

# 辐射模型不同率定方法总辐射数据缺失插补比较

吴立峰<sup>1</sup> 刘惠英<sup>1</sup> 张富仓<sup>2</sup>

(1. 南昌工程学院鄱阳湖流域水工程安全与资源高效利用国家地方联合工程实验室, 南昌 330099;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 在长期连续观测中,总辐射( $R_s$ )的观测数据通常有不同程度的缺失。基于日照时数的 Ångström - Prescott (A - P)模型是一种广泛应用且精度较高的总辐射估算经验模型。选取 A - P 模型 3 种不同参数率定方法(M1:每年率定,M2:分月率定,M3:多年率定),基于 6 个辐射站的辐射资料,对年平均  $R_s$ 、年平均  $ET_0$ 、参数取值和插补精度进行了比较。 $t$  检验结果表明,3 种方法下 A - P 模型在昌都站数据插补无明显差异, $R_s$  年际变化大是造成该站  $R_s$  模拟不准的主要原因。在宜昌和南宁站,M1 方法进行数据插补精度高于其他方法,M1 方法  $R_s$  缺失天数分别为 40 d 和 70 d 时,两站计算的参考作物蒸发蒸腾量( $ET_0$ )与实测  $R_s$  计算的  $ET_0$  相比, $t$  检验无明显差异。M2 与 M3 相比精度稍高,但在昆明、赣州、杭州和南宁站冬季精度更高且 6—8 月份精度更低。与 1990 年以前相比,各站点 A - P 模型参数  $a$  在 1990 年以后有明显上升,工业污染导致气溶胶增加是原因之一。A - P 模型在极端年份率定精度不高,在极端炎热气候年份,应用该模型用于灌溉预报时会低估作物耗水量,可能会给决策带来风险。该研究结果可用于 A - P 模型的风险评估和提高总辐射时间序列数据缺失情况下的插补精度。

**关键词:** Ångström - Prescott 模型; 参数率定; 总辐射量; 参考作物蒸发蒸腾量; 插补

**中图分类号:** P422.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0172-09

## Comparison of Different Calibration Methods on Ångström - Prescott Model for Missing Data Interpolation

Wu Lifeng<sup>1</sup> Liu Huiying<sup>1</sup> Zhang Fucang<sup>2</sup>

(1. State-province United Engineering Laboratory on Water Engineering Safety and Resources Efficient Utilization of Poyang Lake Basin, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In the long-term continuous observation, observed data of global solar radiation ( $R_s$ ) usually has different degrees of missing. Ångström - Prescott (A - P) model, which was based on sunshine hours, is a widely used empirical model that has high precision. Three different parameters calibrated methods for A - P model were chosen, which were annually (M1), monthly (M2) and yearly (M3) calibrated by only one time. Radiation data from six radiation stations were used, which were Changdu, Yichang, Kunming, Ganzhou, Hangzhou and Nanning stations. Annual average  $R_s$ , annual average reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) and parameter selection were compared by the three methods, at last, three stations were selected for interpolation accuracy evaluation. The results were as follow:  $t$ -test results showed that no difference among the three methods in use of data interpolation in Changdu station, severe changes of  $R_s$  inter annual was the main reason for poor accuracy. The accuracy of M1 method for data interpolation was higher than those of other methods in Yichang and Nanning stations. When missing

收稿日期: 2016-01-30 修回日期: 2016-03-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA100504)和教育部高等学校创新引智计划(111 计划)项目(B12007)

作者简介: 吴立峰(1985—),男,讲师,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: china\_sw@163.com

通信作者: 张富仓(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

data were 40 d and 70 d, there were no difference between M1 method calibrated and measured values of  $R_s$  in calculating  $ET_0$ , but when the missing data was over 20 d, M2 and M3 methods showed significant difference between estimated and measured  $R_s$ , its influence on calculating  $ET_0$  was the same. Compared with the calibration method for many years, the monthly calibrated method had a little higher precision in estimating  $R_s$ , with higher precision in winter and lower precision from June to August in Ganzhou, Hangzhou, Kunming and Nanning stations. Compared with the results before 1990, the parameter  $a$  of A - P model was increased dramatically in all stations after 1990, industrial pollution led to an increased aerosol was one of main reasons. In extremely hot year, the accuracy of A - P model was lower than that in normal year, application of the model to irrigation forecast would underestimate crop water consumption, which may bring risk for decision-making. The results can be used in A - P model for risk assessment and improving the total radiation time series data of the interpolation precision of missing cases.

**Key words:** Ångström - Prescott model; parameters calibration; global solar radiation; reference evapotranspiration; interpolation

## 引言

地表总辐射 ( $R_s$ ) 是蒸散量估算和灌溉制度制定<sup>[1-2]</sup>、作物产量预报<sup>[3]</sup>、太阳能开发利用<sup>[4]</sup>、气候变化研究<sup>[5]</sup>等领域重要的基础数据, 获得准确的  $R_s$  对于以上领域都有重要的科学价值和现实意义<sup>[6]</sup>。

尽管  $R_s$  信息如此重要, 但由于观测设备昂贵, 且维护成本较高, 我国只设置了 100 余个太阳辐射观测台, 其中具备比较完整的长系列资料且仍在运行的观测台不足 60 个。虽然经过非常严格的质量控制, 但有观测条件的  $R_s$  数据在时间序列上并不完整, 数据缺失现象仍普遍存在。通过常规资料估算  $R_s$  是解决辐射数据不完整的主要方法, 比如基于卫星图片分析方法<sup>[7]</sup>、人工神经网络方法<sup>[8]</sup>、基于经验系数<sup>[9-11]</sup>的模型法等, 其中 Ångström - Prescott 模型 (A - P 模型) 在我国得到了广泛的应用, 并被认为是最适合我国的辐射估算方法<sup>[10]</sup>。LIU 等<sup>[12]</sup>研究发现, 在我国北方地区, 与利用多年长系列校正相比, 分月率定、分季度率定和分夏、冬半年率定并不能提高模型的预测精度。LI 等<sup>[13]</sup>发现, 长江流域分月率定法要略好于多年一次率定。LIU 等<sup>[14]</sup>研究发现, 当缺失数据达到 100 个时, A - P 模型的稳定性会受到严重影响。

