

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.030

## 农业分区框架下 Hargreaves - Samani 公式的逐月回归修正

夏兴生<sup>1,2</sup> 潘耀忠<sup>1,3</sup> 朱秀芳<sup>2,4</sup> 张锦水<sup>2,4</sup>

(1. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学遥感科学与工程研究院, 北京 100875; 3. 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810016; 4. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 为验证中国农业综合分区框架下 Hargreaves - Samani (HS) 公式线性回归修正方案的适用性, 利用中国气象数据网发布的 124 个站点 1957—2016 年的逐月有效日平均气压、平均最低气温、平均最高气温、平均风速、平均水汽压、月总太阳辐射数据及站点经纬度数据, 首先, 分别基于 Penman - Monteith (PM) 公式和 HS 公式计算了各站点多年逐月的参考作物需水量  $ET_{0-PM}$  和  $ET_{0-HS}$ 。然后, 以  $ET_{0-PM}$  为真值, 基于 1957—2010 年的逐月  $ET_{0-PM}$  和  $ET_{0-HS}$ , 利用线性回归分析方法获取了中国 38 个农业管理子区的 HS 公式校正系数  $a$ 、 $b$ , 并以 2011—2016 年为验证年份, 通过比较  $ET_{0-HS}$  校正前后的相对误差变化, 验证了 HS 公式线性回归校正方法在中国农业区的适用性, 并结合验证年份的具体误差结果, 确定了各农业区 HS 公式校正系数  $a$ 、 $b$  的逐月最优取值。结果表明: 大部分农业区的大部分月份  $ET_{0-PM}$  与  $ET_{0-HS}$  的相关系数超过 0.6, 可以进行  $ET_{0-HS}$  的回归校正; 回归校正得到的系数  $a$  存在显著的季节变化规律, 系数  $b$  则表现较为平稳; 系数  $a$ 、 $b$  的大小及变化说明了  $ET_{0-PM}$  和  $ET_{0-HS}$  彼此之间存在差异, 且季节性明显; 校正前后的  $ET_{0-HS}$  均存在不同程度的相对误差, 但校正后的  $ET_{0-HS}$  的误差范围已经显著缩小; 在具体的验证应用中, 校正后的  $ET_{0-HS}$  并不完全是最优结果, 实践中系数  $a$ 、 $b$  的优选使用才是最佳方案。本研究验证的 HS 公式线性回归校正方法是实践中简便、可行的方案, 对大尺度区域快速获得较高精度的参考作物需水量具有实际意义和推广价值。

**关键词:** 参考作物需水量; Hargreaves - Samani 公式; 线性回归校正; Penman - Monteith 公式; 中国

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)03-0258-10

OSID:



## Regression Correction of Hargreaves - Samani Equation by Monthly under Framework of China's Agricultural Comprehensive Zoning

XIA Xingsheng<sup>1,2</sup> PAN Yaozhong<sup>1,3</sup> ZHU Xiufang<sup>2,4</sup> ZHANG Jinshui<sup>2,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3. School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810016, China

4. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Aiming to verify the applicability of the linear regression correction scheme for Hargreaves - Samani (HS) equation under the framework of agricultural comprehensive division of China, by using 124 stations meteorological data from 1957 to 2016 released by China Meteorological Data Service Center, the multi-year reference crop evapotranspiration  $ET_{0-PM}$  and  $ET_{0-HS}$  were calculated by monthly based on Penman - Monteith (PM) equation and the HS, respectively. Then, taking  $ET_{0-PM}$  as the true value, linear regression analysis method was used to collect the monthly correction coefficients  $a$  and  $b$  of the HS by  $ET_{0-PM}$  and  $ET_{0-HS}$  from 1957 to 2010 for 38 agricultural management sub-areas of China. Thirdly, by comparing the relative error changes before and after  $ET_{0-HS}$  correction during 2011—2016, the applicability of HS equation linear regression correction method in China's agricultural areas was verified. Lastly, combined with the specific error results during 2011—2016, the optimal monthly values of the HS

收稿日期: 2019-07-29 修回日期: 2019-09-27

**基金项目:** 高分辨率对地观测系统重大专项、国家重点研发计划项目(2018YFC1504603)和中国人民财产保险股份有限公司灾害研究基金项目(2017D24-03)

**作者简介:** 夏兴生(1989—),男,博士生,主要从事作物需水量遥感估算研究, E-mail: xiayuan1104@163.com

**通信作者:** 朱秀芳(1982—),女,副教授,博士,主要从事农业和灾害遥感研究, E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

correction coefficients  $a$  and  $b$  in each agricultural area were determined. The results showed that the  $ET_{0-PM}$  and  $ET_{0-HS}$  had good correlation (more than 0.6) in most months and in most agricultural areas. Therefore, the regression analysis can be carried out. Coefficient  $a$  obtained by regression correction had a significant seasonal change, while coefficient  $b$  was relatively stable, which implied that there were obvious seasonal differencing between  $ET_{0-PM}$  and  $ET_{0-HS}$ . There were relative errors for  $ET_{0-HS}$  before and after correction in different degrees, but the error range of  $ET_{0-HS}$  after correction was significantly reduced. In specific verification applications,  $ET_{0-HS}$  after correction was not the best result for all areas in each month. Therefore, the optimization of  $a$  and  $b$  coefficients was the best scheme in practice. The linear regression correction of the HS was a simple and feasible scheme in practice, which had practical significance and popularization value for rapid acquisition of high-precision reference crop evapotranspiration in large-scale area.

**Key words:** reference crop evapotranspiration; Hargreaves - Samani equation; linear regression correction; Penman - Monteith equation; China

## 0 引言

参考作物需水量 (Reference crop evapotranspiration,  $ET_0$ ) 是计算作物需水量、制定农田水利管理策略的核心参数,对农业水资源的开发利用和农业生产潜力的评估具有重要意义<sup>[1]</sup>。目前,常用的参考作物需水量计算方法有 Penman - Monteith 公式法 (PM 公式)<sup>[2]</sup>、Makkink 方法<sup>[3]</sup>、Hargreaves - Samani 公式 (HS 公式)<sup>[4]</sup>、Droogers and Allen 方法<sup>[5]</sup> 等 10 余种。其中,PM 公式因符合气候学和空气动力学机理而被联合国粮农组织 (FAO) 推荐为计算  $ET_0$  的标准方法<sup>[2]</sup>。然而,PM 公式要求研究或应用区域具有相对完善的气象观测数据,但在实际研究和应用中,全球范围内均存在气象站点观测数据的时空差异,可获得的数据很难满足 PM 公式的输入要求<sup>[6]</sup>。因此,结果精确、可行性强、适用范围广的  $ET_0$  简化计算方法得以发展,例如 Makkink 方法<sup>[3]</sup>、HS 公式<sup>[4]</sup>、Droogers and Allen 方法<sup>[5]</sup> 等。PM 公式则作为标准算法为这些简化算法提供标准值<sup>[6]</sup>。

国内外的研究显示<sup>[7-11]</sup>,基于温度和天顶辐射的 HS 公式与 PM 公式计算的  $ET_0$  具有较好的吻合度,是一种计算  $ET_0$  较好的简化气候学经验公式,FAO 也将其作为气候、气象资料缺失条件下计算  $ET_0$  的推荐方法<sup>[2]</sup>。但是,考虑到 HS 公式是 HARGREAVES 和 SAMANA 在干旱半干旱条件下观测和实验得出的经验方程<sup>[12]</sup>,国内外众多学者针对不同研究区或应用区基于 HS 公式的精度评价、参数校正等问题进行了大量研究<sup>[13-19]</sup>,结果均表明,直接使用 HS 公式会产生误差,并建议在新的地区使用 HS 公式计算  $ET_0$  时,需对其进行地域化修正。对此,FAO 也给出了通过线性回归分析方法进行 HS 公式地域化修正的建议方案<sup>[2]</sup>。

