

根据Hargreaves-Samani模型估算博州参考作物蒸散量

姜 鹏

阿拉山口市气象局, 新疆 博州

收稿日期: 2025年8月25日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年9月28日

摘 要

参考作物蒸散量既同时在水分循环和能量循环中扮演重要角色, 又在区域干湿状况评价、作物需水量估算和水资源合理规划等实用领域中决策的发挥重要作用的关键因子, 不仅为了解博州参考作物蒸散量的时空分布特征, 同时也为了评价Hargreaves-Samani模型估算参考作物蒸散量的精度, 本研究使用了博州2016年至2024年4个国家气象站的日最高最低温度、平均温度、相对湿度、日照时数、10 m高风速等数据, 分析了博州地区温度和相对湿度的时间变化以及参考作物蒸散量的时空变化, 对Hargreaves-Samani模型的估计精度进行了评价, 评价标准为Penman-Monteith模型得到的参考作物蒸散量, 得出以下结论: (1) 对由采取了适用全球范围的 k_{RS} 系数的HS方法得到的2016~2024年博州的参考作物蒸散量数据进行分析, 发现博州参考作物蒸散量均呈现上升趋势。(2) 根据2016~2024博州年均参考作物蒸散量空间分布图分析, 阿拉山口与精河成为蒸散量高中心, 分别为历年平均3.834 mm/day和3.896 mm/day, 温泉成为低值中心, 为2.913 mm/day, 博乐则为3.199 mm/day。推测是由于其特殊的地理环境以及辐射情况所致。(3) 对HS方法的两种结果和PM的结果进行比较, 对于选取了两个不同的 k_{RS} 系数的HS方法的逐年参考作物蒸散量变化趋势和PM法的基本一致, 但HS提出的全球普适方程得到的 k_{RS} 与P. Paredes等人提出的根据气候类型划分的 k_{RS} 存在差异。其结果证明在气候偏向干旱的博州, 经过气候修正的HS法更加准确。

关键词

HS方法, 参考作物蒸散量, 博尔塔拉, 时间变化, 空间分布

Estimation of Reference Crop Evapotranspiration in Bozhou Based on Hargreaves-Samani Model

Peng Jiang

Alashankou Meteorological Bureau, Bozhou Xinjiang

Abstract

Reference crop evapotranspiration not only plays an important role in water cycle and energy cycle, but also plays an important role in decision-making in practical fields such as regional dry and wet condition evaluation, crop water demand estimation and rational water resources planning. In order to understand the temporal and spatial distribution characteristics of reference crop evapotranspiration in Bozhou, but also to evaluate the accuracy of Hargreaves-Samani model in estimating reference crop evapotranspiration, this study used the daily maximum and minimum temperature, average temperature, relative humidity, sunshine hours, 10 m high wind speed and other data from four national weather stations in Bozhou from 2016 to 2024 to analyze the temporal and spatial changes of temperature and relative humidity and reference crop evapotranspiration in Bozhou. The estimation accuracy of Hargreaves-Samani model is evaluated, and the evaluation standard is Penman-Monteith. The results are as follows: (1) By analyzing the reference crop evapotranspiration data of Bozhou from 2016 to 2024 obtained by HS method with k_{RS} coefficient applicable to the world, it is found that the reference crop evapotranspiration of Bozhou shows an upward trend. (2) According to the analysis of the spatial distribution map of annual reference crop evapotranspiration in Bozhou from 2016 to 2024, Alashankou and Jinghe have become high evapotranspiration centers, with an average of 3.834 mm/day and 3.896 mm/day over the years, respectively. Hot springs have become low value centers, with an average of 2.913 mm/day, and bole is 3.199 mm/day. It is speculated that it is due to its special geographical environment and radiation conditions. (3) Comparing the two results of HS method with that of PM method, the annual reference crop evapotranspiration variation trend of HS method with two different k_{RS} coefficients is basically the same as that of PM method, but the k_{RS} obtained from the global universal equation proposed by HS is different from the k_{RS} divided according to the climate type proposed by P. Paredes *et al.* The results show that the HS method with climate modification is more accurate in Bozhou, where the climate is prone to drought.

Keywords

HS Method, Reference Crop Evapotranspiration, Bortala, Temporal Variation, Spatial Distribution

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

研究目的及意义

博州拥有大规模的各类农业, 种类丰富多样。目前, 农业已然成为博州经济发展的一大支柱。然而, 2019 年至今, 气候变化带来了更加艰巨的挑战。经博州气象台预测, 2023 年 6~8 月降水将持续偏少, 温度持续偏高。这样的局面对农业用水的规划提出了更高的要求。目前, 博州用水的大部分都是农业用水, 更准确地评估农作物需水量并以此为依据指导灌溉用水就显得尤为重要。

参考作物蒸散量(Reference Evapotranspiration)是假想条件下固定作物类型的蒸发蒸腾量, 在能量平衡和水分循环过程中占有重要位置, 同时也在区域干湿状况评估, 作物需水量估算, 水资源合理规划等作业中扮演重要参考指标的角色[1]。

其变化规律主要受到气温, 相对湿度, 风速和太阳辐射等 4 个因子的影响。而发生变化; 土壤水分随时间呈周期性变化; 大气水汽含量与地面降水量存在着一定关系。

在众多计算参考植物蒸散量的方法中, 由国际农粮组织提倡使用的 Penman-Monteith 公式是得到普遍承认的标准方法。该公式适用于绝大部分地区, 在不同气候、地形、纬度环境下均与实际观测高度符合[2]。