综上所述, 前人研究主要侧重 A - P 模型在未来预测总辐射量方面的参数取值、率定方法比较, 关于缺失数据的影响虽有涉及, 但插补缺失数据的方法及评估方面的研究还未见报道。构建完整的总辐射时间序列有助于研究总辐射的变化趋势和提高区域辐射资源量和  $ET_0$  估算的精度。因此, 本文拟比较不同的模型率定方法对辐射量估算的偏差和对参考作物蒸发蒸腾量的估算偏差, 以期对插补缺失辐

射数据提供理论基础和适宜方法。

## 1 材料与方方法

### 1.1 计算公式

基于日照时数的地表总辐射 ( $R_s$ ) 估算模型是由 Ångström 首先提出, 并由 Prescott 改进而形成的经验模型, 被称为 Ångström - Prescott (A - P) 模型。其表达式为

$$R_s = \left( a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (1)$$

$$\text{其中 } R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (2)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left( \frac{2\pi}{365} J \right) \quad (3)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left( \frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right) \quad (4)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (5)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (6)$$

式中  $R_a$ ——大气层顶部所接收的太阳辐射量, MJ/( $m^2 \cdot d$ )

$N$ ——最大可能日照时数, h

$n$ ——实际日照时数, h

$G_{sc}$ ——太阳常数, 取 0.082 MJ/( $m^2 \cdot \text{min}$ )

$d_r$ ——日地相对距离  $J$ ——日序

$\omega_s$ ——太阳高度角, rad

$\varphi$ ——纬度, rad  $\delta$ ——赤纬, rad

$a$ ——乌云完全覆盖时太阳辐射到达地表的比, 介于 0 ~ 1 之间

$b$ ——完全晴空时太阳辐射到达地表的比, 介于 0 ~ 1 之间

A-P模型的参数校正通常使用最小二乘法,建立  $R_s/R_a$  与  $n/N$  的关系。使用3种校正方法,将长系列以日为单位的  $R_s/R_a$  与  $n/N$  每年进行一次最小二乘回归,每年率定1次,记为M1;将长系列以日为单位的  $R_s/R_a$  与  $n/N$  多年相同月份进行最小二乘回归,共率定12次,记为M2;将长系列以日为单位的  $R_s/R_a$  与  $n/N$  进行最小二乘回归,产生一组参数,记为M3。

参考作物蒸发蒸腾量 ( $ET_0$ ) 采用 FAO 56 推荐的 Penman-Monteith 公式 (P-M) 进行计算,以  $R_s$  实测值代入该公式得到的结果作为对照值,关于 P-M 公式计算方法已有大量报道,此处不再赘述<sup>[15-18]</sup>。

## 1.2 站点数据控制及参数校正

选取我国西南部和东南部数据序列比较完整的6个站点,其数据缺失率为2.2%~4.6%,数据长度都超过40 a。这些站点位于青藏高原冻土区、西南紫色土区和东南红壤丘陵区,地理坐标为东经80.08°~120.17°,北纬20.03°~33.02°,海拔高度为43.2~3307.1 m,地势西高东低。其基本情况如表1所示。

表1 辐射站坐标、高程和数据基本情况

Tab.1 Location, altitude and basic data situation of radiation stations

编号	站名	纬度/ (°)	经度/ (°)	高程/ m	数据起止 年份	数据缺 失率/%
1	昌都	31.15	97.17	3307.1	1957—2013	3.5
2	昆明	25.02	102.68	1896.8	1959—2013	4.6
3	宜昌	30.70	111.30	134.3	1957—2013	3.2
4	赣州	25.85	114.95	124.7	1957—2013	3.0
5	杭州	30.23	120.17	43.2	1959—2013	2.8
6	南宁	22.82	108.35	73.7	1961—2013	2.2

气象数据来自中国气象科学数据共享服务网,数据发布前已经进行了严格的质量控制,但仍存在部分数据缺失的情况,因此在使用前进行了进一步的数据筛选:①如果实测  $R_s$ 、日最高气温、日最低气温、平均相对湿度、平均风速和日照时数有一个及以上缺失,则删除该日所有数据。②如果  $R_s/R_a$  或者  $n/N$  大于1,则删除该日所有数据。③如果某月有10 d以上数据缺失,则删除该月所有数据。

## 1.3 模型评估

选取3种模拟情景对A-P模型不同率定方法进行模型精度评估,假定每年数据随机缺失10~100 d,具体方法为在原数据序列基础上,每年分别随机“删除”10,20,⋯,100个自然日,分别用3种率定方法对剩余数据进行模型参数重新率定,对“删

除”数据进行插补,评估插补精度和不同插补方法对  $ET_0$  的影响,抽样时段为1970—2013年,每个情景共计模拟4400次(每年重复100次)。

## 1.4 统计分析

使用辐射模型和参考作物蒸发蒸腾量模型常用的4个评价指标:均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差( $n_{RMSE}$ )、平均偏差(MBE)和  $t$  统计量,其计算式为

$$R_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (S_i - O_i)^2} \quad (7)$$

$$n_{RMSE} = R_{RMSE} / \bar{O} \times 100\% \quad (8)$$

$$M_{BE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (S_i - O_i) \quad (9)$$

$$t = \sqrt{\frac{(m-1)M_{BE}^2}{R_{RMSE}^2 - M_{BE}^2}} \quad (10)$$

式中  $m$ ——样本容量

$S_i$ ——模拟值  $O_i$ ——观测值

$\bar{O}$ ——观测平均值

RMSE 和 MBE 越小,说明模拟效果越好,  $n_{RMSE} \leq 10\%$ ,认为模拟结果优秀,  $10\% < n_{RMSE} \leq 20\%$ ,认为模拟结果良好,  $20\% < n_{RMSE} \leq 30\%$ ,认为模拟效果合理,  $30\% < n_{RMSE} \leq 40\%$ ,认为模拟结果一般;  $n_{RMSE} > 40\%$ ,认为模拟结果较差<sup>[19]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 A-P模型不同率定方法对年平均 $R_s$ 的影响