现有研究中主要包括基于温度的 HS 校正方法<sup>[20]</sup>、基于降水的 HS 校正方法<sup>[5]</sup>、基于全局优化

的 HS 校正方法<sup>[21-22]</sup>、基于湿润条件下的局部校正方法<sup>[14]</sup> 等,这些方法不仅要考虑地形、气候要素对每一个参数的影响<sup>[23-25]</sup>,还要考虑参数之间的组合问题<sup>[26-27]</sup>,且能够考虑到其他地理因子对  $ET_0$  的影响。但是,在中国复杂的农业地域类型条件下,仍以小区域研究为主<sup>[27-29]</sup>,对应研究结果的时空尺度差异较大,因此,并未得到广泛的推广应用。对于 FAO 建议的线性回归修正方案,有关研究案例却鲜有报道,仅有李丹阳等<sup>[1]</sup> 基于四川地区逐日气象资料对 HS 公式进行了线性回归修正,结果表明,修正后的 HS 公式可以反映该地区的  $ET_0$  实际状况。

本研究以中国九大陆地综合农业区 38 个子区为研究区,采用 FAO 建议的线性回归分析方法逐月逐区进行 HS 公式的修正,验证在中国农业综合分区框架下 HS 公式线性回归修正方案的适用性,并尝试确定全国不同农业区逐月的 HS 公式最佳线性回归校正系数,为大规模实践中快速获得较高精度的  $ET_0$  提供参考,丰富 HS 公式修正应用的案例,以期对未来更为精准的  $ET_0$  空间化研究奠定基础。

## 1 参考作物需水量计算方法

### 1.1 Penman - Monteith 公式

PM 公式的原型是 1948 年 PENMAN 采用能量平衡与质量传递相结合的方法以日照、温度、湿度和风速 4 个标准气象数据推导的水面蒸发量方程<sup>[30]</sup>。后经 MONTEITH 引入阻力因素改进并将其扩展至计算作物表面的腾发量<sup>[31]</sup>。1990 年开始,经 FAO 专家咨询委员会会同国际灌排委员会和世界气象组织对其验证和修正后,诞生了 FAO 推荐的 PM 公式<sup>[2]</sup>,并作为新的确定参考作物需水量的标准方法,其计算式为

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

其中

$$T_{\text{mean}} = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \quad (2)$$

$$e_s = \frac{e(T_{\text{max}}) + e(T_{\text{min}})}{2} \quad (3)$$

$$e(T) = 0.6108 \exp \frac{17.27T}{T + 237.3} \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{4098 \left( 0.6108 \exp \frac{17.27T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}} + 237.3} \right)}{(T_{\text{mean}} + 237.3)^2} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon \lambda} = 6.65 \times 10^{-4} P \quad (6)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (7)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (8)$$

$$R_{nl} = \sigma \frac{T_{\text{max},k}^4 + T_{\text{min},k}^4}{4} (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \cdot \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (9)$$

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} Z) R_a \quad (10)$$

式中  $ET_{0-PM}$ ——基于 PM 公式计算的参考作物需水量, mm/d

$e_a$ ——平均水汽压, kPa/d

$u_2$ ——2 m 高处风速, m/(s·d)

$T$ ——大气温度, °C

$T_{\text{mean}}$ ——2 m 高处日平均气温, °C/d

$T_{\text{max}}$ ——计算时间区间的平均最高气温, °C/d

$T_{\text{min}}$ ——计算时间区间的平均最低气温, °C/d

$e_s$ ——以日为区间计算的饱和水汽压, kPa/d

$e(T)$ ——空气温度  $T$  时的饱和水汽压, kPa

$\Delta$ ——气温  $T$  下的饱和水汽压曲线的倾率, kPa/(°C·d)

$\gamma$ ——湿度计常数, kPa/°C

$P$ ——平均大气压, kPa/d

$\lambda$ ——水汽化潜热, 取 2.45 MJ/kg

$C_p$ ——常压下的比热容, 取  $1.013 \times 10^{-3}$  MJ/(kg·°C)

$\varepsilon$ ——水蒸气分子量与干燥空气分子量的比, 取 0.662

$G$ ——以月为计算区间的土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$R_n$ ——参考作物表面上的净辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$R_{ns}$ ——地表净太阳短波辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$R_s$ ——地表太阳总辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$\alpha$ ——发射率或冠层发射系数, 以草为假想的参考作物时, 取 0.23

$R_{nl}$ ——净输出长波辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$\sigma$ ——Stefan - Boltzmann 常数, 取  $4.903 \times 10^{-9}$  MJ/(K<sup>4</sup>·m<sup>2</sup>·d)

$T_{\text{max},k}$ ——24 h 内最高绝对温度, K

$T_{\text{min},k}$ ——24 h 内最低绝对温度, K

$R_{so}$ ——晴空条件下到达地表的太阳总辐射, 也称晴空太阳辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$R_s/R_{so}$ ——相对短波辐射值, 其值小于等于 1.0

$Z$ ——测站的海拔, m, 因  $2 \times 10^{-5} Z$  实际值较小, 在计算中可忽略不计

$R_a$ ——天顶辐射, 由 FAO 建议的以日为时段的天顶辐射程序计算获得, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

以月为计算区间的土壤热通量计算式为

$$G_{\text{month},i} = 0.07 (T_{\text{month},i+1} - T_{\text{month},i-1}) \quad (11)$$

式中  $G_{\text{month},i}$ ——第  $i$  月的土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$T_{\text{month},i-1}$ ——第  $i-1$  月的大气平均温度, °C/d

$T_{\text{month},i+1}$ ——第  $i+1$  月的大气平均温度, °C/d

## 1.2 Hargreaves - Samani 公式

HS 公式是 HARGREAVES 和 SAMANI<sup>[4]</sup> 1985 年基于干旱半干旱地区的研究提出的经验公式, FAO 推荐其为气象观测数据缺失条件下的  $ET_0$  简化计算方法, 同时也建议在有条件的地区使用该公式计算  $ET_0$  时要基于月或年的经验系数进行修正, 相关算式为

$$ET_{0-HC} = a + bET_{0-HS} \quad (12)$$

其中

$$ET_{0-HS} = \alpha (T_{\text{mean}} + 17.8) (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5} R_a \quad (13)$$

式中  $ET_{0-HC}$ ——校正后的  $ET_{0-HS}$ , mm/d

$a$ 、 $b$ ——校正系数

$ET_{0-HS}$ ——基于 HS 公式计算的参考作物需水量, mm/d

$\alpha$ ——常数, 取 0.0023

校正系数  $a$  和  $b$  通过回归分析或目测的方法拟合。本研究就是基于线性回归分析方法逐月求取  $a$ 、 $b$  系数在中国各农业区的取值, 达到校正 HS 公式的目的。

## 2 数据及预处理

### 2.1 数据来源

根据上述 PM 公式和 HS 公式的参数算法, 本研究使用的数据包括气象站点数据和农业区划数据, 具体如下:

(1) 气象站点数据: 逐月的平均气压  $P$ 、平均最低气温  $T_{\text{min}}$ 、平均最高气温  $T_{\text{max}}$ 、平均风速  $u$ 、平均水汽压  $e_a$ , 均来自中国地面气候资料月值数据集, 包含 756 个站点的数据; 月总太阳辐射  $R_s$ , 来自中国辐射月值数据集, 包含 130 个站点的数据; 站点经纬度