但其计算方法复杂, 且需要输入最高和最低气温(T_{max} 和 T_{min})、太阳辐射、空气湿度和风速等多种数据, 且未得到较为准确的结果需要长时间的连续数据。在以上气象要素中, 太阳辐射、风速以及空气湿度三项在大部分气象站和地区中无法免费获取, 即便获取到相关数据其质量参差不齐难有保证。与之相对的, 最高最低气温是大多数气象站的观测项目, 其质量高数据全, 也能免费获得。因此本文考虑使用基于温度的温度法中的 Hargreaves-Samani 模型。与 Penman-Monteith 公式相比, Hargreaves-Samani 模型具有输入参数少且估算准确度高的优势, 计算方式也更为简便, 适用于数据缺失条件下参考作物蒸散量的估算[3]。因此本文拟采用 Hargreaves-Samani 模型来估算新疆的参考作物蒸散量。

2. 资料与方法

2.1. 资料数据

本研究选取博州四座国家站逐日最低气温, 最高气温, 平均气温, 相对湿度, 日照时数, 10 米高风速和降水量等资料, 统计各气象站点逐日参考植物蒸发量, 进而得到月度、季度和年度参考作物蒸散量。

2.2. 研究方法

2.2.1. Penman-Monteith 公式计算参考植物蒸发量(ET_0)

大量研究表明联合国粮农组织(FAO)在 1998 年修正的 Penman-Monteith 法是目前计算参考作物蒸散量 ET_0 最为精确和最常用的估算方法[1], 其计算公式如下:

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

其中, Δ 为饱和水汽压曲线的斜率, R_n 是作物表面净辐射(mm/day), G 为土壤热通量(MJ/m² day), T_{mean} 是 2 m 处的平均气温(°C), u_2 为 2m 高处的平均风速(m/s), e_s 为饱和水汽压(kPa), e_a 为实际水汽压(kPa), γ 为湿度计常数(kPa/°C)。

湿度计常数 γ :

$$\gamma = \frac{C_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} = 0.0065 \times 10^{-3} P \quad (2)$$

上式, P 为大气压(kPa), λ 为汽化潜热($\lambda = 2.45$ MJ/kg), C_p 为常压下比热($C_p = 1.013 \times 10^{-3}$ MJ·kg⁻¹·°C⁻¹), ε 为水蒸气分子量与干空气分子量之比($\varepsilon = 0.662$)。

平均饱和水汽压 e_s 和空气温度为 T 时的饱和水汽压计算如下:

$$e^0(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right] \quad (3)$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \quad (4)$$

上式, T_{\max} 是最高气温($^{\circ}\text{C}$), T_{\min} 是最低气温($^{\circ}\text{C}$)。

饱和水汽压斜率 Δ :

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \right]}{(T+237.3)^2} \quad (5)$$

实际水汽压 e_a :

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{\frac{50}{e_s(T_{\max})} + \frac{50}{e_s(T_{\min})}} \quad (6)$$

太阳赤纬 δ :

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad (7)$$

上式, J 为日序。

日出日落时角 ω_s :

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (8)$$

理论日照时数 N :

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (9)$$

日地相对距离 d_r :

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (10)$$

太阳天文辐射 R_a :

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{SC} d_r \left[\omega_s \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) \right] \quad (11)$$

上式, G_{SC} 为太阳常数($0.0820 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)。

总辐射 R_S :

$$R_S = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (12)$$

短波辐射 R_{ns} :

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_S \quad (13)$$

上式, α 为反射率(以草为假想参考物 $\alpha = 0.23$)。

天总辐射 R_{so} :

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (14)$$

上式, z 为测站海拔高程(m)。

净长波辐射 R_{nl} :

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max, K}^4 + T_{\min, K}^4}{2} \right] \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left[1.35 \frac{R_S}{R_{so}} - 0.35 \right] \quad (15)$$

上式, 斯蒂芬玻尔兹曼常数 $\sigma = 4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, $T_{\max, K}$ 为 24 h 内最高开式气温(K), $T_{\min, K}$ 为 24 h 内最低开式气温(K)。

净辐射 R_n :

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (16)$$

地表 10 m 高度处风速(u_{10} , m/s)需转化为 2 m 处风速 u_2 :

$$u_2 = u_{10} \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)} \quad (17)$$

2.2.2. Hargreaves-Samani 模型计算参考植物蒸发量

由于 Penman-Monteith 公式计算参考植物蒸发量使用时限制较多, 其计算方法相对复杂且需要大量气象数据输入, 同时这些气象数据中也包含大量难以获得的数据集。当缺少部分气象数据时, 可以使用只需求温度数据的相对更加简单的 Hargreaves-Samani 公式代替。

Hargreaves-Samani 公式:

$$ET_{0-HS} = 0.0135 k_{Rs} \frac{R_a}{\lambda} (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} (T_{mean} + 17.8) \quad (18)$$

其中, λ 是蒸散过程中的潜热($2.45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), k_{Rs} 是辐射调整经验系数($^{\circ}\text{C}^{-0.5}$), R_a 是天文辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

公式(1)通常也用 HS 系数: $C_{HS} = 0.0135 k_{Rs} / \lambda$, 写为:

$$ET_{0-HS} = C_{HS} (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} R_a (T_{mean} + 17.8) \quad (19)$$

辐射调整经验系数 k_{Rs} 采取了两种算法[4], Gao 等研究[5] [6]表明, 多数情况下温度法的应用需要校正, 但 Hargreaves 不需要校正且该方法在全球范围内的表现良好, 其中一种适合大多数地区:

$$k_{Rs} = 0.3023 - 0.0049TD_{avg} + 0.0151u_{2,avg} - 0.0017RH_{avg} \quad (20)$$