不同率定方法下模拟和实测年平均  $R_s$  和统计结果如图1和图2所示。站1多年平均  $R_s$  变化最剧烈,其值介于10.2~19.8 MJ/( $m^2 \cdot d$ )之间。总体上,M1方法与实测站1年平均  $R_s$  偏差最小(图1)。M2和M3方法与实测年平均  $R_s$  相比,在20世纪70年代以前呈现整体低估,但偏差在2.0 MJ/( $m^2 \cdot d$ )以内。与1988年相比,1989—1992年多年平均  $R_s$  呈逐年下降趋势,M2和M3方法则降幅很小,与实测和M1方法相差达2.0~5.5 MJ/( $m^2 \cdot d$ ),其后总体模拟精度较高,2002、2008年,M2和M3方法与实测年平均  $R_s$  差值分别为2.5、1.5 MJ/( $m^2 \cdot d$ )。

对于站2,M2和M3方法模拟值与实测年平均  $R_s$  模拟值在前3年出现趋势背离,实测  $R_s$  在前3年逐渐下降,而M2和M3方法模拟值逐年升高,并且偏差逐年拉大。其后在1982年以前和以后,M2和M3方法与实测  $R_s$  相比大体上分别呈不同程度高估和低估。对于站3和站4,尽管M2和M3方法模拟值与实测值的偏差大于M1方法模拟值与实测值的偏差,但除个别年份外,其差值均在1.5 MJ/( $m^2 \cdot d$ )

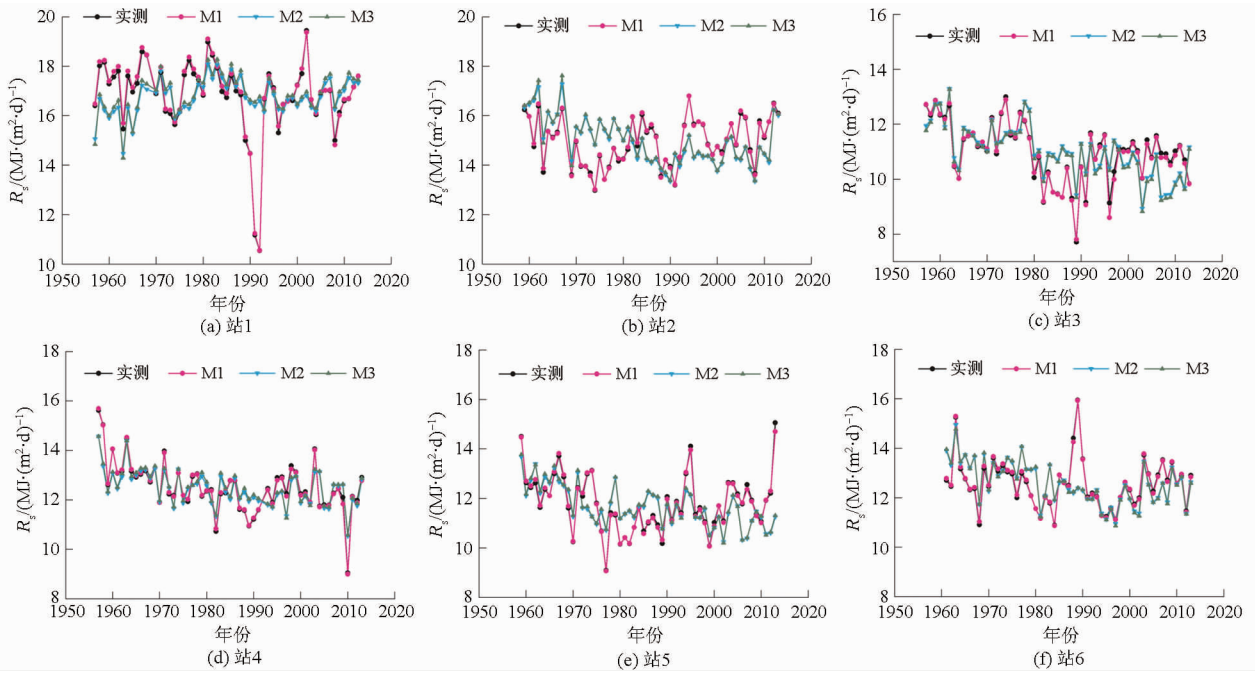


图 1 不同率定方法年平均  $R_s$

Fig. 1 Yearly average  $R_s$  with different calibrated methods

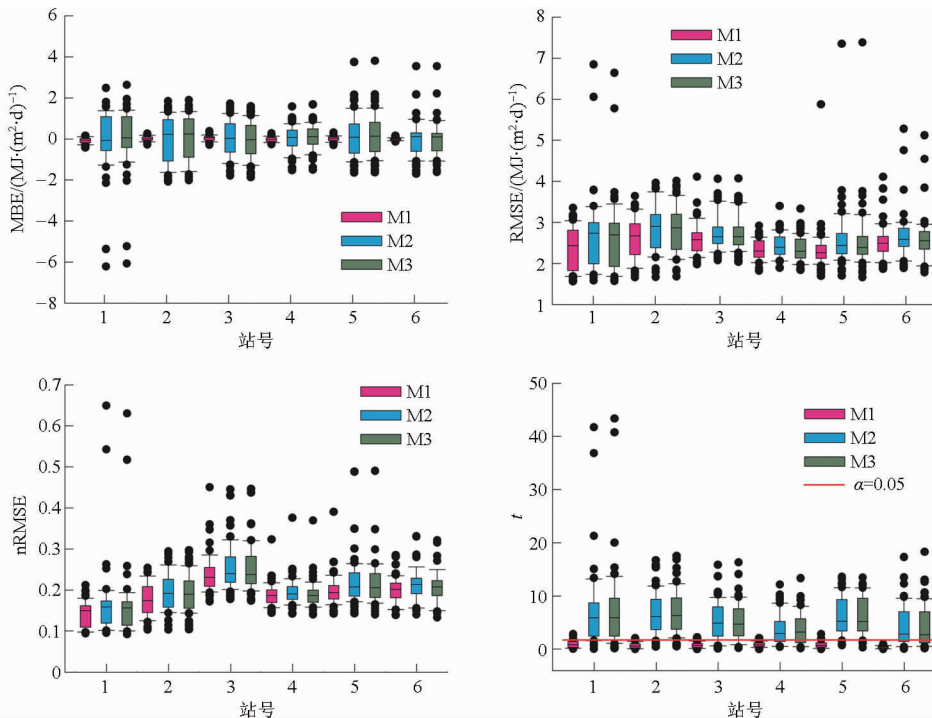


图 2 不同率定方法  $R_s$  统计结果

Fig. 2 Statistical results of  $R_s$  with different calibrated methods

以内(图 1c、1d)。对于站 5, M2 和 M3 方法模拟值与实测值在 20 世纪 70 年代以前偏差较小,其后多年平均  $R_s$  的极值模拟与实测值偏差均较大,除 2013 年以外,误差均在  $2.0 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  以内。对于站 6, M2 和 M3 方法模拟值与实测值仅在 3 年偏差在  $2.0 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  以上,在 1991 年以后,各方法模拟值与实测值差异不大。

