

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.021

基于 Blaney – Criddle 方法估算潜在蒸散量的评价与校准

冯浩<sup>1,2</sup> 刘匣<sup>1,3</sup> 褚晓升<sup>1,3</sup> 丁奠元<sup>4</sup> 余坤<sup>1,3</sup> 李毅<sup>1,3</sup>

(1. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;  
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 4. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225009)

**摘要:** 为提高 Blaney – Criddle (BC) 方法在陕西关中地区的估算精度, 以 Penman 方法 (PE) 为标准, 利用 1960—1999 年陕西关中地区 6 个站点逐日资料对 BC 方法进行适用性评价和参数修正, 并使用 2000—2015 年资料对修正的 BC 方法进行验证, 得到基于温度的潜在蒸散量估算方法 (CBC 方法)。结果表明: BC 方法计算的月均  $ET_p$  (潜在蒸散量) 在温度较低时低估, 在温度较高时高估。通过改进后, CBC 与 PE 方法计算的月均  $ET_p$  回归曲线的斜率更接近于 1 (改进前 0.685, 改进后 0.999 7)。与 PE 方法的计算结果相比, 改进后 BC (CBC) 计算月均  $ET_p$  相对误差由  $-18.022\% \sim 16.269\%$  变为  $1.290\% \sim 3.630\%$ , 均方根误差由  $0.529 \sim 0.921$  mm/d 降为  $0.214 \sim 0.283$  mm/d; 平均偏差由  $-0.063 \sim 0.601$  mm/d 变为  $-0.001\,121 \sim 0.000\,737$  mm/d。修正前后 BC 方法计算月均  $ET_p$  值与 PE 方法计算值拟合的决定系数由 0.942 提高到 0.966。通过年累计  $ET_p$  和年内月累计  $ET_p$  的验证, CBC 与 PE 计算的  $ET_p$  变化趋势和数值更为接近。综合分析表明, CBC 方法能够显著提高潜在蒸散量的计算精度 ( $ET_p$ ), 可以应用于陕西关中地区  $ET_p$  的计算。

**关键词:** 潜在蒸散量; 关中地区; Blaney – Criddle 方法; Penman 方法; 适用性

**中图分类号:** S513      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298 (2017) 06-0159-09

Evaluation and Calibration of Blaney – Criddle Method for Estimating Potential Evapotranspiration

FENG Hao<sup>1,2</sup> LIU Xia<sup>1,3</sup> CHU Xiaosheng<sup>1,3</sup> DING Dianyuan<sup>4</sup> YU Kun<sup>1,3</sup> LI Yi<sup>1,3</sup>

(1. Chinese National Academy of Water-saving Agriculture in Arid Region, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China  
3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
4. School of Hydraulic Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** The objective was to improve the estimation accuracy of the Blaney – Criddle (BC) method to estimate potential evapotranspiration ( $ET_p$ ) in Guanzhong region of Shaanxi Province, and search for some theoretical basis for the choice of formulas. The Penman (PE) method is widely used all over the world to estimate  $ET_p$  since it can provide the satisfactory estimations, but it also requires a lot of climatic variables and complicated nonlinear processes in computing  $ET_p$ . Developing a simple and appropriate method with limited data is urgent. Accordingly, the Blaney – Criddle method was modified. The calibration process used the daily climatic data from 1960 to 1999 and the verification process used the daily climatic data from 2000 to 2015. The results showed that the BC method underestimated the values of monthly  $ET_p$  when the temperature was low and the BC method overestimated the values of monthly  $ET_p$  when the temperature was high. By modifying the original BC method, the slope of regression curve of  $ET_p$  values between the PE method and modified BC method became 0.999 7 from 0.685. Moreover, the trend of  $ET_p$  estimated by the modified BC method was more similar to that estimated by PE method. Compared with the PE method estimation results, the relative error of the  $ET_p$  values estimated by modified BC method became  $1.290\% \sim 3.630\%$  from  $-18.022\% \sim 16.269\%$ ; the root mean square error of the  $ET_p$  values decreased from  $0.529 \sim 0.921$  mm/d to  $0.214 \sim 0.283$  mm/d; the average deviation value became  $-0.001\,121 \sim 0.000\,737$  mm/d from  $-0.063 \sim 0.601$  mm/d; and the fitting

decision coefficient increased from 0.942 to 0.966. It was found that the values of  $ET_p$  estimated by the modified BC method agreed better with that estimated by the PE method by comparing the year and monthly  $ET_p$  values. Therefore, the modified BC method can significantly improve the estimation accuracy of the  $ET_p$  values and it is applicable in Guanzhong region of Shaanxi Province in China.

**Key words:** potential evapotranspiration; Guanzhong region; Blaney – Criddle method; Penman method; applicability

引言

关中平原是陕西省粮棉油主要产区<sup>[1]</sup>,但是地形、气候多变,且地处内陆,远离海洋,对于旱的响应十分敏感,季节性干旱已经成为制约当地农业发展的重要因素<sup>[2]</sup>。因此,制定合理灌溉制度和区域灌溉需水量计划对于水土资源合理配置和农业用水统筹规划至关重要<sup>[3-4]</sup>。潜在蒸散量<sup>[5-6]</sup> (Potential evapotranspiration,  $ET_p$ ) 是计算作物需水量的重要基础数据,但是其计算方法受地区气候的影响,不同方法对各个地区的适用性不同<sup>[7]</sup>。所以,结合区域特点对计算方法进行调试,使该方法能够准确估算潜在蒸散量,对于确定作物需水量和发展节水农业具有重要意义。

以往对  $ET_p$  的研究较多,很多研究都集中于对不同地区  $ET_p$  时空变化特征和成因分析,分析  $ET_p$  的变化趋势以及气象因子对  $ET_p$  的敏感性<sup>[1,8-10]</sup>。也有不少研究对  $ET_p$  计算方法的适用性评价进行分析,通过几种方法间的对比,推荐适合当地的  $ET_p$  计算方法。强小嫚等<sup>[7]</sup> 得出 ASCE Penman – Monteith 可应用于陕西关中半湿润地区  $ET_p$  计算;陈晟等<sup>[11]</sup> 和张倩等<sup>[12]</sup> 也分别提出了适用于河西走廊和河南新乡估算  $ET_p$  的方法。很多研究都以 Penman (PE) 方法为标准来计算  $ET_p$ <sup>[13-15]</sup>,但是 PE 方法需要大量的气象观测资料,对于资料缺失的地区难以使用<sup>[6]</sup>,限制了该方法的广泛应用,而且对于特定地区若没有一套较为简单且固定的参考标准,在实际应用中对于方法的选择会存在一定难度,所以有必要对于特定方法在特定地区进行参数的校准和验证,提高其  $ET_p$  的计算精度。Blaney – Criddle (BC) 是基于温度的较简单的  $ET_p$  估算方法,其较为简单的参数需求被广泛应用于很多地区<sup>[16-17]</sup>。已有研究表明 BC 方法存在地域性差异,应用时应当对其参数进行适当调整<sup>[16-18]</sup>,以提高其  $ET_p$  的计算精度。

