发量(ET_0)是一个重要的气候学和水文学变量, 能够表征气象蒸散发能力的大小, 它的提出为实际蒸散发的标准化计算奠定了基础。目前, 计算 ET_0 的推荐方法是 Penman-Monteith 公式(以下简称 P-M 公式), 该公式的物理学基础比较严密, 计算精度较高, 但需要相当完备的气象数据资料, 因此在应用的过程中往往受到数据缺失的困扰。在这样的情况下, 对数据资料要求较低的气候学方法成为计算 ET_0 的现实选择。其中, 常用的有 Priestley-Taylor、Turc、Blaney-Criddle 公式等十余种^[1]。

Hargreaves 公式(以下简称 H 公式)是 Hargreaves 和 Samina 自 20 世纪 50~60 年代以来逐步提出并不断改进的一个气候学公式^[2]。H 公式仅需要最高温度、最低温度就可以计算 ET_0 , 对资料要求较很低, 因此自提出以来得到了广泛的研究与应用, FAO56 已将该公式作为气象数据缺测条件下计算 ET_0 的推荐方法^[3]。国内外围绕该公式的精度评价、参数校正、误差影响因素分析等问题进行了大量研究。Jensen 等^[4]认为 H 公式用来计算 5 d 或更长时间步长的 ET_0 比较可靠。Xu 等^[5]在瑞士 Vaud 地区比较了 H 公式和其它 5 种经验公式的计算精度, 发现 H 公式校准后能准确的计算年 ET_0 , 但计算精度在所有方法中位居中等。Temesgen 等^[6]指出在湿润低风环境下 H 公式的计算结果偏高, 而在干燥强风的环境下计算值偏低。Lu 等^[7]、Trajkovic^[8]、刘钰等^[9]也提出了类似看法。Samina 提出了一种基于最高温度与最低温度之差修正 H 公式参数的方法^[10], 但后来有人指出该方法并不能有效提高计算精度^[11]。Trajkovic^[8]研究了湿润的巴尔干半岛 H 公式的校正方式, 指出其中的指数型参数取 0.424 可以取得较好的模拟效果。

收稿日期: 2009-12-22; 网络出版时间: 2011-03-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110313.2236.011.html>

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAB14B02); 南京水利科学研究院基金资助项目(Y50701)

作者简介: 胡庆芳(1981-), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, 工程师, 主要从事水文水资源及防洪规划方面的研究。

E-mail: hqf_work@163.com

H 公式是一个从半干旱地区逐步发展起来的经验公式, 目前对于该公式的适用性, 不同学者基于特定区域的数据, 得到的认识也不一致。国外尽管已提出了若干参数修正方法, 但对这些方法的有效性尚存在争论, 对于参数的地区性分布规律, 以及影响该公式计算精度的因素, 也缺乏深入分析。国内的工作, 以在干旱和半干旱地区单站分析为主, 对公式的区域适用性尚未进行系统评价。

基于上述认识, 本文利用具有全局优化能力的 SCE-UA 算法^[12], 基于全国 105 个代表性气象站的数据资料, 对 H 公式的校正进行研究, 以全面认识 H 公式在我国不同气候类型区域的计算精度和适用性, 分析参数的地区变化规律, 同时合理说明公式在年内不同季节计算精度的主要影响因素。

1 数据资料

收集了全国 105 个气象站的逐月地面气候数据和太阳总辐射数据, 数据来源于中国气象局气象信息中心制作的“中国地面气候资料月值数据集”和“中国辐射月值数据集”。绝大部分站点地面气候数据的长度超过 40 年, 辐射数据的长度超过 20 年。这些数据根据《全国地面气候资料(1961~1990)统计方法》及《地面气象观测规范》有关规定, 进行整编统计而得, 经过了严格的质量控制。