与 M2 和 M3 方法相比, M1 方法各站  $R_s$  的 MBE

更小,其离群点也在上下 1/4 限附近,而 M2 和 M3 方法在某些年份偏差较大。M1 方法各站  $R_s$  的 RMSE 和 nRMSE 的上下 1/4 限和中位线均略低于 M2 和 M3 方法,此外, M1 方法各站  $R_s$  的 nRMSE 均在 0.3 以下,处于模拟精度合理水平,而 M2 和 M3 方法某些年份在 0.3 以上,这可能会给 A-P 模型在蒸发蒸腾量估算和作物生长方面的应用带来不确定性。M1 方法各站年平均  $R_s$  的  $t$  检验值箱型图的

中位数均小于  $1.65 (\alpha < 0.05)$ , 说明该方法率定下  $1/2$  以上的年份  $R_s$  与相应实测值没有明显差异; 而其他方法与实测值相比没有明显差异的年份不足  $1/4$ 。

### 2.2 A-P 模型不同率定方法对年平均 $ET_0$ 的影响

A-P 模型不同率定方法对年平均  $ET_0$  的影响如图 3 和图 4 所示。从图 3 可以看出, 年平均  $ET_0$  变化趋势与年平均  $R_s$  相似, 但与年平均  $R_s$  相比, 其

相对误差率略低于  $R_s$ , 且个别年份精度较差, 如站 1 的 1990—1992 年, M2 和 M3 方法绝对偏差最大达 30% 左右, 这也造成了其 MBE 低估 0.4 mm/d 以上, RMSE 在 0.6 mm/d 以上, nRMSE 也大于 0.3, 考虑  $ET_0$  在年内分布并不均匀, 作物生长季和需水高峰期其偏差可能更大, 这样的偏差在用于灌溉预报或作物生长模拟可能会造成较大的偏差和一定程度的风险。年平均  $R_s$  相似, 各站 M1 方法的  $t$  检验箱型