许多学者仍然致力于修正其相关系数的工作上, 以便找到在不同气候环境下适用性更强的 HS 公式 [7] [8]。

可以根据干旱指数(AI)分为四种气候类型, 根据不同的气候类型选择不同的 k_{Rs} 算法:

a. 潮湿气候 ($AI \geq 1.00$)

$$k_{Rs} = 0.3695 - 0.0066TD_{avg} + 0.0127u_{2,avg} - 0.0024RH_{avg} \quad (21)$$

b. 半湿润气候 ($0.50 \leq AI < 1.00$)

$$k_{Rs} = 0.3396 - 0.0059TD_{avg} + 0.0125u_{2,avg} - 0.0020RH_{avg} \quad (22)$$

c. 半干旱气候 ($0.20 \leq AI < 0.50$)

$$k_{Rs} = 0.2962 - 0.0049TD_{avg} + 0.0117u_{2,avg} - 0.0014RH_{avg} \quad (23)$$

d. 干旱和超干旱气候 ($AI < 0.20$)

$$k_{Rs} = 0.2073 - 0.0023TD_{avg} + 0.0224u_{2,avg} - 0.0009RH_{avg} \quad (24)$$

2.2.3. 数据分析

(1) 数据处理, 对收集到的原始多年逐日气象要素数据进行整理, 利用 Excel 和 python 计算逐日、逐年气象要素, 再根据这些气象要素计算逐日、逐年参考植物蒸散量并绘图分析其变化趋势, 再利用 ArcGIS 进行空间插值, 得到新疆参考作物蒸散量分布图, 分析参考作物蒸散量的时空分布特征。

(2) 对于之前的通过不同方法得到的参考作物蒸散量, 在 matlab 中选取回归系数(b), 决定系数(R^2),

均方根误差(RMSE), 相对均方根误差(RRMSE), 模型模拟效率(EF), 一致性指数(d_{IA})作为评价指标, 公式如下:

$$b = \frac{\sum (ET_{0-HS} \cdot ET_{0-PM})}{\sum ET_{0-PM}^2} \quad (25)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum [(ET_{0-HS} - ET_{0-HS_{mean}}) \cdot (ET_{0-PM} - ET_{0-PM_{mean}})]}{\sqrt{\sum (ET_{0-HS} - ET_{0-HS_{mean}})^2} \cdot \sqrt{\sum (ET_{0-PM} - ET_{0-PM_{mean}})^2}} \right\}^2 \quad (26)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (ET_{0-HS} - ET_{0-PM})^2} \quad (27)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{ET_{0-PM_{mean}}} \quad (28)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum (ET_{0-HS} - ET_{0-PM})^2}{\sum (ET_{0-PM} - ET_{0-PM_{mean}})^2} \quad (29)$$

$$d_{IA} = 1 - \frac{\sum (ET_{0-HS} - ET_{0-PM})^2}{\sum (|ET_{0-HS} - ET_{0-PM_{mean}}| + |ET_{0-PM} - ET_{0-PM_{mean}}|)^2} \quad (30)$$

式中, ET_{0-HS} 为 HS 方法计算的参考植物蒸发量, $ET_{0-HS_{mean}}$ 为 ET_{0-HS} 的平均值, ET_{0-PM} 为 PM 方法计算的参考植物蒸发量, $ET_{0-PM_{mean}}$ 为 ET_{0-PM} 的平均值(单位均为 mm/day)。

