

# 基于辐射和温度的 $ET_0$ 模型在吐鲁番地区的比较与修正

范留飞<sup>1,2</sup>, 皮原月<sup>1,2</sup>, 于洋<sup>1,2</sup>, 于瑞德<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011;2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049)

**摘要:**利用吐鲁番地区3个气象站2000—2015年逐日气象资料,以FAO-56 Penman-Monteith(FAO-56 PM)模型为标准,对6种 $ET_0$ 模型(M-A模型、P-T模型、M-H模型、H-S模型、Traj模型和B-H模型)进行评价并修正,采用均方根误差(RMSE)、绝对平均误差(MAE)、平均相对误差(MRE)评价指标和Wilcoxon非参数检验法比较年、月尺度上各模型修正前后的估算精度,以筛选适用吐鲁番地区 $ET_0$ 简化估算模型。结果表明:吐鲁番地区 $ET_0$ 的主要影响因素是 $R_s$ (太阳辐射),其次是 $e_s$ (饱和水汽压)和 $R_n$ (作物表面净辐射);修正前,年尺度上,M-H模型的估算精度最高;月尺度上,各模型误差较大且与FAO-56 PM模型存在显著差异,适用性较差;修正后,各模型在年、月尺度上的精度均有明显提高,无显著差异,其中修正后的P-T、M-H和B-H模型估算精度最高,可作为吐鲁番地区 $ET_0$ 简化估算模型。

**关键词:**  $ET_0$ 估算模型;精度评价;修正;温度;辐射;吐鲁番地区

**中图分类号:** S165 **文献标志码:** A

## Comparison and modification of $ET_0$ models based on radiation and temperature in Turpan region

FAN Liufei<sup>1,2</sup>, PI Yuanyue<sup>1,2</sup>, YU Yang<sup>1,2</sup>, YU Ruide<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** By using the daily climatic data of three meteorological stations from 2000 to 2015 in Turpan region, and taking FAO-56 Penman-Monteith (FAO-56 PM) model as the standard model, six  $ET_0$  models (M-A model, P-T model, M-H model, H-S model, Traj model, and B-H model) were evaluated and modified. The estimation accuracy were analyzed with root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), mean relative error (MRE), and non-parametric Wilcoxon test at yearly and monthly scales, respectively. The purpose was to find a simple and accurate  $ET_0$  model in Turpan region. The results indicated that the main meteorological factor affecting  $ET_0$  was  $R_s$  (solar radiation) in Turpan region, followed by  $e_s$  (saturated water pressure) and  $R_n$  (crop surface net radiation). Before the modification, the M-H model had the highest estimation accuracy on the yearly scale. On the monthly scale, the errors of all models were large and there were significant differences with the calculation results of the FAO-56 PM model, and the applicability was poor in Turpan region. After the modification, the accuracy of each model on the yearly and monthly scales was significantly improved, and there was no significant difference with the FAO-56 PM model. The modified P-T, M-H, and B-H models had the highest estimation accuracy and can be used as simple and accurate  $ET_0$  models in Turpan region.

**Keywords:**  $ET_0$  estimation model; accuracy evaluation; modification; temperature; radiation; Turpan region

蒸散发是土壤-植被-大气连续体中地表水分通过蒸发和蒸腾向大气传输的同步过程<sup>[1]</sup>,是地表

水量平衡和能量平衡的重要组成部分<sup>[2]</sup>。参考作物蒸散发量( $ET_0$ )是指设定水分充足参考地表面的

蒸散发量,表示特定区域和时间大气的蒸发能力,不考虑作物特性、土壤等因素,只考虑气象因素的影响。1998年联合国粮农组织(FAO)定义 $ET_0$ 是:高度为0.12 m,冠层表面阻力为 $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,反射率为0.23,近似于地表开阔,高度一致,生长旺盛,水分充足且完全遮盖地面的绿草的蒸散发量<sup>[3]</sup>。准确估算 $ET_0$ 对于估算作物需水量、合理配置水资源、调整农田灌溉制度、预报作物产量和发展生态节水农业具有重要意义<sup>[4-7]</sup>。

目前 $ET_0$ 估算模型约有50种<sup>[8]</sup>,大致划分为辐射法、温度法、综合法和蒸发皿法<sup>[9-10]</sup>。国内外应用最广泛的是FAO-56 PM模型,该模型基于能量平衡和空气动力学原理,综合考虑了影响蒸散发量的各种气象因子,但很多地区的气象站不能完整获得其需要的气象资料,从而影响其推广与应用,因此需要较少气象因子的 $ET_0$ 简化模型逐渐得到应用。模型的经验系数是在特定地区和气候背景条件下提出的,估算精度存在区域局限性,在适用地区外使用时不进行修正可能会产生较大误差<sup>[11]</sup>。近年来,国内外对 $ET_0$ 模型修正已有研究,如Xu等<sup>[12]</sup>评价并修正了5种 $ET_0$ 模型在瑞士的适用性,指出修正后的P-T、M-A和H-S模型精度得到了提高;王声锋等<sup>[13]</sup>研究表明修正后的H-S模型可作为新乡市 $ET_0$ 简化模型;赵璐等<sup>[14]</sup>对川中丘陵地区4种 $ET_0$ 模型进行评价,发现改进后的Irmak-Allen模型的精度得到了明显提高;吴立峰等<sup>[15]</sup>评价了气象资料缺失情况下P-M模型的8种情况和4种 $ET_0$ 模型在西北地区的适用性,并对其参数进行修正,认为修正后的M-A和H-S模型是该地区适宜的 $ET_0$ 简化模型;Li Meng<sup>[16]</sup>研究指出修正后的H-S、M-A和P-T模型的精度均有较大提高,在淮河流域的适用性很好。

吐鲁番地区位于我国西北极端干旱区,蒸发量大,绿洲农业灌溉用水量、利用效率不高,水资源配置不合理,供需矛盾突出,生态环境脆弱,近年来气候变化导致该地区水循环、生态环境等方面发生了显著变化<sup>[17]</sup>,水资源短缺已成为影响该地区农业发展、生态平衡和制约国民经济持续稳定发展的关键因素<sup>[18]</sup>,找到一种 $ET_0$ 简化估算模型对于估算作物需水量,开发作物生产潜力和发展高效节水农业具有重要意义。目前国内 $ET_0$ 模型的适用性评价和修正研究很少考虑研究区不同月份的气候差异<sup>[19]</sup>,且 $ET_0$ 简化模型在极端干旱的吐鲁番地区研究较少,具有重要的研究价值,鉴于此,本文采用M-A、H-S、P-T、Traj、M-H和B-H模型分别从年、月尺度