基于以上研究现状,本文拟通过分析陕西关中地区 6 个典型站点 1960—2015 年数据,以 PE 方法为标准,对 BC 方法在陕西关中  $ET_p$  的适用性进行评价,并以月为尺度,对 BC 方法的  $ET_p$  参数进行适当

的调整,提高其对气象因子随时间变化的响应能力,以期为准准确计算  $ET_p$  和作物需水量提供参考,并为该地区的灌溉制度优化和区域灌溉需水量计划的制定提供一定的理论指导。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

陕西省关中地区(又称渭河平原),地处陕西中部,南倚秦岭,北界北山,西起宝鸡峡,东至潼关;南北高、中间低,西部高、东部低,中部地势平坦,土质疏松肥沃,总面积约 553.84 万  $hm^2$ ,耕地面积 175.8 万  $hm^2$ <sup>[1]</sup>,是陕西省主要粮食、果林、油料蔬菜产业基地。属大陆性季风气候,暖温带半湿润半干旱气候带,受季风和地形影响较大,雨热同期,易发生干旱,年均气温 6~13℃,无霜期为 210~220 d,年均降水量为 500~700 mm<sup>[2]</sup>。选取研究区域内的 6 个具有代表性的站点进行分析,具体分布情况见图 1。



图1 各站点空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of selected meteorological stations

1.2 数据来源及处理

逐日气象数据来源于中国气象数据网,原始数据文件经过较严格的质量控制和检查,选用区域内 6 个站点 1960—2015 年的资料(表 1),气象数据包括日最高气温、日最低气温、日平均气温、日平均气压、2 m 高处风速(由 10 m 高处风速换算得到<sup>[19]</sup>)、日照时数、平均相对湿度和最小相对湿度等数据。

1.3 研究方法

1.3.1 Penman 方法

采用 1948 年 Penman (PE) 方法作为计算  $ET_p$  的标准方法<sup>[5]</sup>,其表达式为

表 1 各站点的地理位置和数据区间

Tab.1 Location of station sites and their data interval

| 站点 | 纬度 (N) | 经度 (E)  | 海拔高度/m | 数据区间                    |
|----|--------|---------|--------|-------------------------|
| 宝鸡 | 34°21′ | 107°08′ | 612.4  | 1960—2004 年、2007—2008 年 |
| 武功 | 34°15′ | 108°13′ | 447.8  | 1960—2015 年             |
| 西安 | 34°18′ | 108°56′ | 397.5  | 1960—2005 年、2007—2008 年 |
| 长武 | 35°12′ | 107°48′ | 1206.5 | 1960—2015 年             |
| 铜川 | 35°05′ | 109°48′ | 978.9  | 1960—1999 年、2005—2009 年 |
| 华山 | 34°29′ | 110°05′ | 2064.9 | 1960—2015 年             |

$$ET_{p-PE} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \tag{1}$$

其中  $E_a = 0.26(1 + 0.54u_2)(e_s - e_a)$  (2)

式中  $ET_{p-PE}$ ——潜在蒸散量,mm/d

$R_n$ ——净辐射,MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$\Delta$ ——饱和水汽压-温度曲线斜率,kPa/℃

$\gamma$ ——温度计常数,kPa/℃

$\lambda$ ——汽化潜热,MJ/kg

$E_a$ ——干燥力,mm/d

$u_2$ ——距地面 2 m 高处的风速,m/s

$e_s$ ——饱和水汽压,kPa

$e_a$ ——实际水汽压,kPa

1.3.2 Blaney - Criddle 方法

采用 Blaney - Criddle(BC)方法<sup>[20]</sup>在月尺度上对  $ET_{p-BC}$  进行估算,其表达式为

$$ET_{p-BC} = a + bp(0.46T_{mean} + 8.13) \tag{3}$$

其中  $a = 0.0043R_{Hmin} - n/N - 1.41$  (4)

$b = 0.819 - 0.00409R_{Hmin} + 1.071n/N + 0.0656u_d - 0.00597R_{Hmin}(n/N) - 0.000597R_{Hmin}u_d$  (5)

式中  $p$ ——日白昼时数占年昼长时数百分比<sup>[21]</sup>

$T_{mean}$ ——平均温度,℃

$n$ ——实测白昼时数

$N$ ——可能白昼时数

$R_{Hmin}$ ——日最低相对湿度, %

$u_d$ ——白天 2 m 高处平均风速,m/s

关中平原各月份的  $p$  值见表 2。

表 2 关中平原各月份平均昼长时数与全年昼长时数的百分比

| Tab.2 Monthly percentage of annual daylight hours in Guanzhong region |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | % |
|-----------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| 月份                                                                    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |   |
| $p$                                                                   | 22.7 | 24.6 | 26.9 | 29.4 | 31.5 | 32.5 | 32.0 | 30.2 | 27.9 | 25.4 | 23.3 | 22.2 |   |

1.3.3 Blaney - Criddle 方法的校准(CBC)

为校准 Blaney - Criddle 方法中的修正系数  $a_1$ 、 $b_1$ ,以 PE 计算的各月潜在蒸散量为参考,应用平均温度( $T_{mean}$ )和  $p$  值来计算各地区每年每个月的截距和斜率,率定 CBC 中的修正系数  $a_{cal}$ 、 $b_{cal}$ ,并计算

$$ET_{p-CBC} = ET_{p-CBC} = a_{cal} + b_{cal}p(0.46T_{mean} + 8.13) = a_1 + b_1[a + bp(0.46T_{mean} + 8.13)] \tag{6}$$

