

## 黄河源区潜在蒸散量估算方法适用性分析

李云凤, 王文科, 王国庆, 刘翠善, 郑昊昌, 马稚桐

### The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the headwater area of the Yellow River

LI Yunfeng, WANG Wenke, WANG Guoqing, LIU Cuishan, ZHENG Haochang, and MA Zhitong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011044>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 西北旱区潜在蒸散发的的气候敏感性及其干旱特征研究

Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China

阴晓伟, 吴一平, 赵文智, 赵富波, 孙彭成, 宋燕妮, 邱临静 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 20-30

#### 格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征

Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin

朱晓倩, 金晓媚, 张绪财, 张京 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 55-64

#### 基于MOD16的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析

An analysis of spatio-temporal characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration in the Yinchuan Plain based on MOD16 data

王卓月, 孔金玲, 李英, 张在勇, 刘慧慧, 蒋镒竹, 钟炎伶, 张静雅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 53-61

#### 基于MODIS蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析

Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data

郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 朱琳, 龚建师 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 45-52

#### 平原区深层隐伏岩溶塌陷主控因子地球物理调查方法适用性分析

$\{\text{suggestArticle.titleEn}\}$

房浩, 李巧灵, 雷晓东, 王海刚, 李晨, 关伟, 何 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 153-160

#### 蒸散发水源组成与测定方法研究进展

A review of the advances in water source composition and observation methods of evapotranspiration

王周锋, 王文科, 李俊亭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 1-9



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011044

## 黄河源区潜在蒸散量估算方法适用性分析

李云凤<sup>1,2</sup>, 王文科<sup>1,2</sup>, 王国庆<sup>3</sup>, 刘翠善<sup>3</sup>, 郑昊昌<sup>1,2</sup>, 马稚桐<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 潜在蒸散量(Potential Evapotranspiration)是区域水量平衡研究的重要参数。为在资料短缺的情况下准确计算潜在蒸散量,并科学评价其简化算法的适用性。基于黄河源区 11 个气象站点 1970—2018 年气温、降水、相对湿度、风速、日照时数等逐日观测资料,以联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith(PM)法为参考,从年、月及空间尺度等方面分析了 Priestly-Taylor(PT)法、Doorenbos-Pruitt(DP)法、Hargreaves-Samani(HS)法、Rohwer(RO)法、Thorntwaite(TH)法、Blaney-Criddle(BC)法 6 种简易算法的计算精度。结果表明在黄河源区 HS 法与 PM 法的平均偏差最低,仅为 3.487 mm/month,精度最高。但 HS 法未考虑平均相对湿度对于潜在蒸散量估算效果的影响,在气候湿润的黄河源区东南部红原县、河南县、若尔盖县、玛曲县及久治县存在精度不高的问题。因此引入平均相对湿度因子对 HS 法进行修正,并评价了改进后的 HS 法的应用效果。结果表明,引入平均相对湿度因子修正 HS 法后,黄河源区整体年潜在蒸散量的平均偏差由 -22.008 mm/a 降至 6.174 mm/a;月潜在蒸散量的平均偏差由 3.487 mm/month 降至 1.031 mm/month;空间尺度上,以上 5 县的平均偏差明显降低,平均降幅达 5.33 mm/month。表明改进后的 HS 法能够有效解决黄河源区东南部精度不高的问题,可以为黄河源区潜在蒸散量的简化计算提供参考。

**关键词:** 潜在蒸散量;适用性;Hargreaves-Samani 法修正;黄河源区;估算方法

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0010-10

## The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the headwater area of the Yellow River

LI Yunfeng<sup>1,2</sup>, WANG Wenke<sup>1,2</sup>, WANG Guoqing<sup>3</sup>, LIU Cuishan<sup>3</sup>, ZHENG Haochang<sup>1,2</sup>, MA Zhitong<sup>1,2</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid regions, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Nanjing Institute of Hydraulic Research, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

**Abstract:** Potential evapotranspiration is an essential parameter for regional water balance analysis. To realize the accurate calculation of potential evapotranspiration when data are lacking, scientific evaluation of the applicability of the simplified potential evapotranspiration algorithm in the headwater area of the Yellow River is carried out. Based on daily observation data of temperature, precipitation, relative humidity, wind speed, and sunshine hours from 11 meteorological stations in the headwater area of the Yellow River from 1970 to 2018, the calculation accuracy of six simplified methods for potential evapotranspiration calculation are analyzed by using the FAO Penman-Monteith (PM) method as a reference method from the aspects of the year, month and spatial scales, including the Priestly-Taylor (PT) method, Doorenbos-Pruitt (DP) method, Hargreaves-Samani (HS) method, Rohwer (RO) method, Thorntwaite (TH) method and Blaney-Criddle (BC) method. The results show that the

收稿日期: 2020-11-25; 修订日期: 2021-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1603243; 41230314)

第一作者: 李云凤(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 1120672827@qq.com

通讯作者: 王文科(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事旱区地下水文与生态效应研究。E-mail: wenkew@chd.edu.cn

mean deviation between the HS method and the PM method, only 3.487 mm/mon, is the lowest in the headwater area of the Yellow River and the accuracy is the highest. However, the HS method does not consider the influence of the average relative humidity on potential evapotranspiration estimation, resulting in low accuracy in the humid climate of Hongyuan County, Henan County, Ruoergai County, Maqu County and Jiuzhi County in the southeast of the headwater area of the Yellow River. Therefore, this article introduces the average relative humidity factor to modify the HS method and evaluates the application effect of the improved HS method. It is found that after the HS method is revised, the mean deviation of the overall annual potential evapotranspiration in the headwater area of the Yellow River decreases from -22.008 mm/a to 6.174 mm/a, and the mean deviation of the monthly potential evapotranspiration decreases from 3.487 mm/mon to 1.031 mm/mon, respectively. On the spatial scale, the mean deviation of the above 5 counties decreases significantly, with an average drop of 5.33 mm/mon, indicating that the improved HS method can effectively solve the problem of low accuracy in the southeast of the headwater area of the Yellow River, and can provide a reference for the simplified calculation of potential evapotranspiration in the headwater area of the Yellow River.