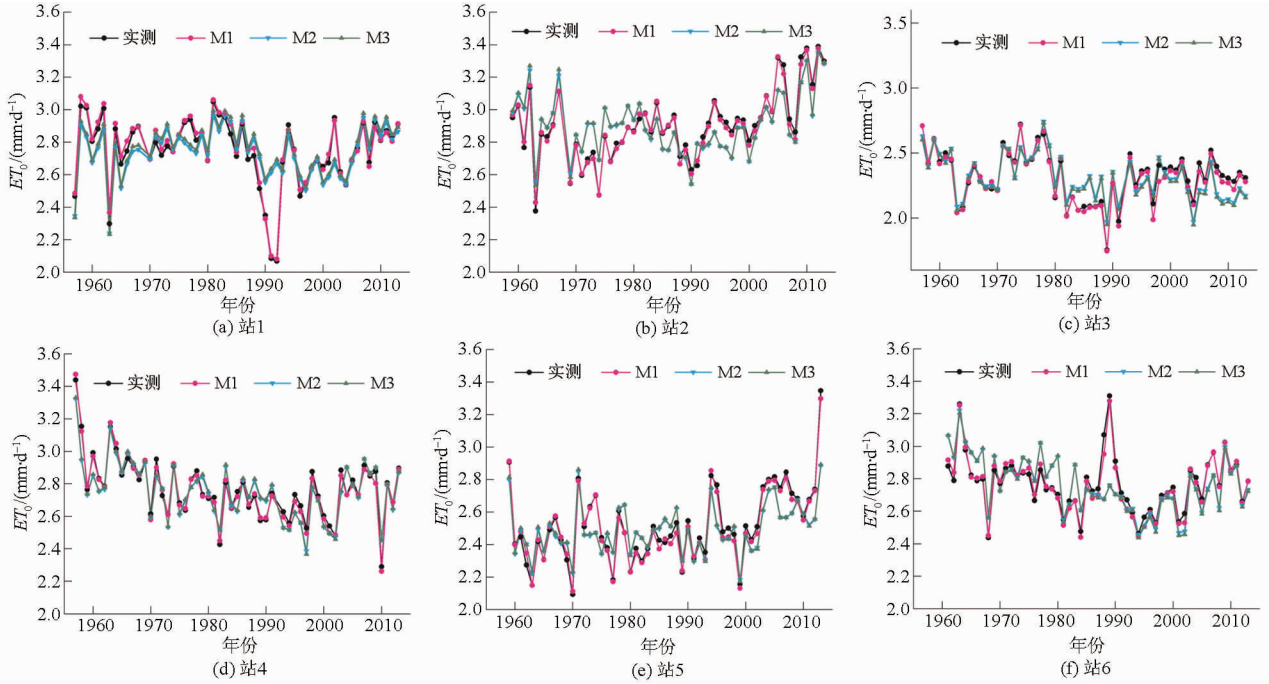


图3 各站不同率定方法年平均  $ET_0$

Fig. 3 Yearly average  $ET_0$  with different calibrated methods

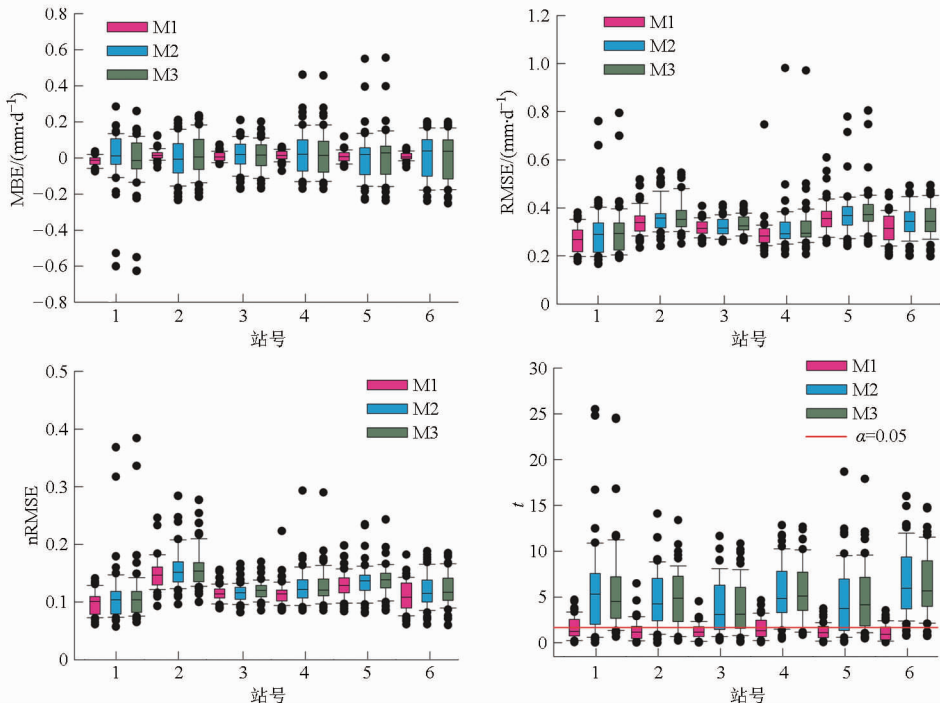


图4 各站不同率定方法  $ET_0$  统计结果

Fig. 4 Statistical results of  $ET_0$  with different calibrated methods

图的中位值也小于 1.65 ( $\alpha < 0.05$ ), 这说明 M1 方法模拟生成的  $ET_0$  序列与实测  $ET_0$  在至少 1/2 年份统计上无明显差异, 而 M2 和 M3 方法各站相应年份不足 1/4。

### 2.3 A-P 模型不同率定方法参数比较

M1、M2 和 M3 率定方法下 A-P 模型的  $a$ 、 $b$ 、 $a+b$  和  $R^2$  如图 5 和图 6 所示。从图 5 可以看出, M3 方法下各站  $a$  值介于 0.13 ~ 0.21 之间, 其中, 站 1 的  $a$  值最大, 站 5 最小;  $b$  值介于 0.55 ~ 0.63

之间, 变异系数为 4.7%, 其中站 1 仍为最大, 站 4 最小;  $a+b$  值介于 0.70 ~ 0.84 之间, 位于青藏高原东部的站 1 最大, 位于赣南的站 4 最小。站 1 的决定系数  $R^2$  最小, 为 0.69, 该站  $R_s$  年际变化剧烈是造成 A-P 模型率定参数变化最剧烈的主要原因, 其余各站  $R^2$  均在 0.82 以上。LIU 等<sup>[10]</sup> 用 2000 年以前辐射数据评估了我国 A-P 模型参数, 其中站 1 略有差异, 其  $a$  和  $b$  值分别为 0.19 和 0.64, 可见 M3 方法下的 A-P 模型参数并未随辐射数据年限增加产生较大波动。