3. 结果与分析

3.1. 博州温度与相对湿度分布特征

分析博州 2016~2024 年均日平均温度与相对湿度变化趋势(见图 1、图 2), 可见: 博州整体温度呈上升趋势, 相对湿度呈下降趋势。

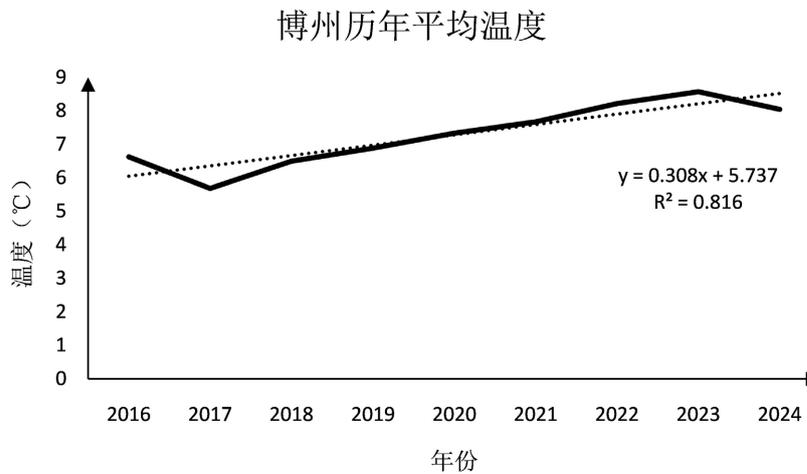


Figure 1. Average temperature over the years in Bozhou
图 1. 博州历年平均温度

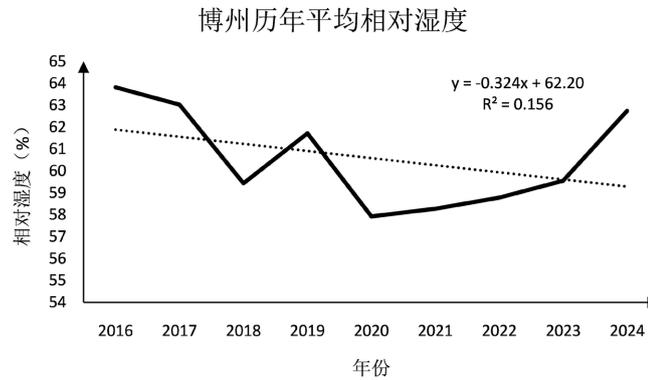


Figure 2. Average relative humidity over the years in Bozhou
图 2. 博州历年平均相对湿度

3.2. 博州参考作物蒸散量时空分布特征

3.2.1. 博州年均参考作物蒸散量变化趋势

分析博州 2016~2024 年均参考作物蒸散量变化趋势(图 3~6), 可见: 阿拉山口参考作物蒸散量呈上升趋势, 使用通用 k_{RS} 计算的参考作物蒸散量在 3.51~4.90 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.83 mm/day, 使用干旱 k_{RS} 计算的参考作物蒸散量在 3.32~4.84 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.79 mm/day, 最大值出现在 2021 年, 最小值出现在 2016 年; 温泉参考作物蒸散量呈上升趋势, 使用通用 k_{RS} 计算的参考作物蒸散量在 2.70~3.04 mm/day 内波动变化, 平均值为 2.91 mm/day, 使用干旱 k_{RS} 计算的参考作物蒸散量在 2.85~3.19 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.06 mm/day, 最大值出现在 2021 年, 最小值出现在 2016 年; 精河参考作物蒸散量呈上升趋势, 使用通用 k_{RS} 计算的参考作物蒸散量在 3.77~4.11 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.90 mm/day, 使用干旱 k_{RS} 计算的参考作物蒸散量在 3.76~4.22 mm/day 内波动变化, 平均值为 4.02 mm/day, 最大值出现在 2022 年, 最小值出现在 2021 年; 博乐参考作物蒸散量呈上升趋势, 使用通用 k_{RS} 计算的参考作物蒸散量在 2.36~3.31 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.20 mm/day, 使用干旱 k_{RS} 计算的参考作物蒸散量在 2.80~3.38 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.21 mm/day, 最大值出现在 2020 年, 最小值出现在 2017 年。

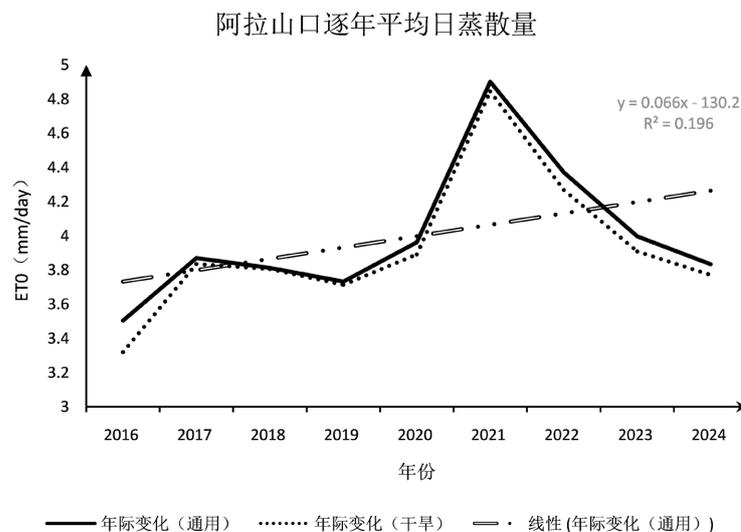


Figure 3. Annual average daily evapotranspiration of Alashankou
图 3. 阿拉山口逐年平均日蒸散量