数据,来自中国地面气候资料月值数据集的元数据文件。两个数据集均下载自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),时间尺度 1957—2016 年。

(2) 中国农业综合区划数据:来自全国农业委员会发布的《中国农业综合区划图》(图 1,图中 A 表示东北区:A1 兴安岭区,A2 松嫩三江平原区,A3 长白山山地区,A4 辽宁平原区;B 表示内蒙古及长城沿线区:B1 内蒙古北部区,B2 内蒙古中南部,B3 长城沿线区;C 表示黄淮海区:C1 燕山太行山山麓平原区,C2 冀鲁豫低洼平原区,C3 黄淮平原区,C4 山东丘陵区;D 表示黄土高原区:D1 晋东豫西丘陵区,D2 汾渭谷地区,D3 晋陕甘黄土丘陵区,D4 陇中青东丘陵区;E 表示长江中下游区:E1 长江下游平原区,E2 豫鄂皖低山区,E3 长江中游平原区,E4 江南丘陵区,E5 浙闽丘陵区,E6 南岭丘陵区;F 表示西南区:F1 秦岭大巴山区,F2 四川盆地,F3 川鄂湘黔边境区,F4 黔桂高原山地区,F5 川滇高原山地区;G 表示华南区:G1 闽南粤中区,G2 粤西桂南区,G3 滇南区,G4 琼雷及南海诸岛区,G5 台湾;H 表示甘新区:H1 蒙宁甘区,H2 北疆区,H3 南疆区;I 表示青藏区:I1 藏南区,I2 川藏区,I3 青甘区,I4 青藏高寒区)。

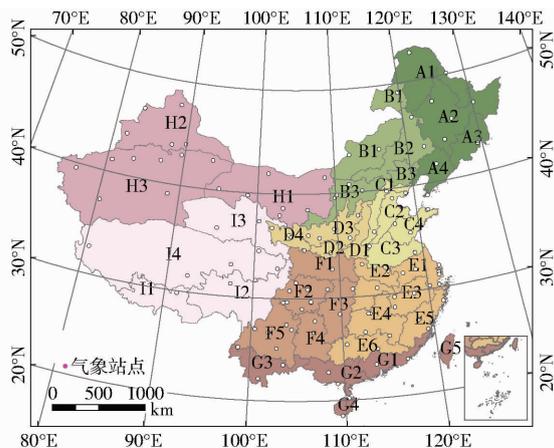


图 1 农业综合区划及气象站点位置示意图

Fig. 1 Map of agricultural comprehensive zoning and meteorological station location

## 2.2 数据预处理

(1) 将月总太阳辐射数据转换为逐月日均值,其他气象数据校正为 PM 公式要求的 2 m 高度标准数据,并统一数据单位尺度。

(2) 通过站点编号  $R_s$ 、点经纬度及其他气象数据一一对应关联,共得到 124 个交集站点(图 1)。

(3) 根据元数据说明剔除无效数据,并基于 FAO<sup>[2]</sup> 建议的以日为时段的天顶辐射计算程序,求得各站点逐月的日平均  $R_a$ ,以  $R_a > R_s$  的理论关系为规则进行数据质量检查,剔除  $R_s$  异常值。

(4) 将数据分为系数  $a$ 、 $b$  的确定和验证两部分,即 1957—2010 年的数据进行系数  $a$ 、 $b$  的回归确定,2011—2016 年的数据则用来进行系数  $a$ 、 $b$  的应用验证。

(5) 以《中国农业综合区划图》上的经纬度和中国行政矢量数据为基准,进行空间校正并数字化得到农业分区矢量数据。

## 3 技术路线

本研究过程主要包括  $ET_{0-PM}$  和  $ET_{0-HS}$  的计算、HS 公式校正系数的计算、误差分析 3 部分,具体技术路线如图 2 所示。

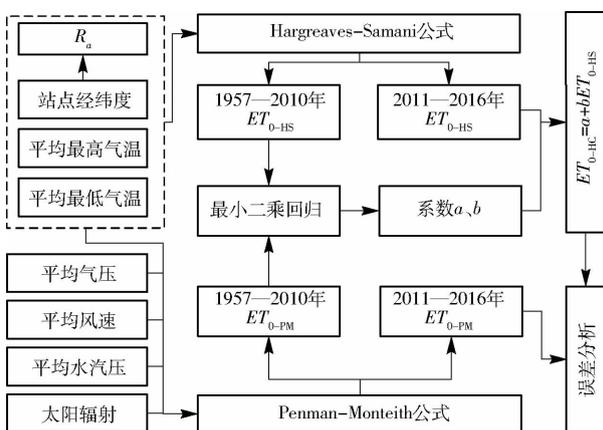


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technical flow chart

### (1) $ET_{0-PM}$ 和 $ET_{0-HS}$ 计算

按照 PM 公式和 HS 公式分别逐站点逐年逐月计算得到  $ET_{0-PM}$  和  $ET_{0-HS}$ ,其中  $ET_{0-PM}$  作为本研究的真值。

### (2) HS 公式校正系数计算

以各站点多年的逐月  $ET_{0-PM}$  为因变量,以与之对应的  $ET_{0-HS}$  为自变量,以最小二乘回归算法计算得到各站点各月份的系数  $a$ 、 $b$ 。

### (3) 误差分析

以农业区划矢量数据区域统计得到各农业子区内系数  $a$ 、 $b$  的站点平均值,以式(13)计算并统计得到 2011—2016 年逐年逐月各农业子区的  $ET_{0-HC}$ ,通过计算比较  $ET_{0-HC}$ 、 $ET_{0-HS}$  的 6 年平均相对误差,说明 HS 校正系数在中国各农业区的适用性,并筛选出系数  $a$ 、 $b$  的最佳建议取值。

## 4 结果与分析

### 4.1 HS 公式校正系数的回归结果

图 3 是逐月统计的各区 1957—2010 年  $ET_{0-PM}$  与  $ET_{0-HS}$  相关系数均值,其中, D1 区因整体没有有效的站点观测数据,故 D1 区缺失,下同。从图

可以看出,大部分农业区在年内有超过一半的月份  $ET_{0-PM}$ 、 $ET_{0-HS}$  相关系数均超过 0.6,相关性显著,只有 G4、H3 和 I1 相关系数相对较小的月份较多,可能是因为有效数据较少且数据时间序列不

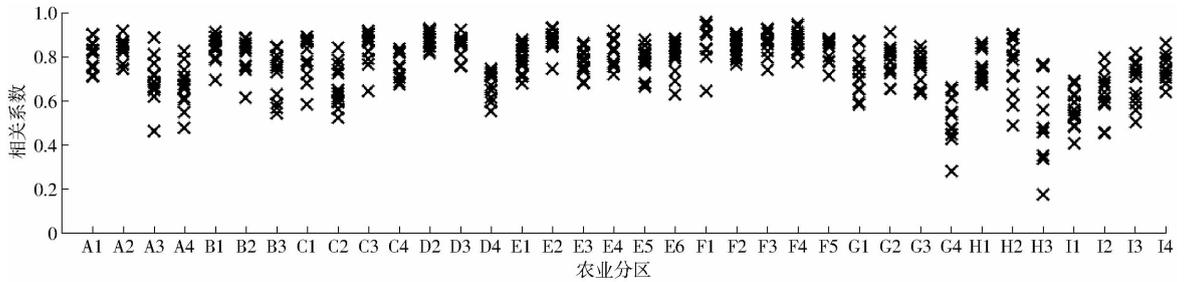


图3 逐月统计的各区 1957—2010 年  $ET_{0-PM}$ 、 $ET_{0-HS}$  相关系数均值

Fig. 3 Monthly mean values of correlation coefficients between  $ET_{0-PM}$  and  $ET_{0-HS}$  in each area from 1957 to 2010