本文将所有站点划分为 7 组。各区域站点的分布如图 1 所示。第 1 组(12 个站点)分布在东北地区; 第 2 组(15 个站点)位于新疆以外的西北地区(仍用西北地区表示); 第 3 组(12 个站点)分布在新疆地区; 第 4 组(11 个站点)分布在青藏高原及毗邻区域; 第 5 组(13 个站点)分布在华北和南北过渡带; 第 6 组(25 个站点)站点位于在西南地区; 第 7 组(26 个站点)分布在华南地区。站点分组方法基本上遵从了中国自然地理区划(<http://www.sinomaps.com>)中将全国分为北方、西北、南方 4 个自然大区的方式及空间范围。进一步考虑到同一大区内自然地理特征的差异和气象站点空间分布, 在西北大区中将新疆地区单独划分出来, 其它部分仍用西北地区表示。将北方地区划分为东北、华北两个亚区, 将南方地区划分为西南、华南两个亚区。对于少数处于分区边缘地带的站点, 根据其地理位置、海拔对区域归属进行了调整。



图 1 各区域站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations

2 研究方法

2.1 P-M 公式

由于 P-M 公式的计算精度较高, 因此, 本文将该公式计算的 ET_0 作为评价 H 公式计算精度的基准值, 仍用 ET_0 表示。PM 公式的形式及计算 ET_0 的步骤可参见文献[3], 但需要指出的是 P-M 公式计算 ET_0 的过程中所采用 Angstrom 公式^[3] 计算太阳总辐射 R_s :

$$R_s = R_a \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

式中 n 、 N 分别为实际日照时数和理论日照时数, h/d; R_a 为月天文辐射总量, MJ/(m²·d); a 、 b 为 Angstrom 公式的参数, 其数值对 ET_0 计算影响较大, 因此需要进行率定, 不可盲目采用 FAO56 建议的 $a=0.25$, $b=0.5$ 。本文 105 个站点的 a 、 b 值, 均根据天文总辐射和实测逐月太阳总辐射, 通过建立如式(1)的线性回归方程求得。

2.2 H 公式及其校正方法

H 公式是基于下列两个经验公式提出的^[10]:

$$ET_H = 0.0135 R_s \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + T \right) \quad (2)$$

$$R_s = K_{RS} R_a \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right)^E \quad (3)$$

式中 ET_H 表示 H 公式计算的 ET_0 , mm/d; T_{\max} 、 T_{\min} 分别为最高、最低温度, °C; K_{RS} 为经验系数。将式(3)代入式(2), 即得到 H 公式:

$$ET_H = C R_a (T_{\max} - T_{\min})^E \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + T \right) \quad (4)$$

式中 C 、 E 、 T 为 H 公式的 3 个参数, 其建议值分别为 0.0023 (K_{RS} 取 0.16, $C=0.0135K_{RS}$)、0.5、17.8。式(4)在形式上对于不同类型气候区域均具有一定的合理性, 但许多研究指出参数 C 、 T 、 E 均具有地区变异性。因此, 使用原有的建议参数值 ($C=0.0023$, $T=17.8$, $E=0.5$), 或者仅对某一个参数进行修正 (通常做法是仅对 C 进行修正) 是不合理的, 难以显著提高计算精度, 故需要对 H 公式的 3 个参数均作地区校正。同时, 笔者认为对于经验公式 (或气候学公式) 的修正, 应尽可能的保持原有结构的简洁性, 不宜为提高计算精度而引入更多的参数。因此, 本文采用具有全局优化能力的 SCE-UA 算法^[12] 对上述 3 个参数进行校正, 这样既可以达到保持 H 公式原有形式的简洁性, 又尽可能提高公式的计算精度。H 公式校正的具体步骤如下:

(1) 划分校准期和检验期 将各站连续的逐月气象数据序列按时间顺序划分为前后两部分, 作为模型的校准样本和验证样本, 两者的样本数分别为 l_1 和 l_2 。 l_1 与 l_2 之比一般为 5:1。