1.3.4 Blaney - Criddle 方法的校准(CBC1)

采用 CBC 方法的各个站点修正系数( $a_1$ 、 $b_1$ )的平均值  $a_2$ 、 $b_2$ 计算  $ET_{p-CBC1}$

$$ET_{p-CBC1} = a_{cal} + b_{cal}p(0.46T_{mean} + 8.13) = a_2 + b_2[a + bp(0.46T_{mean} + 8.13)] \tag{7}$$

1.4 统计分析方法

通过 PE 与 BC 以及 PE 与 CBC(CBC1)的比较来评价估算效果。验证指标为相对误差(Relative error, RE)、均方根误差(Root mean square error, RMSE)、平均偏差(Mean bias error, MBE)和决定系数( $R^2$ )。

2 结果与分析

2.1 PE 和 BC 方法计算的月均  $ET_p$

用 PE 和 BC 方法计算的各个站点月平均  $ET_p$  间的相关关系如图 2 所示。分析数据可知,以月为尺度,BC 估算的  $ET_p$  平均值为 2.499 mm/d,PE 计算的  $ET_p$  平均值为 2.227 mm/d,BC 估算的  $ET_p$  平均值较 PE 方法计算值偏高 12.21%,线性回归系数为 0.685,BC 方法估算的月均  $ET_p$  值与 PE 方法的计算值拟合决定系数为 0.942,BC 方法估算结果表现为在  $ET_p$  值较小(温度较低)时低估,在  $ET_p$  值较大(温

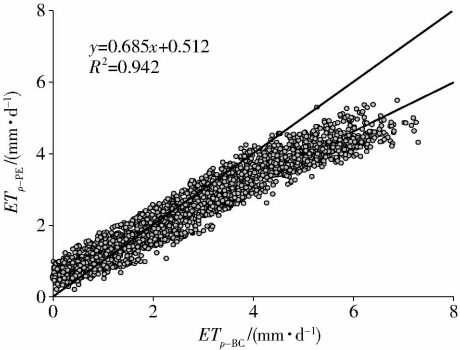


图 2 6 个站点 PE 和 BC 方法计算的月均  $ET_p$  比较

Fig.2 Comparison of  $ET_p$  calculated by PE and BC methods for six stations

度较高)时高估,整体均值为高估。

月均温度与 BC 和 PE 方法计算的月均  $ET_p$  的拟合关系如图 3 所示,2 种方法的  $ET_p$  都是随着温度的增加而增加。月均温度与 BC 和 PE 的线性回归系数分别为 0.183 和 0.126,决定系数分别为 0.869 和 0.833。当温度较低时,BC 方法计算的  $ET_p$  相对

于 PE 方法计算值偏小,BC 方法计算的  $ET_p$  在温度较低时趋近于零,当温度进一步降低  $ET_p$  值甚至小于零;当温度较高时,BC 方法计算的  $ET_p$  值相对于 PE 方法偏大。综合分析,2 种方法计算的  $ET_p$  值差距较大,需要以 PE 为标准,对 BC 方法的参数进行修正。

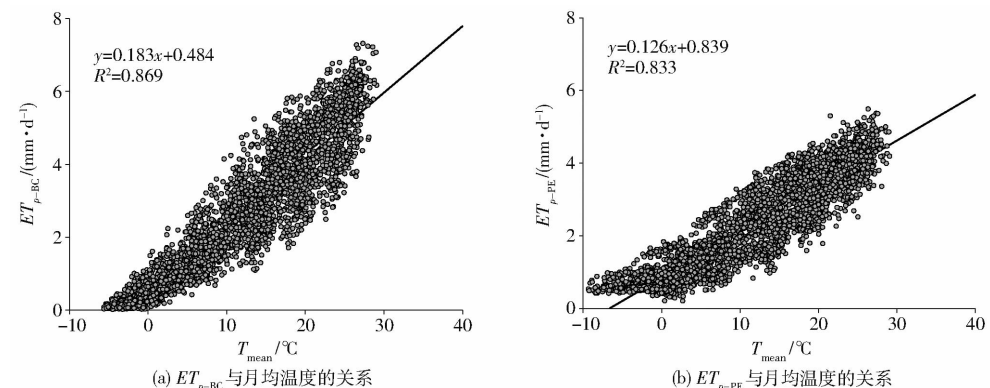


图 3 6 个站点 PE 和 BC 方法计算的月均  $ET_p$  与月均温度的关系

Fig. 3 Relationship between BC and PE methods calculated mean  $ET_p$  and mean temperature

基于 BC 和 PE 方法计算的各站点月平均  $ET_p$  值的 RE、RMSE 和 MBE 如表 3 所示。由表 3 可知,RE 变化范围为  $-18.022\% \sim 16.269\%$ ,其绝对值的均值为  $12.814\%$ ;RMSE 的变化范围为  $0.529 \sim 0.921 \text{ mm/d}$ ,平均值为  $0.715 \text{ mm/d}$ ;MBE 的变化范围为  $-0.063 \sim 0.601 \text{ mm/d}$ ,绝对值的均值为  $0.300 \text{ mm/d}$ 。BC 方法的估算结果与 PE 方法计算结果偏差较大,需要对 BC 方法进行修正。

表 3 各站点 BC 和 PE 方法中各评价指标的评估结果比较

| Tab. 3 Comparison of statistical indices for estimating $ET_p$ values calculated by BC and PE methods |         |                                          |                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 站点                                                                                                    | RE/%    | RMSE/( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | MBE/( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) |
| 宝鸡                                                                                                    | -14.657 | 0.529                                    | -0.063                                  |
| 武功                                                                                                    | 10.988  | 0.792                                    | 0.469                                   |
| 西安                                                                                                    | 16.269  | 0.921                                    | 0.601                                   |
| 长武                                                                                                    | -13.670 | 0.688                                    | 0.220                                   |
| 铜川                                                                                                    | 3.278   | 0.777                                    | 0.410                                   |
| 华山                                                                                                    | -18.022 | 0.584                                    | 0.040                                   |

2.2 BC 方法中  $a$ 、 $b$  值

各站点各月平均  $a$ 、 $b$  值如表 4 所示, $a$  值的变化范围为  $-1.937 \sim -1.561$ ,最小值( $-1.937$ )出现在 12 月份,最大值( $-1.561$ )出现在 9 月份,在温暖干燥的月份(5、6 月份)明显低于气候寒冷湿润的月份(12、1 月份),但是在 9 月份,温度降低,且降水较多,湿度较大,导致  $a$  值最小。这是大气温度和湿度综合作用的结果。