图4是基于最小二乘回归方法逐月计算的各区系数  $a$ 、 $b$  平均值。从图可以明显看出,九大农业区系数  $a$ 、 $b$  在时间上存在明显的变化规律。其中,系数  $a$  统一表现为冬季月份最大,夏季月份最小,春、秋季月份为过渡变化时段的规律;系数  $b$  则在年内统一表现比较平稳,集中在 1.0~2.0 之间。 $a$ 、 $b$  的相对大小却没有明显的对应关系。由此可见,系数  $a$  的变化在很大程度上决定了  $ET_{0-HS}$  的校正精度,也说明在中国  $ET_{0-HS}$  和  $ET_{0-PM}$  之间存在明显的季节性差异,且夏季差异较大,冬季差异较小。这一差异显然与影响  $ET_0$  变化的主导因子随中国“雨热同期”的季风气候变化规律有关。HS 公式只考虑了气温对  $ET_0$  的影响,PM 公式则是综合考虑了气温、风速、湿度等各项气候条件,当影响  $ET_0$  的主导因子随着季节发生变化时, $ET_{0-HS}$  和  $ET_{0-PM}$  之间的差异性也随之发生变化。二者在冬季差异小,说明冬季影响  $ET_0$  的主导因子为气温,在夏季差异大,说明夏季影响  $ET_0$  的主导因子不仅仅是气温,还有其他因子,但主要包含哪些主导因子则需要进一步探讨。

在图4所示的九大农业区内部,各子区之间的系数  $a$ 、 $b$  则存在明显的差异,且没有规律可循。例如在 A3、C2、H3 和 I4 区,系数  $a$  的年内变化幅度较其所在大区的其他子区明显要小;G4 和 I1 区的系数  $a$  则与整体变化规律完全不同,大部分月份  $a$  均大于 0,且波动变化明显。这一结果说明九大农业区内部的局部地理因子可能也会引起  $ET_{0-HS}$  和  $ET_{0-PM}$  之间的差异,还需要在精细化的尺度上再进行深入研究。

理论上,最小二乘回归结果  $a$  越接近于 0, $b$  越接近于 1,说明  $ET_{0-HS}$  就越接近  $ET_{0-PM}$ 。但综合图4的分析结果,在中国九大农业区, $ET_{0-PM}$  和  $ET_{0-HS}$  之间整体上存在差异,特别是夏季月份的差异还较大,不仅验证了引言中说明的已有研究结果表明直接使

连续导致  $ET_{0-PM}$  和  $ET_{0-HS}$  存在随机误差。整体上, $ET_{0-PM}$  与  $ET_{0-HS}$  具有较好的相关性,可以直接基于最小二乘回归方法计算 HS 公式的校正系数  $a$ 、 $b$ 。

用 HS 公式计算的  $ET_{0-HS}$  会产生误差的结论,也验证了 FAO 建议进行 HS 公式地域化修正的必要性<sup>[2]</sup>,即,在实际应用中,应以尽可能得到的观测数据进行  $ET_{0-HS}$  的本地化校正。

#### 4.2 误差分析和最优系数的确定

基于上述的系数  $a$ 、 $b$  回归结果,以式(13)计算并统计得到 2011—2016 年逐年逐月各农业子区的站点平均  $ET_{0-HC}$ ,进一步以  $ET_{0-PM}$  站点均值为真值,计算了  $ET_{0-HC}$ 、 $ET_{0-HS}$  的 6 年逐月平均相对误差,结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, $ET_{0-HS}$  和  $ET_{0-HC}$  相对于  $ET_{0-PM}$  均存在不同程度的误差,但是, $ET_{0-HS}$  的相对误差年内较为分散,特别是在 A、B 两区的分散度较大,进一步验证了  $ET_{0-HS}$  和  $ET_{0-PM}$  之间存在显著差异,而  $ET_{0-HC}$  的相对误差则较为集中,说明校正后的  $ET_{0-HS}$  可以缩小  $ET_{0-HS}$  和  $ET_{0-PM}$  的差异。在具体数据上, $ET_{0-HS}$  相对误差集中在 50% 以内,最大值高达 250% (A1 区),而  $ET_{0-HC}$  的相对误差则集中在 20% 以内,最大值也未达到 40%。因此,以线性回归方法得到 HS 公式校正系数  $a$ 、 $b$  能够代表除温度外的其他因子对  $ET_0$  的影响,从而使得  $ET_{0-HS}$  的校正结果能够显著缩小其对应的年内相对误差范围,是实践中可行的方案。

表 1 是  $ET_{0-HC}$  和  $ET_{0-HS}$  在 2011—2016 年不同区域逐月的相对误差比较结果,其中小于 0 的数字表示  $ET_{0-HC}$  优于  $ET_{0-HS}$ ,值越小表示  $ET_{0-HC}$  的相对精度越高,大于等于 0 的数字则相反。从表 1 可以看出,在具体的验证应用中,并不是所有农业区在所有月份均是  $ET_{0-HC}$  优于  $ET_{0-HS}$ ,而是大部分农业区均不同程度存在  $ET_{0-HS}$  优于  $ET_{0-HC}$  的情况。具体来说,A1、B1、B2、F3、H1、I1、I3 区全年均表现为  $ET_{0-HC}$  优于  $ET_{0-HS}$ ,而 C2、D4、G4 区有 11 个月,A2、C3、C4、E2、F1、I4 区有 10 个月,A3、C1、D3、F2、H2、H3 区有 9 个月,B3、E6、G1 区有 8 个月,A4、F5 区