(2) 确定待优化变量的可行域 经分析和调试, 本文中 3 个参数的可行域分别取: $C \in [5 \times 10^{-5}, 0.02]$ 、 $E \in [0.02, 2.0]$ 、 $T \in [2.0, 85.0]$ 。

(3) 确定优化目标函数 为保证 H 公式校正后尽可能同时具有较高的模拟精度和泛化能力, 将最小化下列函数 F 作为 SCE-UA 算法的寻优目标。

$$F = \frac{l_1}{l_1 + l_2} (1 - C_{D1}) + \frac{l_2}{l_1 + l_2} (1 - C_{D2}) \quad (5)$$

式中 C_{D1} 、 C_{D2} 分别表示率定期和检验期的 Nash-Sutcliffe 系数, 其计算公式分别为

$$C_{D1} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{l_1} [ET_H(t) - ET_0(t)]^2}{\sum_{t=1}^{l_1} [ET_0(t) - \overline{ET_0}]^2}, \quad C_{D2} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{l_1+l_2} [ET_H(t) - ET_0(t)]^2}{\sum_{t=T_1+1}^{l_1+l_2} [ET_0(t) - \overline{ET_0}]^2} \quad (6)$$

式中 $ET_H(t)$ 、 $ET_0(t)$ 分别为 H、P-M 公式计算的第 t 个月 ET_0 , $\overline{ET_0}$ 为 $ET_0(t)$ 的逐月均值。

(4) 确定 SCE-UA 算法的结构参数和收敛准则, 运行优化算法, 输出 H 公式参数优化结果。

2.3 计算精度评价指标

本文主要从两个方面来考察 H 公式的适用性: 一方面, 从长系列过程来看, ET_H 和 ET_0 是否具有较强同步性; 另一方面, 从年内过程来看, ET_H 和 ET_0 的季节性变化是否比较一致。对于长系列过程的同步性, 本文通过 Nash-Sutcliffe 系数 (C_D), 逐月、逐年平均相对误差 (E_{MR}), 逐月合格率 (R) 进行评价。对于季节性变化的一致性, 通过年内各月平均相对误差和合格率进行分析。其中, 合格率是指在评价时期内, 绝对值相对误差 (E_{AR}) 不超过 15% 的月份数占统计总月份数的百分比。

由于在分析过程中发现, 检验期和率定期内上述精度指标的差异较小, 因此下文讨论时不再区分检验期和率定期, 而是对所有的样本一并分析。

3 结果分析与讨论

3.1 参数校正结果

图 2 点绘了 H 公式校正后 3 个参数在各站的分布, 表 1 列出了上述参数在 7 个区域的统计指标。根据图 2 可知, C 、 E 、 T 在绝大多数站点均偏离了 FAO 给出的建议值。校正后 C 值基本上低于 0.0023, 仅在少数几个站点高于建议值, 其集中分布区间是 $[0.0005, 0.0020]$ 。从地区分布来看, 除新疆地区有 5 个站点的 C 值明显偏高以及东北地区站点的 C 值偏低外, C 在其它 6 个区域差异并不十分显著。对于 E 而言, 大部分站点的校正值均高于建议值 0.5, 低于 0.5 的几个站点主要分布在新疆地区。总体上, 华南地区站点 E 最高, 其次为东北地区 and 西南地区, 西北、华北和青藏地区相当, 新疆地区最低。 C_v 说明除新疆地区外, 其它 6 个区域 E 值在区域内的变异性较小。参数 T 的地区性差异最为明显。由图 2(c) 和表 1 明显可知, 东北、西北、华北、青藏区域站点的 T 值要显著高于西南和华南区域站点。

