

王大刚,于洋,孙凌霄,等.塔克拉玛干沙漠南缘典型绿洲 $ET_0$ 模型适用性评价及修正[J].中国沙漠,2021,41(6):41-53.

# 塔克拉玛干沙漠南缘典型绿洲 $ET_0$ 模型适用性评价及修正

王大刚<sup>1,2</sup>, 于洋<sup>1,2</sup>, 孙凌霄<sup>1,2</sup>, 何婧<sup>1,2</sup>, Malik Ireneusz<sup>1,3</sup>,  
Wistuba Malgorzata<sup>1,3</sup>, 姜逢清<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, 北京 100049; 3.西里西亚大学 环境学院, 波兰 卡托维兹 40866)

**摘要:**  $ET_0$ 模型在不同地区具有不同的适用性,而对极端干旱的塔克拉玛干沙漠南缘绿洲的 $ET_0$ 模型的适用性研究较为稀缺。利用2006—2014年生长季(4—10月)策勒气象站逐日气象资料,以自动称重式蒸渗仪实测数据为标准,采用最大绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、模型效率(EF)和一致性指数(d)4个指标,在日、月时间尺度上评价了6种常用 $ET_0$ 模型在策勒绿洲的适用性,并使用回归修正法和比例修正法分别修正了这6种模型。结果表明:(1)日、月时间尺度上,Hargreaves-Samani(H-S)模型高估程度较大,其余模型均不同程度低估,拟合度由高到低依次为FAO-56PM、Jensen-Haise(J-H)、Priestley-Taylor(P-T)、Makkink、Turc、H-S。(2)所有 $ET_0$ 模型月值变化趋势与蒸渗仪实测值基本一致,除FAO-56PM和Turc模型计算的 $ET_0$ 月值在6月达到峰值外,其余模型均在7月达到峰值,在生长季尺度所有模型 $ET_0$ 月值与蒸渗仪实测值呈显著相关。(3)日、月时间尺度上,回归修正法和比例修正法修正后的 $ET_0$ 模型计算结果与蒸渗仪实测值均呈极显著相关,回归修正法优于比例修正法。(4)相关性分析表明,对策勒绿洲 $ET_0$ 影响由高到低的气象因子依次为 $T_{\text{mean}} > T_{\text{min}} > P > T_{\text{max}} > R_s > U_2 > RH_{\text{mean}}$ 。

**关键词:** 塔克拉玛干沙漠南缘; 策勒绿洲; 参考作物蒸散发量; 适用性评价; 模型修正

文章编号: 1000-694X(2021)06-041-13

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00069

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

## 0 前言

中国干旱区主要分布在西北部<sup>[1]</sup>,近几十年来由于干旱、气候变暖和土地覆盖变化的综合影响,在极端干旱的塔克拉玛干沙漠南缘,绿洲土地退化严重,主要表现为人工绿洲面积扩大和天然绿洲面积减少<sup>[2]</sup>,人工绿洲扩张的两个主要原因是迅速增加的人口和迅速扩大的耕地面积<sup>[3]</sup>。水资源是干旱地区最宝贵的自然资源,农业用水在水资源利用方面占比较大<sup>[4]</sup>,随着绿洲水浇地面积不断扩大,流入绿洲的径流量显著减少<sup>[5]</sup>,从而导致绿洲水资源短缺。在极端干旱地区,水是维持当地生态系统的关键因素,农业用水增加导致了严重的水文和环境退化,节水和提高作物灌溉效率对未来水资源配置至

关重要<sup>[6]</sup>,因此合理配置有限的水资源是绿洲生态系统可持续发展的前提<sup>[7]</sup>。在干旱的沙漠地区,绿洲是人类和野生动植物的重要栖息地,有效地管理绿洲水资源,对区域的环境可持续发展和经济发展也具有重要意义<sup>[8]</sup>。

蒸散发(evapotranspiration, ET)是绿洲水文循环中最重要的人文过程和生态过程,开展绿洲蒸散发研究是提高水资源利用的基础<sup>[9]</sup>,准确估计蒸散发能满足绿洲有限水资源的供应,同时可以降低灌溉成本<sup>[10]</sup>,然而实际情况下很难用仪器测定或者直接计算实际蒸散发,一般通过参考作物蒸散发量(Reference crop evapotranspiration,  $ET_0$ )乘以作物系数( $K_c$ )进行估算<sup>[11]</sup>。参考作物蒸散发是指参考面不缺水的蒸散发速率,世界粮农组织(FAO)将其定义

收稿日期:2021-03-17; 改回日期:2021-05-18

资助项目:中国科学院“西部青年学者”B类项目(2018-XBQNXZ-B-017);新疆维吾尔自治区高层次人才引进工程(Y942171)

作者简介:王大刚(1993—),男,甘肃古浪人,硕士研究生,研究方向为干旱区水资源。E-mail: wangdagang19@mailsucas.ac.cn

通信作者:于洋(E-mail: yuyang@ms.xjb.ac.cn)

为:假设作物高度为0.12 m,并有固定的表面阻力为 $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,反照率为0.23的参考冠层的蒸散发,相当于高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面而不缺水的开阔草地的蒸散发<sup>[12]</sup>。现今存在几十种以综合法、辐射法、温度法、蒸发皿法为主的估算 $ET_0$ 的方法<sup>[13]</sup>,在需要的气象数据均能得到满足的前提下,FAO-56 Penman-Monteith方法被FAO推荐为估算参考作物蒸散发的唯一方法<sup>[14]</sup>,但该公式中需要的气象要素较多,该方法在实测资料缺乏的地区使用时存在困难<sup>[15-16]</sup>。多数 $ET_0$ 模型的参数具有经验性和地方性,因而对参数进行区域优化是提高 $ET_0$ 计算精度的重要手段<sup>[17]</sup>。

为了准确估计不同地区的参考作物蒸散发,国内外诸多学者评估了不同气候和地区的 $ET_0$ 模型的适用性<sup>[18-21]</sup>,而在中国多见于对湿润地区的适用性评价<sup>[22-24]</sup>,少见对于干旱地区的适用性评价<sup>[25-26]</sup>,极少见对极端干旱的塔克拉玛干沙漠南缘地区进行 $ET_0$ 模型的适用性评价。国内对 $ET_0$ 模型的评价主要是以FAO-56PM为标准<sup>[26-27]</sup>,而以蒸渗仪为评价标准的情况较为少见<sup>[23,28-29]</sup>,而在国外,各种禾草和或苜蓿的蒸渗仪测量的蒸散发已被用作建立估计值方程的标准<sup>[30]</sup>,故本文选择以蒸渗仪实测值为标准对极端干旱的塔克拉玛干沙漠南缘绿洲的 $ET_0$ 模型进行适用性研究。塔克拉玛干沙漠南缘地区条件恶劣、气象站点少,各种气象资料的测量和数据获取极其困难,且缺少长时间段的气象观测,对该地区进行 $ET_0$ 模型适用性研究能够在 $ET_0$ 适宜计算方法的选取上提供依据。

本文以新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站(以下简称策勒站)为依托,以蒸渗仪实测数据为标准,用6种常用的模型FAO-56 Penman-Monteith模型、Hargreaves-Samani模型、Priestley-Taylor模型、Makkink模型、Jensen-Haise模型和Turc模型评价了极端干旱的塔克拉玛干沙漠南缘典型绿洲——策勒绿洲 $ET_0$ 模型的适用性,并通过最大绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、模型效率(EF)和一致性指数(d)4个指标对各种模型进行了精度评估,并通过回归修正法和比例修正法分别修正了6种 $ET_0$ 模型,为塔克拉玛干沙漠南缘绿洲实测资料缺乏的地区提供了计算 $ET_0$ 模型的选择,这对极端干旱区脆弱的生态农业系统在农业用水规划、灌溉系统设计和估算作物需水量等方面具有重要意义。