**Keywords:** potential evapotranspiration; applicability; improved Hargreaves-Samani method; the headwater area of the Yellow River; estimation method

黄河源区是我国重要的水资源补给源头和生态安全屏障。近年来黄河源区气候朝着暖湿化方向发展,导致区内水热平衡发生变化<sup>[1]</sup>。如何科学评价气候变化对水量平衡的影响,是当前国内外研究的热点问题,其中潜在蒸散量估算的准确性对于气候变化下水量平衡分析和陆面水文过程模拟至关重要。

潜在蒸散发受纬度、气候条件(水气压、相对湿度、温度、风速、日照时数等)、海拔高度和地表立地条件等因素影响,其动力学过程极为复杂。迄今对于如何准确估算潜在蒸散量的问题仍然没有得到很好的解决,对此学者提出了包括综合法 Penman-Monteith 法、基于辐射的 Priestly-Taylor 法、Makkink 法、Jensen-Haise 法和 Doorenbos-Pruitt 法、基于温度的 Hargreaves-Samani 法、Thornthwaite 法、Hamon 法和 Blaney-Criddle 法,以及基于风速的 Rohwer 法等在内的 50 余种估算方法<sup>[2]</sup>。其中 Penman-Monteith 法(PM 法)物理意义强,综合考虑了能量平衡和水汽扩散,计算精度高且与蒸发皿蒸发量及水面蒸发量有较高的相关性<sup>[2-3]</sup>,被联合国粮农组织(FAO)列为计算潜在蒸散量的首选方法。但是 PM 法需要十分详尽的气象资料<sup>[4]</sup>,在气象站点稀少的地区存在模型参数获取困难的问题,而其他方法需要的输入参数较少,如 TH 法和 BC 法仅需要温度资料,在气象资料短缺的区域,此类简易算法的应用难度更低,可以代替 PM 法估算潜在蒸散量。然而不同的潜在蒸散量估算方法表现出很强的地区差异性<sup>[5]</sup>,各研究区适宜的替代模型并不相同,需要对其适用性进行评估。李晨等<sup>[6]</sup>以 PM 法为参考,对比了 48Penman 法、Hargreaves-Samani 法、Pristley-

Taylor 法、Irmak-Allen 法、Makkink 法和 Penman-Van Bavel 法等 6 种简易算法在四川省不同区域的计算精度,发现四川东部盆地区表现最好的是 Hargreaves-Samani 法,其他区域均为 Priestley-Taylor 法,48Penman 法和 Makkink 法的偏差较大,推荐在东部盆地区使用 Hargreaves-Samani 法,在盆周山地区、川西南地区与川西高原区使用 Priestley-Taylor 法代替 PM 法进行潜在蒸散量的估算。刘晓英等<sup>[7]</sup>选取了华北地区 6 个气象站点,探讨了 Priestly-Taylor 法在干旱气候条件下的适用性问题,其研究发现辐射项占比越高, Priestly-Taylor 法与 PM 法吻合程度越高,并指出应对 Priestly-Taylor 法进行适当修正。随后研究人员引入不同方法,根据区域特性校准了简易模型的原始参数。如 Bormann<sup>[8]</sup>发现不同估算方法之间存在显著的线性关系,采用线性修正方法能够提高替代方法与 PM 法的拟合程度。范文波等<sup>[9]</sup>和贾悦等<sup>[10]</sup>基于贝叶斯原理,分别在玛纳斯河流域及川中丘陵区,对 Hargreaves-Samani 法(即 HS 法)原始系数进行修正,校准后的模型平均误差显著降低,优化了 HS 法在干旱和湿润 2 种气象条件下的应用效果。黄河源区地域辽阔,气象站点密度相对较低,在本区及类似区域(如西藏北部高原湖盆区)应用 PM 法受到限制,但目前针对黄河源区潜在蒸散量简化计算的研究尚不多见。

在此背景下,本文利用黄河源区 11 个站点 1970—2018 年逐日气象数据,以 PM 法为参考,根据黄河源区气候及下垫面特性选取 6 种简易方法(PT 法、HS 法、DP 法、RO 法、BC 法和 TH 法)估算潜在蒸散量,对比评价各方法在黄河源区的适用性,筛选出本

区适用性最强的简易方法并根据气象要素敏感性进行修正,以期进一步提高其在黄河源区的计算精度和适用性。研究成果对黄河源区或相同气候条件下资料短缺的区域,选用精度高且计算简便的潜在蒸散量估算方法有着重要的借鉴意义。

## 1 研究区概况

黄河源区一般指河源至唐乃亥水文站的区间<sup>[1]</sup>,位于青藏高原东缘,面积约  $12.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,源区涵盖青海、四川和甘肃三省的 16 个县级行政单元,其中设有气象站点的县自西向东依次为青海曲麻莱、玛多、达日、兴海、玛沁、贵南、久治,河南蒙古自治县,甘肃玛曲,四川红原和若尔盖(图 1)。

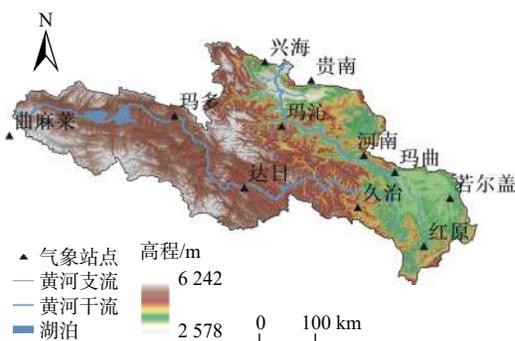


图 1 黄河源区气象站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of the meteorological stations in the headwater area of the Yellow River

黄河源区地势较高,人类活动相对较少,区域内地貌众多,水系发育,地下水丰富,水源涵养功能极佳。本区地势西北高、东南低,黄河自西向东经玛曲县折向北方奔流,黑河、白河是其两大主要支流及重要的水源地或产流区<sup>[1]</sup>。黄河源区 80% 以上植被为高原草地、林地和沼泽<sup>[12]</sup>。气候区划上属于青藏高原亚寒带半湿润区,平均气温  $-0.9 \sim 3.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。年降水量  $250 \sim 800 \text{ mm}$ ,自西北向东南递增,年内变化大,降水为本区径流的主要补给源。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