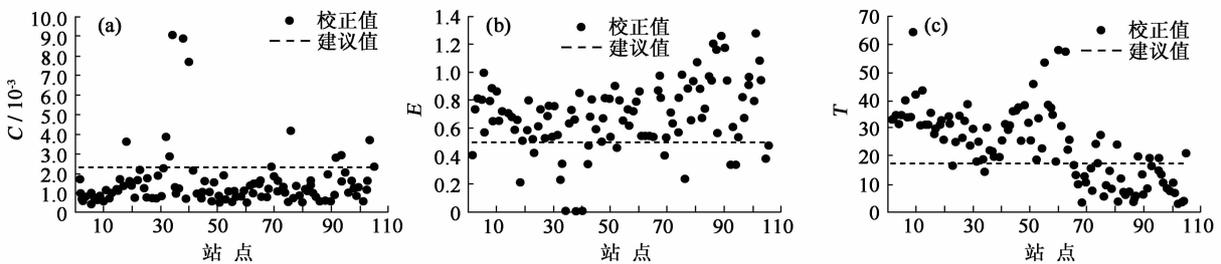


图 2 校正后 H 公式参数分布

Fig. 2 Calibrated parameters of Hargreaves Equation

表 1 各区域 H 公式参数的统计指标

Table 1 Statistical indexes of calibrated parameters of Hargreaves equation in seven regions

区域	C		E		T	
	平均值	C_v	平均值	C_v	平均值	C_v
东北	0.0008	0.39	0.74	0.21	37.9	0.24
西北	0.0014	0.51	0.60	0.24	30.2	0.17
新疆	0.0035	0.93	0.44	0.71	22.5	0.21
青藏	0.0012	0.50	0.64	0.27	33.4	0.18
华北	0.0010	0.38	0.66	0.19	34.5	0.40
西南	0.0014	0.64	0.70	0.31	13.1	0.50
华南	0.0014	0.60	0.83	0.34	10.5	0.59

经初步分析, E 、 T 分别与多年平均降水量、年平均温度具有一定的相关性。 E 随站点的年均降水量增加而有升高的趋势, T 随年平均温度的升高而降低。图 3 所揭示的这种相关性, 对于参数的区域综合具有一定价值, 但仍有待通过更多的站点, 对这种规律进行更细致分析。

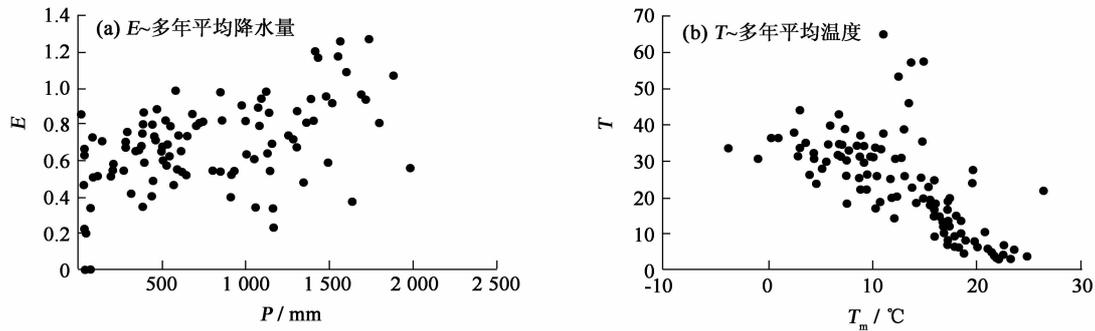


图3 H公式参数与气候要素的相关性

Fig. 3 Correlation between parameters of Hargreaves equation and climatic variables

3.2 ET_H 与 ET_0 长系列一致性

图4列出了H公式校正前后的逐月精度指标,包括逐月 C_D 、逐月 E_{MR} 和逐月合格率 R 。总体而言,校正前H公式的适用性不强,而对于西南地区和华南地区站点尤其如此。对于北方和青藏区的部分站点,尽管逐月 C_D 值较高,但是其 R 较低,因此仍存在较大计算误差。而校正后,在绝大多数站点H公式的计算精度有显著提高。除极个别站点外, C_D 均提高到80%以上,东北、西北和新疆地区站点绝大多数在90%以上。对逐月 E_{MR} ,其绝对值基本在10%以内。同时,大多数站点的逐月 R 也有显著提高, R 超过70%的站点达到71个,超过50%的站点达到101个。因此,对于大多数站点,H公式校准后 ET_H 与 ET_0 在长系列意义上已具有较好的同步性。