## 1 研究区概况

策勒绿洲( $35^{\circ}17' - 39^{\circ}30' \text{N}$ ,  $80^{\circ}03' - 82^{\circ}10' \text{E}$ )位于塔克拉玛干沙漠南缘地区中部,是中国新疆南部典型的沙漠-绿洲生态系统,平均海拔1 365 m,地势南高北低<sup>[31]</sup>,发源于昆仑山的策勒河是该绿洲唯一的驱动河流,直接决定绿洲的水资源补给<sup>[32]</sup>。策勒绿洲属典型内陆暖温带荒漠气候,夏季炎热,干旱少雨,光热充足,日照时间长,昼夜温差大,极端最高气温 $41.9^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温 $-23.9^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量为35.1 mm,年潜在蒸发量2 600 mm,全年盛行西北风,大风天气3—9 d,沙尘暴20 d,扬沙90 d,浮尘150 d。绿洲内主要作物为红枣、核桃、石榴、小麦、桉柳和玉米等。土壤以棕漠土和风沙土为主<sup>[33]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

策勒绿洲用水以农作物灌溉为主,故本研究选用策勒站2006—2014年生长季(4—10月)逐日气象资料和蒸渗仪实测数据(日值),观测站地理坐标 $37^{\circ}01' \text{N}$ ,  $80^{\circ}43' \text{E}$ ,海拔1 301.5 m。气象数据主要包括日均气温 $T_{\text{mean}}(^{\circ}\text{C})$ 、日最高气温 $T_{\text{max}}(^{\circ}\text{C})$ 、日最低气温 $T_{\text{min}}(^{\circ}\text{C})$ 、日均相对湿度 $RH_{\text{mean}}(\%)$ 、日照时数 $N(\text{h})$ 、日均2 m处风速 $U_2(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 、气压 $P(\text{kPa})$ 、太阳辐射 $R_s(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$ 。

### 2.2 参考作物蒸散发计算模型

FAO-56 Penman-Monteith公式

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

式中: $ET_0$ 为参照腾发速率( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ); $R_n$ 为作物表面上的净辐射( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ); $G$ 为土壤热通量( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ); $T$ 为2 m高处日平均气温( $^{\circ}\text{C}$ ); $u_2$ 为2 m处的风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $e_s$ 为饱和水汽压(kPa); $e_a$ 为实际水汽压(kPa); $e_s - e_a$ 为饱和水汽压差(kPa); $\Delta$ 为饱和水汽压曲线的倾率; $\gamma$ 为湿度计常数( $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )。其中, $R_n$ 采用净短波辐射与净长波辐射的差值来计算,详见FAO技术文档<sup>[12]</sup>;在日计算尺度, $G$ 相对于 $R_n$ 较小,故忽略<sup>[34]</sup>。

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

Hargreaves-Samani 模型(H-S模型)

$$ET_0 = \alpha R_a (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.78 \right) \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为经验系数, 取值 0.0023;  $R_a$  为大气顶层辐射 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $T_{\max}$  为最高气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\min}$  为最低气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

Priestley-Taylor 模型(P-T模型)

$$ET_0 = \alpha \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  是校准常数, 取值为 1.26; 其余参数同上。

Makkink 模型

$$ET_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{2.45} - \beta \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为经验系数, 取值 0.61;  $\beta$  为经验系数, 取值 0.012;  $R_s$  为太阳辐射 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ); 其余参数同上。

Jensen-Haise 模型(J-H模型)

$$ET_0 = \alpha \frac{TR_s}{2.450} + \beta \quad (6)$$

式中:  $\alpha$  为经验系数, 取值 0.025;  $\beta$  为经验系数, 取值 0.08; 其余参数同上。

Turc 模型

$$ET_0 = a_T 0.013 \frac{T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}} + 15} \cdot \frac{23.8856 R_s + 50}{\lambda} \quad (7)$$

式中:  $a_T$  是基于湿度的参数, 若日平均相对湿度大于等于 50%, 则  $a_T$  等于 1; 若日平均相对湿度小于 50%, 则  $a_T$  用下式计算:

$$a_T = 1 + \frac{50 - RH_{\text{mean}}}{70} \quad (8)$$

式中:  $T_{\text{mean}}$  为日均气温;  $\lambda$  为蒸发潜热, 取值 2.45  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $RH_{\text{mean}}$  为日均相对湿度; 其余参数同上。

### 2.3 模型评价方法

为评价模型的准确性, 本文使用了最大绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、一致性指数( $d$ )、模型效率(EF)4个指标<sup>[35]</sup>, 在这里, 最好的模型是  $d=EF=1.0$  并且  $MAE=RMSE=0$ 。具体计算方法如下:

$$MAE = \max(|O_i - E_i|)_{i=1}^N \quad (9)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (11)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (12)$$

式中:  $N$  为样本数;  $O$  是蒸渗仪实测蒸散量 ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $E$  是用其他方法计算所得的参考蒸散发量 ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )。

### 2.4 模型修正方法

$ET_0$  模型具有多种修正方法, 比如比例修正法、回归修正法和公式内部参数进行率定修正<sup>[36-37]</sup>等, 本文采用最常用的比例修正法和回归修正法分别对各模型进行修正并通过绝对差值和相对偏差对修正后的结果进行精度评价。

回归修正形式:

$$ET_0(E_{a1}) = aET_0(E_{bc}) + b \quad (13)$$

比例修正形式:

$$ET_0(E_{a2}) = K_R ET_0(E_{bc}) \quad (14)$$

式中:  $ET_0(E_{bc})$  为模型修正前计算的  $ET_0$  值;  $ET_0(E_{a1})$ 、 $ET_0(E_{a2})$  分别为回归修正法和比例修正法的修正结果;  $K_R$  为比例修正因子(随月份变化);  $a$ 、 $b$  为回归系数。

## 3 结果与分析

### 3.1 模型计算的 $ET_0$ 与蒸渗仪实测值日值序列统计分析

对策勒站生长季各  $ET_0$  模型计算的多年日均值序列和相应的蒸渗仪实测值进行统计特征分析(表1)。Turc 模型除变异系数外其余统计值均最小, H-S 模型除变异系数外其余统计值均最大。FAO-56PM 的平均值(4.963 mm)最接近蒸渗仪实测值的平均值(5.829 mm)。Turc 模型的标准差和方差均最小, 说明该模型在策勒绿洲计算所得的  $ET_0$  值离散程度较低, 而策勒绿洲在生长季  $ET_0$  具有一定的离散程度, 故该模型不能准确反映当地的  $ET_0$  水平, 而 J-H、FAO-56PM、P-T 的标准差分别为 1.406、1.190、1.142, 方差分别为 1.977、1.416、1.304, 与蒸渗仪实测值的标准差 1.239 和方差 1.535 较接近, 说明这 3 种模型和蒸渗仪实测值具有较高的相似性。所有模型的变异系数均小于 0.4, 变异程度较低, 表明  $ET_0$  日值序列具有很好的可靠性, 其中 J-H 模型的变



表1 各种模型计算 $ET_0$ 和蒸渗仪实测值日值序列统计特征Table 1 Statistic characteristics for daily  $ET_0$  between different models and lysimeter

模型	最小值/mm	最大值/mm	均值/mm	标准差	方差	变异系数
蒸渗仪	2.738	9.989	5.829	1.239	1.535	0.213
Hargreaves-Samani	5.439	18.140	13.289	3.156	9.958	0.237
Jensen-Haise	1.172	7.197	4.424	1.406	1.977	0.318
Makkink	1.717	5.152	3.453	0.729	0.531	0.211
FAO-56PM	1.853	6.915	4.963	1.190	1.416	0.240
Priestley-Taylor	1.294	6.212	4.008	1.142	1.304	0.285
Turc	0.812	2.804	1.943	0.458	0.209	0.236