$b$  值的变化范围为  $0.953 \sim 1.486$ ,最小值和最大值分别出现在 9 月份和 12 月份,这与  $a$  值的最大

和最小值出现月份相反,在温暖干燥的月份(5、6 月份)明显高于气候寒冷湿润的月份(12、1 月份),而 9 月份温度较低,且降水较多,导致  $b$  值最大。 $a$  与  $b$  值的线性回归方程为  $a = -1.0056b - 0.596$  ( $R^2 = 0.973$ )。

2.3 CBC 与 CBC1 方法计算的  $ET_p$

以 PE 计算结果为标准,利用 CBC 和 CBC1 方法估算的月  $ET_p$  值与其进行拟合,结果如图 4 所示,基于 CBC 方法计算的  $ET_p$  值都集中在 1:1 线附近,PE 计算的  $ET_p$  平均值为  $2.227 \text{ mm/d}$ ,CBC 估算的  $ET_p$  平均值为  $2.226 \text{ mm/d}$ ,参数调整前后拟合方程的决定系数  $R^2$  均达到了 0.9 以上,调整后(0.966)略高于调整前(0.942,图 2),调整后回归趋势线斜率(0.9997)较参数调整前(0.685)更接近于 1。CBC1 方法估算的  $ET_p$  平均值为  $2.227 \text{ mm/d}$ ,回归趋势线斜率由调整前的 0.685 增加到 0.991,决定系数略有增大(0.943),CBC1 与 PE 的拟合趋势线较参数调整前更趋向于 1。这表明参数调整后,CBC 和 CBC1 方法估算值较 BC 方法计算的  $ET_p$  值更接近于 PE 方法计算值。

参数调整后的  $a_1$ 、 $b_1$  值和 CBC 与 PE 计算的月平均  $ET_p$  的评估结果如表 5 所示,RE 的变化范围为  $1.290\% \sim 3.630\%$ ,平均值为  $2.245\%$ ;RMSE 的变化范围为  $0.214 \sim 0.283 \text{ mm/d}$ ,平均值为  $0.240 \text{ mm/d}$ ;MBE 的变化范围为  $-0.001121 \sim 0.00087 \text{ mm/d}$ ,绝对值的均值为  $0.00078 \text{ mm/d}$ 。相对于校准前的 BC,CBC 与 PE 的 RE、RMSE 和 MBE 绝对值的均值分别降低了 82.48%、66.41%、

表 4 各站点各月平均  $a$ 、 $b$  值

Tab.4 Monthly  $a$  and  $b$  values for different months at investigated stations

| 参数  | 站点 | 月份     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|     |    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     |
| $a$ | 宝鸡 | -1.679 | -1.654 | -1.617 | -1.675 | -1.706 | -1.713 | -1.677 | -1.660 | -1.561 | -1.604 | -1.668 | -1.688 |
|     | 武功 | -1.689 | -1.655 | -1.658 | -1.699 | -1.711 | -1.713 | -1.662 | -1.655 | -1.575 | -1.613 | -1.677 | -1.709 |
|     | 西安 | -1.614 | -1.626 | -1.622 | -1.658 | -1.689 | -1.727 | -1.689 | -1.700 | -1.575 | -1.566 | -1.591 | -1.588 |
|     | 长武 | -1.833 | -1.742 | -1.717 | -1.751 | -1.754 | -1.751 | -1.691 | -1.679 | -1.565 | -1.636 | -1.751 | -1.830 |
|     | 铜川 | -1.847 | -1.776 | -1.728 | -1.764 | -1.780 | -1.783 | -1.711 | -1.709 | -1.643 | -1.714 | -1.794 | -1.865 |
|     | 华山 | -1.915 | -1.825 | -1.794 | -1.827 | -1.801 | -1.796 | -1.738 | -1.741 | -1.695 | -1.770 | -1.856 | -1.937 |
| $b$ | 宝鸡 | 1.079  | 1.066  | 1.036  | 1.090  | 1.117  | 1.124  | 1.073  | 1.045  | 0.953  | 0.994  | 1.055  | 1.082  |
|     | 武功 | 1.113  | 1.080  | 1.088  | 1.128  | 1.208  | 1.123  | 1.046  | 1.029  | 0.972  | 1.022  | 1.094  | 1.131  |
|     | 西安 | 1.033  | 1.056  | 1.059  | 1.088  | 1.114  | 1.156  | 1.096  | 1.089  | 0.981  | 0.976  | 1.005  | 1.007  |
|     | 长武 | 1.242  | 1.171  | 1.178  | 1.207  | 1.197  | 1.183  | 1.106  | 1.078  | 0.980  | 1.045  | 1.156  | 1.233  |
|     | 铜川 | 1.272  | 1.212  | 1.171  | 1.210  | 1.214  | 1.215  | 1.116  | 1.104  | 1.052  | 1.127  | 1.208  | 1.285  |
|     | 华山 | 1.442  | 1.330  | 1.303  | 1.340  | 1.294  | 1.255  | 1.158  | 1.142  | 1.135  | 1.238  | 1.379  | 1.486  |

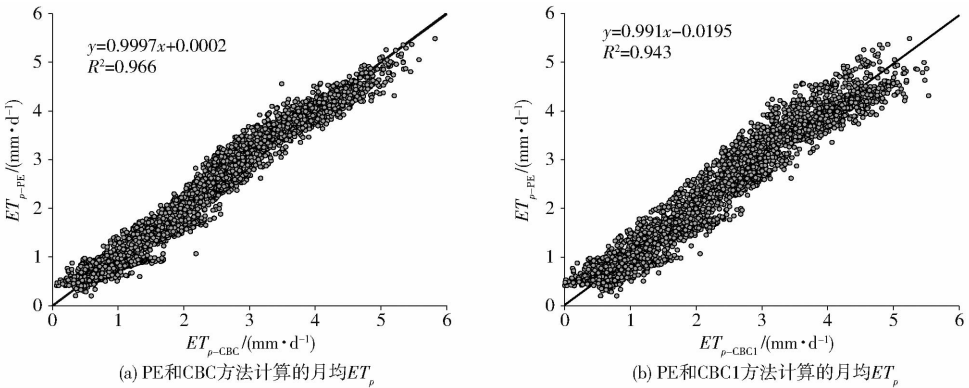


图 4 6 个站点 PE 和 CBC、CBC1 方法计算的月均  $ET_p$

Fig.4 Mean  $ET_p$  estimated by using PE and CBC or CBC1 methods in every month at six stations