根据图4(a)、图4(c)还可以认识到:校准后的H公式的逐月精度指标在不同区域间仍具有一定的差异,其主要表现在华南地区逐月 C_D 值和 R 均较其它区域偏低。

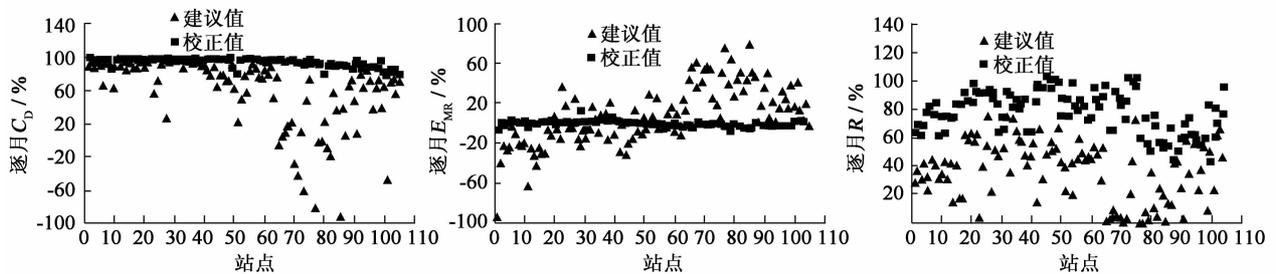


图4 校准前后H公式的逐月精度指标对比

Fig. 4 Accuracy indexes of Hargreaves equation before and after calibration

3.3 ET_H 与 ET_0 的季节一致性

为分析 ET_H 与 ET_0 在年内的季节性变化过程是否具有 consistency,本文计算了校正前后H公式在年内各月的 R 、 E_{MR} 以及绝对误差(E)。对105个站点各月精度指标分析后发现,校正前后H公式计算精度的季节性分布规律都比较复杂,不同气候区域的差异性很大,即使同一区域站点也可能明显不同,很难进行统一描述,这说明文献[9]等对H公式计算精度的描述比较片面。

H公式校正后计算精度的季节性特征可以总结为3种情况:①青藏高原及毗邻区,西南、西北地区大部分站点,在年内各月均具有较高的计算精度,因此公式全年适用;②东北、华北和新疆地区的大部分站点,在夏秋季节具有较高的计算精度,而在冬春季的计算精度较低(ET_H 在1~3月以偏高为主,11~12月以偏低为主),因此公式仅在夏秋季节适用;③华南地区的大多数站点,在年内多数月份的计算精度仍较低(ET_H 在3~6月偏高,其它月份则偏低),仅2至3个月份的 R 、 E_{MR} 满足要求,因此基本不具备描述 ET_0 的年内变化过程的适用性。图5列出了校正后的H公式在7个区域代表站的年内各月精度指标分布。

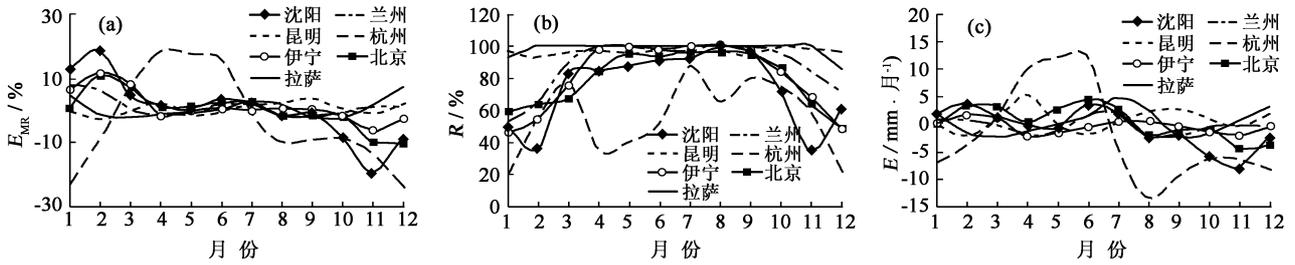


图 5 校正后 H 公式年内各月精度指标

Fig. 5 Seasonal accuracy indexes of calibrated Hargreaves Equation in representative stations