异系数最大,计算的 $ET_0$ 最不稳定;Makkink模型变异系数最小,计算的 $ET_0$ 最稳定。

### 3.2 模型计算的 $ET_0$ 与蒸渗仪实测值日变化特征

图1反映策勒绿洲日尺度的各模型计算的 $ET_0$ 与蒸渗仪实测值多年平均变化情况,所有模型的计算结果均呈现出线性趋势,H-S模型的计算结果均出现在 $X=Y$ 直线的上方,表明该模型计算的策勒绿洲的 $ET_0$ 大于蒸渗仪实测值;而J-H模型、FAO-56PM模型和P-T模型的计算结果均不同程度地落在 $X=Y$ 直线上,且J-H模型和P-T模型的计算结果数据离散程度大,而FAO-56PM模型的计算结果落在 $X=Y$ 直线上最多,数据离散程度略小于J-H模型和P-T模型,说明FAO-56PM模型计算结果与蒸渗仪实测值相差不大。而Makkink模型和Turc模型的计算结果与上述结果相反,均出现在 $X=Y$ 直线的下方,表明这两种模型计算的策勒绿洲的 $ET_0$ 小于蒸渗仪实测值。

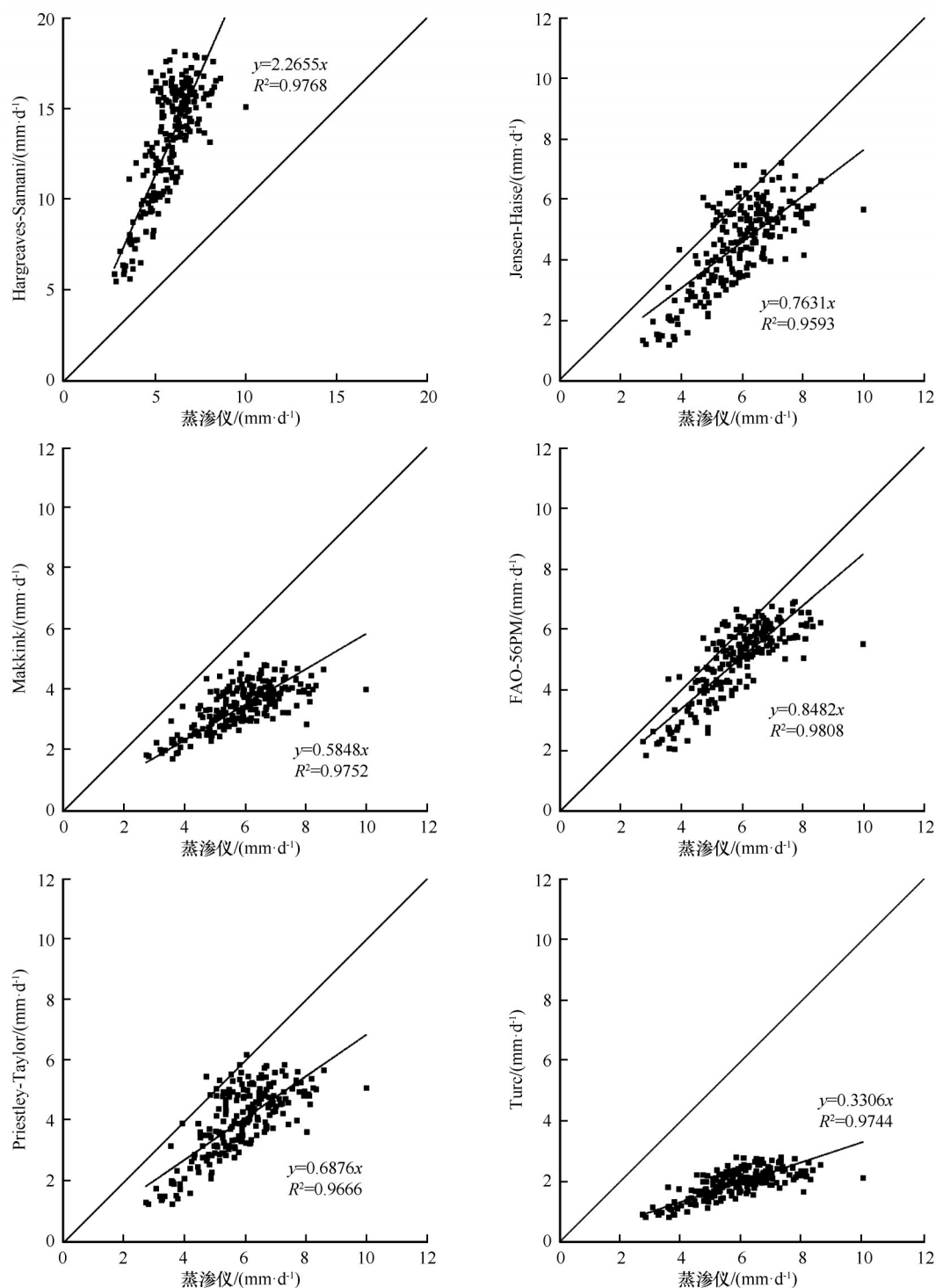
比较各模型的评价指标(表2),所有 $ET_0$ 模型线性回归方程的决定系数 $R^2$ 均大于0.95,为0.95—0.99,FAO-56PM模型的 $R^2$ 最大,J-H的 $R^2$ 最小;所有模型斜率 $K$ 值0.3—2.3,其中FAO-56PM模型的 $K$ 值为0.8482最接近1,且最大绝对误差MAE( $0.97 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )和均方根误差RMSE( $1.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )均为所有模型中最小,而模型效率 $EF$ (0.14)和一致性指数 $d$ (0.80)均最接近于1,说明该模型计算的数据较接近于蒸渗仪实测值,而H-S斜率 $K$ 值较大,Turc斜率 $K$ 值较小,且这两种模型计算的 $ET_0$ 的最大绝对误差MAE和均方根误差RMSE均较大,而模型效率 $EF$ 和一致性指数 $d$ 均较小,说明这两种模型与蒸渗仪实测值差距较大。分析可得,H-S高估了日蒸散,Turc低估了日蒸散,而其他模型也不同程度出现了

低估现象但幅度不大。通过对各种评价指标的比较,可得出策勒绿洲在生长季日尺度最优经验模型依次为FAO-56PM、J-H、P-T、Makkink、Turc、H-S。

### 3.3 模型计算的 $ET_0$ 与蒸渗仪实测值月变化特征

图2反映的是策勒绿洲各模型月时间尺度的 $ET_0$ 与蒸渗仪实测值多年平均的变化情况,可以看出,在生长季内各模型计算结果均呈单峰型变化,且变化趋势基本与蒸渗仪实测值相一致,在所有模型中除FAO-56PM和Turc的峰值出现在6月外,其余模型的峰值均出现在7月,且蒸渗仪实测值也在7月出现峰值,所有模型和蒸渗仪实测值的最小值均出现在10月,且所有模型各月的变化趋势大体与蒸渗仪实测值基本一致。H-S计算的月 $ET_0$ 明显高于其他模型,同时也高于蒸渗仪实测值;Turc计算的月 $ET_0$ 明显低于其他模型;FAO-56PM的计算结果虽然也出现了低估现象,但在所有模型中最接近蒸渗仪实测值。