表 5 各站点 CBC 和 PE 方法计算  $ET_p$  各评价指标的评估结果

Tab.5 Comparison of statistical indices in estimating  $ET_p$  values by using CBC and PE methods

| 站点 | RE/%  | RMSE/( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | MBE/( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | $a_1$ | $b_1$ |
|----|-------|----------------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|
| 宝鸡 | 1.695 | 0.214                                  | 0.000 529                             | 0.751 | 0.738 |
| 武功 | 2.198 | 0.245                                  | 0.001 036                             | 0.346 | 0.694 |
| 西安 | 3.630 | 0.239                                  | -0.000 737                            | 0.305 | 0.672 |
| 长武 | 1.290 | 0.214                                  | 0.000 494                             | 0.542 | 0.669 |
| 铜川 | 2.190 | 0.248                                  | -0.001 121                            | 0.427 | 0.676 |
| 华山 | 2.465 | 0.283                                  | 0.000 787                             | 0.609 | 0.697 |

99.74%,高估和低估现象都有明显的改进。可见,  $a_1$  和  $b_1$  作为各个站点的校准系数,能显著提高 BC 方法的估算精度,可使用 BC 方法代替 PE 来计算各站点的  $ET_p$ 。

选取各站点参数调整后的  $a_1$  和  $b_1$  的平均值 0.497 和 0.691 作为修正系数,用它计算的 CBC1 与 PE 计算的月平均  $ET_p$  的评估结果如表 6 所示,RE 的变化范围为  $-15.409\% \sim 21.916\%$ ,绝对值的均值为  $10.998\%$ ; RMSE 的变化范围为  $0.218 \sim 0.441 \text{ mm/d}$ ,平均值为  $0.311 \text{ mm/d}$ ; MBE 的变化范围为  $-0.377 \sim 0.244 \text{ mm/d}$ ,绝对值均值为  $0.167 \text{ mm/d}$ 。RMSE 有明显减小,RE 和 MBE 的评估结果相对于

校准前没有发生明显变化。统一修正系数后,估算精度变化不明显。可见,校正后的统一参数并不完全适用于所有地区,CBC1 方法在其他地区的应用需要重新进行率定和验证。

### 2.4 年 $ET_p$ 的验证

选取数据较为完整的武功、长武、华山站 2000—2015 年的数据和西安、铜川、宝鸡站 2000 年以后的数据进行 CBC 方法的进一步验证,如图 5 所示,其中 CBC 方法中的修正系数均采用表 5 中各个站点的率定结果。从图中可以看出,除宝鸡站外,其余 5 个站点 CBC 方法估算的年累积  $ET_p$  接近 PE 方法的计算值。

表 6 各站点 CBC1 和 PE 方法计算的  $ET_p$  各评价指标的评估结果比较

Tab. 6 Comparison of statistical indices in estimating  $ET_p$  values by using CBC1 and PE methods

| 站点 | RE/%    | RMSE/( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | MBE/( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | $a_2$ | $b_2$ |
|----|---------|----------------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|
| 宝鸡 | -15.409 | 0.441                                  | -0.376 748                            | 0.497 | 0.691 |
| 武功 | 12.828  | 0.284                                  | 0.143 993                             | 0.497 | 0.691 |
| 西安 | 21.916  | 0.343                                  | 0.243 771                             | 0.497 | 0.691 |
| 长武 | -0.426  | 0.218                                  | 0.006 116                             | 0.497 | 0.691 |
| 铜川 | 9.047   | 0.272                                  | 0.107 704                             | 0.497 | 0.691 |
| 华山 | -6.362  | 0.309                                  | -0.124 053                            | 0.497 | 0.691 |

对于武功站,PE、BC 和 CBC 方法计算的年均累积  $ET_p$  分别为 787.27、945.50、782.55 mm,经过参数修正后,CBC 方法估算的年累计  $ET_p$  较 BC 方法降低了 162.95 mm,且更接近于 PE 方法的年累计  $ET_p$  计算值;对于长武站,PE、BC 和 CBC 方法计算的年均累积  $ET_p$  分别为 777.18、870.63、780.42 mm,经过参数修正后,CBC 方法的估算年累计  $ET_p$  较 BC 增加 90.21 mm,且更接近于 PE 方法的年累计  $ET_p$  计算值;华山站的估算结果与长武站类似,PE、BC 和 CBC 方法计算的年均累积  $ET_p$  分别为 771.22、817.90、792.52 mm,CBC 方法的估算年累计  $ET_p$  较 BC 减小 25.39 mm,CBC 方法的估算结果精度较高。

对于西安站和铜川站,经过参数校验后,CBC 方法计算的年累计  $ET_p$  值较 BC 的估算值更接近于 PE 方法的计算值。但是对于宝鸡站,2004、2007 和 2008 年修正后与 PE 方法计算的年累计  $ET_p$  值相差较大,而表 5 中的各个评估结果相对于修正前较优。原因之一为应用 1960—1999 年的数据进行参数校正,气象因子不确定性较大,且时间序列较长,导致

2000 年之后的修正系数发生变化,另一方面可能因为年累计值并不能完全代表评估结果,还需对年内月累计  $ET_p$  值的变化做深入分析。

综合分析,通过校准后的 CBC 方法的计算精度较高,可以用来代替 PE 方法估算潜在蒸散量以及进行灌溉预报,但是对于个别气象因子不确定性因素较大地区,应该考虑短时间序列来进行方法的率定和验证,使得 CBC 方法的估算和预报更为准确。

2.5 月累计  $ET_p$  的验证

分别选取年累计  $ET_p$  验证时 CBC 估算相对较差的年份(武功站 2011 年、长武站 2008 年、华山站 2014 年、西安站 2004 年、铜川站 2007 年和宝鸡站 2007 年,图 5),进行年内月累计值的验证。如图 6 所示,BC 在温度较低的月份(1—3 月份和 10—12 月份)明显低估月累计  $ET_p$  值;在温度较高的月份(4—9 月份)高估月累计  $ET_p$  值。CBC 方法计算的月累计  $ET_p$  值与 PE 的计算值更为接近,且高估和低估效果都能明显改善。而宝鸡站也表现出在 4—9 月份高估现象,CBC 方法计算值使得高估现象有了明显的改善,而在温度较低的月份(1—3 月份和