3.4 H 公式计算精度与气象要素的关系

H 公式主要考虑了温度和辐射这两类最主要的气象因子对 ET_0 的影响, 但未能考虑湿度、风速等因素的影响。对于某些站点, 校正后的 H 公式在全年或特定月份仍会产生较大误差。因此, 本文进一步分析校正后 H 公式在年内各月 R 、平均绝对值相对误差 (E_{MAR}) 与各月平均相对湿度 (R_H)、降水量 (P)、风速 (U)、P-M 公式中空气动力学项占 ET_0 的比例 (用 K 表示)。

本文计算了各站点年内各月 R 和 E_{MAR} 与上述 4 个气象要素的相关系数。以各月合格率 R 和各月平均 K 的相关系数为例, 相关系数的计算公式如下:

$$\rho = \text{Cov}(R, K) / [\text{Std}(R)\text{Std}(K)] \tag{7}$$

$$R = (R_1, R_2, \dots, R_{12}), K = (K_1, K_2, \dots, K_{12}) \tag{8}$$

以上两式中, Cov 、 Std 分别为协方差函数和标准差函数, R_i 和 K_i 分别为年内第 i 月合格率和平均 K 值。其它气象要素与 R 和 E_{MAR} 的相关系数的计算类似。

对气象要素与各月 R 和 E_{MAR} 的相关性进行分析后发现, 在各气象要素中, K 、 P 与 R 和 E_{MAR} 的相关性比较密切, 并且在不同区域都具有较强的普遍性 (图 6)。