温泉逐年平均日蒸散量

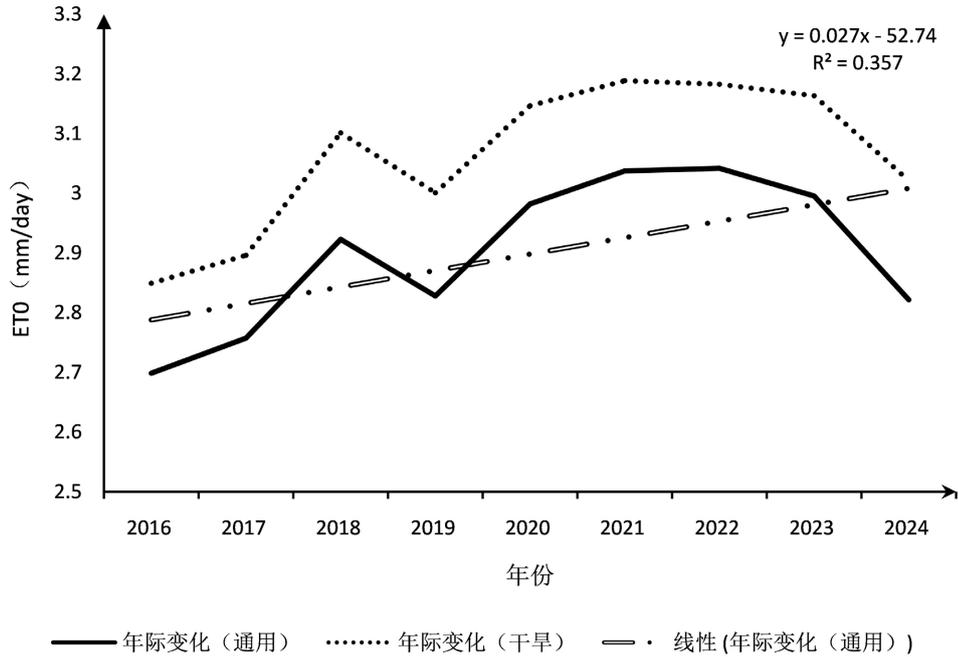


Figure 4. Annual average daily evapotranspiration of Wenquan
图 4. 温泉逐年平均日蒸散量

精河逐年平均日蒸散量

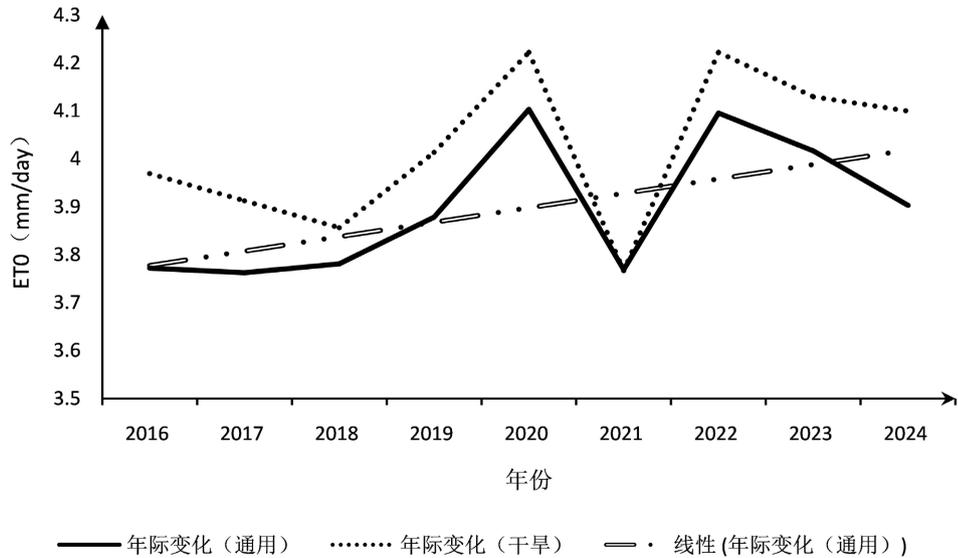


Figure 5. Annual average daily evapotranspiration of Jinghe
图 5. 精河逐年平均日蒸散量

分析博州 2016~2024 多年月平均参考作物蒸散量变化趋势(图 7), 可见: 博州四站均呈现近似钟形曲线的变化趋势, 最大值出现在 7~9 月, 最小值出现在 12、1、2 月, 仅在数值高低上有所区别; 其中精河、阿拉山口显著高于博乐, 温泉最小。