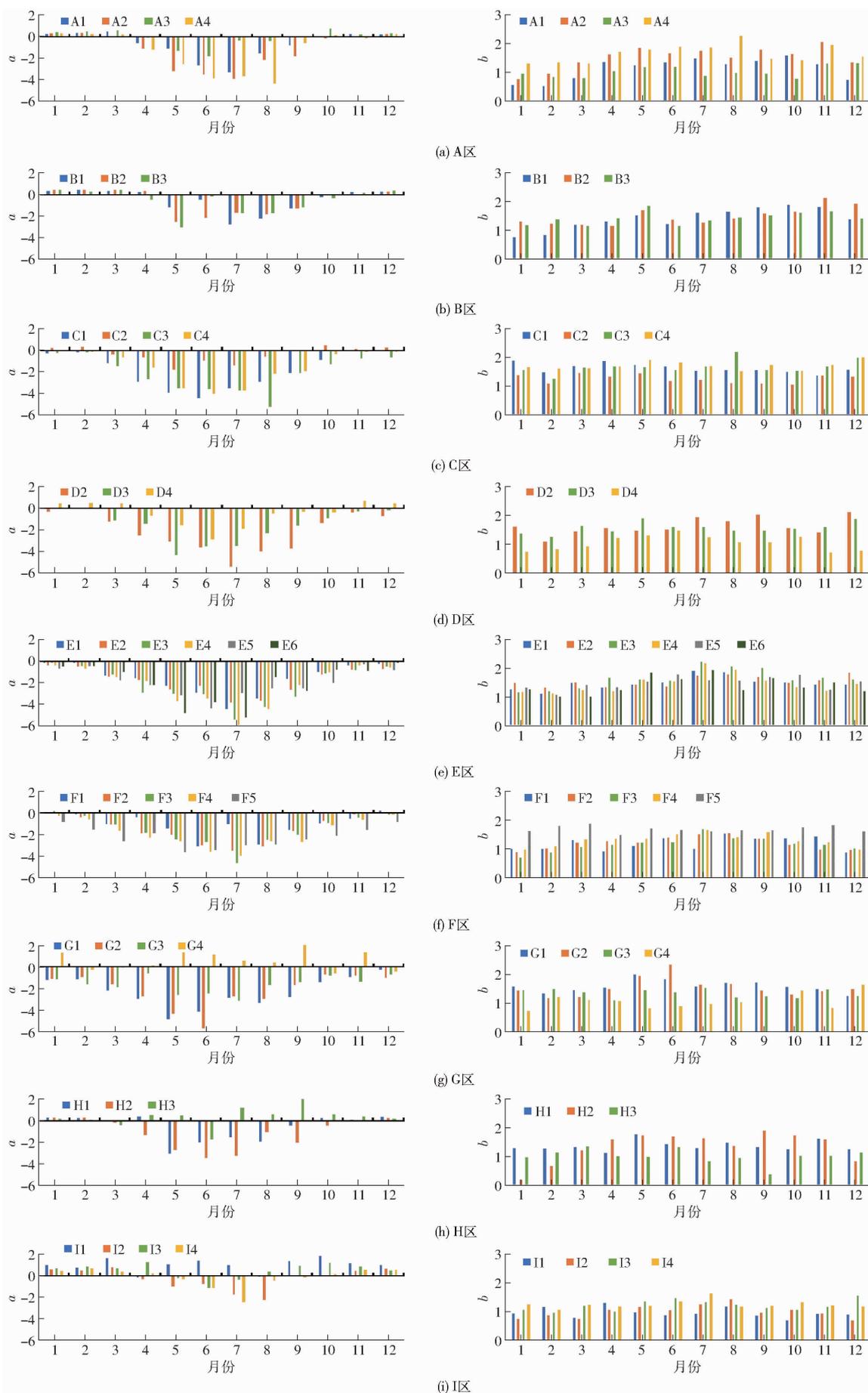


图 4 校正系数  $a$ 、 $b$  逐月的回归结果

Fig. 4 Monthly regression results of correction coefficients  $a$  and  $b$

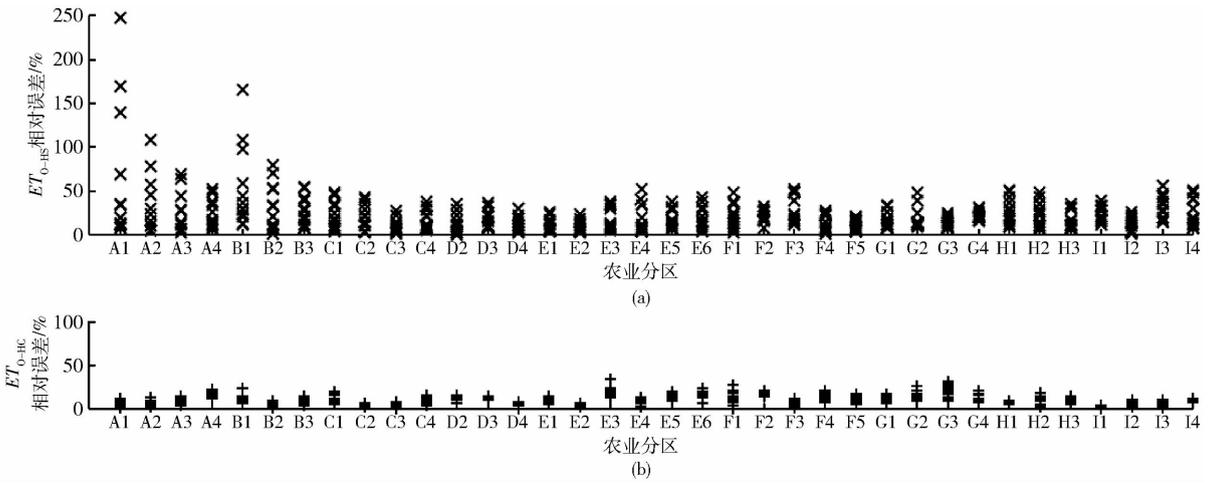


图5  $ET_{0-HS}$ 校正前后相对误差各区站点均值年内分布

Fig.5 Distributions of mean relative errors of sites before and after  $ET_{0-HS}$  correction within a year

表1 2011—2016年  $ET_{0-HS}$ 校正前后精度比较结果

Tab.1 Accuracy comparison results of  $ET_{0-HS}$  before and after correction from 2011 to 2016

农业分区	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
A1	-2.42	-1.37	-0.32	-0.08	-0.04	-0.10	-0.07	-0.03	-0.02	-0.32	-0.61	-1.63
A2	-1.01	-0.52	-0.17	-0.12	0	-0.02	0.02	0.01	-0.03	-0.20	-0.33	-0.69
A3	-0.61	-0.41	-0.16	0	0.05	-0.06	-0.05	-0.01	0.05	-0.14	-0.38	-0.56
A4	-0.39	-0.20	-0.13	-0.02	0.04	0.11	0.09	0.15	0.02	-0.10	-0.27	-0.30
B1	-1.41	-0.86	-0.27	-0.23	-0.17	-0.03	-0.07	-0.13	-0.21	-0.34	-0.51	-0.93
B2	-0.72	-0.48	-0.30	-0.19	-0.09	-0.04	-0.05	0	-0.09	-0.28	-0.46	-0.60
B3	-0.50	-0.31	-0.25	-0.13	-0.04	0.04	0.02	0.04	0.03	-0.15	-0.32	-0.47
C1	-0.26	-0.20	-0.14	-0.07	0.01	-0.01	-0.01	0.09	0.06	-0.06	-0.24	-0.31
C2	-0.37	-0.25	-0.20	-0.12	-0.06	-0.01	0	0.02	-0.06	-0.16	-0.31	-0.41
C3	-0.19	-0.06	-0.07	0	0	-0.09	-0.02	0.03	-0.02	-0.03	-0.08	-0.20
C4	-0.20	-0.08	-0.12	-0.03	-0.02	-0.01	-0.04	0.01	0.03	-0.10	-0.12	-0.23
D2	-0.18	-0.04	0.01	0.08	0.06	0.09	0.03	0.05	0.10	0.04	-0.09	-0.19
D3	-0.18	-0.08	-0.03	0.01	0.06	0.05	0.03	0.03	0.05	0.02	-0.13	-0.21
D4	-0.23	-0.14	-0.05	0	-0.03	-0.07	-0.09	0	-0.02	-0.06	-0.17	-0.23
E1	-0.08	0.01	0.04	0.06	0.02	-0.16	0.01	0.01	0.02	-0.03	-0.04	-0.14
E2	-0.08	-0.01	0	-0.08	-0.11	-0.13	-0.05	-0.04	0.01	-0.01	-0.06	-0.16
E3	0.04	-0.11	-0.22	-0.12	-0.10	-0.16	0.12	0.10	0.11	0.09	0.21	0.11
E4	0.01	-0.22	-0.41	-0.32	-0.27	-0.17	0.02	0.03	0	0.02	0.02	0.04
E5	0.04	-0.16	-0.12	-0.18	-0.27	-0.19	0.03	0.03	0.06	0.03	0.01	0.02
E6	0.09	-0.02	-0.27	-0.20	-0.16	-0.03	0.14	0.09	0.04	-0.05	-0.07	-0.08
F1	0.07	-0.06	-0.08	-0.24	-0.30	-0.28	-0.13	-0.05	-0.12	-0.02	0.06	-0.01
F2	-0.07	-0.11	-0.08	-0.05	-0.08	-0.10	0	0.09	-0.05	-0.02	-0.02	0
F3	-0.03	-0.27	-0.39	-0.41	-0.46	-0.45	-0.22	-0.15	-0.17	-0.10	-0.07	-0.01
F4	-0.14	-0.14	-0.15	0.01	-0.05	-0.07	0.10	0.08	0.11	0.08	0.10	0.14
F5	-0.04	-0.04	-0.02	-0.02	0	0.06	0.01	0.02	0.02	0	-0.05	-0.03
G1	0	-0.04	-0.21	-0.20	-0.10	0.04	0.03	0.04	0.04	-0.07	-0.05	-0.11
G2	-0.05	-0.29	-0.37	-0.08	0.07	0.12	0.06	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01
G3	0.09	0.10	0.07	0.01	0.05	0.03	0.03	-0.01	0.03	0.02	0.05	0.04
G4	-0.03	-0.01	0.01	0	-0.08	-0.11	-0.11	-0.10	-0.04	-0.17	-0.18	-0.19
H1	-0.42	-0.30	-0.21	-0.16	-0.07	-0.03	-0.01	-0.04	-0.11	-0.20	-0.35	-0.45
H2	-0.34	-0.23	-0.02	-0.01	0.02	0.04	0.02	-0.01	-0.07	-0.09	-0.23	-0.40
H3	-0.19	-0.08	-0.01	-0.05	0	0.03	-0.01	0	-0.05	-0.08	-0.22	-0.28
I1	-0.39	-0.29	-0.28	-0.20	-0.18	-0.15	-0.11	-0.14	-0.19	-0.27	-0.31	-0.33
I2	-0.15	-0.11	-0.07	0.02	0.05	0.01	0.06	0.04	0.02	-0.07	-0.14	-0.12
I3	-0.48	-0.37	-0.33	-0.24	-0.17	-0.13	-0.07	-0.11	-0.19	-0.29	-0.41	-0.45
I4	-0.39	-0.32	-0.19	-0.09	-0.05	0.01	0.01	-0.04	-0.07	-0.18	-0.33	-0.37