图 6(a)、图 6(c) 说明几乎对于所有站点, 各月平均 K 与 R 存在显著的负相关关系, 而与 E_{MAR} 存在显著

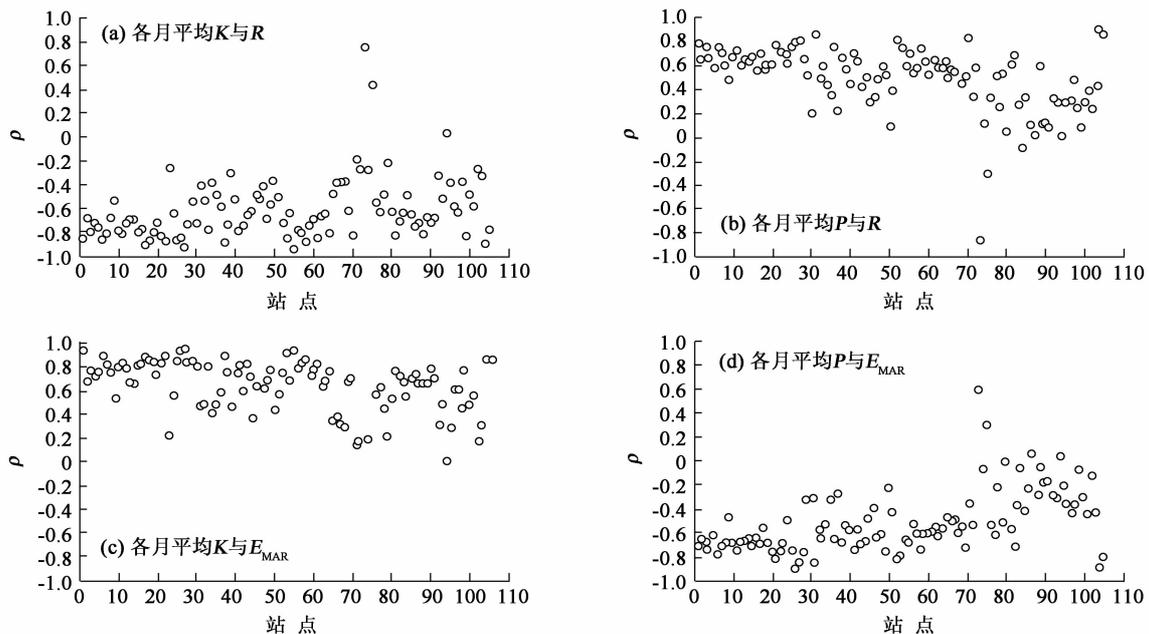


图 6 校正后 H 公式计算精度与气象要素相关系数

Fig. 6 Correlations coefficient between precision indexes of Calibrated Hargreaves Equation and climatic variables

的正相关关系。而图 6(b)、图 6(d) 则说明, P 与 R 存在显著的正相关关系, 与 E_{MAR} 存在显著的负相关关系(在华南区域稍差)。 K 值越大, 则 H 公式的计算精度越低。这就统一解释了无论对于干旱半干旱区, 还是湿润半湿润地区, 校正后 H 公式误差产生的主要原因均在于该公式无法描述 ET_0 中的空气动力学项, 因而 K 和 P 在一定程度上可以作为校正后 H 公式适用性的指示因子。

对于 U 和 RH 两个气象要素与 H 公式计算精度的关系, 在不同区域有较大差别。这两个气象要素与 K 和 P 不同, 无法对 H 公式精度具有普遍性指示性作用, 但它们对于特定区域 H 公式计算精度指标间可能存在较强的相关性。限于篇幅, 本文不再讨论。

4 结 论

基于中国 105 个气象站的常规气象观测资料和太阳总辐射观测资料, 利用 SCE-UA 算法对 Hargreaves 公式(H 公式)进行了全局校正, 分析了校正后参数的地区分布特征, 从 ET_0 长系列过程的同步性和年内季节性变化过程的一致性两方面综合评价了 H 公式在中国 7 个区域的计算精度和适用性, 并分析了校正后 H 公式计算精度与气象要素之间的关系, 主要研究结论如下:

(1) 校准前的 H 公式, 在中国各种类型气候区域的适用性较差, 而利用 SCE-UA 算法对参数进行全局校准后, 既保留而 H 公式原有的形式, 又显著提高了计算精度。

(2) 各站点校准后的 H 公式参数基本上均偏离了原 FAO 建议值, 但具有明显的地区分布特征, 参数 E 和 T 分别与多年平均降水量和平均温度具有一定的相关性, 为参数的地区综合提供了可能。

(3) 校准后的 H 公式在青藏高原及毗邻区和西南、西北大多数站点全年均具有较强适用性, 在华北、东北、西北及新疆地区的夏秋季节具有较高的计算精度, 而在华南地区基本上全年均不适用。

(4) 无法有效描述 ET_0 中的空气动力学项, 是各区域校正后 H 公式误差产生的主要原因。校正后 H 公式在年内各月计算精度指标与 Penman-Monteith 公式中空气动力学项占 ET_0 之比(K)和月均降水量(P)关系密切。一般而言, K 值越大, H 公式计算精度越差; P 越高, 计算精度越高。

本文讨论的空间尺度比较大, 着重于对一般性区域规律的分析, 但已经基本上明确了 H 公式在我国各气候区域的适用性, 为气象数据不完备条件下 ET_0 计算提供了重要依据, 也为进一步利用 H 公式进行有关实际蒸散发的计算创造了条件。在后续研究中, 需要在更小的空间尺度上对这一问题进行讨论, 以得到更为翔实的结论。同时, 本文主要在月时间尺度上对 H 公式的适用性进行研究, 限于篇幅, 未在日、时尺度进行讨论, 这也是下一步需要进行的工作。

致谢: 衷心感谢中国气象科学数据科学共享服务网(<http://cdc.gov.cn>)提供本文所需的气象资料!