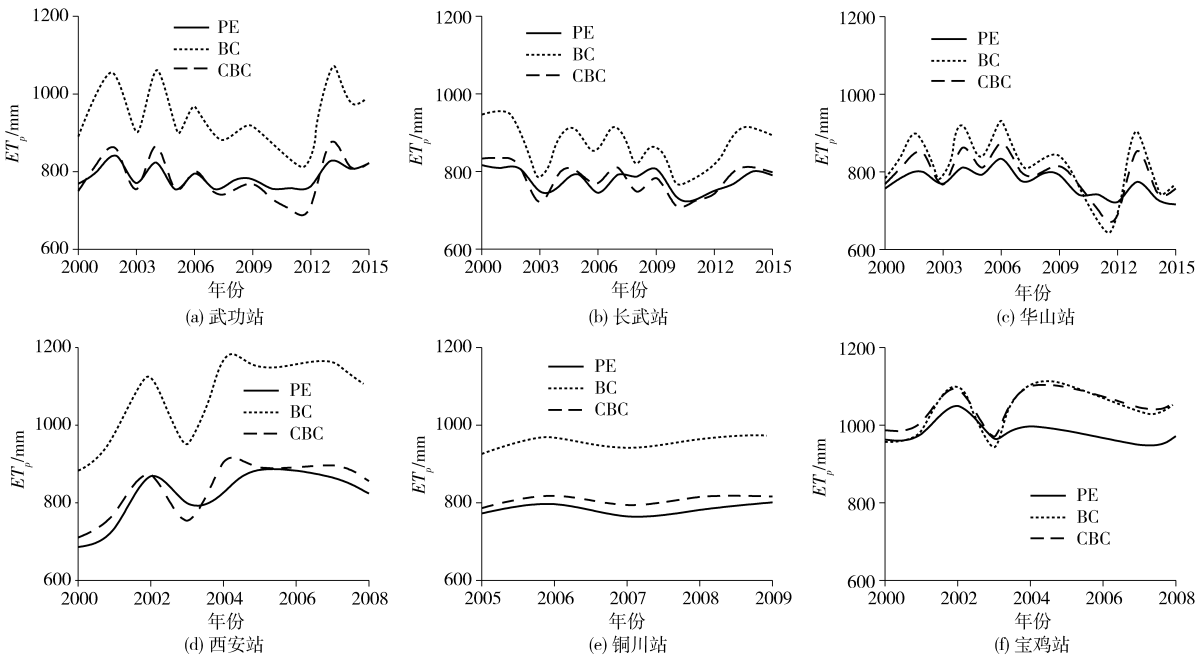


图 5 PE、BC 和 CBC 方法计算的年  $ET_p$  对比

Fig. 5 Comparison of annual  $ET_p$  calculated by PE, BC and CBC methods at six stations

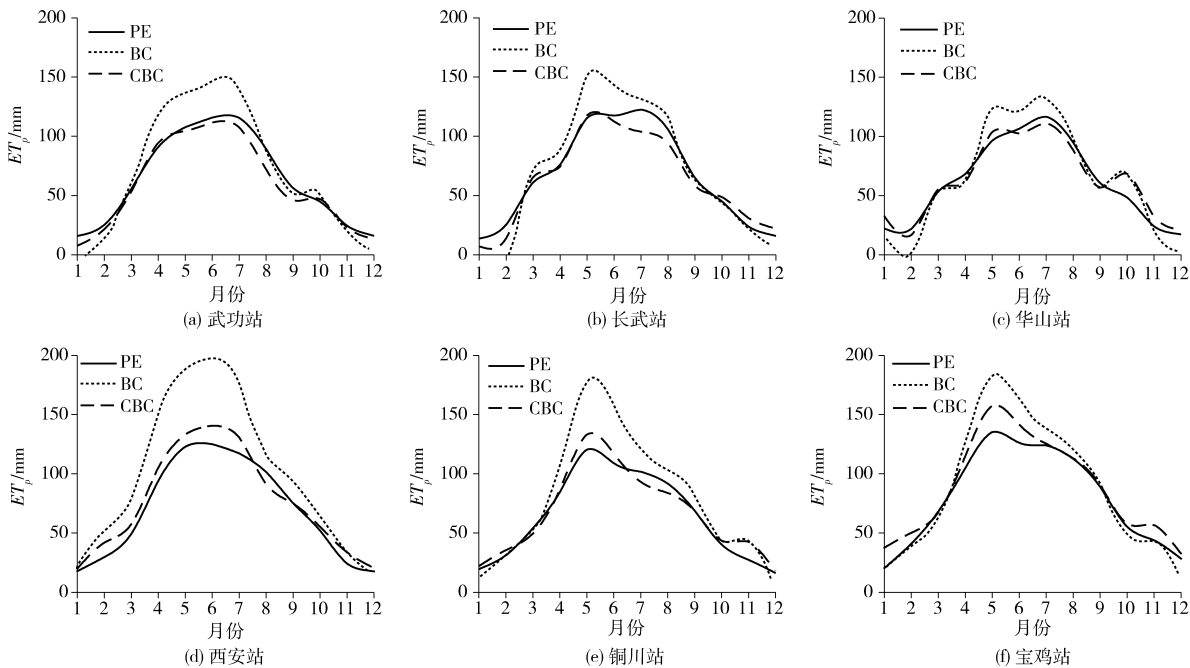


图6 PE、BC 和 CBC 方法计算的月累计  $ET_p$  对比

Fig. 6 Comparison of evolution of cumulative  $ET_p$  according to PE, BC and CBC methods

10—12 月份), BC 方法计算值与 PE 方法计算值很接近, CBC 方法计算值较大, 综合导致 2007 年 CBC 方法相对于 BC 方法年累计  $ET_p$  没有明显变化。这表明 CBC 方法对陕西关中地区的月累计  $ET_p$  计算精度有明显提高。