上估算 $ET_0$ ,以FAO-56 PM模型为标准评价其适用性,并逐月修正其原始经验系数,从而获得适宜吐鲁番地区的 $ET_0$ 简化估算方法,以期对吐鲁番地区作物需水量估算、生态用水安全保障、水资源优化配置和生态环境改善提供科学有效的指导,为其他干旱地区 $ET_0$ 估算研究提供参考。

## 1 研究背景

### 1.1 研究区域

吐鲁番地区( $87^{\circ}16'—91^{\circ}55'E, 41^{\circ}12'—43^{\circ}40'N$ )位于新疆天山东部博格达峰南坡的山间盆地,是连接新疆—中亚地区与南北疆的重要通道,属于典型大陆性暖温带干旱沙漠气候,由于西部和北部山地的阻挡,盆地地势低凹,辐射强,地表增温快,形成了日照充足、气温高、降水稀少、昼夜温差大、多大风、蒸发量大的气候特点<sup>[20-21]</sup>。年均温为 $13.9^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为16 mm,年蒸发量为3 000 mm,年日照时间约3 000 h,无霜期210 d左右<sup>[22]</sup>。土种为白硝土,土壤类型为棕漠土和灌耕土<sup>[23]</sup>。

### 1.2 数据来源

本研究选用吐鲁番地区库米什站( $88^{\circ}13'E, 42^{\circ}14'N$ )、吐鲁番站( $89^{\circ}12'E, 42^{\circ}56'N$ )和鄯善站( $90^{\circ}14'E, 42^{\circ}51'N$ )2000—2015年逐日气象资料,包括最高气温、最低气温、平均气温、平均相对湿度、日照时数和2 m高度处风速(由10 m高度处风速换算)等。

## 2 研究方法

### 2.1 灵敏度分析

灵敏度是模型中某一因子的取值发生微小变化时,使模型的输出结果发生数值变化的大小程度<sup>[14,24-25]</sup>。模型对某一因子的灵敏度表示为:

$$S_{x_i} = \frac{ET_0(1.1x_i) - ET_0(0.9x_i)}{ET_0(x_i)} \quad (1)$$

式中, $x_i$ 为模型中第*i*个因子; $S_{x_i}$ 的绝对值越大,表明 $ET_0$ 对 $x_i$ 越敏感。

### 2.2 $ET_0$ 估算模型

2.2.1 FAO-56 PM模型 FAO-56 PM模型综合考虑了太阳辐射、气温引起的辐射项和风速、相对湿度等引起的空气动力学项参数<sup>[3]</sup>,理论基础清晰,估算精度较高,1998年被FAO推荐作为估算 $ET_0$ 的标准方法。公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T_{\text{mean}} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

式中,  $ET_0$  为参考作物蒸散发量 ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $R_n$  为作物表面净辐射 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $G$  为土壤热通量 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 当估算步长为日尺度时,  $G$  相对于  $R_n$  较小, 忽略不计;  $\gamma$  为干湿表常数 ( $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$ );  $T_{\text{mean}}$  为平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $U_2$  为 2 m 高度处风速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $e_s$ 、 $e_a$  分别为饱和水汽压和实际水汽压 ( $\text{kPa}$ );  $\Delta$  为饱和水汽压 - 温度曲线斜率 ( $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$ )。模型所需各参数的估算方法详见参考文献<sup>[3]</sup>。

**2.2.2 M-A 模型** M-A 模型在 Penman 模型基础上忽略了空气动力学项, 用太阳辐射代替净辐射, 可以看成是一种简化的 P-T 模型。公式如下:

$$ET_0 = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (3)$$

式中,  $R_s$  为太阳辐射 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 原始经验系数  $K = 0.61$ , 其余参数同上。

**2.2.3 P-T 模型** P-T 模型是假设周围环境湿润, 忽略了空气动力学项得出的简化的 Penman 模型, 因所需参数较少而被广泛应用<sup>[26]</sup>。公式如下:

$$ET_0 = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left( \frac{R_n - G}{\lambda} \right) \quad (4)$$

式中, 原始经验系数  $K = 1.26$ , 参数同上。

**2.2.4 M-H 模型**

$$ET_0 = 0.7 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_s}{\lambda} \quad (5)$$

式中, 原始经验系数  $K = 0.7$ , 参数同上。

**2.2.5 H-S 模型** H-S 模型以温度和太阳辐射为基础, 只需要日最高气温、最低气温和大气顶层辐射资料, 在气象资料缺乏地区被广泛使用<sup>[27]</sup>。公式如下:

$$ET_0 = 0.0023 R_{\text{aequ}} (T_{\text{mean}} + 17.8) (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5} \quad (6)$$

式中,  $R_{\text{aequ}}$  蒸发量表示的大气顶层辐射 ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $T_{\text{max}}$  为最高气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\text{min}}$  为最低气温 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 原始经验系数  $K = 0.0023$ 。

**2.2.6 Traj 模型**

$$ET_0 = 0.0023 R_{\text{aequ}} (T_{\text{mean}} + 17.8) (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.424} \quad (7)$$

式中, 原始经验系数  $K = 0.0023$ , 参数同上。

**2.2.7 B-H 模型**

$$ET_0 = 0.00193 R_{\text{aequ}} (T_{\text{mean}} + 17.8) \Delta (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.517} \quad (8)$$

式中, 原始经验系数  $K = 0.00193$ , 参数同上。

**2.3 模型精度评价方法**

采用均方根误差 ( $RMSE$ )、平均绝对误差

( $MAE$ )<sup>[28]</sup> 和平均相对误差 ( $MRE$ ) 来评价各模型的估算精度, 并通过 Wilcoxon 非参数检验法检验各模型与 FAO-56 PM 模型估算结果是否有显著差异<sup>[13,17]</sup>。Wilcoxon 方法中  $P$  值大于 (小于) 0.05, 表明与 FAO-56 PM 模型无 (有) 显著差异。 $RMSE$ 、 $MAE$  和  $MRE$  值越接近 0, 与 FAO-56 PM 模型无显著差异, 模型估算精度越高。吐鲁番地区冬季温度较低, 模型利用原始经验系数时个别估算结果会出现负值, 在累加日值估算月值和年值时需要剔除负值。

**2.4 模型修正方法**

$ET_0$  模型的经验系数是在特定的地区和气候条件下提出的, 在适用地区外不进行修正直接使用可能会产生较大误差。因此, 考虑到吐鲁番地区不同月份的气候差异影响, 以各模型估算的逐月  $ET_0$  日值为自变量, 对应月份 FAO-56 PM 模型的估算结果为因变量, 建立逐月线性回归方程, 修正各模型的原始经验系数, 提高其估算精度。