博乐逐年平均日蒸散量

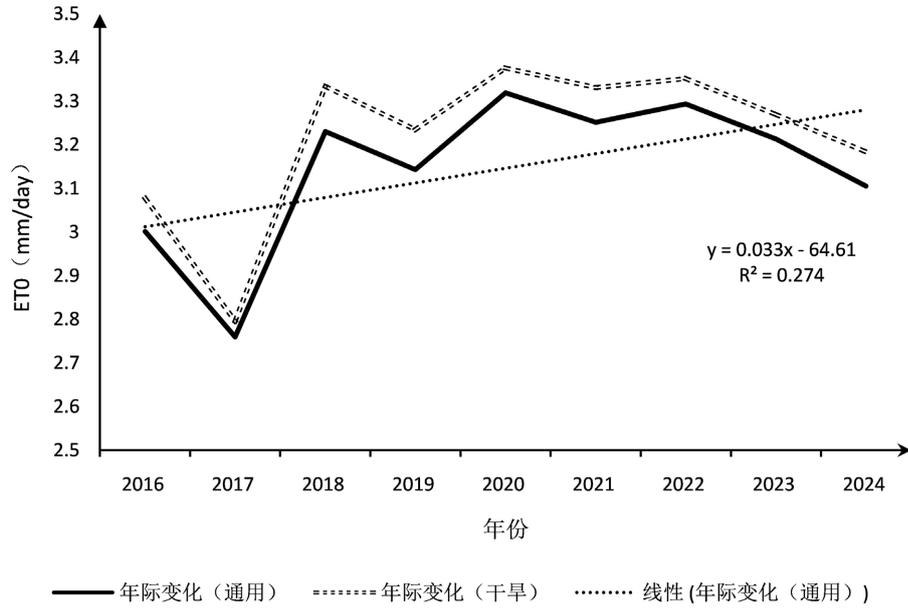


Figure 6. Annual average daily evapotranspiration of Bole
图 6. 博乐逐年平均日蒸散量

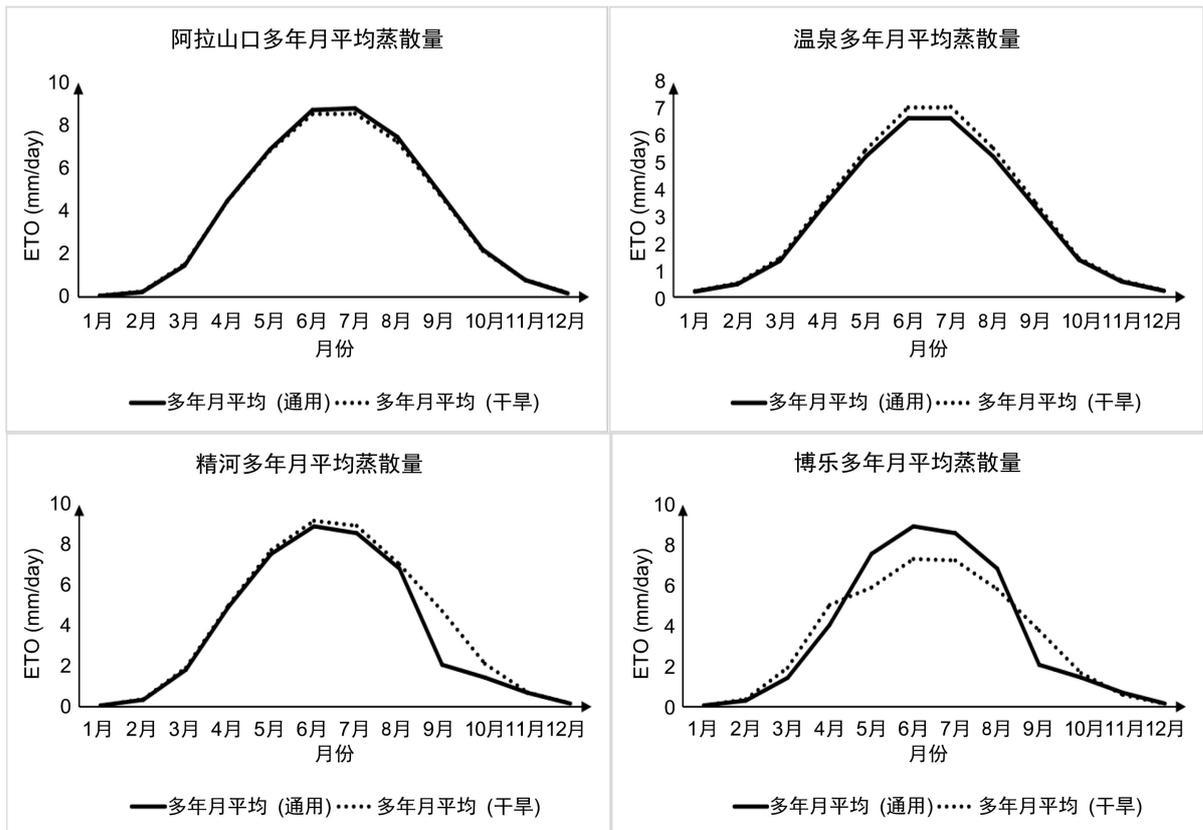


Figure 7. Multi year variation of monthly average evapotranspiration in Bozhou
图 7. 博州四站多年月平均蒸散量

3.2.2. 博州参考作物蒸散量的空间分布

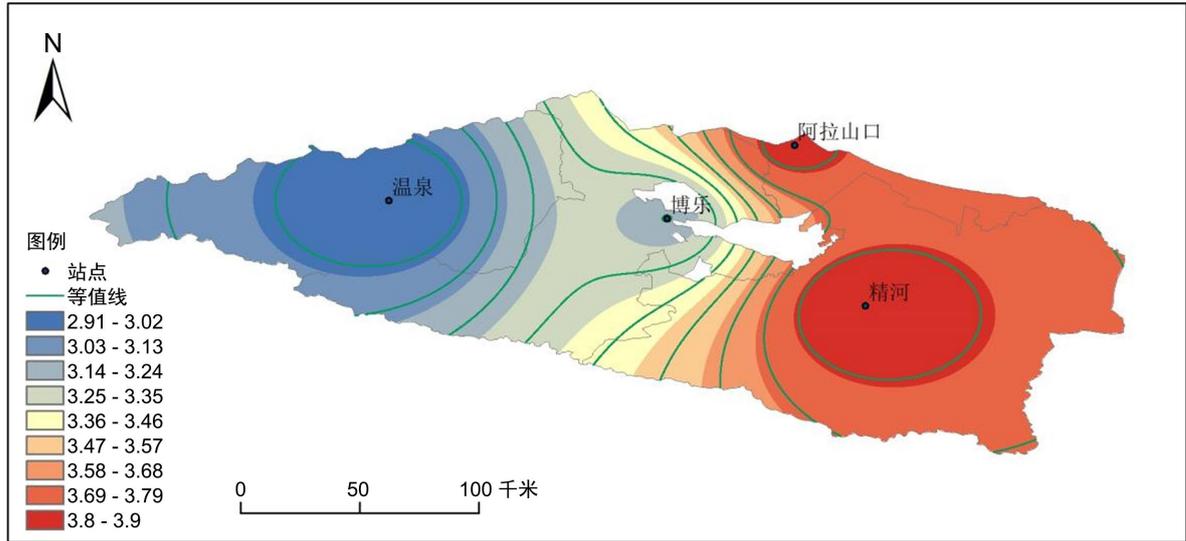


Figure 8. Distribution map of annual evapotranspiration in Bozhou
图 8. 博州四站年均蒸散量分布图

基于博州 2016~2024 年均参考作物蒸散量, 利用 ArcGIS 空间插值, 绘制参考作物蒸散量空间分布图 (图 8)。分析下图可知, 阿拉山口与精河成为蒸散量高中心, 分别为历年平均 3.834 mm/day 和 3.896 mm/day, 温泉成为低值中心, 为 2.913 mm/day, 博乐则为 3.199 mm/day。

3.3. 评估 HS 模型估算新疆参考作物蒸散量的精确度

3.3.1. 辐射调整经验系数 k_{Rs} 的计算

本文选取博州 4 个气象站点的干旱指数(AI)均为干旱与极度干旱, 所以选取公式(20)和公式(24)作为 HS 公式中辐射调整经验系数 k_{Rs} 的计算方法, 其中不区分气候区的 k_{Rs} 计算如下:

$$k_{Rs} = 0.3023 - 0.0049TD_{avg} + 0.0151u_{2avg} - 0.0017RH_{avg} \quad (20)$$