### 3 讨论

我国对于  $ET_p$  的研究较多, 主要集中于对特定地区  $ET_p$  时空变化特征与成因分析。于东平等<sup>[22]</sup>对青海省东部高原农业区的的研究发现潜在蒸散量南高北低, 东高西低, 具有明显的地区差异; 曾丽红等<sup>[23]</sup>对东北地区的研究显示  $ET_p$  南高北低、西高东低, 从东北向西南逐渐增加。有关方法的应用对比和适用性研究也有很多<sup>[18, 24-25]</sup>, 樊军等<sup>[18]</sup>用 FAO - Rad、BC、Hargreaves、Makkink 和 Priestley - Taylor 方法等 10 种方法计算黄土区的  $ET_p$ , 认为在需要数据较少的方法中 Priestley - Taylor 方法接近 Penman - Monteith 方法, 且应用这些方法时需要对其参数进行适当调整, 以适应该地的气象条件。李晨等<sup>[25]</sup>对四川省不同区域 6 种简易方法的  $ET_p$  计算精度进行对比, 推荐在东部盆地区使用 Hargreaves - Samani 法, 盆周山地区、川西南地区与川西高原区使用 Priestley - Taylor 法。但是这些单纯的成因分析和公式比较并不能确认公式的应用性。对于特定地区没有一套较为简单且固定的参考标准, 在实际应用中对于方法的选择存在一定难度, 所以有必要对公式在特定地区进行参数的校准和验证, 提高其  $ET_p$  的计算精度, 为方法的应用提供理论依据。苏春宏

等<sup>[26]</sup>研究发现单纯的方法计算比较不能确认模型的应用性, 在中国复杂的地理及气候环境下, 需要在充分方法率定的条件下, 对各种计算  $ET_p$  的方法进行率定考核, 才有可能得出在不同气候条件下更适合且较为简单的  $ET_p$  计算方法。丁加丽等<sup>[27]</sup>研究表明, 修正后的温度法具有较高的模拟精度, 具有较好的地区适用性。HEYDARI 等<sup>[28]</sup>对 Hargreaves 方法进行参数修正, 结果显示修正参数能够提高估算精度, 在各个地区不同的修正系数可以用来代替原来方法中的系数。这些方法通过参数修正后都能明显提高计算精度, 故本文采用陕西关中 6 个典型站点 1960—2015 年的气象数据对 BC 方法进行参数的修正和验证, 选用 1960—1999 年的数据进行参数调整, 确定修正参数, 并采用 2000—2015 年数据进行验证, 结果表明经过参数修正后的 Blaney - Criddle 方法能显著提高计算精度。

Blaney - Criddle 方法是基于温度相对准确和简便的  $ET_p$  计算方法<sup>[16]</sup>, 张乐昕等<sup>[16]</sup>基于 BC 方法对河套灌区  $ET_p$  的估算结果表明, 基于温度改进的 BC 方法得到的逐旬平均  $ET_p$  与 PE 方法相近, 率定期各旬相对误差均小于 5%, 标准误差小于 0.65 mm/d, 验证期各旬相对误差均小于 9%, 标准误差小于 0.70 mm/d, 可以应用于河套灌区解放闸灌域的灌溉预报中。国外对 BC 的研究较多, HEYDARI 等<sup>[29]</sup>对 BC 方法进行了修正, 结果表明校准后均方根误差由调整前 0.794 mm/d 减小到 0.342 mm/d, 平均偏差由 0.157 mm/d 变为 0.007 mm/d, 百分误差由 20.645% 降低到 6.968%, 经过参数校准后 BC

方法能显著提高计算精度,可以应用于气候参数的时空变化管理和有限水资源的管理调控。本文也得出了类似结论:改进前后 BC 方法估算的月均  $ET_p$  值与 PE 方法的计算值拟合,决定系数调整后(0.966)高于调整前(0.942),与 PE 方法计算的  $ET_p$  相比, CBC 方法较改进前 BC 方法计算的各站点月平均  $ET_p$  的相对误差(−12.814% 降至 2.245%)、均方根误差(0.715 mm/d 降至 0.240 mm/d)和平均偏差(0.300 mm/d 降至 0.000 78 mm/d)发生明显降低。通过 6 个站点年累计  $ET_p$  和月累计  $ET_p$  的验证, CBC 方法具有较高的计算精度, CBC 方法可用于陕西关中地区的实际应用中。

本文只研究了陕西关中地区 6 个长序列站点,对于其他较短时间站点的数据分析暂未涉及,得到的结果只对于提高当地的  $ET_p$  具有一定的指导意义,对于整个关中地区各个站点的研究和应用还有一定的局限性,因此,研究工作还应在更多站点和气候区对  $ET_p$  的参数进行修正和试验研究,且 BC 方法的参数具有较强的地域差异性,需要针对不同地区的气象数据进行参数修正和验证。

## 4 结束语

以 PE 方法为标准对关中地区 6 个典型站点的 BC 方法进行参数校准和验证, BC 方法在温度较低时低估月累计  $ET_p$ , 在温度较高时高估  $ET_p$ 。 $a$  值的变化范围为 −1.937 ~ −1.561, 最小值和最大值分别出现在 12 月份和 9 月份,  $b$  值的变化范围为 0.953 ~ 1.486, 最低值和最高值分别出现在 9 月份和 12 月份, 这是大气温度和湿度综合作用的结果。通过参数调整, CBC 方法能够显著提高计算精度, RE 绝对值的均值由 12.814% 降至 2.245%; RMSE 均值由 0.715 mm/d 降至 0.240 mm/d, MBE 绝对值的均值由 0.300 mm/d 降至 0.000 78 mm/d。改进前后 BC 方法估算的月均  $ET_p$  值与 PE 方法的计算值拟合决定系数由 0.942 提高到 0.966, CBC 方法计算的年累计  $ET_p$  值和月累计  $ET_p$  值较 BC 方法的计算值更接近于 PE 方法的计算值。可见, 经过参数修正后的 CBC 方法能够显著提高  $ET_p$  的估算精度, 可以为陕西关中地区计算作物需水量和制定灌溉制度提供参考。