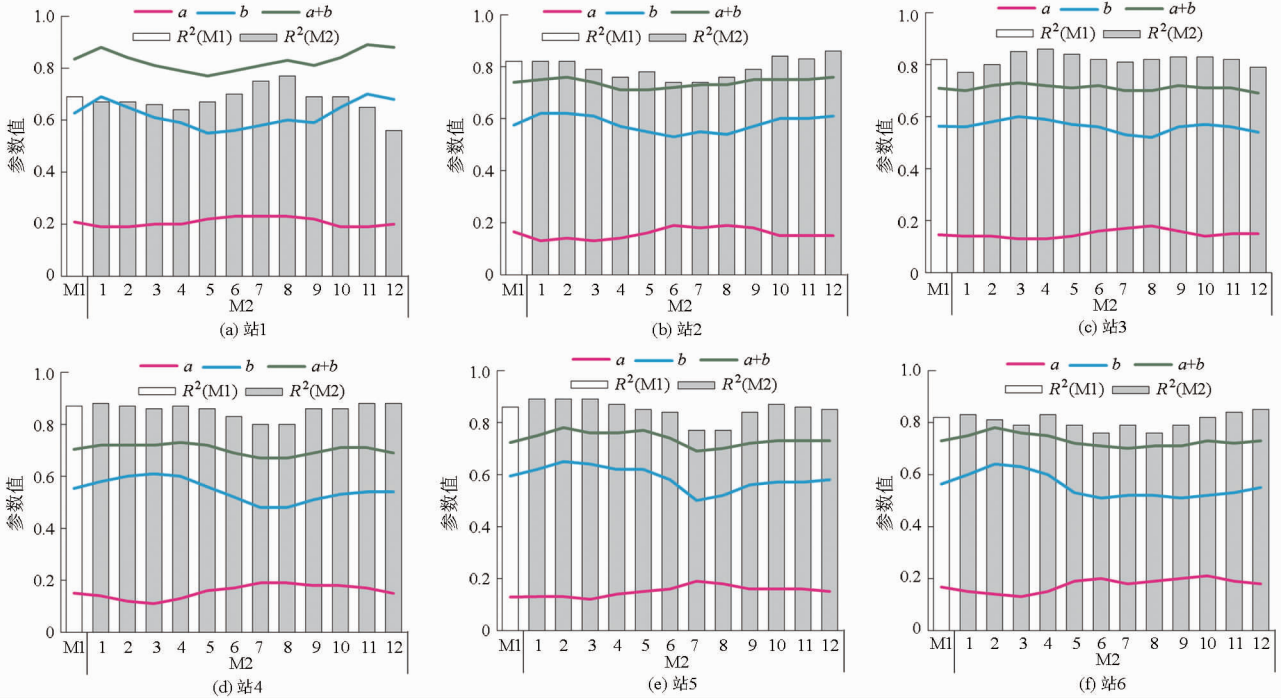


图 5 M1 和 M2 方法参数以及决定系数

Fig. 5 Parameters and determination coefficients of M1 and M2 methods

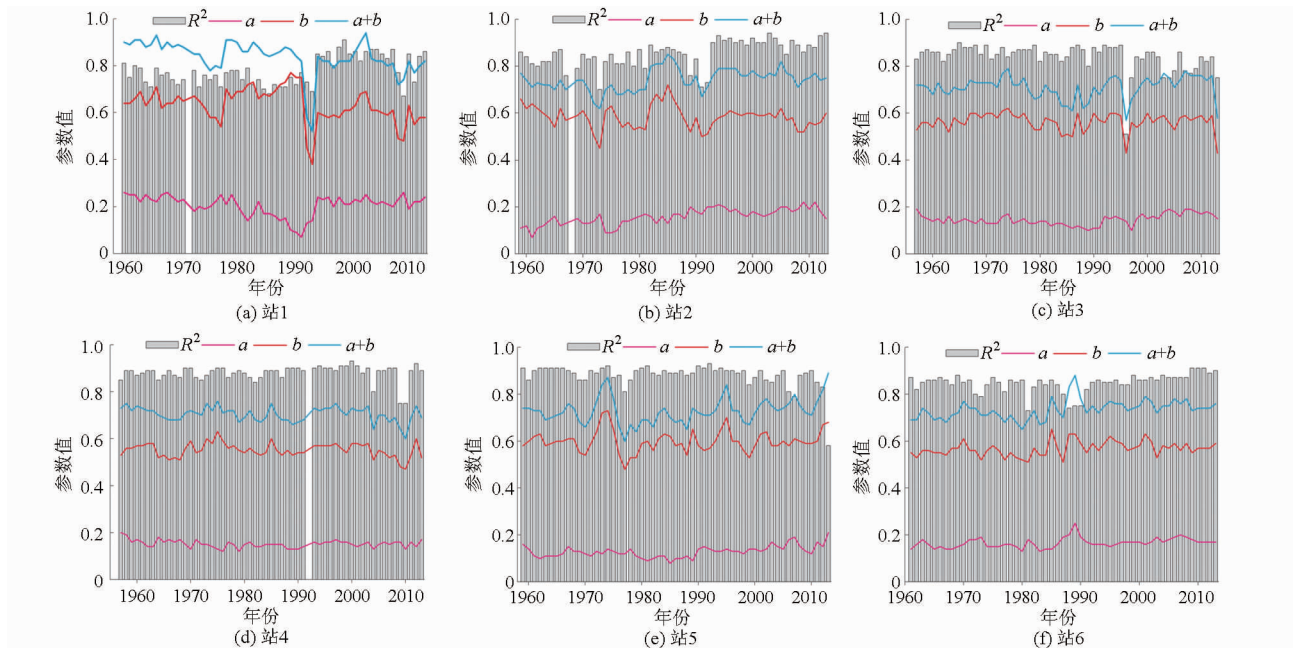


图 6 率定 (M1) 参数值和决定系数  $R^2$  变化情况

Fig. 6 Changes of parameters and determination coefficients of M1 method

M2方法下各站每月 $a$ 值介于0.11~0.23之间,其中,位于青藏高原的站1的 $a$ 值年内差异最大,而位于赣南的站4年内差异最小。从年内变化看,站1~5,在6—8月份 $a$ 值较高,站6的 $a$ 值在年内呈双峰分布,并在6月份和10月份达到峰值。

各站每月 $b$ 值介于0.48~0.70之间,变异系数介于4%~9%之间(图5)。其中,站1的 $b$ 值在11月一次年1月份较高,在5月份达到最低;站2在12月一次年3月份较高,6—8月份较低;站3和站4趋势相似,在3、4月份达到较高,而在7、8月份较低;站5和站6在2月份 $b$ 值最高,7月份最低。

各站每月 $a+b$ 值介于0.67~0.89之间,变异系数介于2%~5%之间,在 $a$ 、 $b$ 和 $a+b$ 三者之中变化幅度最小(图5)。其中,站1的 $a+b$ 值整体高于其他各站,在11月一次年2月份较高,1—5月份降幅较大,并在5月份达到最低,之后缓慢回升;站2的 $a+b$ 值整体变化趋势比较平缓,在9月一次年2月份较高;站3和站4的 $a+b$ 值整体变化趋势也比较平缓,无明显峰值月份,但站4的 $a+b$ 值在7、8月份达到低谷;站5和站6的 $a+b$ 值均在2月份达到最大,站5在7、8月份较低,站6则无明显低谷。

各站每月 $R^2$ 介于0.56~0.89之间,变异系数介于4%~8%之间。其中,站1在7、8月份较高,而站3在3、4月份较高;站1在12月份 $R^2$ 仅为0.56,站3则在1月份最低,为0.77;而站2、站4、站5、站6的 $R^2$ 在6—8月份较低,在冬季和春季较高。LIU等<sup>[14]</sup>研究发现,由于受冬季气溶胶增加造成环境污染的影响,在我国北方站点每月率定下的 $R^2$ 在1月份和12月份较低。本研究中,站1在12月份和1月份较低,但该站位于工业欠发达的地区,说明气溶胶增加并不是M2率定方法下A-P模型精度下降的唯一原因,该成因还有待进一步研究。

## 2.4 M1方法参数变化分析

M1方法下各站参数与 $R^2$ 如图6所示。由图6可知,除站3在1996年和站5在2013年的 $R^2$ 有明

显下降外,各站点每年A-P模型的 $R^2$ 均在0.7以上,对于站1,M1方法与M2和M3方法 $R^2$ 有明显提高,对于其他站,M1方法的平均 $R^2$ 并没有明显提高。 $R^2$ 越低表明辐射与日照时数的同步性越差。说明辐射与日照的同步性并没有明显改善。从A-P模型的结构看,参数 $a$ 代表乌云密布时 $R_s$ 与 $R_0$ 的比例, $a+b$ 代表完全晴空时 $R_s$ 与 $R_0$ 的比例。各站 $a+b$ 值变化比较剧烈,结合图1可以看出,在数十年观测过程中,地表接受的总辐射发生了剧烈的变化,而M2和M3方法在大部分年份都存在一定程度的高估和低估,造成了其与M1方法相比RMSE、nRMSE和 $t$ 检验等有明显的下降。