参考文献:

- [1] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 10: 83-98. (XU Zong-xue. Hydrology model [M]. Beijing: Science Press, 2009, 10: 83-98. (in Chinese))
- [2] HARGREAVES G H, ALLEN R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(1): 53-63.
- [3] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements irrigation and drainage paper [M]. Rome: FAO, 1998: 290-300.
- [4] JENSEN D T, HARGREAVES G H, TEMESGEN B, et al. Computation of ET_0 under nonideal conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, 123(5): 394-400.
- [5] XU C Y, SINGH V P. Evaluation and generalization of temperature-based method for calculating evaporation[J]. Hydrology Process, 2001, 15(2): 305-319.
- [6] TEMESGEN B, ECHING S, DAVIDOFF B, et al. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1): 73-84.
- [7] LU Jian-biao, SUN Ge, McNULTY S G, et al. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the

- Southeast United States[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005, 7: 621-633.
- [8] TRAJKOVIC S. Hargreaves versus Penman-Monteith under Humid conditions [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2007, 133(1): 38-42.
- [9] 刘钰, PEREIRA L S. 气象数据缺测条件下参考作物蒸发量的计算方法[J]. 水利学报, 2001, 42(3): 1-17. (LIU Yu, PEREIRA L S. Calculation methods for reference evapotranspiration with limited weather data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 42(3): 1-17. (in Chinese))
- [10] SAMANI Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2000, 126(4): 265-267.
- [11] DROOGERS P, ALLEN R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions[J]. Irrigation and Drainage System, 2002, 16(1): 33-45.
- [12] DUAN Q, GUPTA V K, SOROOSHIAN S. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models [J]. Water Resources Research, 1992, 28(4): 1015-1031.

Global calibration of Hargreaves equation and its applicability in China*

HU Qing-fang^{1,2}, YANG Da-wen¹, WANG Yin-tang², YANG Han-bo¹

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: As one of the simplest empirical methods for positional evapotranspiration (ET_0) calculation, it is still lack of systemic evaluation for Hargreaves equation's computational accuracy and applicability evaluation in different climatic regions. In this paper, the Hargreaves equation is calibrated using the global optimization algorithm SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method developed at University of Arizona). The value of ET_0 calculated by the Penman-Monteith equation is used as the benchmark. The global calibration is done using a monthly time step at 105 climate stations distributed over the continental China as well as on Hainan Island. The regional distribution of the calibrated parameters is analyzed and influencing factors on the parameters are investigated. The applicability of the calibrated Hargreaves equation in seven different climatic regions is synthetically evaluated for the long-term consistency and the seasonal consistency. The influencing factors on the accuracy of the calibrated Hargreaves equation are investigated using the method of correlation analysis. Results show that globally calibrated parameter values of the Hargreaves equation using SCE-UA are essentially different from that recommended by Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. However, the accuracy of the equation is highly promoted and the calibrated parameters at the 105 stations exhibit a certain regional regularity and may vary with annual precipitation and temperature. At almost all the stations on the Qinghai-Tibet Plateau, Northwest and Southwest China, the calibrated Hargreaves equation is applicable all year round. In contrast, poor calculation of ET_0 is found in all seasons in South China. The calibrated Hargreaves equation is only valid during summer and autumn seasons over Northeast and North China and the Xinjiang Autonomous Region. Generally, the disability in calculating the aerodynamic component of ET_0 is the main source of errors causing computational defect in the Hargreaves equation over different regions. The accuracy of the calibrated Hargreaves at most stations is notably related to the ratio (K) of the aerodynamic component to ET_0 calculated by the Penman-Monteith equation. The computational accuracy deteriorates with decreasing of K . The opposite is true for annual precipitation and temperature. While, effects of relative humidity and wind speed on the computational accuracy are rather complicated, varying with regions.

Key words: ET_0 ; Hargreaves equation; Penman-Monteith equation; SCE-UA; applicability evaluation

* The study is financially supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the 11th Five-year Plan Period (No. 2006BAB14B02).