根据干旱指数(AI)分气候区计算时 k_{Rs1} 如下:

$$k_{Rs1} = 0.2073 - 0.0023TD_{avg} + 0.0224u_{2avg} - 0.0009RH_{avg} \quad (24)$$

从表 1 可以看出, 博州 k_{Rs} 和 k_{Rs1} 的差距的差异较大, 其中温泉差异率在 5% 以上, 而其他三地均在 5% 以内。

Table 1. k_{Rs} and k_{Rs1} in each station

表 1. 不同站点的 k_{Rs} 和 k_{Rs1} 值

站点	差异率	k_{Rs}	k_{Rs1}
博乐	2.339973%	0.181435827	0.185783103
温泉	5.268048%	0.196134675	0.207041734
精河	3.207469%	0.209720283	0.216669904
阿拉山口	0.108680%	0.224464535	0.224220851

3.3.2. HS 法与 PM 法计算结果比较

Table 2. Error statistics between HS method and PM method
表 2. HS 法和 PM 法的误差统计

选取系数与地区	b	R^2	EF	d_{IA}	RRMSE	RMSE1 (mm/day)
博乐 k_{RS}	0.963	0.892	0.895	0.956	0.298	0.805
温泉 k_{RS}	0.951	0.907	0.916	0.915	0.245	0.788
精河 k_{RS}	0.923	0.910	0.906	0.995	0.234	0.716
阿拉山口 k_{RS}	0.976	0.889	0.965	0.936	0.301	0.823
博乐 k_{RS1}	0.934	0.892	0.889	0.983	0.267	0.770
温泉 k_{RS1}	0.949	0.908	0.964	0.917	0.275	0.703
精河 k_{RS1}	0.896	0.911	0.917	0.904	0.339	0.620
阿拉山口 k_{RS1}	0.908	0.887	0.946	0.976	0.258	0.883

对 HS 方法的两种结果和 PM 的结果进行比较, PM 法得到的逐年参考作物蒸散量数据与采用了两种方法得到 k_{RS} 的 HS 方程的结果差异不大, 但 HS 提出的全球普适方程得到的 k_{RS} 与 P. Paredes 等人提出的根据气候类型划分的 k_{RS} 差异很大。对 HS 法和 PM 法得到的参考作物蒸散量进行了回归分析, 主要参考指标如下: 回归系数(b)、确定系数(R^2)、模型模拟效率(EF)和一致性指数(d_{IA})、均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(RRMSE)。结果显示, 在两种 HS 方法得到的结果中, 采用了全球公式法测定 k_{RS} 的方法的回归系数(b)略高于 k_{RS1} 法, 两种方法的确定系数(R^2)相同, 表明采用两种 k_{RS} 计算的参考作物蒸散量偏差不大; k_{RS} 和 k_{RS1} 模型的模拟效率(EF)均接近 1, 这说明两种模型的预测效率都较为准确, 这也印证了 HS 方法全球公式在干旱条件下的准确性; 一致性指数(d_{IA})两者相近, 普遍为 0.95 以上, 证明全球适用的 HS 模型和经过气候校正的 HS 模型均有模拟效率高且一致性好的特征; RRMSE 都位于 0.2~0.3 之间, 属于正常区间, 说明不论是否经过气候校正, HS 方法分模拟效率都是合理的; 均方根误差是选取了 k_{RS1} 的更小一些, 说明尽管差距不大, 但在新疆经过了气候校正的 HS 模型会更加精准。以上结果证明在气候偏向干旱的中国西北部, 虽然两种 HS 方法得出的结果差距较小(见表 2), 但经过气候修正的 HS 法更加准确。

3.3.3. HS 法与 PM 法计算结果比较

对 HS 方法的两种结果和 PM 的结果进行比较, PM 法得到的逐年参考作物蒸散量数据与采用了两种方法得到 k_{RS} 的 HS 方程的结果差异不大, 但 HS 提出的全球普适方程得到的 k_{RS} 与 P. Paredes 等人提出的根据气候类型划分的 k_{RS} 差异很大。对 HS 法和 PM 法得到的参考作物蒸散量进行了回归分析, 主要参考指标如下: 回归系数(b)、确定系数(R^2)、模型模拟效率(EF)和一致性指数(d_{IA})、均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(RRMSE)。结果显示, 在两种 HS 方法得到的结果中, 采用了全球公式法测定 k_{RS} 的方法的回归系数(b)略高于 k_{RS1} 法, 两种方法的确定系数(R^2)相同, 表明采用两种 k_{RS} 计算的参考作物蒸散量偏差不大; k_{RS} 和 k_{RS1} 模型的模拟效率(EF)均接近 1, 这说明两种模型的预测效率都较为准确, 这也印证了 HS 方法全球公式在干旱条件下的准确性; 一致性指数(d_{IA})两者相近, 普遍为 0.95 以上, 证明全球适用的 HS 模型和经过气候校正的 HS 模型均有模拟效率高且一致性好的特征; RRMSE 都位于 0.2~0.3 之间, 属于正常区间, 说明不论是否经过气候校正, HS 方法分模拟效率都是合理的; 均方根误差是选取了 k_{RS1} 的更小一些, 说明尽管差距不大, 但在新疆经过了气候校正的 HS 模型会更加精准。以上结果证明在气候偏向干旱的中国西北部, 虽然两种 HS 方法得出的结果差距较小(见表 3), 但经过气候修正的 HS 法更加准确。