对于站3,1996年1月1日—9月16日 $R_s/R_0$ 与 $n/N$ 的关系与9月17日—12月31日有明显差异(数据未给出),9月17日—12月31日参数与其他年份参数相比有明显下降,其原因还有待进一步研究,这是造成该年模拟精度不高的主要原因。对于站5,经统计发现,2013年该站气候比较炎热,7、8月份与多年平均该月份气温相比,高了3.5、3℃,因此该年 $R_s$ 为该站历年最大值,这一变化造成该年 $R^2$ 偏低。结合M2和M3方法,该站年平均 $R_s$ 和 $ET_0$ 的RMSE分别超过7 MJ/(m<sup>2</sup>·d)和0.3 mm/d,也说明在极端气候条件下,3种率定方法精度均不高。在应用于灌溉预报时,这种低估可能会造成预报灌水量远低于实际需水量,进一步加剧旱情,以上说明在极端炎热年份,A-P模型应用可能会给决策带来风险。

## 2.5 模拟情景下模型评估

不同率定方法对 $R_s$ 值的插补结果如图7所示。对于站1,M1方法的 $t$ 检验值小于M2和M3方法,但3种方法插补的 $R_s$ 值与实测 $R_s$ 值之间都有显著差异( $t > 1.65$ )。对于站3,当缺失 $R_s$ 数据少于20 d时,仅M1方法插补的 $R_s$ 值与实测值无明显差异( $\alpha < 0.05$ )。对于站6,当缺失 $R_s$ 数据少于10 d时,M1和M2方法无明显差异,当缺失 $R_s$ 数据达到20 d时,仅M1方法插补的 $R_s$ 值与实测值无明显差异。

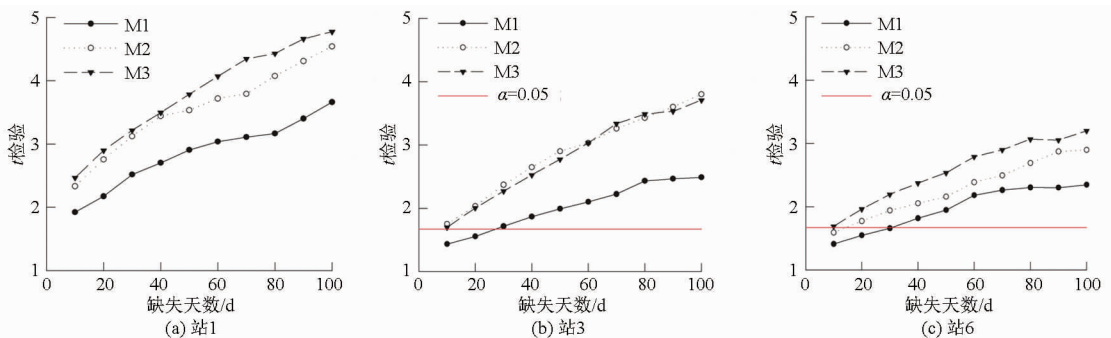


图7 缺失天数对 $R_s$ 值 $t$ 检验的影响

Fig. 7 Influence of missing days on  $R_s$  by  $t$ -test

不同率定方法对  $ET_0$  值的插补结果如图 8 所示。对于站 1, 与  $R_s$  结果相似, 3 种方法都与实测值有明显差异。对于站 3, 由于  $R_s$  只贡献一部分的蒸发蒸腾量, M1 方法对于数据缺失在 40 d 以内, 均与实测  $R_s$  计算的  $ET_0$  值无明显差异。对于站 6, 数据缺失达到 60 d, 采用 M1 方法计算  $ET_0$  仍与实测  $R_s$  计

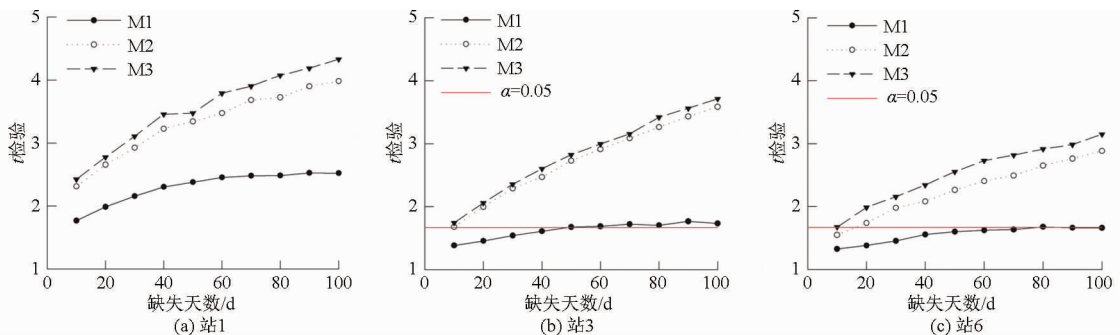


图 8 缺失天数对  $ET_0$  值  $t$  检验的影响

Fig. 8 Influence of missing days on  $ET_0$  by  $t$ -test

### 3 讨论

SOLER 等<sup>[20]</sup>发现在欧洲气候环境下使用 A-P 模型每月参数比固定一个参数估算  $R_s$  精度更高。PODESTA 等<sup>[21]</sup>研究阿根廷潘帕斯高原辐射与日照关系后, 建议使用月参数或者季度参数来避免时间规律造成的系统误差。MANZANO 等<sup>[22]</sup>研究显示, 在西班牙使用月参数和固定参数对  $R_s$  精度估算是等效的。HUSSAIN 等<sup>[23]</sup>发现, 将 A-P 模型分为暖季(4—9 月份)和冷季(10 月—次年 3 月份)单独率定, 估算  $R_s$  精度高于固定参数方法。LIU 等<sup>[12]</sup>对我国北方站点的研究发现, 分月率定方法(M2)与多年率定方法(M3)相比, RMSE 有微小提高, 但  $t$  检验无明显差异, 认为 2 种方法对未来预测精度是等效的。LI 等<sup>[13]</sup>基于长江流域站点研究发现, 对未来预报方面 M3 方法略好于 M2 方法。本研究结果表明, 每年率定一次 A-P 模型的方法(M1 方法)比 M2 和 M3 方法, 其 MBE、RMSE、nRMSE 和  $t$  检验率定结果均有明显提高, 造成这种现象的原因是由于全球变亮变暗<sup>[24]</sup>以及工业污染造成的气溶胶增加<sup>[14]</sup>的影响, 年平均  $R_s$  在较长时间序列存在明显的波动, M1 方法对年平均  $R_s$  模拟精度更高, 而 M2 和 M3 方法对  $R_s$  在大多数年份都存在着高估或低估的问题。因此, M1 方法对于数据缺失不多的情况下, 数据插补可能更有优势, 但年内数据缺失较多, 可能会影响模型稳定性, 此外, 该方法还存在无法预测未来的问题。