## 3 结果与分析

### 3.1 灵敏度分析

为了量化分析各气象因子对标准  $ET_0$  的影响, 利用 FAO-56 PM 模型估算结果分别对各气象因子进行灵敏度分析, 并估算出多年平均值, 结果见表 1。

表 1  $ET_0$  与各气象因子间的灵敏度

Table 1 Sensitivity between  $ET_0$  and various meteorological factors

$R_n$	$T_{\text{mean}}$	$U_2$	$RH_{\text{mean}}$	$R_s$	$T_{\text{max}}$	$T_{\text{min}}$	$\Delta$	$e_s$	$e_a$
0.117	0.066	0.058	-0.092	0.234	0.035	-0.010	0.013	0.188	-0.066

注:  $R_n$  为作物表面净辐射;  $T_{\text{mean}}$  为平均气温;  $U_2$  为 2 m 高处风速;  $RH_{\text{mean}}$  为平均相对湿度;  $R_s$  为太阳辐射;  $T_{\text{max}}$  为最高气温;  $T_{\text{min}}$  为最低气温;  $\Delta$  为饱和水汽压 - 温度曲线斜率;  $e_s$  为饱和水汽压;  $e_a$  为实际水汽压。

Note:  $R_n$  is net radiation at the crop surface;  $T_{\text{mean}}$  is mean air temperature;  $U_2$  is wind speed at 2 m;  $RH_{\text{mean}}$  is average relative humidity;  $R_s$  is solar radiation;  $T_{\text{max}}$  is max air temperature;  $T_{\text{min}}$  is min air temperature;  $\Delta$  is slope of saturation vapor pressure curve;  $e_s$  is saturation vapor pressure;  $e_a$  is actual vapor pressure.

气象因子中  $RH_{\text{mean}}$ 、 $T_{\text{min}}$  和  $e_a$  的灵敏度为负, 表明标准  $ET_0$  与  $RH_{\text{mean}}$ 、 $T_{\text{min}}$  和  $e_a$  呈负相关关系, 与其他气象因子呈正相关关系 (表 1)。  $R_s$  的灵敏度最大 (0.234), 其次是  $e_s$  和  $R_n$ ,  $T_{\text{min}}$  的灵敏度最小 (-0.010)。不考虑正负关系, 各气象因子的灵敏度排序为:  $R_s > e_s > R_n > RH_{\text{mean}} > e_a > T_{\text{mean}} > U_2 > T_{\text{max}} > \Delta > T_{\text{min}}$ 。因此, 可认为吐鲁番地区标准  $ET_0$  的主要影响



因子是  $R_s$ , 其次是  $e_s$  和  $R_n$ 。

### 3.2 不同模型 $ET_0$ 结果比较

3.2.1  $ET_0$  年值 FAO-56 PM 模型估算的多年平均  $ET_0$  为 1 099.13 mm, 其余 6 种模型估算结果介于 904.53~1 309.56 mm 之间。利用原始经验系数的各模型估算的历年  $ET_0$  与 FAO-56 PM 模型估算结果存在明显差异(图 1), H-S 和 B-H 模型明显偏大, P-T 和 M-A 模型明显偏小; Traj 模型在 2000—2004 年与 FAO-56 PM 模型最为接近, 其余年份表现出略微低估现象; M-H 模型估算结果偏差相对较小, 在 2005—2008 年和 2010—2015 年表现出低估现象, 其余年份表现出高估现象。温度法中 Traj 和 B-H 模型是 H-S 模型的 2 种修正模型, 其年际变化趋势一致; 辐射法中 M-A 和 M-H 模型是简化的 P-T 模型, 其年际变化趋势也基本一致; 各温度法、辐射法模型与 FAO-56 PM 模型年际变化趋势除个别年份外基本一致。

各  $ET_0$  模型的经验系数存在一定的区域局限性, 未考虑吐鲁番地区的气候特点。H-S 模型的经验系数(0.0023)是 1985 年在加利福尼亚 Davis 地区估算苇状羊茅草蒸散发时提出的; Traj 和 B-H 模型的经验系数(0.0023、0.00193)是修正 H-S 模型而得到的; P-T 模型的经验系数(1.26)是利用海面 and 湿润陆面资料得到的, 反映的是平流的作用<sup>[29-30]</sup>; M-A 模型是在荷兰提出的, 经验系数(0.61)主要取决于  $R_n/R_s$ , 随季节而变化<sup>[31]</sup>。

与 FAO-56 PM 模型估算的  $ET_0$  年值相比, H-S 模型的 RMSE、MAE 和 MRE 最大, 分别为 212.24、210.43  $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$  和 19.15%。M-H 模型的 RMSE、MAE 和 MRE 最小, 分别为 37.92、34.82  $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$  和 3.17%(表 2)。M-H 模型 Wilcoxon 法中  $P$  值大于 0.05, 与 FAO-56 PM 模型估算结果无显著差异, 其

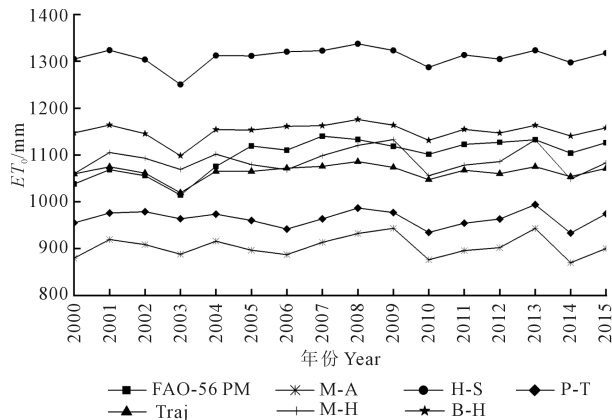


图 1 不同模型计算的  $ET_0$  年值比较

Fig.1 Comparison of estimated yearly  $ET_0$  by different models

余模型  $P$  值均小于 0.05, 存在显著差异, 不能代替其在吐鲁番地区使用。综上所述, 利用原始经验系数估算年  $ET_0$  时, M-H 模型在吐鲁番地区的估算精度最高。

3.2.2  $ET_0$  月值 利用原始经验系数的各模型估算的多年平均逐月  $ET_0$ (图 2) 在年内呈单峰型变化趋势, 峰值出现在 7 月, 谷值出现在 12、1 月。各模型估算的逐月  $ET_0$  与 FAO-56 PM 模型估算结果存在不同程度的差异, H-S 模型在 1—12 月偏大, P-T 模型在 1—12 月偏小, B-H 模型在 1 月、3—4 月偏小, M-A 模型在 3—9 月偏小, 其余月份偏大。所有模型在作物生长季(4—9 月)与 FAO-56 PM 模型估算结果的差异较大, 其余月份差异较小, 原因是冬春季节吐鲁番地区温度低, 太阳辐射量少, 蒸散发量较小。