#### 2.1.1 气象资料

气象数据来自中国国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),依据研究区范围(图 1)选定 11 个气象站点 1970—2018 年的逐日数据,数据集主要包括降水量、最低最高及平均温度、相对湿度、风速、日照时数等。根据实测值的趋势对数据集进行异常值修正及

缺测值插补、计算潜在蒸散量并进行空间插值处理。

#### 2.1.2 地形数据

地形数据来自中国科学院地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。数据产品为 SRTM3 V4.1 版本,分辨率为  $90 \text{ m}$ 。对数据进行预处理后,重采样为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  经纬网格高程数据。

### 2.2 研究方法

表 1 列出了 PM 法和对比方法(DP 法、PT 法、BC 法、TH 法、HS 法和 RO 法)的计算公式、参数物理意义、各方法优点和不足。辐射参数  $a=0.183$ ,  $b=0.681$ <sup>[13]</sup>,各方法具体计算过程参见文献[2,14]。按照 Allen<sup>[15]</sup>等的研究,日尺度的土壤热通量  $G$  相对于  $R_n$  较小,故忽略不计。对比方法选取的主要依据为黄河源区气候条件及估算方法考虑的气象要素。首先,针对本区辐射强烈的特性,选取了基于辐射的 DP 法和 PT 法。其次,根据本区寒冷干旱的气候条件选取了基于温度的 BC 法、TH 法和 HS 法。最后,以考虑了风速和水汽压的 RO 法作为补充。

### 2.3 精度评价标准

本文以 PM 法为参考,采用一致性系数( $d$ )、平均偏差( $MBE$ )、决定系数( $R^2$ )、均方根误差( $RSME$ )4 个指标从年和月尺度上比较六种方法估算值与 PM 法计算结果之间的吻合程度。其中,一致性系数  $d$  及决定系数  $R^2$  能够反映被评价方法与 PM 法二者估计值的相关程度,指示两者是否具有相同的变化趋势及分布规律。平均偏差和均方根误差能够反映二者的偏离程度,平均偏差为正时代表正偏差,即评价方法较 PM 法高估了  $E_p$ ,反之则为负偏差,表现为相对低估。 $d$  和  $R^2$  越接近 1,  $MBE$  和  $RSME$  越接近 0,则该方法与 PM 法一致性越好,计算精度越高。各指标计算公式如下:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{pi} - E_{pmi})^2}{\sum_{i=1}^n (|E_{pi} - \bar{E}_{pm}| + |E_{pmi} - \bar{E}_{pm}|)} \quad (1)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{pi} - E_{pmi})}{n} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (E_{pi} - \bar{E}_p)(E_{pmi} - \bar{E}_{pm}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (E_{pi} - \bar{E}_p)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (E_{pmi} - \bar{E}_{pm})^2} \quad (3)$$

表 1 潜在蒸发量估算公式  
Table 1 Estimation formula of potential evapotranspiration

方法	公式	参数含义	优点	不足
PM法 <sup>[15]</sup>	$E_{pm} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$	$\Delta$ 为温度对饱和水汽压曲线的斜率/(kPa·°C <sup>-1</sup> ); $R_n$ 和 $G$ 分别为地表净辐射和日土壤热通量/(MJ·m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> ); $\gamma$ 为干湿表常数/(kPa·°C <sup>-1</sup> ); $T$ 为日平均气温/°C; $U_2$ 为2 m处风速/(m·s <sup>-1</sup> ); $e_s$ 和 $e_a$ 分别为饱和水汽压和实际水汽压/kPa	联合国粮农组织推荐的首选方法, 物理意义强, 综合考虑了辐射项和风速项	需要的气象资料及模型参数多, 在资料短缺的地区应用受到限制
BC法 <sup>[16]</sup>	$E_{bc} = 0.85p(0.46T_a + 8.13)$	$p$ 为白天天数占全年白天天数的百分比; $T_a$ 为月平均气温/°C	所需资料 and 参数少, 计算简便	计算精度较低
TH法 <sup>[17]</sup>	$E_{th} = \begin{cases} 0, T_a < 0^\circ\text{C} \\ 1.6C\left(\frac{10T_a}{T}\right)^\beta, 0^\circ\text{C} \leq T_a \leq 26.5^\circ\text{C} \\ C(-415.85 + 32.24T_a - 0.43(T_a)^2), T_a > 26.5^\circ\text{C} \end{cases}$	$I$ 为年温度效率指数; $\beta$ 为热量指数的函数; $C = d \cdot N/360$ , 其中 $d$ 为月平均日照时数, $N$ 为每月天数	基于水量平衡原理提出, 计算时仅需月均温度的数据	计算精度受温度影响, 夏季偏高
RO法 <sup>[18]</sup>	$E_{ro} = 0.44(1 + 0.27U_2)(e_s - e_a)$	参数意义同上	基于空气动力学原理, 考虑水汽压和风速的影响	未考虑辐射项影响, 在辐射强烈的地区误差较大
HS法 <sup>[19]</sup>	$E_{hs} = 0.0023 \times 0.408(T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a$	$R_a$ 为大气层外太阳辐射/(MJ·m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	需要气象资料较少, 适用于干旱半干旱地区	未考虑风速、湿度的影响
DP法 <sup>[20]</sup>	$E_{dp} = 0.408 \frac{b \cdot \Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_s - 0.3$	$b$ 为基于风速和湿度的修正系数, $R_s$ 为短波太阳辐射/(MJ·m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	需要的参数较少, 计算简便	未考虑蒸发潜热的影响
PT法 <sup>[21]</sup>	$E_{pt} = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - G)}{\lambda}$	$\lambda$ 为蒸发潜热/(MJ·kg <sup>-1</sup> ), 其余参数意义同上	需要参数较少, 计算简便	未考虑风速项

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{pi} - E_{pmi})^2}{n}} \quad (4)$$

式中:  $n$ ——样本总数;

$E_{pmi}$ 、 $\bar{E}_{pm}$ ——PM 法计算值及平均值;

$E_{pi}$ 、 $\bar{E}_p$ ——六种方法计算值及平均值。

同时, 为进一步分析黄河源区各简便估算方法在空间尺度的适用性, 本文对各方法计算的潜在蒸散量多年平均值进行反距离权重插值, 并以 PM 法为标准, 对比 6 种简易算法与 PM 法二者估计值的空间分布之间的差异。