## 参 考 文 献

- 曹红霞, 粟晓玲, 康绍忠, 等. 陕西关中地区参考作物蒸发蒸腾量变化及原因[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 8–16. CAO Hongxia, SU Xiaoling, KANG Shaozhong, et al. Changes of reference crop evapotranspiration and causes in Guanzhong region of Shaanxi Province[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 8–16. (in Chinese)
- 白雪娇, 王鹏新, 解毅, 等. 基于结构相似度的关中平原旱情空间分布特征[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 345–351. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20151147&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151147&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.047. BAI Xuejiao, WANG Pengxin, XIE Yi, et al. Spatial distribution characteristics of droughts in Guanzhong plain based on structural similarity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 345–351. (in Chinese)
- 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 372–376. LI Yulin, CUI Jianyuan, ZHANG Tonghui. Comparative study on calculation methods of reference evapotranspiration[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(4): 372–376. (in Chinese)
- MOHAWESH O E. Spatio-temporal calibration of Blaney–Criddle equation in arid and semiarid environment[J]. Water Resources Management, 2010, 24(10): 2187–2201.
- MCMAHON T A, PEEL M C, LOWE L, et al. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2013, 17(4): 1331–1363.
- LI S, KANG S, ZHANG L, et al. Evaluation of six potential evapotranspiration models for estimating crop potential and actual evapotranspiration in arid regions[J]. Journal of Hydrology, 2016, 543(B): 450–461.
- 强小嫚, 蔡焕杰, 孙景生, 等. 陕西关中地区  $ET_0$  计算方法的适用性评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 121–127. QIANG Xiaoman, CAI Huanjie, SUN Jingsheng, et al. Adaptability evaluation for reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) formulas in Guanzhong region of Shaanxi[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 121–127. (in Chinese)
- 冯禹, 崔宁博, 魏新平, 等. 川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 78–86. FENG Yu, CUI Ningbo, WEI Xiping, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 78–86. (in Chinese)
- 王小静, 李志, 赵姤, 等. 西北旱区 1961—2011 年参考作物蒸散量的时空分异[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5609–5616. WANG Xiaojing, LI Zhi, ZHAO Cha, et al. Spatiotemporal variations of the reference crop evapotranspiration in the arid region of Northwest China during 1961—2011[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5609–5616. (in Chinese)
- PATLE G T, SINGH D K. Sensitivity of annual and seasonal reference crop evapotranspiration to principal climatic variables[J]. Journal of Earth System Science, 2015, 124(4): 819–828.
- 陈晟, 李森, 陈雷, 等. 基于气温和 DC–BP–NN 的河西走廊月度  $ET_0$  估算模型[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 140–147. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20151220&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151220&journal_id=jcsam).



- DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.020.
- CHEN Sheng, LI Miao, CHEN Lei, et al. Monthly reference crop evapotranspiration estimation method based on air temperature and DC - BP - NN in Hexi corridor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 140 - 147. (in Chinese)
- 12 张倩, 段爱旺, 高阳, 等. 基于温度资料估算参考作物腾发量的方法比较[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 104 - 109. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150216&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150216&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.016.
- ZHANG Qian, DUAN Aiwang, GAO Yang, et al. Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation methods using temperature data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 104 - 109. (in Chinese)
- 13 SUMNER D M, JACOBS J M. Utility of Penman - Monteith, Priestley - Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration[J]. Journal of Hydrology, 2005, 308(1 - 4): 81 - 104.
- 14 DONOHUE R J, MCVICAR T R, RODERICK M L. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate[J]. Journal of Hydrology, 2010, 386(1): 186 - 197.
- 15 DOUGLAS E M, JACOBS J M, SUMNER D M, et al. A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(3): 366 - 376.
- 16 张乐昕, 丛振涛. 基于 FAO - Blaney - Criddle 方法的河套灌区参考作物蒸散发量估算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 95 - 101.
- ZHANG Lexin, CONG Zhentao. Calculation of reference evapotranspiration based on FAO - Blaney - Criddle method in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 95 - 101. (in Chinese)
- 17 HEYDARI M M, FOOLADMAND H R, TAJAMOLI A, et al. Erratum to: evaluation and calibration of Blaney - Criddle equation for estimating reference evapotranspiration in semiarid and arid regions[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(9): 1 - 2.
- 18 樊军, 邵明安, 王全九. 黄土区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 98 - 102.
- FAN Jun, SHAO Ming'an, WANG Qianjiu. Comparisons of many equations for calculating reference evapotranspiration in the Loess Plateau of China [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 98 - 102. (in Chinese)
- 19 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]. Rome: FAO, 1998.
- 20 OORENBOS J, PRUITT W O. Guidelines for predicting crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 24 (2nd ed.) [R]. Rome: FAO, 1977.
- 21 ALLEN R G, PRUITT W O. Rational use of the FAO Blaney - Criddle formula[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1986, 112(2): 139 - 155.
- 22 于东平, 张鑫, 何毅, 等. 青海省东部高原农业区参考作物蒸散量的时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 66 - 71.
- YU Dongping, ZHANG Xin, HE Yi, et al. Temporal-spatial variations of reference crop evapotranspiration in eastern plateau agricultural region of Qinghai province[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 66 - 71. (in Chinese)
- 23 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 近 60 年来东北地区参考作物蒸散量时空变化[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 194 - 200.
- ZENG Lihong, SONG Kaishan, ZHANG Bai, et al. Patiotemporal variability of reference evapotranspiration over the northeast region of China in the last 60 years[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 194 - 200. (in Chinese)
- 24 吴立峰, 白桦, 张富仓, 等. FAO Penman - Monteith 及简化方法在西北适用性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 139 - 151. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161218&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161218&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.018.
- WU Lifeng, BAI Hua, ZHANG Fucang, et al. Applicability of FAO Penman - Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration in Northwest China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 139 - 151. (in Chinese)
- 25 李晨, 崔宁博, 冯禹, 等. 四川省不同区域参考作物蒸散量计算方法的适用性评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 127 - 134.
- LI Chen, CUI Ningbo, FENG Yu, et al. Adaptation evaluation for reference evapotranspiration methods in different regions of Sichuan[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 127 - 134. (in Chinese)
- 26 苏春宏, 陈亚新, 王亚东, 等. ET<sub>0</sub> 计算模型及其主要输入因子的影响分析评估[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 14 - 19.
- SU Chunhong, CHEN Yaxin, WANG Yadong, et al. ET<sub>0</sub> calculates the influence of methods and its major inputted factor to analysis evaluation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(1): 14 - 19. (in Chinese)
- 27 丁加丽, 彭世彰, 徐俊增, 等. 基于温度资料的参考作物蒸发蒸腾量计算方法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(6): 633 - 637.
- DING Jiali, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Calculation method for reference crop evapotranspiration based on temperature data[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(6): 633 - 637. (in Chinese)
- 28 HEYDARI M M, HEYDARI M. Calibration of Hargreaves - Samani equation for estimating reference evapotranspiration in semiarid and arid regions[J]. Archives of Agronomy & Soil Science, 2014, 60(5): 695 - 713.
- 29 HEYDARI M M, FOOLADMAND H R, TAJAMOLI A, et al. Erratum to: evaluation and calibration of Blaney - Criddle equation for estimating reference evapotranspiration in semiarid and arid regions[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(9): 1 - 2.