与 FAO-56 PM 模型估算的  $ET_0$  月值相比, 就 MRE 而言, M-A 模型在 1 月、3—9 月和 11—12 月大于 10%, 且存在显著差异(表 3); H-S 模型除 3 月外其余月份均大于 10%, 且存在显著差异; P-T 模型

表 2 不同模型  $ET_0$  年值估算效果评价

Table 2 The evaluation of yearly  $ET_0$  simulated effects by different models

模型 Model	RMSE /( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	MAE /( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	MRE/%	Wilcoxon $P$
M-A	197.79	194.60	17.70	0.000
P-T	140.26	134.74	12.26	0.000
M-H	37.92	34.82	3.17	0.148
H-S	212.24	210.43	19.15	0.000
Traj	45.25	39.79	3.62	0.003
B-H	59.16	52.03	4.73	0.000

注: Wilcoxon 方法中  $P > 0.05$ , 表明无显著差异;  $P < 0.05$ , 表明存在显著差异。

Note: If  $P > 0.05$ , indicates no significant difference; If  $P < 0.05$ , indicates significant difference.

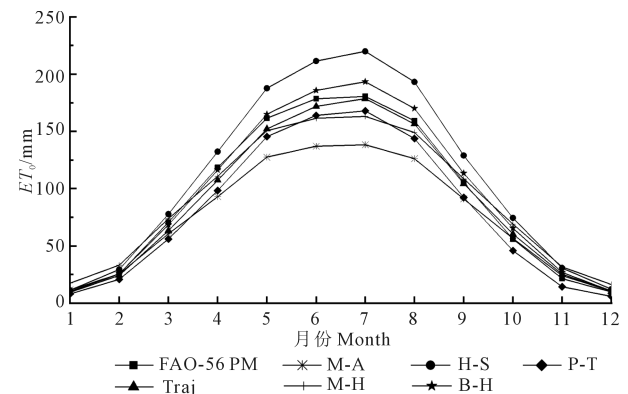


图 2 不同模型计算的  $ET_0$  月值比较

Fig.2 Comparison of estimated monthly  $ET_0$  by different models

在6—8月小于10%,其余月份大于10%,且存在显著差异;M-H模型在1—2月和10—12月大于10%,且存在显著差异;Traj模型各月误差相对较小,除9月外其余月份存在显著差异;B-H模型在2月和4月MRE最小,且不存在显著差异,适用性较好。就RMSE和MAE而言,几乎所有模型在作物生长季(4—9月)误差相对较大。年内较多月份Wilcoxon  $P$  小于0.05,各模型与FAO-56 PM模型估算结果普遍存在显著差异,适用性较差,均不能代替FAO-56 PM模型在吐鲁番地区使用。

### 3.3 模型原始经验系数的修正

利用原始经验系数的各模型估算  $ET_0$  年值时,除M-H模型外其余模型误差较大,且与FAO-56

PM模型估算结果存在显著差异。估算  $ET_0$  月值时,几乎所有模型在作物生长季(4—9月)估算误差较大,且存在显著差异,适用性较差。

选取的各模型对气象资料要求相对较低,因此气象资料相对缺乏地区也能估算  $ET_0$ ,但经验系数具有区域局限性,在其他地区使用时需要修正。因此,为提高各模型在吐鲁番地区的适用性,以各模型估算的逐月  $ET_0$  日值为自变量,对应月份FAO-56 PM模型估算结果为因变量,进行线性回归分析,建立逐月修正的经验系数( $K$ )。各模型回归方程斜率和修正的逐月经验系数见表4。M-A、H-S、P-T、Traj、M-H和B-H模型的原始经验系数分别为0.61、0.0023、1.26、0.0023、0.7和0.00193。

表3 不同模型  $ET_0$  月值估算效果评价

Table 3 The evaluation of monthly  $ET_0$  simulated effects by different models

月份 Month	模型 Model	RMSE/ (mm·mon <sup>-1</sup> )	MAE/ (mm·mon <sup>-1</sup> )	MRE /%	Wilcoxon $P$	月份 Month	模型 Model	RMSE/ (mm·mon <sup>-1</sup> )	MAE/ (mm·mon <sup>-1</sup> )	MRE /%	Wilcoxon $P$
1	M-A	1.44	1.24	12.16	0.000	7	M-A	42.59	42.29	23.41	0.000
	P-T	2.27	2.25	22.01	0.000		P-T	13.87	12.79	7.08	0.000
	M-H	7.24	7.16	70.03	0.000		M-H	18.59	17.61	9.75	0.000
	H-S	1.22	1.05	10.24	0.000		H-S	39.67	39.28	21.75	0.000
	Traj	0.94	0.83	8.10	0.000		Traj	4.60	3.78	2.09	0.028
	B-H	0.63	0.54	5.24	0.001		B-H	13.64	12.69	7.03	0.000
2	M-A	2.14	1.79	7.01	0.733	8	M-A	33.54	33.06	20.76	0.000
	P-T	5.22	4.77	18.70	0.000		P-T	16.01	15.44	9.69	0.000
	M-H	7.87	7.69	30.12	0.000		M-H	11.64	10.18	6.40	0.000
	H-S	4.00	3.85	15.07	0.000		H-S	34.51	34.08	21.40	0.000
	Traj	1.98	1.38	5.39	0.000		Traj	4.54	3.44	2.16	0.001
	B-H	1.23	0.99	3.87	0.172		B-H	11.69	10.84	6.81	0.000
3	M-A	11.46	10.10	14.28	0.000	9	M-A	15.77	14.52	13.75	0.000
	P-T	15.07	14.65	20.72	0.000		P-T	13.64	13.27	12.57	0.000
	M-H	5.50	4.65	6.58	0.001		M-H	6.06	5.03	4.76	0.007
	H-S	8.33	7.05	9.97	0.000		H-S	23.74	23.36	22.13	0.000
	Traj	7.92	7.34	10.38	0.000		Traj	4.02	3.19	3.02	0.165
	B-H	4.09	3.28	4.63	0.002		B-H	8.77	7.91	7.50	0.000
4	M-A	26.12	25.45	21.48	0.000	10	M-A	3.94	3.43	6.12	0.433
	P-T	20.58	20.13	16.99	0.000		P-T	10.35	10.08	18.01	0.000
	M-H	9.54	7.92	6.69	0.000		M-H	13.42	13.14	23.49	0.000
	H-S	15.69	14.02	11.83	0.000		H-S	18.75	18.48	33.02	0.000
	Traj	12.03	11.11	9.38	0.000		Traj	5.20	4.68	8.37	0.000
	B-H	6.22	4.96	4.18	0.090		B-H	9.82	9.49	16.97	0.000
5	M-A	34.37	34.03	21.06	0.000	11	M-A	2.98	2.63	12.32	0.000
	P-T	16.73	16.16	10.00	0.000		P-T	7.28	7.06	33.02	0.000
	M-H	12.09	10.94	6.77	0.000		M-H	10.49	10.31	48.22	0.000
	H-S	27.17	26.12	16.16	0.000		H-S	9.61	9.23	43.18	0.000
	Traj	10.63	9.68	5.99	0.000		Traj	4.13	3.89	18.21	0.000
	B-H	7.09	5.81	3.60	0.003		B-H	5.73	5.43	25.42	0.000
6	M-A	41.80	41.48	23.23	0.000	12	M-A	1.40	1.11	11.35	0.009
	P-T	15.68	14.58	8.17	0.000		P-T	4.09	3.90	39.82	0.000
	M-H	18.10	17.13	9.59	0.000		M-H	6.63	6.46	65.84	0.000
	H-S	33.46	32.90	18.43	0.000		H-S	2.88	2.35	23.99	0.000
	Traj	8.45	6.88	3.86	0.000		Traj	1.22	1.02	10.44	0.060
	B-H	9.22	7.90	4.42	0.000		B-H	1.54	1.21	12.31	0.070