### 3 结果与分析

#### 3.1 未经修正时各方法估算效果分析

##### 3.1.1 黄河源区潜在蒸发量年值估算效果

图 2 是各原始公式估算的潜在蒸散量年值序列。从图 2 可以发现, 7 种公式估算结果在 50 年间呈现微弱的上升趋势, 这是因为受局部地形的影响, 各地区潜在蒸散发或表现为上升趋势, 或表现为下降趋势<sup>[22]</sup>, 导致黄河源区整体潜在蒸散发的上升趋势并不明显, 这与刘昌明等<sup>[23]</sup>指出的 1960—2007 年黄河源区潜在蒸散发呈现微弱上升趋势的结论基本一致。虽然 6 种方法与 PM 法二者估算值的年代际变化趋势大致相同, 均于 80 年代达到最低值, 然而各方法与 PM 法的拟合度存在较大的差异, PM 法与 HS 法计算的黄河源区年潜在蒸散量变化范围为 700 ~ 800 mm/a, DP 法估

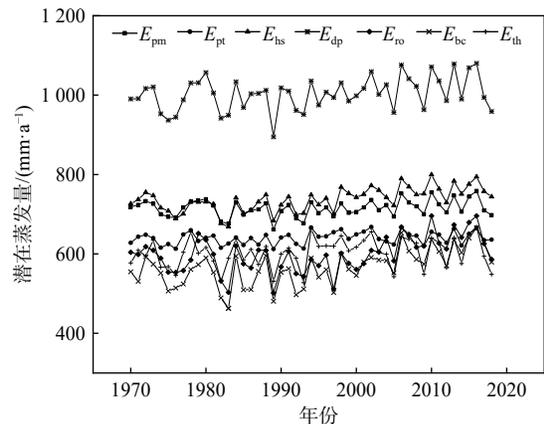


图 2 未经修正时各估算方法年潜在蒸散量时间序列

Fig. 2 Time series of potential evapotranspiration for each method without correction

算值在 900 ~ 1100 mm/a, 其余方法的计算结果在 500 ~ 700 mm/a 之间。HS 法的年值序列与 PM 法最为接近, 且年际波动趋势与标准 PM 法基本一致, 表明 HS 法可以较好地反映出黄河源区潜在蒸散发的年代际和年际变化, 这与 HS 法最早在美国西部干旱地区提出<sup>[24]</sup>因而在干旱气候下应用效果较好有关。DP 法存在显著高估的现象, 这或许是原始经验系数过大的缘故, 表明未经系数修正的 DP 法不宜直接应用于黄河源区。RO 法、BC 法和 TH 法则存在显著低估的现象, 这是由于近年来黄河源区气候趋于暖湿化<sup>[1]</sup>, 使得仅考虑温度的 BC 法和 TH 法变化幅度较大, 同时由于黄河源区大风天数减少、风速降低, 导致 RO 法计算

的潜在蒸散量偏低。

### 3.1.2 黄河源区潜在蒸散量月值估算效果

从图 3 可以看出,各方法估算值均在 7 月达到蒸发峰值,呈现出中间高两边低的特征。月潜在蒸散量的取值范围在  $-10 \sim 150 \text{ mm/mon}$  之间,只有 BC 法在 1 月的估算值为负值,其余方法各月的取值均为正值。从走势上看,HS 法、PT 法及 DP 法与 PM 法的走势大致相同,RO 法和 BC 法的走势较 PM 法平缓,TH 法的走势较 PM 法陡峭。

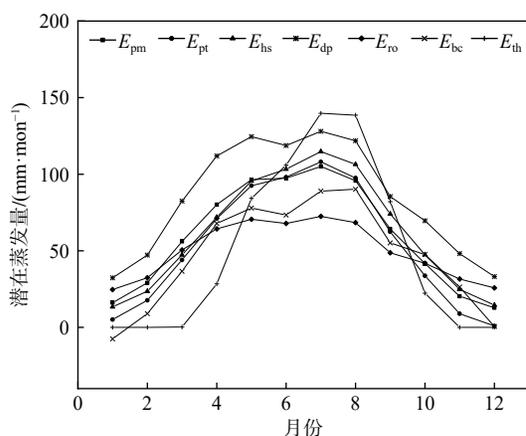


图 3 未经修正时 7 种方法多年平均 (1970—2018 年) 逐月潜在蒸散量估算值

Fig. 3 Uncorrected multi-year average monthly potential evapotranspiration estimation of the seven methods

各方法估算值与 PM 法的计算结果之间的一致性系数 ( $d$ ) 均在 0.85 以上,HS 法和 PT 法最高,达到了 0.98(表 2)。各方法决定系数  $R^2$  在 0.71~0.97 之间,其中 HS 法、PT 法和 DP 法 3 种方法的决定系数均在 0.9 以上,表明各方法估算值与 PM 法的计算结果之间的线性相关程度较高,尤其是 HS 法、PT 法和 DP 法表现最优。再按平均偏差绝对值的大小对各估算方法与 PM 法二者的估计值之间的偏离程度进行排序,可得:HS 法 < PT 法 < TH 法 < RO 法 < BC 法 < DP 法。虽然 HS 法及 PT 法的均方根误差均约为  $10 \text{ mm/mon}$ ,但 HS 法平均偏差仅为  $3.49 \text{ mm/mon}$ ,而 PT 法为  $-6.04 \text{ mm/mon}$ ,即 HS 法与 PM 法的吻合程度比 PT 法更高。未经修正时,HS 法与 PM 法二者的估计值最为接近,在本区精度最高。结合图 3 和表 2 可以发现,HS 法仅 6—9 月计算的潜在蒸散量略高,且误差较小,这是由于 HS 法的估算效果受区域干旱程度影响<sup>[5,24-25]</sup>,在干旱条件下精度更高。其次为 PT 法,月潜在蒸散量的平均偏差为  $-6.04 \text{ mm/mon}$ 。PT 法的计算结果在辐射最强的