为了进一步探讨蒸渗仪实测蒸散与各模型 $ET_0$ 计算值之间的关系,将蒸渗仪实测值与6种模型 $ET_0$ 月值进行了相关分析(表3)。结果表明,FAO-56PM模型计算的 $ET_0$ 月值与蒸渗仪实测值在生长季的相关系数在所有模型中最大(0.808),相关程度最强,除7月和9月外,其余月份均与蒸渗仪实测值呈显著相关。各模型的 $ET_0$ 月值与蒸渗仪实测值相关程度较低,而所有模型普遍表现为4月和10月相关程度较高,均呈显著相关,其余月份相关程度较低,未全呈显著相关,而在整个生长季,H-S、J-H、Makkink、FAO-56PM、P-T和Turc与蒸渗仪实测值均呈显著相关,相关系数分别达到0.764、0.751、0.711、0.808、0.747和0.736,但均未呈极显著相关,因此,在一定程度上不能通过这6种模型计算策勒绿洲的 $ET_0$ 。

图1 模型计算日  $ET_0$  与蒸渗仪实测值的线性回归分析Fig.1 Linear regression analysis of daily  $ET_0$  between calculated and measured values

### 3.4 $ET_0$ 模型修正及评价

#### 3.4.1 $ET_0$ 模型经验系数的修正

通过分析可得,利用原始经验系数的各模型在估算策勒绿洲的  $ET_0$  时,无论在日时间尺度还是在月时间尺度上,除 FAO-56PM 以外的各种模型均与

蒸渗仪实测差异较大,且与蒸渗仪实测值存在显著差异。其中 H-S 高估程度较大,其余模型出现了不同程度的低估现象,在计算策勒绿洲的  $ET_0$  时适用性较差。除 FAO-56PM 外,其余模型对气象资料的要求相对较低,由于塔克拉玛干沙漠南缘绿洲地理条件与策勒绿洲相似,而塔克拉玛干沙漠南缘绿洲并

表 2 各模型计算日蒸散准确性分析

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

模型	线性回归		最大绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE	模型效率 $EF$	一致性指数 $d$
	$K$	$R^2$				
Hargreaves-Samani	2.2655	0.9768	7.46	7.82	-38.85	0.24
Jensen-Haise	0.7631	0.9593	1.50	1.69	-0.87	0.69
Makkink	0.5848	0.9752	2.38	2.54	-3.19	0.49
FAO-56PM	0.8482	0.9808	0.97	1.15	0.14	0.80
Priestley-Taylor	0.6876	0.9666	1.83	2.01	-1.63	0.61
Turc	0.3306	0.9744	3.89	4.00	-9.43	0.35

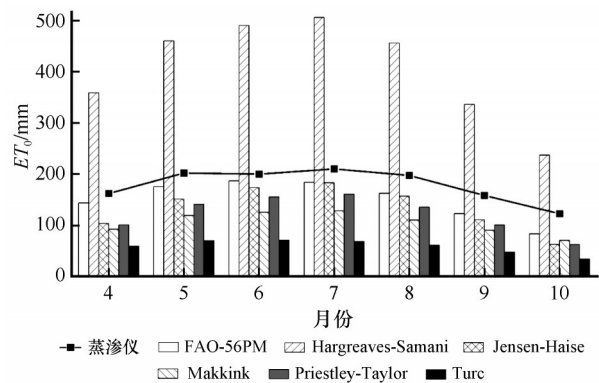


图2 蒸渗仪蒸散量与不同模型计算的月蒸散结果  
Fig.2 Monthly evapotranspiration calculated with different models

不全具备观测多种气象数据的条件,各模型的经验系数具有地域差异性。为了提高各模型在塔克拉玛干沙漠南缘绿洲的适用性,本文采用回归修正法和比例修正法分别对6种模型进行了逐月修正,分别以各模型估算的 $ET_0$ 日均值为自变量,对应月份蒸渗仪实测值日均值为因变量,进行逐月线性回归分析,分

别建立了逐月的回归修正模型和比例修正模型,回归修正方程斜率 $a$ 和经验系数 $b$ 及比例系数 $K_R$ 见表4。

3.4.2 不同模型修正后 $ET_0$ 日值结果比较

采用表4所示的修正系数对6种模型进行修正后分别计算各模型逐日 $ET_0$ 并与蒸渗仪实测值进行比较(图3),整个生长季内蒸渗仪实测日均为5.83 mm,采用回归修正后,H-S、J-H、Makkink、FAO-56PM、P-T和Turc计算日均值分别为5.83、5.82、5.83、5.77、5.83 mm和5.83 mm,与蒸渗仪实测值相比,除J-H和FAO-56PM分别偏低0.15%和1.04%外,其余模型计算的日均值与蒸渗仪实测值一致;采用比例修正后,H-S、J-H、Makkink、FAO-56PM、P-T和Turc计算日平均值分别为5.80、5.75、5.79、5.82、5.78 mm和5.74 mm,与蒸渗仪实测值相比均有所偏低,分别偏低0.47%、1.36%、0.71%、0.19%、0.82%和1.53%,偏低程度均较小。采用回归修正法和比例修正法修正后的计算结果皆均匀分布在 $X=Y$

表 3 逐月蒸渗仪实测值与不同 $ET_0$ 模型计算月值的相关系数(观测样点=214)

Table 3 Correlation coefficient between monthly measured value of lysimeter and monthly value calculated by different  $ET_0$  models (data points=214)

月份	Hargreaves-Samani	Jensen-Haise	Makkink	FAO-56PM	Priestley-Taylor	Turc
4	0.575**	0.627**	0.481**	0.825**	0.557**	0.606**
5	0.179	0.076	-0.088	0.375**	-0.082	0.082
6	0.220	0.279	0.212	0.480**	0.149	0.377**
7	-0.235	0.004	0.049	0.226	0.040	0.113
8	0.066	0.095	0.019	0.556**	0.043	0.137
9	0.168	0.218	0.075	0.333	0.072	0.270
10	0.760**	0.761**	0.748**	0.737**	0.790**	0.731**
生长季	0.764**	0.751**	0.711**	0.808**	0.747**	0.736**

\*\*表示极显著相关, $P<0.01$ 。

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	模型	回归修正		比例修正
		$a$	$b$	$K_R$
4	Hargreaves-Samani	0.268	2.201	0.449
	Jensen-Haise	0.762	2.779	1.545
	Makkink	1.029	2.233	1.744
	FAO-56PM	1.113	0.081	1.129
	Priestley-Taylor	1.070	1.805	1.600
	Turc	1.794	1.835	2.701
5	Hargreaves-Samani	0.131	4.585	0.438
	Jensen-Haise	0.101	6.030	1.309
	Makkink	-0.160	7.145	1.669
	FAO-56PM	0.742	2.282	1.139
	Priestley-Taylor	-0.135	7.141	1.420
	Turc	0.273	5.893	2.793
6	Hargreaves-Samani	0.179	3.752	0.407
	Jensen-Haise	0.327	4.779	1.136
	Makkink	0.409	4.957	1.575
	FAO-56PM	1.053	0.114	1.071
	Priestley-Taylor	0.284	5.205	1.281
	Turc	1.219	3.784	2.790
7	Hargreaves-Samani	-0.458	14.042	0.406
	Jensen-Haise	0.011	6.546	1.122
	Makkink	0.179	5.874	1.602
	FAO-56PM	0.880	1.450	1.126
	Priestley-Taylor	0.141	5.881	1.273
	Turc	0.775	4.902	2.988
8	Hargreaves-Samani	0.044	5.731	0.431
	Jensen-Haise	0.148	5.619	1.237
	Makkink	0.043	6.219	1.760
	FAO-56PM	1.347	-0.717	1.212
	Priestley-Taylor	0.088	5.991	1.441
	Turc	0.606	5.179	3.209
9	Hargreaves-Samani	0.103	4.102	0.465
	Jensen-Haise	0.287	4.192	1.403
	Makkink	0.161	4.768	1.728
	FAO-56PM	0.491	3.235	1.271
	Priestley-Taylor	0.124	4.836	1.547
	Turc	1.007	3.646	3.270
10	Hargreaves-Samani	0.382	1.022	0.511
	Jensen-Haise	0.831	2.201	1.796
	Makkink	1.565	0.354	1.717
	FAO-56PM	1.009	1.158	1.415
	Priestley-Taylor	1.126	1.669	1.908
	Turc	2.459	1.132	3.419