表 4 各模型回归方程斜率和修正的逐月经验系数

Table 4 Slope of linear regression equation and monthly empirical coefficient of models after modified

月份 Month	M-A		H-S		P-T		Traj		M-H		B-H	
	斜率 Slope	K	斜率 Slope	K	斜率 Slope	K	斜率 Slope	K	斜率 Slope	K	斜率 Slope	K
1	0.89	0.54	0.90	0.0021	1.27	1.60	1.08	0.0025	0.59	0.41	1.03	0.00200
2	1.01	0.62	0.88	0.0020	1.24	1.56	1.06	0.0024	0.78	0.55	1.00	0.00193
3	1.17	0.71	0.91	0.0021	1.26	1.58	1.11	0.0026	0.96	0.67	1.03	0.00199
4	1.27	0.78	0.89	0.0020	1.20	1.51	1.10	0.0025	1.07	0.75	1.01	0.00196
5	1.27	0.77	0.86	0.0020	1.11	1.40	1.06	0.0024	1.07	0.75	0.98	0.00189
6	1.30	0.79	0.84	0.0019	1.09	1.37	1.04	0.0024	1.10	0.77	0.96	0.00185
7	1.30	0.79	0.82	0.0019	1.07	1.35	1.01	0.0023	1.11	0.77	0.93	0.00180
8	1.26	0.77	0.82	0.0019	1.11	1.39	1.02	0.0023	1.07	0.75	0.94	0.00181
9	1.16	0.71	0.82	0.0019	1.14	1.44	1.01	0.0023	0.97	0.68	0.93	0.00180
10	1.00	0.61	0.76	0.0017	1.21	1.53	0.93	0.0021	0.82	0.57	0.86	0.00166
11	0.89	0.54	0.70	0.0016	1.47	1.85	0.85	0.0020	0.68	0.48	0.80	0.00154
12	0.92	0.56	0.79	0.0018	1.67	2.10	0.94	0.0022	0.60	0.42	0.90	0.00174

3.4 不同模型修正后  $ET_0$  结果比较

3.4.1  $ET_0$  年值 修正经验系数后各模型与 FAO-56 PM 模型估算的历年  $ET_0$  的差异较修正前明显减小 (图 3), 修正后 H-S、P-T 和 Traj 模型在 2000—2004 年略微高估, 其余年份略微低估; 修正后 M-A 模型在 2000—2004 年和 2008—2009 年略微高估, 其余年份略微低估; 修正后 M-H 模型在 2000—2004 年和 2009 年略微高估, 其余年份略微低估; 修正后 B-H 模型在 2000—2004 年和 2007 年略微高估, 其余年份略微低估。各模型修正后的年际变化趋势和修正前基本一致, 无明显变化。

修正经验系数后 M-A、H-S 和 P-T 模型的误差减小程度最明显 (表 5)。修正后 P-T 模型的 RMSE、MAE 和 MRE 最大, 分别为每年 38.81、34.97 mm 和 3.18%; 修正后 B-H 模型的 RMSE、MAE 和 MRE 最小, 分别为每年 27.38、23.65 mm 和 2.15%。Wilcoxon P 值均大于 0.05, 说明修正后各模型的估算结果不存在显著差异。修正后各模型估算精度排序如下: B-H 模型 > H-S 模型 > M-H 模型 > M-A 模型 > Traj 模型 > P-T 模型。综上所述, 各模型修正后估算的  $ET_0$  年值与 FAO-56 PM 模型误差较小, 在吐鲁番地区适用性均较好。

3.4.2  $ET_0$  月值 修正经验系数后各模型估算的月  $ET_0$  峰值出现在 6、7 月, 谷值出现在 12 月, 与修正前基本一致 (图 4)。修正经验系数后各模型与 FAO-56 PM 模型估算结果比较接近, 修正后 M-A 模型在 2—5 月和 8—10 月略微高估, 其余月份略微低估; 修正后 H-S 模型在 4 月、6 月和 10—12 月略微低估, 其余月份略微高估; 修正后 Traj 模型在 2 月、4—5 月和 7—10 月略微低估, 其余月份略微高估; 修正后 B-H 模型在 2 月、5 月和 7—11 月略微高估, 其余月份略微低估。

修正经验系数后各模型估算的  $ET_0$  月值的误差明显减小且普遍不存在显著差异 (表 6)。修正后 M-

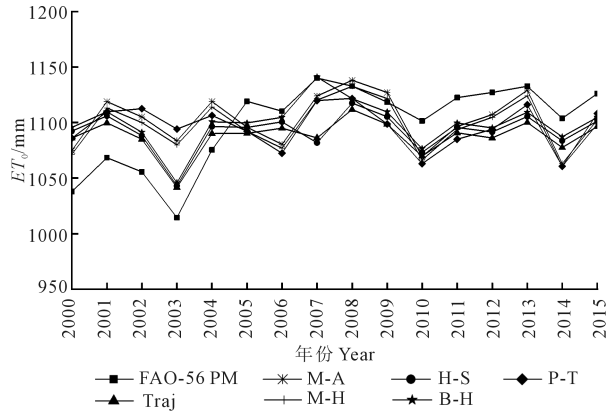


图 3 不同模型计算的  $ET_0$  年值比较 (修正后)