5—9 月与 PM 法估计值较接近,其余月份因太阳辐射较弱而远低于 PM 法估计值,故整体平均偏差为负值。DP 法计算的潜在蒸散量全年显著偏高,而 BC 法和 RO 法计算的潜在蒸散量 5—9 月显著偏低,这或许是由于黄河源区 5—9 月潜在蒸散量对相对湿度和风速的敏感性偏小,且其敏感性分别于 6 月和 7 月达到最低值<sup>[26]</sup>,使得 DP 法和 RO 法夏季误差较大。TH 法仅需要月均温一个参数,其估算效果受气温影响而变化幅度较大,温度较低时 TH 法计算的潜在蒸散量显著偏低,而温度较高时则显著偏高。Xu 等<sup>[27]</sup>研究表明 TH 法的应用效果亦受水分含量影响,在有充足水分供于蒸发的山谷地区最为适用。综合图 2、图 3 和表 2 可以看出,利用原始系数估算潜在蒸散量时,时间尺度上 HS 法与 PM 法误差最小,适用性最强。

表 2 未经修正时各估算方法月潜在蒸散量估算效果

Table 2 Monthly potential evapotranspiration estimation effect of each estimation method without correction

方法	月平均 潜在蒸散量/ ( $\text{mm}\cdot\text{mon}^{-1}$ )	平均偏差/ ( $\text{mm}\cdot\text{mon}^{-1}$ )	$d$	$R^2$	均方根误差/ ( $\text{mm}\cdot\text{mon}^{-1}$ )
PM法	59.58	/	/	/	/
HS法	61.41	3.49	0.98	0.93	10.59
PT法	53.32	-6.04	0.98	0.97	9.90
TH法	50.11	-8.75	0.87	0.76	32.48
RO法	49.91	-9.16	0.86	0.71	21.33
BC法	47.15	-10.69	0.92	0.80	19.85
DP法	83.62	23.84	0.89	0.95	25.25

### 3.1.3 各估算方法计算的多年平均值空间分布

为进一步分析各简易估算方法在黄河源区空间尺度上的适用性,本文对 7 种方法估算的多年平均潜在蒸散量进行空间插值,插值结果见图 4。从图 4 可以看出,PM 法估算的潜在蒸散量空间分布呈现由南向北递增的趋势,变化范围为  $676.40 \sim 785 \text{ mm/a}$ ,多年平均潜在蒸散量为  $714.96 \text{ mm/a}$ 。其中,兴海和贵南两县是潜在蒸散量空间分布的高值中心,为  $778 \sim 787 \text{ mm/a}$ ;玛沁、达日、久治和河南等 4 县为低值中心,为  $672 \sim 696 \text{ mm/a}$ 。西北部及东南部的曲麻莱和红原等县潜在蒸散量为  $708 \sim 735 \text{ mm/a}$ 。

对比分析 6 种简易算法与 PM 法二者计算值的空间分布,可以发现,各简便方法在黄河源区空间尺度上的应用效果不尽相同。除 PT 法外,其余方法均在空间上体现出了北部兴海及贵南县的高值中心。PT 法估算的潜在蒸散量高值中心为东南部若尔盖县,年潜在蒸散量空间分布上呈现由东向西递减的趋势,

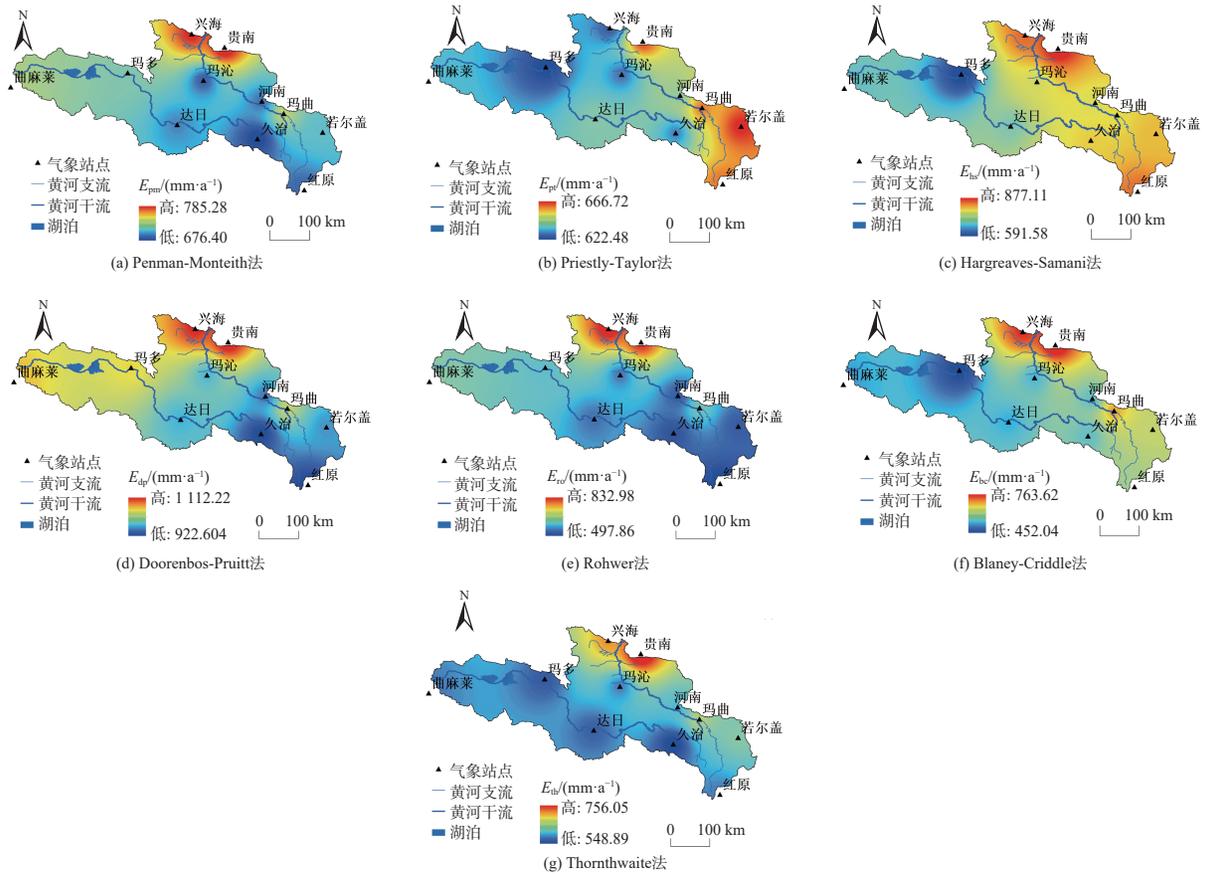


图4 各估算方法潜在蒸散量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of potential evapotranspiration of each estimation method