有 7 个月, E4、I2 区有 6 个月, E1、E3、E5、F4 区有 5 个月, D2、G2 有 4 个月, G3 仅有 1 个月  $ET_{0-HC}$  优于  $ET_{0-HS}$ , 这些区域剩余的时间段均  $ET_{0-HS}$  优于  $ET_{0-HC}$ 。对于这一结果的原因, 最大的可能是系数  $a$ 、 $b$  是长时间序列数据线性回归的结果, 本质上是一种整体的趋势拟合结果, 在短期内的验证应用中, 存在气象/气候条件的随机性误差, 故而造成了在具体的验证应用中存在  $ET_{0-HS}$  优于  $ET_{0-HC}$  的情况, 但具体情况有待进一步分析。

综上误差分析结果, 整体上  $ET_{0-HC}$  要优于

$ET_{0-HS}$ , 但在各农业子区的具体应用中,  $ET_{0-HC}$  的相对误差结果则参差不齐。因此, 优选使用  $ET_{0-HS}$  的修正(HS 公式的回归校正)系数才是当前的最佳方案, 即根据本研究的验证结果, 整体上, 中国各农业区使用回归得到的本地化校正系数  $a$ 、 $b$  进行  $ET_{0-HS}$  的修正, 但在校正结果较差的时段, 仍然直接使用  $ET_{0-HS}$  作为  $ET_{0-HC}$  简化计算的最终结果(即  $a=0$ ,  $b=1$ ), 从而使 HS 公式计算的  $ET_{0-HC}$  在不同农业区的各个时段均达到最优。基于这一方案, 本研究最终推荐使用的中国各农业区 HS 公式逐月的校正系数如表 2 所示。

表 2 中国各农业区 HS 公式逐月的校正系数建议值

Tab.2 Recommended values of monthly correction coefficients of HS in China's agricultural regions