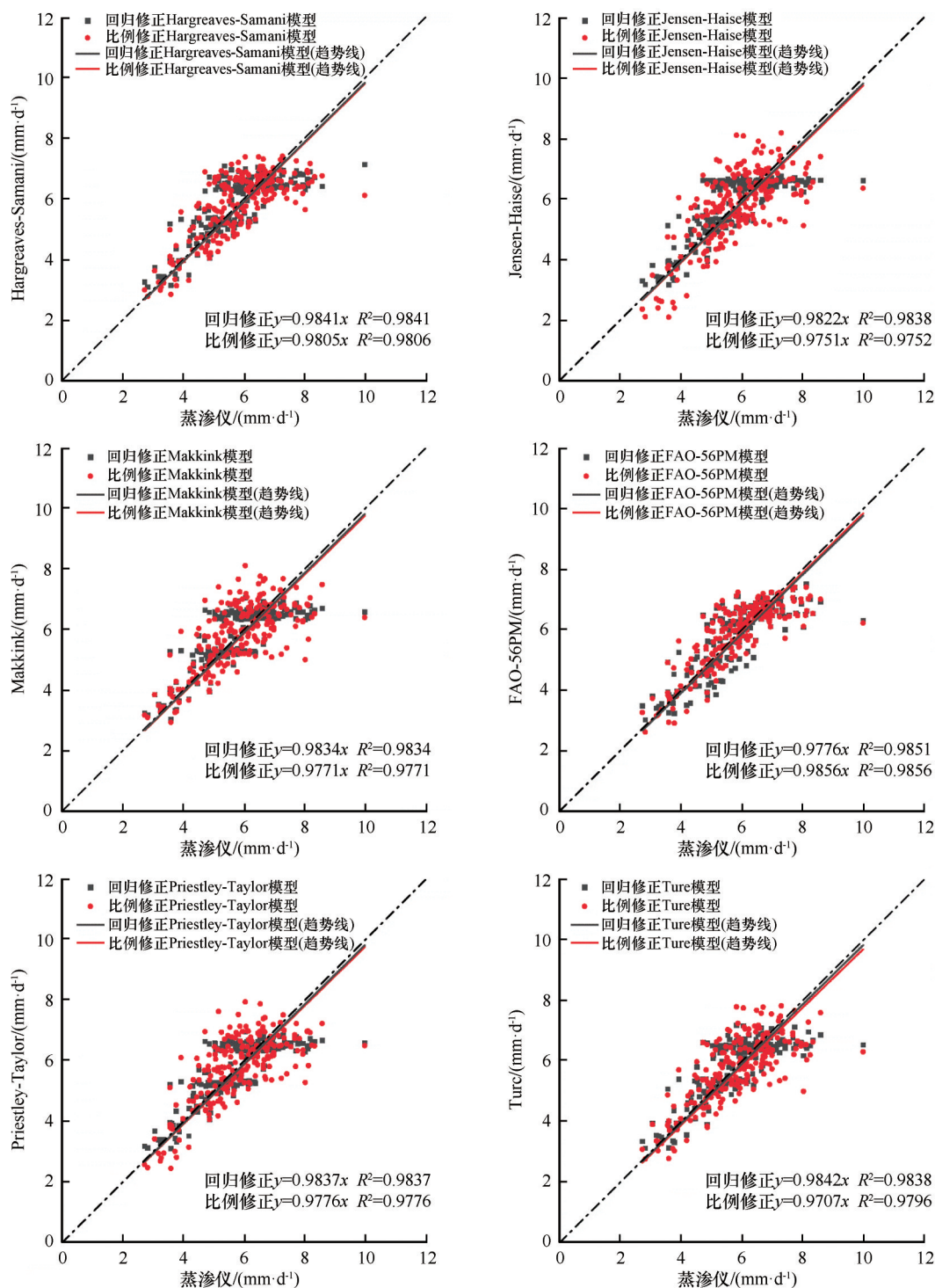
直线两侧,且具有一定的离散性,而策勒绿洲  $ET_0$  在不同月份具有明显的差异性,这与实际情况相吻合。采用回归修正法修正后,各模型计算值的决定系数  $R^2$  为 0.9834—0.0.9851,而采用比例修正法修正后,各模型计算值的决定系数  $R^2$  为 0.9752—0.9856,采用回归修正法和比例修正法修正后的  $ET_0$  模型的决定系数均大于 0.97,可以看出两种修正方法修正后的结果与蒸渗仪实测值均呈极显著相关,在一定程度上可以使用修正后的模型来计算策勒绿洲的  $ET_0$ 。

3.4.3 模型修正后  $ET_0$  月值与蒸渗仪实测值变化特征

采用回归修正法和比例修正法分别计算了策勒绿洲 6 种模型逐日的  $ET_0$  日均值统计出月值后多年平均,以对应日期的蒸渗仪实测值多年平均为标准,将两种方法修正后的 6 种模型的计算结果与蒸渗仪实测值进行对比分析(图 4)。两种方法修正的各模型与蒸渗仪实测值的拟合程度均较好,各模型计算的  $ET_0$  均在 7 月达到峰值,最低值均出现在 10 月,变化趋势基本与蒸渗仪实测值一致。回归修正后的 J-H 模型在 6 月低估了 0.94%,6 种模型在 7 月均低估 2.62%,除 9 月 FAO-56PM 模型低估程度较大(低估 8.85%)外,其余修正模型的结果在各月份与蒸渗仪实测月均值基本一致,无显著性差异;比例修正后的模型均不同程度低估了  $ET_0$ ,其中 7、8、9、10 月低估程度较大,所有模型平均低估分别为 2.98%、1.47%、1.46% 和 1.96%。由此可知,在月尺度上策勒绿洲采用回归修正法修正的  $ET_0$  模型计算结果与蒸渗仪实测值的吻合程度优于采用比例修正法修正的  $ET_0$  模型。

以回归修正法和比例修正法分别计算 6 种  $ET_0$  模型生长季的月值与对应蒸渗仪实测值进行比较(表 5)。回归修正法修正后,各模型各月绝对偏差和相对偏差变化幅度较小。生长季 H-S、J-H、Makkink、FAO-56PM、P-T 和 Turc 模型月平均绝对差值分别为 1、1.27、1、2.86、1 mm 和 1 mm,月平均相对偏差分别为 0.52%、0.65%、0.52%、1.69%、0.52% 和 0.52%,均相对较小;回归修正法修正后,生长季 H-S、J-H、Makkink、FAO-56PM、P-T 和 Turc 模型月平均绝对差值分别为 1.84、3.42、2.26、1.35、2.46 mm 和 3.72 mm,月平均相对偏差分别为 1.02%、2.05%、1.19%、0.76%、1.41% 和 1.97%,与回归修正法相比,比例修正法修正后的模型整体上绝对差值和相对偏差略大于回



图3 修正后各模型计算日  $ET_0$  与蒸渗仪实测值的线性回归分析Fig.3 Linear regression analysis of daily  $ET_0$  between calculated (modified) and measured values

归修正法修正后的模型计算的  $ET_0$  月值。综合分析得,在月时间尺度上,回归修正法修正效果优于比例修正法。

### 3.5 气象因子与实测蒸散

太阳辐射、温度、空气湿度、风是影响植物蒸腾

与水分蒸发的主要因素<sup>[28]</sup>,为了分析各气象因子对实际蒸散的影响大小以及直观表明各气象因子与蒸渗仪实测变化的关系,分别对生长季策勒绿洲多年平均实测气象数据的日均值与蒸渗仪实测值日均值经 max-min 标准化处理[标准值=(原值-极小值)/(极大值-极小值)]后进行简单统计,并绘制