在中部地区误差较大, 达 98.19 mm/a。HS 法估算值整体与 PM 法的计算结果相近, 仅在东南部红原县、久治县、河南县和若尔盖县计算结果偏高, 误差约 84.4 mm/a。DP 法在整个区域计算结果偏高现象明显, 平均误差达 288 mm/a。RO 法、TH 法和 BC 法计算值明显偏低, 误差分别为 116.04, 113.64, 149.16 mm/a。结合各方法空间特征和黄河源区已有的潜在蒸散量与气象因子的敏感性分析<sup>[12,28]</sup>, 黄河源区各简易估算方法计算结果的空间分布与其所含气象因子的敏感性的空

间变化基本一致, 表明各简易估算方法的适用区域与气象因子敏感性的空间分布密切相关。综合评价各简易方法时间与空间尺度上的估算效果可知, HS 法在本区精度最高, 适用性最强, 这与焦丹丹等<sup>[2]</sup>在气候干旱的甘肃临泽地区的研究类似。

### 3.2 黄河源区 HS 法改进后的估算效果分析

#### 3.2.1 HS 公式修正方法

为进一步提高 HS 法在黄河源区估算潜在蒸散量的适用性, 以 PM 法为参考, 对 HS 法进行改进。利用

表3 相关系数矩阵

Table 3 Correlation matrix

气象因子	平均相对湿度	日照时数	平均气温	日最高气温	日最低气温	平均风速	净辐射
平均相对湿度	1.000	-0.459	0.427	0.281	0.547	-0.169	0.240
日照时数	-0.459	1.000	-0.046	0.139	-0.225	-0.052	0.378
平均气温	0.427	-0.046	1.000	0.941	0.961	0.006	0.740
日最高气温	0.281	0.139	0.941	1.000	0.832	-0.057	0.723
日最低气温	0.547	-0.225	0.961	0.832	1.000	0.040	0.653
平均风速	-0.169	-0.052	0.006	-0.057	0.040	1.000	0.036
净辐射	0.240	0.378	0.740	0.723	0.653	0.036	1.000

注: 以上系数均通过0.001的显著性水平检验。

主成分分析筛选出影响潜在蒸散量估算效果的主要气象因子,根据各气象因子载荷值判定改进 HS 法需要引入的气象因子。

表 3 为 HS 法中所含的各气象因子之间的相关系数,从表中可以得知:HS 法所含的平均气温、日最高气温、日最低气温和净辐射之间具有较高的相关系数,达到了极显著水平。依据特征值大于 1 的原则,提取了前 3 个主成分(表 4),累积方差贡献率达到 89.505%,表明前 3 个主成分能够解释 7 个气象因子对潜在蒸散量的影响。表 5 列出了各成分的载荷值,可以发现:第一主成分与平均相对湿度、平均气温、日最高气温、日最低气温和净辐射具有较强的相关性;第二主成分与平均相对湿度和日照时数 2 个气象因子相关性较好;第三主成分只与平均风速具有显著相关性。

表 4 总方差解释

Table 4 Explanation of total variance

成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	3.653	52.187	52.187
2	1.566	22.378	74.566
3	1.046	14.939	89.505

注:以上系数均通过 0.001 的显著性水平检验。

表 5 初始因子载荷阵得分

Table 5 Component matrix

气象因子	第一主成分	第二主成分	第三主成分
平均相对湿度	0.531	-0.661	-0.167
日照时数	-0.027	0.929	-0.199
平均气温	0.982	0.019	0.052
日最高气温	0.922	0.203	-0.038
日最低气温	0.954	-0.178	0.105
平均风速	-0.026	0.106	0.981
净辐射	0.804	0.426	-0.009

注:以上系数均通过 0.001 的显著性水平检验。

由以上分析可知:第一、第二主成分均与平均相对湿度相关性较高,且第一、第二主成分的累积方差贡献率达 74.566%,表明平均相对湿度对于潜在蒸散发影响较大,在本区应用时应当将平均相对湿度引入 HS 的修正公式:

$$E_{hsc} = E_{hs} + f(RH_{mean}) \quad (5)$$

式中:  $E_{hs}$ ——原 HS 公式计算的潜在蒸散量;

$E_{hsc}$ ——HS 公式引入平均相对湿度因子后的逐日潜在蒸散量;

$f(RH_{mean})$ ——平均相对湿度函数。

以 PM 法和改进前的 HS 法计算所得的潜在蒸散

量之差( $E_{pm}-E_{hs}$ )为因变量  $y$ ,  $RH_{mean}$  为自变量  $x$ , 进行回归分析,得到非线性回归趋势方程为:

$$y = -0.928 \ln(RH_{mean}) + 3.677 \quad (6)$$

即非线性回归方程系数  $a=0.928$ ,  $b=3.677$ 。通过引入平均相对湿度因子建立的 HS 修正公式为:

$$E_{hsc} = E_{hs} - 0.928 \ln(RH_{mean}) + 3.677 \quad (7)$$

### 3.2.2 改进后的 HS 法时空尺度的修正结果分析

为分析改进后的 HS 法在黄河源区的应用效果,分别对改进后的 HS 法时间(年、月)及空间尺度上的适用性进行评估(表 6)。PM 法计算的多年潜在蒸散量平均值为 714.96 mm/a,原 HS 法为 736.97 mm/a,误差为 22.01 mm/a,改进后的 HS 法多年平均值为 708.79 mm/a,误差为 -6.17 mm/a,多年月平均值与 PM 法的误差也从 1.83 mm/mon 降到 0.51 mm/mon,意味着改进后的 HS 法的计算精度优于未经修正的 HS 法。

表 6 改进后的 HS 法计算潜在蒸散量在时间尺度的估算效果

Table 6 Estimation effect of the potential evapotranspiration calculated by the improved HS method on the time scale