农业分区	1月		2月		3月		4月		5月		6月		7月		8月		9月		10月		11月		12月	
	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$																
A1	0.26	0.56	0.40	0.52	0.48	0.81	-0.56	1.37	-1.10	1.24	-2.68	1.35	-3.30	1.48	-1.50	1.28	-0.82	1.41	0.01	1.58	0.30	1.29	0.24	0.75
A2	0.33	0.75	0.37	0.97	0.04	1.35	-1.10	1.63	-3.18	1.86	-3.46	1.67	0	1.00	0	1.00	-1.79	1.79	-0.14	1.65	0.02	2.06	0.28	1.36
A3	0.42	0.96	0.48	0.84	0.60	0.80	0	1.00	0	1.00	-1.80	1.20	-0.30	0.89	-0.36	0.97	0	1.00	0.74	0.78	0.25	1.30	0.31	1.34
A4	0.34	1.30	0.26	1.35	0.22	1.30	-1.17	1.71	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0.17	1.42	-0.16	1.95	0.28	1.55
B1	0.35	0.77	0.43	0.83	0.31	1.19	0.22	1.29	-1.13	1.52	-0.46	1.21	-2.75	1.60	-2.22	1.65	-1.24	1.79	-0.20	1.88	0.22	1.81	0.31	1.38
B2	0.43	1.29	0.45	1.23	0.45	1.19	0.36	1.16	-2.52	1.70	-2.17	1.36	-1.67	1.27	-1.78	1.40	-1.22	1.57	-0.04	1.63	0.04	2.13	0.26	1.92
B3	0.44	1.18	0.27	1.37	0.46	1.15	-0.48	1.42	-3.06	1.85	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	-0.34	1.60	0.15	1.66	0.38	1.40
C1	-0.28	1.89	-0.20	1.48	-1.19	1.71	-2.95	1.86	0	1.00	-4.45	1.69	-3.53	1.54	0	1.00	0	1.00	-0.92	1.51	0.01	1.36	0.01	1.58
C2	0.19	1.39	0.31	1.09	-0.43	1.46	-0.64	1.32	-1.77	1.43	-0.97	1.16	-1.38	1.21	0	1.00	-0.04	1.09	0.46	1.04	0.15	1.35	0.25	1.34
C3	-0.25	1.56	-0.18	1.26	-1.44	1.64	0	1.00	-3.54	1.66	-3.61	1.56	-3.70	1.68	0	1.00	-2.11	1.56	-1.27	1.54	-0.73	1.68	-0.60	1.99
C4	0.03	1.66	-0.15	1.60	-0.63	1.62	-1.62	1.68	-3.54	1.90	-4.04	1.82	-3.72	1.71	0	1.00	0	1.00	-0.36	1.53	-0.14	1.74	-0.14	2.00
D2	-0.35	1.62	-0.05	1.08	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	-0.39	1.42	-0.79	2.14
D3	0.06	1.37	-0.05	1.27	-1.17	1.64	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	-0.31	1.59	-0.25	1.89
D4	0.42	0.75	0.47	0.82	0.40	0.92	0	1.00	-1.58	1.30	-2.92	1.48	-1.95	1.26	-0.52	1.06	-0.32	1.07	-0.40	1.27	0.68	0.71	0.43	0.78
E1	-0.14	1.26	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	-2.90	1.49	0	1.00	0	1.00	0	1.00	-0.98	1.50	-0.42	1.41	-0.24	1.42
E2	-0.38	1.47	-0.53	1.33	0	1.00	-1.76	1.34	-2.58	1.41	-2.25	1.35	-3.90	1.73	-3.69	1.78	0	1.00	-1.23	1.48	-0.79	1.59	-0.70	1.83
E3	0	1.00	-0.43	1.17	-1.25	1.30	-2.90	1.67	-3.02	1.60	-3.08	1.56	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00
E4	0	1.00	-0.64	1.11	-1.45	1.22	-1.82	1.18	-3.73	1.60	-3.47	1.54	0	1.00	0	1.00	-2.24	1.55	0	1.00	0	1.00	0	1.00
E5	0	1.00	-0.42	1.05	-1.77	1.40	-2.19	1.33	-3.17	1.52	-4.43	1.77	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00
E6	0	1.00	-0.45	1.00	-0.98	0.99	-2.22	1.22	-4.83	1.84	-3.84	1.61	0	1.00	0	1.00	0	1.00	-0.77	1.31	-0.89	1.50	-0.11	1.18
F1	0	1.00	-0.11	1.01	-1.01	1.30	-0.35	0.91	-1.41	1.09	-3.07	1.37	-1.04	1.01	-2.92	1.53	-1.59	1.36	-0.95	1.37	0	1.00	0.21	0.86
F2	-0.05	0.88	-0.39	1.03	-1.10	1.22	-1.89	1.28	-1.99	1.22	-2.97	1.40	0	1.00	0	1.00	-1.68	1.35	-0.68	1.14	-0.10	0.98	0	1.00
F3	0.15	0.69	-0.28	0.87	-1.10	1.07	-1.85	1.15	-2.43	1.21	-2.67	1.24	-4.59	1.69	-2.48	1.37	-2.01	1.36	-0.92	1.18	-0.45	1.15	-0.14	1.02
F4	-0.25	0.98	-0.59	1.08	-1.65	1.34	0	1.00	-2.63	1.35	-3.56	1.52	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00
F5	-0.82	1.62	-1.50	1.81	-2.63	1.87	-1.90	1.49	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	-2.12	1.77	-1.55	1.81	-0.82	1.61
G1	-1.23	1.61	-1.18	1.35	-2.19	1.48	-2.94	1.56	-4.85	2.01	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	-1.42	1.57	-0.94	1.52	-0.28	1.27
G2	-1.10	1.45	-0.96	1.19	-1.59	1.23	-2.74	1.52	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00
G3	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	-1.68	1.22	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00
G4	1.29	0.74	-0.27	1.23	0	1.00	0.14	1.08	1.35	0.82	1.15	0.90	0.60	0.99	0.42	1.05	3.82	-0.03	-0.61	1.45	1.38	0.84	-0.41	1.67
H1	0.29	1.31	0.24	1.30	0.01	1.33	0.43	1.13	-3.05	1.78	-2.02	1.44	-1.54	1.31	-1.98	1.49	-0.44	1.33	0.26	1.28	0.10	1.61	0.37	1.27
H2	0.33	0.20	0.30	0.66	-0.21	1.23	-1.35	1.61	0	1.00	0	1.00	0	1.00	-1.08	1.37	-2.08	1.90	-0.47	1.75	-0.04	1.61	0.23	0.84
H3	0.22	0.98	0.07	1.15	-0.38	1.36	0.51	1.03	0	1.00	0	1.00	1.18	0.84	0	1.00	3.13	0.37	0.59	1.03	0.41	1.05	0.19	1.15
I1	1.01	0.94	0.76	1.18	1.63	0.80	-0.14	1.31	1.03	0.98	1.42	0.89	0.99	0.92	-0.11	1.19	1.35	0.86	1.85	0.71	1.14	0.93	0.98	0.91
I2	0.60	0.77	0.52	0.88	0.82	0.77	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0	1.00	0.06	1.06	0.44	0.95	0.66	0.71
I3	0.69	1.07	0.90	0.97	0.70	1.21	1.25	1.01	-0.22	1.36	-1.11	1.49	-0.38	1.34	0.39	1.24	0.91	1.13	1.23	1.07	0.86	1.18	0.50	1.56
I4	0.47	1.27	0.71	1.06	0.37	1.24	0.23	1.20	-0.30	1.21	0	1.00	0	1.00	-0.41	1.19	-0.15	1.22	0.15	1.33	0.54	1.24	0.53	1.19

5 讨论

$ET_0$ 是影响作物需水量的重要因素,也是区域

灌溉制度和水资源管理策略制定的重要依据。本研究基于可获得的数据,逐月回归校正了中国各农业管理区利用 HS 公式计算的  $ET_{0-HS}$ ,结果表明基于

FAO 建议的 HS 公式线性回归修正方案可行性强、适用范围广,且具有较好的精度,对大规模实践中快速获得较高精度的  $ET_0$  以指导农业水资源的开发利用、农业生产潜力的评估和强化节水农业的发展具有重要的参考意义。但从精度分析和验证应用的结果来看,还需进一步讨论如下问题:

(1)由图 5 可知,  $ET_{0-HC}$  的相对误差年内变化范围已经显著小于  $ET_{0-HS}$ ,说明  $ET_{0-HS}$  和  $ET_{0-PM}$  存在线性关系,基于最小二乘回归逐月求得的  $ET_{0-HS}$  校正系数  $a$ 、 $b$  能够在应用中使  $ET_{0-HS}$  更接近于  $ET_{0-PM}$ ,也就是说系数  $a$ 、 $b$  已经反映了除温度外的其他气象因子对  $ET_0$  的影响,可在实践中应用,也验证了 HS 公式线性校正方案在中国的可行性。但是,分析  $ET_{0-PM}$  的计算过程可知,在  $R_{so}$  的计算中,使用了式(10),该式中的常数 0.75 是晴空条件下  $R_o$  到达地面的比例。现实中,在大气组分和厚度时空变化的影响下,这一比例数值可能存在时空差异,而且在中国并未发现有研究或行业部门发布该式中的本地化参数,因此,基于此计算的  $ET_{0-PM}$  本身就存在系统误差,只能称作准真值,并不是真正的标准值。所以,后续研究中有必要探讨计算  $R_{so}$  的公式参数在中国各农业区的具体取值。

(2)由表 1 可知,大部分农业区均不同程度存在  $ET_{0-HS}$  优于  $ET_{0-HC}$  的情况。存在这一结果的原因,除了长时间序列数据的线性回归增强了气候变化引起的误差和短期验证应用存在的随机误差外,如从数据的角度分析,可能数据质量也是这一结果的一个影响因素。本研究数据的获取时间尺度是 1957—2016 年。因气象观测中存在的不可控因素,站点数据均存在不同程度缺失,即,实际上站点的的数据时间序列是不连续的,只是在研究中将其假设为时间序列数据。另外,不同站点的有效观测时间尺

度也不一致,所以,最后各站点回归求得系数  $a$ 、 $b$  时的样本量不一致。之后,又以区域的站点平均值来代表整个研究区的取值,但各农业区内站点密度明显不均(图 1),系数  $a$ 、 $b$  取站点的平均值没有考虑其他地理因子的影响,所以,以区域内站点的平均结果代表整个区域的取值也可能进一步致使结果存在偏差。因此,未来不仅要考虑验证不同气候尺度下  $ET_{0-HS}$  的校正精度,以确定最优的气候尺度从而削弱气候变化对  $ET_0$  的影响,还需要讨论如何进一步弱化现有数据不连续的影响,而最优系数在具体验证年份及未来应用中是否存在变化,也值得进一步的探讨。