Fig.3 Comparison of estimated yearly  $ET_0$  by different models (after modified)

表 5 不同模型  $ET_0$  年值估算效果评价 (修正后)

Table 5 The evaluation of yearly  $ET_0$  simulated effects by different models (after modified)

模型 Model	RMSE /(mm · a <sup>-1</sup> )	MAE /(mm · a <sup>-1</sup> )	MRE/%	Wilcoxon P
M-A	34.63	29.94	2.72	0.756
P-T	38.81	34.97	3.18	0.836
M-H	33.90	29.75	2.71	0.959
H-S	31.33	28.58	2.60	0.569
Traj	31.86	30.15	2.74	0.148
B-H	27.38	23.65	2.15	0.959

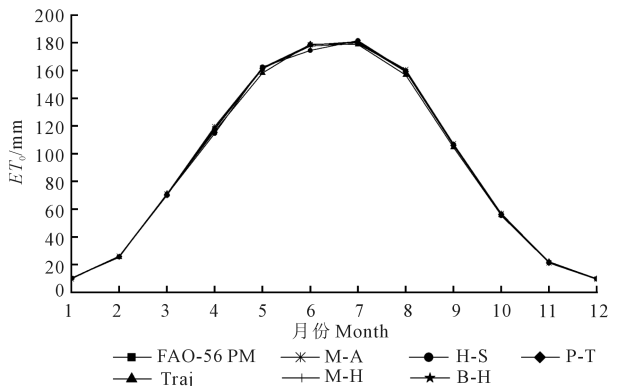


图 4 不同模型的  $ET_0$  月值比较 (修正后)

Fig.4 Comparison of estimated monthly  $ET_0$  by different models (after modified)

表6 不同模型  $ET_0$  月值估算效果评价(修正后)Table 6 The evaluation of monthly  $ET_0$  simulated effects by different models(after modified)

月份 Month	模型 Model	RMSE/ (mm·mon <sup>-1</sup> )	MAE/ (mm·mon <sup>-1</sup> )	MRE /%	Wilcoxon P	月份 Month	模型 Model	RMSE/ (mm·mon <sup>-1</sup> )	MAE/ (mm·mon <sup>-1</sup> )	MRE /%	Wilcoxon P
1	M-A	0.84	0.68	6.50	0.000	7	M-A	7.05	5.57	3.09	0.468
	P-T	0.61	0.51	4.70	0.378		P-T	6.13	5.04	2.79	0.456
	M-H	0.67	0.56	5.51	0.875		M-H	6.93	5.66	3.13	0.189
	H-S	0.53	0.42	3.84	0.769		H-S	5.06	4.20	2.33	0.232
	Traj	0.50	0.41	3.76	0.860		Traj	5.08	3.87	2.14	0.046
	B-H	0.53	0.43	3.96	0.583		B-H	5.14	4.28	2.37	0.695
2	M-A	2.14	1.85	6.56	0.187	8	M-A	6.53	5.15	5.56	0.299
	P-T	0.96	0.80	2.83	0.246		P-T	5.41	4.60	4.92	0.531
	M-H	2.65	2.40	8.49	0.387		M-H	6.34	4.97	5.10	0.481
	H-S	1.24	0.96	3.40	0.439		H-S	4.23	3.28	2.72	0.710
	Traj	1.31	0.94	3.31	0.964		Traj	4.93	3.90	2.90	0.001
	B-H	1.23	0.99	3.49	0.172		B-H	4.13	3.20	2.79	0.456
3	M-A	4.18	3.54	5.02	0.481	9	M-A	4.92	4.29	3.92	0.221
	P-T	2.92	2.48	3.52	0.531		P-T	3.27	2.59	2.37	0.943
	M-H	4.44	3.68	5.23	1.000		M-H	4.99	4.26	3.89	0.910
	H-S	3.50	2.85	4.04	0.922		H-S	3.56	3.15	2.87	0.206
	Traj	3.33	2.67	3.79	0.389		Traj	3.74	3.17	2.89	0.057
	B-H	3.51	2.79	3.97	0.493		B-H	3.60	3.21	2.93	0.393
4	M-A	6.12	5.26	4.31	0.165	10	M-A	3.90	3.36	5.97	0.505
	P-T	5.73	4.46	3.65	0.453		P-T	2.22	1.77	3.14	0.557
	M-H	5.85	4.82	3.95	0.441		M-H	4.44	3.84	6.83	0.845
	H-S	6.74	5.40	4.42	0.004		H-S	3.41	2.70	4.79	0.224
	Traj	5.77	4.66	3.81	0.009		Traj	3.41	2.80	4.97	0.318
	B-H	6.00	4.86	3.98	0.813		B-H	3.22	2.71	4.81	0.164
5	M-A	5.69	4.29	2.66	0.224	11	M-A	1.49	1.21	5.46	0.206
	P-T	5.23	4.33	2.68	0.544		P-T	1.59	1.25	5.64	0.572
	M-H	5.47	4.06	2.52	0.652		M-H	1.70	1.44	6.48	0.079
	H-S	5.92	4.79	2.97	0.147		H-S	1.25	0.96	4.31	0.877
	Traj	5.97	4.46	2.76	0.009		Traj	1.37	1.16	5.23	0.005
	B-H	5.82	4.62	2.86	0.638		B-H	1.27	1.05	4.71	0.159
6	M-A	5.93	4.59	2.49	0.877	12	M-A	1.11	0.90	9.07	0.014
	P-T	5.83	4.62	2.50	0.943		P-T	1.00	0.80	8.10	0.666
	M-H	5.86	4.43	2.40	0.465		M-H	0.79	0.65	6.62	0.984
	H-S	6.49	4.96	2.69	0.000		H-S	0.99	0.82	8.32	0.068
	Traj	4.99	3.95	2.14	0.36		Traj	0.99	0.85	8.63	0.518
	B-H	5.30	4.05	2.19	0.719		B-H	1.04	0.88	8.91	0.281

A模型7月的RMSE和MAE最大(7.05 mm·mon<sup>-1</sup>和5.57 mm·mon<sup>-1</sup>),12月的MRE最大(9.07%),1月、12月存在显著差异;修正后Traj模型5月的RMSE最大(5.97 mm·mon<sup>-1</sup>),4月的MAE最大(4.66 mm·mon<sup>-1</sup>),12月的MRE最大(8.63%),4—5月、7—8月和11月存在显著差异;修正后P-T、M-H和B-H模型各月均不存在显著差异。综上所述,修正后的P-T、M-H和B-H模型在吐鲁番地区适用性最好。