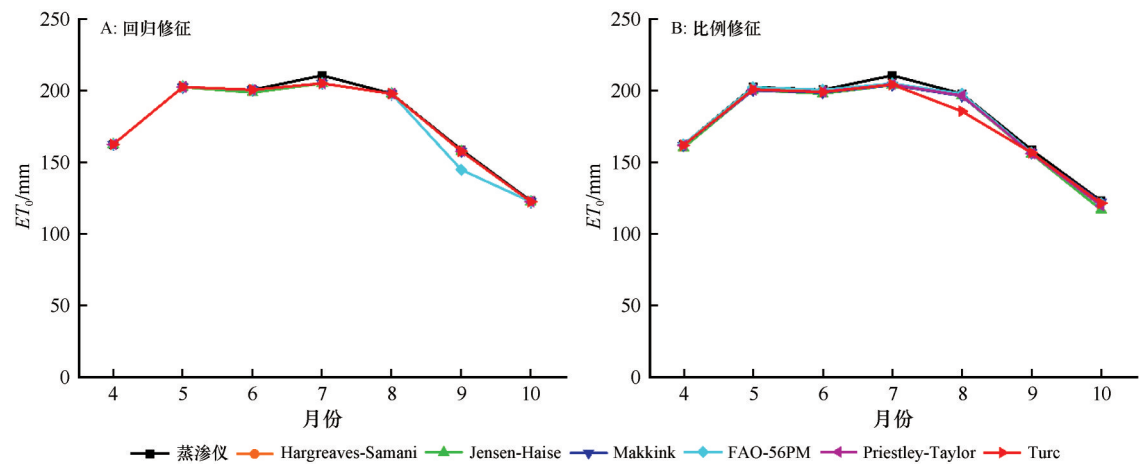


图 4 修正后不同模型的  $ET_0$  月值比较

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

表 5 修正后各模型计算月蒸散准确性分析					
Table 5 The evaluation of monthly $ET_0$ simulated effects by different modified models					
月 份	模型	绝对差值/mm		相对偏差/%	
		回归 修正	比例 修正	回归 修正	比例 修正
4	Hargreaves-Samani	0.01	1.05	0.01%	0.65%
	Jensen-Haise	0.00	2.32	0.00%	1.43%
	Makkink	0.00	0.77	0.00%	0.47%
	FAO-56PM	0.00	0.03	0.00%	0.02%
	Priestley-Taylor	0.00	0.64	0.00%	0.40%
	Turc	0.00	0.79	0.00%	0.48%
5	Hargreaves-Samani	0.01	0.62	0.01%	0.31%
	Jensen-Haise	0.00	2.18	0.00%	1.08%
	Makkink	-0.01	2.22	0.00%	1.10%
	FAO-56PM	-0.01	0.27	0.00%	0.13%
	Priestley-Taylor	-0.01	1.99	0.00%	0.99%
	Turc	0.00	1.54	0.00%	0.76%
6	Hargreaves-Samani	0.01	0.50	0.01%	0.25%
	Jensen-Haise	1.87	2.45	0.94%	1.22%
	Makkink	0.00	1.80	0.00%	0.90%
	FAO-56PM	-0.01	0.02	0.00%	0.01%
	Priestley-Taylor	0.00	1.27	0.00%	0.63%
	Turc	0.00	1.53	0.00%	0.77%
7	Hargreaves-Samani	5.52	6.10	2.63%	2.90%
	Jensen-Haise	5.51	6.62	2.62%	3.15%
	Makkink	5.52	6.60	2.62%	3.14%
	FAO-56PM	5.52	5.64	2.62%	2.68%
	Priestley-Taylor	5.51	6.26	2.62%	2.97%
	Turc	5.52	6.40	2.63%	3.04%
8	Hargreaves-Samani	-0.01	1.03	-0.01%	0.52%
	Jensen-Haise	-0.01	1.51	0.00%	0.77%

月 份	模型	绝对差值/mm		相对偏差/%	
		回归 修正	比例 修正	回归 修正	比例 修正
8	Makkink	0.00	1.49	0.00%	0.75%
	FAO-56PM	0.01	-0.07	0.00%	-0.04%
	Priestley-Taylor	0.01	1.28	0.00%	0.65%
	Turc	0.00	12.16	0.00%	6.15%
9	Hargreaves-Samani	0.99	2.15	0.62%	1.35%
	Jensen-Haise	1.00	2.89	0.63%	1.82%
	Makkink	0.99	2.23	0.63%	1.41%
	FAO-56PM	14.02	1.94	8.85%	1.22%
	Priestley-Taylor	1.00	2.55	0.63%	1.61%
	Turc	0.99	2.10	0.63%	1.32%
10	Hargreaves-Samani	0.47	1.43	0.38%	1.16%
	Jensen-Haise	0.48	5.98	0.39%	4.87%
	Makkink	0.48	0.69	0.39%	0.56%
	FAO-56PM	0.48	1.60	0.39%	1.30%
	Priestley-Taylor	0.48	3.20	0.39%	2.61%
	Turc	0.48	1.54	0.39%	1.25%
生 长 季 平 均	Hargreaves-Samani	1.00	1.84	0.52%	1.02%
	Jensen-Haise	1.27	3.42	0.65%	2.05%
	Makkink	1.00	2.26	0.52%	1.19%
	FAO-56PM	2.86	1.35	1.69%	0.76%
	Priestley-Taylor	1.00	2.46	0.52%	1.41%
	Turc	1.00	3.72	0.52%	1.97%
生 长 季 合 计	Hargreaves-Samani	7.00	12.88	3.64%	7.14%
	Jensen-Haise	8.86	23.95	4.57%	14.33%
	Makkink	6.99	15.81	3.64%	8.33%
	FAO-56PM	20.02	9.42	11.86%	5.33%
	Priestley-Taylor	6.99	17.19	3.64%	9.85%
	Turc	7.00	26.06	3.65%	13.78%

了生长季各个气象因子与蒸渗仪实测值同步变化的统计图,如图5所示。

在生长季内,蒸渗仪实测值与气压 $P$ 呈相反的变化趋势,表明气压与蒸渗仪实测值之间为负向相关关系,而蒸渗仪实测值与平均相对湿度 $RH_{mean}$ 之间没有明显相同或相反变化趋势,表明两者之间可能没有明显的相关关系。太阳辐射 $R_s$ 、平均温度 $T_{mean}$ 和蒸渗仪实测值均表现为单峰曲线,且三者变化趋势一致,表明 $R_s$ 和 $T_{mean}$ 与蒸渗仪实测蒸散发之间为正相关关系,而2 m处风速 $U_2$ 在生长季内没有明显的峰值变化,表明在生长季策勒绿洲2 m处平均风速 $U_2$ 无明显波动,可能与蒸渗仪实测值之间没有明显的相关关系。

为了明确蒸渗仪实测数据与各气象因子之间的相关关系,将蒸渗仪实测值与各气象因子进行了

相关分析,如表6所示。结果显示,除蒸渗仪实测值与 $RH_{mean}$ 相关性不显著外,其余气象因子均表现为显著相关。蒸渗仪实测值和日均2 m处风速 $U_2$ 、日均气温 $T_{mean}$ 、日最高气温 $T_{max}$ 、日最低气温 $T_{min}$ 、太阳辐射 $R_s$ 之间均为高度正相关关系,其相关性 $T_{mean} > T_{min} > T_{max} > R_s > U_2$ ,说明在策勒绿洲对蒸散发影响较大的气象因子主要为温度,其次是太阳辐射和风速,蒸渗仪实测值与气压 $P$ 呈高度负相关关系,表明气压对策勒绿洲的蒸散发影响也较大,与之相比,FAO-56PM公式通过海拔计算气压 $P$ (详见FAO技术文档<sup>[12]</sup>)会在计算 $ET_0$ 时带来一定的误差;蒸渗仪实测值与 $RH_{mean}$ 无相关关系,可能与策勒绿洲地处塔克拉玛干沙漠南缘、相对湿度较小且每天变幅不大有关,更深层次的机理需在今后研究中探讨。