方法	多年平均/(mm·a <sup>-1</sup> )	月平均/(mm·mon <sup>-1</sup> )
PM法	714.96	59.58
原HS法	736.97	61.41
改进HS法	708.79	59.07

图 5 为改进 HS 法与 PM 法的月潜在蒸散量拟合效果,改进后的 HS 法月潜在蒸散量与 PM 法拟合良好。一年中有 7 个月份计算值大致相等,其余月份也较为接近潜在蒸散量,最大的差值出现在 4 月,仅为 7.39 mm/mon。

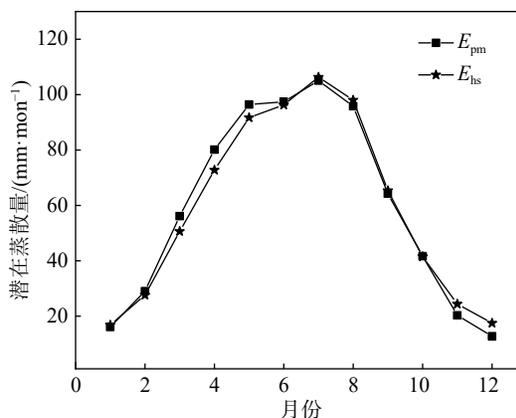


图 5 改进 HS 法与 PM 法的月潜在蒸散量拟合效果

Fig. 5 The fitting effect of monthly potential evapotranspiration between the improved of HS method and PM method

图 6 为改进后的 HS 法潜在蒸散量多年平均值的

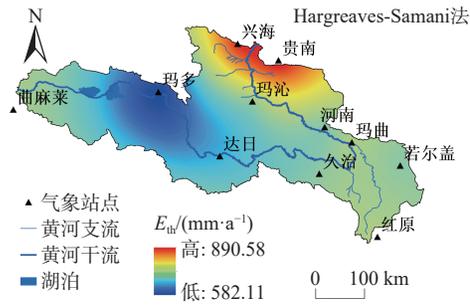


图6 改进后的HS法多年平均潜在蒸散量空间分布

Fig. 6 The spatial distribution of the multi-year average potential evapotranspiration of the improved HS method

空间分布,对比图4与图6,可以发现,改进后的HS法的估算值与PM法空间分布更为接近。潜在蒸散量高值中心贵南县为890.58 mm/a,低值中心玛多县为582.11 mm/a,空间分布上呈现由北向南逐渐降低的趋势,与PM法空间分布趋势相同。东南部红原县、河

南县、久治县和若尔盖县,平均误差由84.4 mm/a降至20.42 mm/a。表明引入平均相对湿度因子后,HS法描述气候相对湿润的黄河源区东南部潜在蒸散量的能力得以提升。

表7为HS法改进前后的平均偏差变化情况。HS法改进后,其平均偏差有着显著的降低,黄河源区整体的平均偏差由3.49 mm/mon降至1.03 mm/mon,与PM法偏离程度变小。在相对湿度大的河南、红原、久治、若尔盖和玛曲等5县,改进后的HS公式平均偏差显著降低,平均降幅为5.33 mm/mon,尤以气候最为湿润的红原县修正效果为优,平均偏差降幅最大,达7.38 mm/mon。相对湿度较小的中部和西北部,除玛沁县和曲麻莱县的平均偏差降低之外,其余地区的MBE表现出1~3 mm/mon的上升,意味着HS法的修正效果与相对湿度有一定联系。

表7 HS法改进前后月潜在蒸散量平均偏差空间分布

Table 7 The spatial distribution of the average error of monthly potential evapotranspiration before and after HS method improvement

区域	行政区	平均相对湿度/%	改进前平均偏差( $MBE_1$ )/(mm·mon <sup>-1</sup> )	改进后平均偏差( $MBE_2$ )/(mm·mon <sup>-1</sup> )	$ MBE_2  -  MBE_1 $ /(mm·mon <sup>-1</sup> )
东南部	河南	63.90	5.67	1.02	-4.65
	红原	69.70	11.16	3.78	-7.38
	久治	65.40	8.62	3.25	-5.37
	若尔盖	67.40	6.46	0.10	-6.36
	玛曲	61.50	3.26	0.36	-2.9
中部	达日	60.70	0.20	-2.87	2.67
	贵南	53.20	7.77	9.50	1.73
	玛沁	60.90	5.62	2.38	-3.24
	兴海	50.50	4.03	7.98	3.95
西北部	玛多	56.80	-10.59	-11.42	0.83
	曲麻莱	54.10	-3.84	-2.72	-1.12
黄河源区平均值		60.40	3.49	1.03	-2.46

注: $|MBE_2| - |MBE_1|$ 代表HS法与PM法估算值偏离程度的变化。 $|MBE_2| - |MBE_1|$ 为负表示HS改进后与PM法偏离程度变小,反之则偏离程度变大。

综合分析HS法改进前后在黄河源区时间及空间尺度上的应用效果,可以看出,引入平均相对湿度因子改进HS法,能够有效解决HS法在黄河源区东南部红原县、河南县、玛曲县、久治县和若尔盖县精度不高的问题。而且,随着近年来黄河源区日趋暖湿化,在未来气候条件下改进后的HS法将极大地提升潜在蒸散量的估算精度,在本区有着较好的应用前景。

## 4 结论

(1)通过计算,黄河源区多年平均潜在蒸散量为714.96 mm/a,年内蒸散能力最大的月份出现在7月,为105.03 mm/mon。空间分布呈现由北向南逐渐降低

的趋势,蒸散能力的高值中心为北部的贵南县,年潜在蒸散量达785.28 mm/a。

(2)6种估算方法中,HS法无论是时间还是空间尺度,均与PM法的差值最小。其年、月值的时间序列最为接近PM法,在黄河源区的适用性最强。但仍存在红原县、河南县、若尔盖县、玛曲县及久治县精度不高的问题,需要根据区域特性进行修正。

(3)通过主成分分析,发现由于黄河源区东南部气候湿润,原HS公式未考虑平均相对湿度对潜在蒸散量估算效果的影响,导致HS法在东南部红原等县误差较大。针对此问题,本文在HS公式中引入平均相对湿度因子,将HS公式修正为 $E_{hsc} = E_{hs} - 0.928 \ln(RH_{mean}) + 3.677$ 。HS法改进之后,黄河源区整体的年潜在蒸散