## 4 讨论

各辐射法和温度法模型考虑的气象因子不同,其估算精度也存在差异。P-T模型考虑了太阳辐射的影响,未考虑相对湿度和风速的影响,只有辐射项因子,没有空气动力学项因子;M-A模型未考

虑土壤热通量、饱和水汽压差、净辐射和日照时数的影响;H-S模型考虑的辐射项是大气顶层辐射,没有考虑大气对太阳辐射吸收的影响,忽略了 $ET_0$ 中的空气动力学项是产生误差的主要原因<sup>[32-33]</sup>。因此,应根据吐鲁番地区实际气象资料对各模型的原始经验系数进行修正,以减小误差,提高其适用性。

$ET_0$ 模型的修正方法有很多种,如回归修正法、最小二乘法<sup>[12]</sup>、洗牌复合形进化算法(SCE-UA)<sup>[33]</sup>、对模型内部参数进行率定<sup>[15,34]</sup>、贝叶斯方法<sup>[35-37]</sup>、误差比例修正法<sup>[38]</sup>和引入敏感性较大的气象因子等<sup>[39-40]</sup>。文中通过回归修正法对各模型经验系数进行修正,只是简单的线性拟合,未考虑深层次模型修正的机理,在进一步的研究中应考虑



结合吐鲁番地区气候资料引入对  $ET_0$  影响较大的气象因子进行修正,以增加各模型的估算精度。

我国西北干旱区属于大陆性气候,空气干燥,降水稀少,蒸发量大,具有很强的相似性<sup>[41]</sup>,因此在吐鲁番地区进行  $ET_0$  研究可为气候相似地区研究作物实际蒸散发量,估算作物需水量,开发作物生产潜力,提升作物产量,调整灌溉制度,合理配置水资源,发展节水农业提供一定的参考。

## 5 结 论

本文以 FAO-56 PM 模型为标准,基于均方根误差、绝对平均误差、平均相对误差和 Wilcoxon 非参数检验法,对 6 种辐射法和温度法模型在吐鲁番地区的适用性进行了评价和修正,取得了以下结论:

(1) 灵敏度分析表明,吐鲁番地区  $ET_0$  的主要影响因子是  $R_s$ , 其次是  $e_s$  和  $R_n$ 。

(2) 综合年、月尺度上  $ET_0$  的评价结果,修正前,与 FAO-56 PM 模型估算结果比较,各模型存在较大误差和显著差异,适用性较差;修正后,各模型误差明显减小且普遍无显著差异,修正后的 P-T、M-H 和 B-H 模型适用性最好,可作为吐鲁番地区  $ET_0$  简化估算模型,用于指导该地区水资源的合理配置、节水农业和生态恢复的发展。

目前国内  $ET_0$  模型的适用性评价和修正研究主要集中在年尺度,很少考虑月尺度上气候的差异,本文利用 6 种辐射法和温度法模型计算吐鲁番地区  $ET_0$  时,综合考虑该地区影响  $ET_0$  的主要气象因子,并结合不同月份的气候特点,根据线性回归修正法逐月修正模型的经验系数,提高各模型的修正效果,从而获得适宜吐鲁番地区的  $ET_0$  简化估算方法。

## 参 考 文 献:

[1] Sentelhas P C, Gillespie T J, Santos E A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(5): 635-644.

[2] 陈曦. 亚洲中部干旱区蒸散发研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2012: 14-36.

[3] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop Evapotranspiration guidelines for computing water requirements* [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nation, 1998.

[4] 王书功, 康尔泗, 金博文, 等. 黑河山区草地蒸散发量估算方法研究 [J]. *冰川冻土*, 2003, 25(5): 558-565.

[5] Kyotaek H, Minha C. Seasonal trends of satellite-based evapotranspiration algorithms over a complex ecosystem in East Asia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 137: 244-263.

[6] 王新华, 郭美华, 徐中民. 分别利用 Hargreaves 和 PM 公式估算西北干旱区  $ET_0$  的比较 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(10): 21-25.

[7] 王晓东, 马晓群, 许莹, 等. 淮河流域参考作物蒸散量变化特征及主要气象因子的贡献分析 [J]. *中国农业气象*, 2013, 34(6): 661-667.

[8] Grismer M E, Orang M, Snyder R. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2002, 128(3): 180-184.

[9] 曹金峰, 李玉中, 刘晓英, 等. 四种参考作物蒸散量综合法的比较 [J]. *中国农业气象*, 2015, 36(4): 428-436.

[10] 徐俊增, 彭世彰, 丁加丽, 等. 基于蒸渗仪实测数据的日参考作物蒸散发量估算方法评价 [J]. *水利学报*, 2010, 41(12): 1497-1505.

[11] Douglas E M. A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373(4): 366-376.

[12] Xu C Y, Singh V P. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland [J]. *Water Resources Management*, 2002, 16(3): 197-219.

[13] 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, 24(7): 29-33.

[14] 赵璐, 梁川, 崔宁博, 等. 不同  $ET_0$  估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.

[15] 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]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 139-151.

[16] Li M, Chu R H, Md. Towfiqul Islam A R, et al. Reference Evapotranspiration variation analysis and its approaches evaluation of 13 empirical models in sub-humid and humid regions: a case study of the Huai River Basin, eastern China [J]. *Water*, 2018, 10(4): 493-515.

[17] 刘宪锋, 潘耀忠, 张锦水, 等. 1960-2011 年西北五省潜在蒸散的时空变化 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2564-2570.

[18] 张山清, 普宗朝, 宋良变, 等. 吐鲁番地区气候变化对参考作物蒸散量的影响 [J]. *中国农业气象*, 2009, 30(4): 532-537.

[19] 秦孟晟, 郝璐, 施婷婷, 等. 淮河流域五种参考作物蒸散量估算方法的比较及改进 [J]. *中国农业气象*, 2016, 37(4): 390-399.

[20] 阿不都克依木·阿布力孜, 地里夏提·买买提, 阿布都沙塔尔·买买提明, 等. 吐鲁番盆地植被盖度变化的自然和人文耦合 [J]. *新疆农业科学*, 2007, 44(5): 667-671.

[21] 麦尔哈巴·麦提尼亚孜. 吐鲁番绿洲生态-生产-生活承载力演变趋势研究 [D]. 新疆: 新疆大学, 2015.

[22] 古丽吉米丽·艾尼, 迪丽努尔·阿吉, 古丽巴哈尔·吾布力. 近 53 年吐鲁番地区气候变化研究分析 [J]. *绵阳师范学院学报*, 2011, 30(8): 109-113.