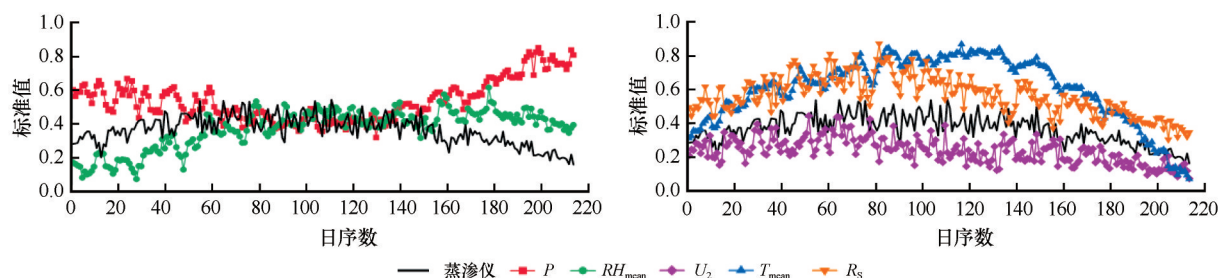


图5 生长季各气象因子和蒸渗仪蒸散的变化

Fig.5 Changes of evaporation in each meteorological factor and evaporating dish with underlying surface in the growing season

表6 蒸渗仪实测值与气象因子的相关系数(观测样点=214)

Table 6 Correlation coefficient of lysimeter measured  $ET_0$  with meteorologic variables (data points=214)

		蒸渗仪	$U_2$	$T_{mean}$	$T_{max}$	$T_{min}$	$P$	$RH_{mean}$	$R_s$
蒸渗仪	Pearson 相关	1	0.610**	0.778**	0.735**	0.762**	-0.747**	-0.081	0.643**
	Sig. 双尾		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.236	0.000

\*\*表示极显著相关。

## 4 讨论

本研究结果表明,在日、月时间尺度上,基于蒸渗仪为标准对塔克拉玛干沙漠南缘典型绿洲——策勒绿洲 $ET_0$ 模型适用性最好的模型是FAO-56PM,次之为J-H和P-T。国内主要以FAO-56PM方程为标准来评价其他各种模型,范留飞等<sup>[38]</sup>利用吐鲁番地区相关的气象资料,以FAO-56PM模型为标准,评价并修正了6种 $ET_0$ 模型;王永东等<sup>[25]</sup>依据塔克拉玛干沙漠腹地收集的气象资料,以FAO-56PM模型为标准,探讨了8种参考作物蒸散量不同计算方法在塔克拉玛干沙漠腹地的适用性。本文研究的结

果与袁小环等<sup>[28]</sup>的研究结果基本一致,他们基于蒸渗仪实测数据评价4种 $ET_0$ 模型在北京地区的适用性,结果表明P-T模型低估 $ET_0$ ,H-S模型高估 $ET_0$ 。徐俊增等<sup>[23]</sup>通过蒸渗仪草坪试验评价了11种计算方法的日 $ET_0$ 计算结果,发现FAO-56PM模型与实测值最为接近,也与本文研究结果基本一致。国内少见以蒸渗仪实测值为标准来评价各种模型的实例,一方面主要是由于称重式蒸渗仪实测数据测量和记录数据较复杂,另一方面由于称重式蒸渗仪安装较为困难,测量方法费用较高<sup>[39]</sup>。

在 $ET_0$ 模型修正方面,张昊等<sup>[40]</sup>使用回归分析法修正了Hargreaves公式和Irmak-Allen公式;刘战

东等<sup>[37]</sup>分别使用比例修正法、回归修正法和公式内部参数率定修正法修正了Hargreaves公式。本文的不同在于同时采用回归修正法和比例修正法分别修正了文中评估的所有模型。FAO-56PM为综合模型,需要的气象参数最多,H-S和Turc是基于温度和辐射的模型,需要气象参数较少,P-T、Makkink和J-H是基于辐射的模型,需要气象参数最少,由于各种模型在计算  $ET_0$  时所需要的气象因子各不相同,修正多种模型在计算  $ET_0$  时可以根据气象因子的种类进行选择对应的修正模型,这将有利于修正模型在塔克拉玛干沙漠南缘绿洲适用的广泛性。

本文通过对策勒绿洲多年气压、气温、相对湿度、太阳辐射、2 m处风速等多种气象因子进行了相关分析,与前人研究不同的地方在于将各种气象因子进行数据的标准化处理,消除各种气象因子的量纲关系,使得各种气象因子具有可比性,在以往的研究中,气压在某一时间段内变化幅度较小,未能引起诸多研究者的重视,本文仅分析了数据标准化处理后的大气压与蒸渗仪实测蒸散的相关关系,今后还需进一步探讨两者之间更深层次的机制。本文的不足在于仅使用了9年的气象数据且只有一个气象观测站点,得到的结果具有一定的局限性,在今后的研究中还应该进行塔克拉玛干沙漠南缘多气象站点和长时间序列的参考作物蒸散发研究。

## 5 结论

本文使用策勒站2006—2014年生长季的逐日气象资料,以自动称重式蒸渗仪实测值为标准,评估了6种  $ET_0$  模型在该地区的适用性,并分别采用回归修正法和比例修正法对6种  $ET_0$  模型进行了修正。

综合日、月两个时间尺度,FAO-56PM准确性最高,H-S高估了  $ET_0$  且高估程度较大,其余模型不同程度地低估了  $ET_0$ ,其中FAO-56PM低估程度最小,与蒸渗仪实测值最接近,Turc低估程度最大。模型拟合程度由高到低依次为:FAO-56PM、J-H、P-T、Makkink、Turc和H-S。

所有模型计算的  $ET_0$  月值变化趋势与蒸渗仪实测值基本一致,除FAO-56PM和Turc在6月  $ET_0$  出现峰值外,其余模型均在7月出现峰值,且所有模型均在10月达到最小值,在生长季所有模型  $ET_0$  值与蒸渗仪实测值均表现为显著相关。

采用回归修正法和比例修正法分别修正6种  $ET_0$  模型后,在日、月时间尺度上,两种修正方法修

正后各模型  $ET_0$  计算结果与蒸渗仪实测值的相关性极显著,整体上两种修正方法均表现出较好的结果,但回归修正法修正的  $ET_0$  模型计算结果精度高于比例修正法。

策勒绿洲生长季蒸渗仪实测值与  $T_{\text{mean}}$ 、 $T_{\text{min}}$ 、 $T_{\text{max}}$ 、 $R_s$  和  $U_2$  均呈显著正相关,与  $P$  呈显著负相关,与  $RH_{\text{mean}}$  无明显相关关系,对策勒绿洲蒸散发影响程度  $T_{\text{mean}} > T_{\text{min}} > P > T_{\text{max}} > R_s > U_2 > RH_{\text{mean}}$ 。