Table 3. Error statistics between HS method and PM method
表 3. HS 法和 PM 法的误差统计

选取系数与地区	b	R^2	EF	d_{IA}	RRMSE	RMSE1 (mm/day)
博乐 k_{RS}	0.963	0.892	0.895	0.956	0.298	0.805
温泉 k_{RS}	0.951	0.907	0.916	0.915	0.245	0.788
精河 k_{RS}	0.923	0.910	0.906	0.995	0.234	0.716
阿拉山口 k_{RS}	0.976	0.889	0.965	0.936	0.301	0.823
博乐 k_{RS1}	0.934	0.892	0.889	0.983	0.267	0.770
温泉 k_{RS1}	0.949	0.908	0.964	0.917	0.275	0.703
精河 k_{RS1}	0.896	0.911	0.917	0.904	0.339	0.620
阿拉山口 k_{RS1}	0.908	0.887	0.946	0.976	0.258	0.883

4. 结论

(1) 对由采取了适用全球范围的 k_{RS} 系数的 HS 方法得到的 2016~2024 年博州的参考作物蒸散量数据进行分析, 结果如下: 阿拉山口参考作物蒸散量呈上升趋势, 使用通用计算的参考作物蒸散量在 3.51~4.90 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.83 mm/day, 使用干旱计算的参考作物蒸散量在 3.32~4.84 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.79 mm/day, 最大值出现在 2021 年, 最小值出现在 2016 年; 温泉参考作物蒸散量呈上升趋势, 使用通用计算的参考作物蒸散量在 2.70~3.04 mm/day 内波动变化, 平均值为 2.91 mm/day, 使用干旱计算的参考作物蒸散量在 2.85~3.19 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.06 mm/day, 最大值出现在 2021 年, 最小值出现在 2016 年; 精河参考作物蒸散量呈上升趋势, 使用通用计算的参考作物蒸散量在 3.77~4.11 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.90 mm/day, 使用干旱计算的参考作物蒸散量在 3.76~4.22 mm/day 内波动变化, 平均值为 4.02 mm/day, 最大值出现在 2022 年, 最小值出现在 2021 年; 博乐参考作物蒸散量呈上升趋势, 使用通用计算的参考作物蒸散量在 2.36~3.31 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.20 mm/day, 使用干旱计算的参考作物蒸散量在 2.80~3.38 mm/day 内波动变化, 平均值为 3.21 mm/day, 最大值出现在 2020 年, 最小值出现在 2017 年。

(2) 根据 2016~2024 博州年均参考作物蒸散量空间分布图分析, 阿拉山口与精河成为蒸散量高中心, 分别为历年平均 3.834 mm/day 和 3.896 mm/day, 温泉成为低值中心, 为 2.913 mm/day, 博乐则为 3.199 mm/day。推测是由于其特殊的地理环境以及辐射情况所致。

(3) 对 HS 方法的两种结果和 PM 的结果进行比较, 对于选取了两个不同的 k_{RS} 系数的 HS 方法的逐年参考作物蒸散量变化趋势和 PM 法的基本一致, 但 HS 提出的全球普适方程得到的 k_{RS} 与 P. Paredes 等人提出的根据气候类型划分的 k_{RS} 存在差异。在回归分析中, 将回归系数(b)、确定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、相对均方根误差(RRMSE)、模型模拟效率(EF)和一致性指数(d_{IA})等项目作为评价标准, 对 HS 法和 PM 法的两种结果进行了回归分析。其结果证明在气候偏向干旱的博州, 经过气候修正的 HS 法更加准确。

参考文献

- [1] Paredes, P., Pereira, L.S., Almorox, J. and Darouich, H. (2020) Reference Grass Evapotranspiration with Reduced Data Sets: Parameterization of the FAO Penman-Monteith Temperature Approach and the Hargeaves-Samani Equation Using Local Climatic Variables. *Agricultural Water Management*, **240**, Article ID: 106210. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106210>

-
- [2] 刘倩, 张方敏, 李威鹏, 杨雷刚, 景元书. 基于温度的参考作物蒸散量计算方法的适用性评价[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(2): 19-26.
- [3] Paredes, P. and Pereira, L.S. (2019) Computing FAO56 Reference Grass Evapotranspiration Pm-Eto from Temperature with Focus on Solar Radiation. *Agricultural Water Management*, **215**, 86-102.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.014>
- [4] Monteith, J.L. (1965) *Evaporation and Environment. The Stage and Movement of Water in Living Organisms*. The Company of Biologists.
- [5] Gao, Y., Long, D. and Li, Z. (2008) Estimation of Daily Actual Evapotranspiration from Remotely Sensed Data under Complex Terrain over the Upper Chao River Basin in North China. *International Journal of Remote Sensing*, **29**, 3295-3315. <https://doi.org/10.1080/01431160701469073>
- [6] Jensen, D.T., Hargreaves, G.H., Temesgen, B. and Allen, R.G. (1997) Computation of Eto under Nonideal Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **123**, 394-400.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(1997\)123:5\(394\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(1997)123:5(394))
- [7] 王声锋, 段爱旺, 张展羽. 半干旱地区不同水文年 Hargreaves 和 P-M 公式的对比分析[J]. 农业工程学报, 2008(7): 29-33.
- [8] 汪彪, 曾新民, 黄旭, 等. 参考作物蒸散量计算方法的比较[C]//中国气象学会年会. 南京, 2013: 593-600.