[23] 新疆维吾尔自治区农业厅. *新疆土种志* [M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993: 116-376.

[24] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 99-103.

[25] 刘绍民, 孙中平, 李小文, 等. 蒸散量测定与估算方法的对比研究 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 161-167.

[26] 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: 81-92.

[27] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature [J]. *Agriculture*, 1985, 1(2): 96-99.

[28] Willmott C J, Matsuura K. Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in assessing average model performance [J]. *Climate Research*, 2005, 30(1): 79-82.



- [29] 谢平,陈晓宏,刘丙军.湛江地区适宜参考作物蒸发蒸腾量估算模型分析[J].农业工程学报,2008,24(5):6-9.
- [30] Tabari H.Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates[J]. Water Resources Management, 2010, 24(10): 2311-2337.
- [31] 赵捷.基于辐射的潜在蒸散发量估算方法在黑河流域的适用性分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(10):107-114.
- [32] Fontenot R L. An evaluation of reference crop evapotranspiration models in Louisiana[D].BatonRouge: Louisiana State University, 2004.
- [33] 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.
- [34] 刘战东.黄淮海地区基于温度的  $ET_0$  估算方法比较及修正[J].节水灌溉,2014,(4):1-6.
- [35] 贾悦,崔宁博,魏新平,等.考虑辐射改进 Hargreaves 模型估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.
- [36] 李晨,崔宁博,魏新平,等.改进 Hargreaves 模型估算川中丘陵区参考作物蒸散量[J].农业工程学报,2015,31(11):19-24.
- [37] 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):129-135.
- [38] 陶新娥,陈华,徐崇育.潜在蒸散发公式 2 种修正方法及其在闽江流域的应用研究[J].亚热带资源与环境学报,2014,9(3):12-19,34.
- [39] 杨永红,张展羽.改进 Hargreaves 方法估算拉萨参考作物蒸发蒸腾量[J].水科学进展,2009,20(5):614-618.
- [40] 王旭明,刘海军,张睿昊.河套灌区参考作物蒸发蒸腾量估算方法研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(3):95-101.
- [41] 秦大河.中国西部环境演变评估(I):中国西部环境特征及其演变[M].北京:科学出版社,2002:83-85.

(上接第 266 页)

2) 从极端干旱发生的空间范围看,1971 年以来,夏玉米生长季干旱发生总次数空间上呈现由南向北逐渐递减的分布特征,但 6 月份的高值区则主要分布在豫中和豫西地区。6 月和 9 月极端干旱发生站次百分比明显高于 7 月和 8 月,且 6、7 月和 9 月的发生站次百分比在 2010s 呈现回升趋势。

3) 尽管极端干旱发生频数年际变化呈现微弱的下降趋势,但无论发生频数还是站次百分比在 2010s 均呈现回升的趋势,而且 6、7 月和 9 月发生干旱的站次百分比仍然较高,这些都应该引起玉米生产上的关注和重视。

#### 参考文献:

- [1] 黄小燕,李耀辉,冯建英,等.中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J].生态学报,2015,35(5):1359-1370.
- [2] 马柱国,华丽娟,任小波.中国近代北方极端干湿事件的演变规律[J].地理学报,2003(S1):69-74.
- [3] 侯威,杨萍,封国林.中国极端干旱事件的年代际变化及其成因[J].物理学报,2008,(6):3932-3940.
- [4] 刘文莉,张明军,王圣杰,等.近 50 年来华北平原极端干旱事件的时空变化特征[J].水土保持通报,2013,33(4):90-95.
- [5] 贺晋云,张明军,王鹏,等.近 50 年西南地区极端干旱气候变化特征[J].地理学报,2011,66(9):1179-1190.
- [6] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis[R]. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [7] 张彬,朱建军,刘华民,等.极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J].植物生态学报,2014,38(9):1008-1018.
- [8] 秦鹏.广东省近 40 多年来极端温度和降水的变化规律分析[D].南京:南京信息工程大学,2006.
- [9] 袁文德,郑江坤,董奎.1962—2012 年西南地区极端降水事件的时空变化特征[J].资源科学,2014,36(4):766-772.
- [10] 刘珂,姜大膀.中国夏季和冬季极端干旱年代际变化及成因分析[J].大气科学,2014,38(2):309-321.
- [11] 余敦先,夏军,杜鸿,等.黄河流域极端干旱的时空演变特征及多变量统计模型研究[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(S1):15-29.
- [12] 李伟光,侯美亭,陈汇林,等.基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究[J].自然灾害学报,2012,21(4):84-90.
- [13] 胡实,莫兴国,林忠辉.未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J].干旱区地理,2015,38(2):239-248.
- [14] Hulme M, Marsh R, Jones P D. Global changes in a humidity index between 1931-60 and 1961-90[J]. Climate Research. 1992, 2: 1-22.
- [15] 郭佳香,王景才,周建康.基于 SPI 和 HI 的淮河流域气象干旱特征分析[J].人民珠江,2017,38(10):33-38.
- [16] 王兴梅,张勃,张凯,等.石羊河流域极端干旱事件的时空变化特征[J].地理科学进展,2011,30(3):299-305.
- [17] 李喜平.河南省夏玉米生长季水分供需时空变化特征[J].干旱气象,2013,31(4):796-802.
- [18] 田宏伟,李树岩.河南省夏玉米干旱综合风险精细化区划[J].干旱气象,2016,34(5):852-859.
- [19] 刘小雪.河南省夏玉米干旱灾损评估与减损措施研究[D].南京:南京信息工程大学,2014.
- [20] 吴利华,彭汐,马月伟,等.1951—2016 年昆明极端气温和降水事件的变化特征[J].豫南大学学报(自然科学版),2019,41(1):91-104.
- [21] 温克刚.中国气象灾害大典—河南卷[M].北京:气象出版社,2008:65-81.
- [22] 薛昌颖,马志红,胡程达.近 40a 黄淮海地区夏玉米生长季干旱时空特征分析[J].自然灾害学报,2016,25(2):1-14.
- [23] 安迪,李栋梁,王自强,等.基于 SPEI 的黄淮海地区夏季干旱时空异常特征及成因[J].干旱气象,2018,36(4):544-553.
- [24] 韦潇宇,胡琦,马雪晴,等.基于 SPEI 的华北平原夏玉米生长季干旱时空变化特征[J].干旱气象,2018,36(4):554-560,577.
- [25] 万能涵,杨晓光,刘志娟,等.气候变化背景下中国主要作物农业气象灾害时空分布特征(III):华北地区夏玉米干旱[J].中国农业气象,2018,39(4):209-219.