## 参考文献:

- [1] 李新荣,赵洋,回嵘,等.中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述[J].地理科学进展,2014,33(11):1435-1443.
- [2] 张飞,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等.干旱区绿洲土地利用/覆被及景观格局变化特征:以新疆精河县为例[J].生态学报,2009,29(3):1251-1263.
- [3] Cheng W, Zhou C, Liu H, et al. The oasis expansion and eco-environment change over the last 50 years in Manas River Valley, Xinjiang[J]. Science in China, 2006, 49(2): 163-175.
- [4] 瓦哈甫·哈力克,塔西甫拉提·特依拜,海米提·依米提.干旱区绿洲农业结构与水资源合理利用研究:以新疆策勒绿洲为例[J].云南农业大学学报,2004(6):737-742.
- [5] Xue X, Liao J, Hsing Y, et al. Policies, land use, and water resource management in an arid oasis ecosystem[J]. Environmental Management, 2015, 55(5): 1036.
- [6] Yu Y, Disse M, Yu R, et al. Large-scale hydrological modeling and decision-making for agricultural water consumption and allocation in the main stem Tarim River, China[J]. Water, 2015, 7(6): 2821-2839.
- [7] 李宝富,陈亚宁,李卫红,等.基于遥感和SEBAL模型的塔里木河干流区蒸散发估算[J].地理学报,2011,66(9):1230-1238.
- [8] Liu Y, Shen M, Zhao J, et al. A new optimization method for the layout of pumping wells in oases: application in the Qira Oasis, Northwest China[J]. Water, 2019, 11(5): 970.
- [9] 赵文智,吉喜斌,刘鹄.蒸散发观测研究进展及绿洲蒸散发研究展望[J].干旱区研究,2011,28(3):463-470.
- [10] Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [11] 严坤,王玉宽,徐佩,等.岷江源区Hargreaves法适用性与未来参考作物蒸散量预测[J].农业机械学报,2018,49(4):273-281.
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 [J]. Fao, Rome, 1998, 300(9): D05109.
- [13] Xiang K, Li Y, Horton R, et al. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration-a review [J]. Agricultural Water Management, 2020, 232:

- 106043.
- [14] Yagob D, Deepak J, Ahmad F, et al. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 399(3/4):422-433.
- [15] 段春锋, 缪启龙, 曹雯, 等. 西北地区小型蒸发皿资料估算参考作物蒸散[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4):94-99.
- [16] 左德鹏, 徐宗学, 刘兆飞. 基于气温的潜在蒸散发量估算方法在我国西北干旱地区的应用比较[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(10):123-131.
- [17] 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.
- [18] Tabari H. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates [J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(10):2311-2337.
- [19] Yoder R E, Odhiambo L O, Wright W C. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2005, 21(2):197-202.
- [20] Pandey P K, Dabral P P, Pandey V. Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2016, 4(1):52-63.
- [21] Trajkovic S, Kolakovic S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(14):3057-3067.
- [22] 刘松林, 康银红. 多种  $ET_0$  计算方法在四川省湿润气候区适用性的评价研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(增刊1):111-117, 127.
- [23] 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发腾量计算方法评价[J]. *水利学报*, 2010, 41(12):1497-1505.
- [24] 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(6):633-637.
- [25] 王永东, 邱永志, 许波, 等. 参考作物蒸散量计算方法在极端干旱区的适用性[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(3):390-396.
- [26] 马亮, 魏光辉. 新疆塔里木盆地西缘参考作物蒸散发模型的适用性评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(8):132-137.
- [27] 樊湘鹏, 许燕, 周建平. 参照作物蒸散量计算模型在新疆干旱地区适用性研究[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(20):273-280.
- [28] 袁小环, 杨学军, 陈超, 等. 基于蒸渗仪实测的参考作物蒸散发模型北京地区适用性评价[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13):104-110.
- [29] Xu J, Peng S, Ding J, et al. Evaluation and calibration of simple methods for daily reference evapotranspiration estimation in humid East China [J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2013, 59(6):845-858.
- [30] Hargreaves G H. Defining and using reference evapotranspiration [J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 1994, 120(6):1132-1139.
- [31] 庞营军, 雷加强, 曾凡江, 等. 新疆维吾尔自治区策勒县绿洲-沙漠过渡带小气候特征[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(5):240-245.
- [32] 刘毅. 塔里木盆地南缘绿洲灌区地表水与地下水联合利用研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2019.
- [33] 毛东雷, 蔡富艳, 方登先, 等. 新疆策勒绿洲-沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1):88-99.
- [34] 杜加强, 熊珊珊, 刘成程, 等. 黄河上游地区几种参考作物蒸散量计算方法的适用性比较[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(5):831-840.
- [35] Sheikh V, Mohammadi M. Evaluation of reference evapotranspiration equations in semi-arid regions of northeast of Iran [J]. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2013, 5(5):450.
- [36] 胡顺军, 潘渝, 康绍忠, 等. Penman-Monteith 与 Penman 修正式计算塔里木盆地参考作物潜在腾发量比较[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(6):30-35.
- [37] 刘战东, 刘祖贵, 秦安振, 等. 黄淮海地区基于温度的  $ET_0$  计算方法比较及修正[J]. *节水灌溉*, 2014(4):1-6, 10.
- [38] 范留飞, 皮原月, 于洋, 等. 基于辐射和温度的  $ET_0$  模型在吐鲁番地区的比较与修正[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(2):267-75.
- [39] 高云飞. 黑河上游天老池流域亚高山草地蒸散发研究[D]. 兰州:兰州大学, 2016.
- [40] 张昊, 郝春雷, 董喆, 等. 燕山北部丘陵温热区  $ET_0$  估算方法比较及修正[J]. *节水灌溉*, 2018(8):81-84, 89.



## Adaptability evaluation and modification of $ET_0$ models in a typical oases on southern margin of the Taklimakan Desert

Wang Dagang<sup>1,2</sup>, Yu Yang<sup>1,2</sup>, Sun Lingxiao<sup>1,2</sup>, He Jing<sup>1,2</sup>, Malik Ireneusz<sup>1,3</sup>, Wistuba Malgorzata<sup>1,3</sup>,  
Jiang Fengqing<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 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Reconstructing Environmental Change, University of Silesia, Katowice 40866, Poland)

**Abstract:**  $ET_0$  model has different applicability in different regions, and the applicability of  $ET_0$  model in the extremely arid oasis in the southern margin of the Taklimakan Desert is relatively scarce. Based on the daily meteorological data of Qira meteorological station during the growing season (April-October) from 2006 to 2014, and the measured data of automatic weighing lysimeter as the standard, the applicability of each model in Qira oasis was evaluated 6 kinds of commonly used  $ET_0$  models on the daily and monthly time scales by using the four indexes of maximum absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), model efficiency (EF) and consistency index ( $d$ ), and using regression correction method and proportional correction method calibrated  $ET_0$  methods respectively. The results showed that: (1) Hargreaves-Samani (H-S) was overestimated to a large extent on the daily and monthly time scales, while other models were underestimated to varying degrees. The fitting degree from high to low was FAO-56PM, Jensen-Haise, Priestley-Taylor, Makkink, Turc and H-S. (2) The monthly value variation trend of all  $ET_0$  models was basically consistent with the lysimeter measured values. Except for the monthly value of  $ET_0$  calculated by FAO-56PM and TURC models, which reached the peak value in June, the other models all reached the peak value in July. At the scale of growing season, the monthly value of  $ET_0$  of all models was significantly correlated with the lysimeter measured values. (3) On the daily and monthly time scales, the calculated results of  $ET_0$  model modified by the regression correction method and the proportional correction method were significantly correlated with the measured values of the lysimeter, and the regression correction method was superior to the proportional correction method. (4) Correlation analysis showed that the main meteorological factors affecting  $ET_0$  in Qira oasis from high to low were:  $T_{\text{mean}} > T_{\text{min}} > P > T_{\text{max}} > R_s > U_2 > RH_{\text{mean}}$ .

**Key words:** southern margin of the Taklimakan Desert; Qira oasis; reference crop evapotranspiration; adaptation evaluation; model modification