量的平均偏差由 $-22.008$  mm/a降至 $6.174$  mm/a;月潜在蒸散量的平均偏差由 $3.487$  mm/mon降至 $1.031$  mm/mon;空间尺度上,黄河源区东南部的红原县、河南县、若尔盖县、玛曲县及久治县的潜在蒸散量的平均偏差明显降低。表明 HS 法改进后,在黄河源区的计算精度和适用性得到进一步提升。

#### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 蓝永超,鲁承阳,喇承芳,等.黄河源区气候向暖湿转变的观测事实及其水文响应[J].冰川冻土,2013,35(4):920-928. [LAN Yongchao, LU Chengyang, LA Chengfang, et al. The fact of climate shift to warm-humid in the source regions of the Yellow River and its hydrologic response[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 920 - 928. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 焦丹丹,吉喜斌,金博文,等.干旱气候条件下多种潜在蒸发量估算方法对比研究[J].高原气象,2018,37(4):1002-1016. [JIAO Dandan, JI Xibin, JIN Bowen, et al. Comparison of different methods for estimating potential evaporation in an arid environment[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(4): 1002 - 1016. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 许文豪,王晓勇,张俊,等.鄂尔多斯高原湖泊蒸发原位试验研究[J].水文地质工程地质,2019,46(5):16-23. [XU Wenhao, WANG Xiaoyong, ZHANG Jun, et al. Research on in situ test of lake evaporation in the Ordos Plateau[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 16 - 23. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 赵玲玲,夏军,许崇育,等.水文循环模拟中蒸散发估算方法综述[J].地理学报,2013,68(1):127-136. [ZHAO Lingling, XIA Jun, XU Chongyu, et al. A review of evapotranspiration estimation methods in hydrological Models[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(1): 127 - 136. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] LU J B, SUN G, MCNULTY S G, et al. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States I[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41(3): 621 - 633.
- [ 6 ] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(4): 127 - 134. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 刘晓英,林而达,刘培军.干旱气候条件下 Priestley-Taylor 方法应用探讨[J].水利学报,2003,34(9):31-38. [LIU Xiaoying, LIN Erda, LIU Peijun. Study on application of Priestly-Taylor method to dry climate condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(9): 31 - 38. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] BORMANN H. Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations[J]. Climatic Change, 2011, 104(3/4): 729 - 753.
- [ 9 ] 范文波,吴普特,韩志全,等.玛纳斯河流域 ET0 影响因素分析及对 Hargreaves 法的修正[J].农业工程学报,2012,28(8):19-24. [FAN Wenbo, WU Pute, HAN Zhiqian, et al. Influencing factors analysis of reference crop evapotranspiration and modification of Hargreaves method in Manas river basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 19 - 24. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 贾悦,崔宁博,魏新平,等.考虑辐射改进 Hargreaves 模型计算川中丘陵区参考作物蒸散量[J].农业工程学报,2016,32(21):152-160. [JIA Yue, CUI Ningbo, WEI Xiping, et al. Modifying Hargreaves model considering radiation to calculate reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(21): 152 - 160. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 陈利群,刘昌明,郝芳华,等.黄河源区基流变化及影响因素分析[J].冰川冻土,2006,28(2):141-148. [CHEN Liqun, LIU Changming, HAO Fanghua, et al. Change of the baseflow and its impacting factors in the source regions of Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2): 141 - 148. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 叶红,张廷斌,易桂花,等.2000—2014年黄河源区 ET 时空特征及其与气候因子关系[J].地理学报,2018,73(11):2117-2134. [YE Hong, ZHANG Tingbin, YI Guihua, et al. Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration and its relationship with climate factors in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(11): 2117 - 2134. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 祝昌汉.再论总辐射的气候学计算方法(二)[J].南京气象学院学报,1982,5(2):196-206. [ZHU

- Changhan. A further discussion on the climatological calculating method of total radiation(II)[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1982, 5(2): 196 – 206. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 冀雅珍, 武海霞. 试论VB程序在彭曼公式中的应用[J]. *科技情报开发与经济*, 2011, 21(5): 191 – 193. [ JI Yazhen, WU Haixia. Discussion on the application of VB program in penman formula[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2011, 21(5): 191 – 193. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] ALLEN RG, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1998.
- [16] BLANEY H F, CRIDDLE W D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data[C]//US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1950, 48.
- [17] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55.
- [18] ROHWER C. Evaporation from free water surfaces[M]. Washington: US Department of Agriculture, 1931.
- [19] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Estimating potential evapotranspiration[J]. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1982, 108(3): 225 – 230.
- [20] DOORENBOS J. Crop water requirements[J]. *Fao Irrigation & Drainage Paper Rome*, 1977, 24: 322 – 334.
- [21] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. *Monthly Weather Review*, 1972, 100(2): 81 – 92.
- [22] XU S Q, YU Z B, YANG C G, et al. Trends in evapotranspiration and their responses to climate change and vegetation greening over the upper reaches of the Yellow River Basin[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 263: 118 – 129.
- [23] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(5): 579 – 588. [ LIU Changming, ZHANG Dan. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 579 – 588. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 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.
- [25] GAO F, FENG G, OUYANG Y, et al. Evaluation of reference evapotranspiration methods in arid, semiarid, and humid regions[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2017, 53(4): 791 – 808.
- [26] 刘勤, 严昌荣, 赵彩霞, 等. 黄河流域日潜在蒸散量变化及气象敏感要素分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(17): 157 – 166. [ LIU Qin, YAN Changrong, ZHAO Caixia, et al. Changes of daily potential evapotranspiration and analysis of its sensitivity coefficients to key climatic variables in Yellow River Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(17): 157 – 166. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] XU C Y, SINGH V P. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(2): 305 – 319.
- [28] 黄彩霞, 赵德明, 王保福. 甘肃中东部半干旱区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(6): 41 – 47. [ HUANG Caixia, ZHAO Deming, WANG Baofu. A comparative study on calculation methods of reference crop evapotranspiration in the semi-arid region of Central Eastern Gansu[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(6): 41 – 47. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 张若琳