## 6 结论

(1)在年内,大部分农业区超过一半的月份  $ET_{0-PM}$  与  $ET_{0-HS}$  的相关系数超过 0.6,因此,可以直接以  $ET_{0-PM}$  为真值进行  $ET_{0-HS}$  的回归校正。

(2)九大农业区回归校正得到的系数  $a$  整体上存在显著的季节变化规律,冬季月份最大,夏季月份最小,系数  $b$  则表现较为平稳。从  $a$ 、 $b$  变化可知,  $ET_{0-PM}$  和  $ET_{0-HS}$  之间存在差异,且季节性明显,在实际应用中进行  $ET_{0-HS}$  校正十分必要。

(3)基于验证应用年份的结果表明,校正前后的  $ET_{0-HS}$  相对于  $ET_{0-PM}$  均存在不同程度的误差,但校正后的  $ET_{0-HS}$  的误差范围相比校正前的  $ET_{0-HS}$  误差范围已经显著缩小,因此,进行 HS 公式的线性回归校正在中国各农业区具有一定的适用性,且是实践中简便、可行的方案。

(4)在各农业子区的具体验证应用中,  $ET_0$  的相对误差结果表现参差不齐,因此,校正系数  $a$ 、 $b$  的优选使用才是以 HS 方程快速计算的  $ET_0$  在不同农业区的各个时段均达到最优的最佳方案。

## 参 考 文 献

- [1] 李丹阳,张涵,王与,等. 基于 Hargreaves 的四川地区参考作物蒸发蒸腾量研究[J]. 节水灌溉, 2017(6): 85-89. LI Danyang, ZHANG Han, WANG Yu, et al. Study on reference crop evapotranspiration in Sichuan Province based on Hargreaves formula[J]. Water Saving Irrigation, 2017(6): 85-89. (in Chinese)
- [2] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[M]. FAO, Rome, 1998.
- [3] MAKINK G F. Testing the Penman formula by means of lysimeters[J]. Journal of the Institution of Water Engineers, 1957, 11: 277-288.
- [4] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96-99.
- [5] DROOGERS P, ALLEN R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(1): 33-45.
- [6] PENG L, LI Y, FENG H. The best alternative for estimating reference crop evapotranspiration in different sub-regions of mainland China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 5458.
- [7] 刘松林,康银红. 多种  $ET_0$  计算方法在四川省湿润气候区适用性的评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(增刊 1): 111-117, 127. LIU Songlin, KANG Yinhong. Applicability evaluation of various methods for calculating  $ET_0$  in humid climatic region of Sichuan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(Supp. 1): 111-117, 127. (in Chinese)

- [8] YANG Y, YUFENG L, CONGLIN W, 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.
- [9] EMEKA N, IKENNA O, KINGSLEY N O, et al. Performance evaluation of solar radiation equations for estimating reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) in a humid tropical environment[J]. *Journal of Water and Land Development*, 2019, 42(1): 124 - 135.
- [10] KOFFI D, MICHAEL O, LAMINE D, et al. Evaluation of the Penman - Monteith and other 34 reference evapotranspiration equations under limited data in a semiarid dry climate[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 137(1 - 2): 729 - 743.
- [11] TODOROVIC M, KARIC B, PEREIRA L S. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 481: 166 - 176.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] TRAJKOVIC S. Hargreaves versus Penman - Monteith under humid conditions [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(1): 38 - 42.
- [15] 冯克鹏, 田军仓. Hargreaves 公式计算宁夏地区参考作物腾发量的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(9): 100 - 105.  
FENG Kepeng, TIAN Juncang. Estimation of evapotranspiration in Ningxia by Hargreaves equation[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(9): 100 - 105. (in Chinese)
- [16] 邱微, 樊庆铎, 王明轩, 等. 基于生态用水的 Hargreaves 模型修正[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(2): 21 - 25.  
QIU Wei, FAN Qingxin, WANG Mingxuan, et al. Amending the Hargreaves model based on ecological water[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(2): 21 - 25. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] 刘钰, PEREIRA L S. 气象数据缺测条件下参照腾发量的计算方法[J]. *水利学报*, 2001, 32(3): 11 - 17.  
LIU Yu, PEREIRA L S. Calculation methods for reference evapotranspiration with limited weather data [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 32(3): 11 - 17. (in Chinese)
- [19] 赵璐, 梁川, 崔宁博, 等. 不同  $ET_0$  计算方法在川中丘陵地区的比较及改进[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(24): 92 - 98.  
ZHAO Lu, LIANG Chuan, CUI Ningbo, et al. Comparison and improvement of different calculation methods for  $ET_0$  in hilly area of central Sichuan Basin[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(24): 92 - 98. (in Chinese)
- [20] SAMANI Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2000, 126(4): 265 - 272.
- [21] DUAN Q, SOROOSHIAN S, GUPTA V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(4): 1015 - 1031.
- [22] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. Hargreaves 公式的全局校正及适用性评价[J]. *水科学进展*, 2011, 22(2): 160 - 167.  
HU Qingfang, YANG Dawen, WANG Yintang, et al. Global calibration of Hargreaves equation and its applicability in China [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 160 - 167. (in Chinese)
- [23] RAZIEL T, PEREIRA L S. Estimation of  $ET_0$  with Hargreaves - Samani and FAO - PM temperature methods for a wide range of climates in Iran [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 121: 1 - 18.
- [24] SHAHIDIAN S, SERRALHEIRO R P, SERRANO J, et al. Parametric calibration of the Hargreaves - Samani equation for use at new locations [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(4): 605 - 616.
- [25] 范文波, 吴普特, 韩志全, 等. 玛纳斯河流域  $ET_0$  影响因子分析及对 Hargreaves 法的修正[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 19 - 24.  
FAN Wenbo, WU Pute, HAN Zhiquan, et al. Influencing factors analysis of reference crop evapotranspiration and modification of Hargreaves method in Manas river basin[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(8): 19 - 24. (in Chinese)
- [26] BERTI A, TARDIVO G, CHIAUDANI A, et al. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 140: 20 - 25.
- [27] 唐晓培, 宋妮, 陶国通, 等. 黄淮海地区 Hargreaves 公式主要参数的空间化处理[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊 1): 63 - 70.  
TANG Xiaopei, SONG Ni, TAO Guotong, et al. Spatial distribution of main parameters of Hargreaves formula in typical time scales in Huang - Huai - Hai Plain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(Supp. 1): 63 - 70. (in Chinese)
- [28] 严坤, 王玉宽, 徐佩, 等. 岷江源区 Hargreaves 法适用性与未来参考作物蒸散量预测[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 273 - 281.  
YAN Kun, WANG Yukuan, XU Pei, et al. Adaptation of Hargreaves methods and prediction of reference crop evapotranspiration in Minjiang River headwater region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 273 - 281. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180431&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180431&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.031. (in Chinese)
- [29] 汤鹏程, 徐冰, 高占义, 等. 西藏高海拔地区气象数据缺失条件下的  $ET_0$  计算研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(9): 1055 - 1063.  
TANG Pengcheng, XU Bing, GAO Zhanyi, et al. Simplified limited data  $ET_0$  equation adapted for high-elevation locations in Tibet[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(9): 1055 - 1063. (in Chinese)
- [30] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1948, 193(1032): 120 - 145.
- [31] MONTEITH J L. Evaporation and environment [J]. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 1965, 19: 205 - 234.