LIU 等<sup>[14]</sup>研究发现, 在我国北方站点, 由于冬季供暖燃烧大量化石燃料, 冬季(如 1 月份、12 月份)模拟精度均最低。本研究发现, 站 1 和站 3 在冬

季模拟精度最低; 而站 2、站 4、站 5 和站 6 模拟精度最低的月份通常出现在 6—8 月份, 可能是由于南方降雨频率更高, 夏季降雨更频繁, 云层薄厚变化更大致使辐射变化更加剧烈。

前人曾采用以 10 a 为步长, 取  $a$ 、 $b$  滑动平均值的方法观察参数对于时间的变化, 发现 1990 年以后全国的 6 个工业城市  $a$  值逐渐升高, 并认为这是由于工业化进程加快, 空气中气溶胶增加降低了辐射中直射的比例造成的<sup>[14]</sup>。本研究中, 除 3 个站点的某些年份外, 各个站点每年 A-P 模型的  $R^2$  均在 0.7, 并且与 M3 方法相比,  $R^2$  总体无明显下降, 说明尽管  $a$ 、 $b$  和  $a+b$  参数值呈现一定程度的变化, 但这种变化是对当年  $R_s/R_a$  和  $n/N$  变化的客观反映, 而  $t$  检验、RMSE 和 nRMSE 结果显示, 对于年平均  $R_s$  和  $ET_0$  的模拟, 以 1 a 为周期均有更高的率定精度, 精度的提高有助于时间序列数据插补精度的提高; 此外, 站点 2、3、5 在 1990 年以后 A-P 模型的参数有明显提高, 这与前人结果相一致<sup>[14]</sup>; 而站点 1 位于工业很不发达的地区, 该站在 1990 年以后 A-P 模型参数  $a$  值也有明显提高, 说明工业污染的气溶胶增加并不是 1990 年以后  $a$  值增大的唯一原因, 其他原因还有待进一步研究。

### 4 结论

(1) 3 种方法对于昌都站  $R_s$  和  $ET_0$  插补无明显差异。在宜昌和南宁站, 每年率定法在数据缺失 20 d 时, 插补值与实测值无明显差异; 而对于计算  $ET_0$ , 每年率定法的  $R_s$  缺失值分别在 40 d 和 70 d, 其与实测  $R_s$  计算结果相比无明显差异, 而另外 2 种方法相应天数仅为 10 d, 该方法对于数据缺失不多情况下



的数据插补精度更高。

(2)与1990年以前相比,各站点模型参数 $a$ 值在1990年以后有明显上升,工业污染是原因之一。

(3)A-P模型在极端年份率定精度不高,在极端炎热气候年份,将该模型用于灌溉预报时会低估作物耗水量,可能会给决策带来风险。

### 参 考 文 献

- 1 LIU X, MEI X, LI Y, et al. Variation in reference crop evapotranspiration caused by the Angstrom - Prescott coefficient: locally calibrated versus the FAO recommended[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7):1137 - 1145.
- 2 ALLEN R G, PRUITT W O, WRIGHT J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference  $ET_0$  by the FAO56 Penman - Monteith method[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1 - 2):1 - 22.
- 3 PORTER J R. AFRCWHEAT2: a model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen[J]. *European Journal Agronomy*, 1993, 2(2): 69 - 82.
- 4 郑健, 蔡焕杰, 王健, 等. 日光温室室内光合有效辐射基本特征分析[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(12):164 - 168.
- 5 SUSAN S, JAMES L, PHILIP A, et al. Solar radiation management could be a game changer[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(10):842.
- 6 LI H S, MA W B, LIAN Y W, et al. Estimating daily global solar radiation by day of year in China[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(10):3011 - 3017.
- 7 HAKUBA M Z, FOLINI D, SCHAEPMAN-STRUB G, et al. Solar absorption over Europe from collocated surface and satellite observations[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2014, 119(6):3420 - 3437.
- 8 ŞAHİN M, KAYA Y, UYAR M. Comparison of ANN and MLR models for estimating solar radiation in Turkey using NOAA/AVHRR data[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(5):891 - 904.
- 9 LIU X, MEI X, LI Y, et al. Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9):1433 - 1446.
- 10 LIU X, MEI X, LI Y, et al. Calibration of the Ångström - Prescott coefficients ( $a$ ,  $b$ ) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(3 - 4):697 - 710.
- 11 YAO W, LI Z, WANG Y, et al. Evaluation of global solar radiation models for Shanghai, China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 84:597 - 612.
- 12 LIU X, Mei X, Li Y, et al. Choice of the Angstrom - Prescott coefficients: are time-dependent ones better than fixed ones in modeling global solar irradiance? [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51:2565 - 2574.
- 13 LI M, FAN L, LIU H, et al. Impact of time interval on the Ångström - Prescott coefficients and their interchangeability in estimating radiation[J]. *Renewable Energy*, 2012, 44:431 - 438.
- 14 LIU J, LINDERHOLM H, CHEN D, et al. Changes in the relationship between solar radiation and sunshine duration in large cities of China[J]. *Energy*, 2015, 82:589 - 600.
- 15 陈晟, 李森, 陈雷, 等. 基于气温和 DC - BP - NN 的河西走廊月度  $ET_0$  估算模型[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12):140 - 147.  
CHEN Sheng, LI Miao, CHEN Lei, et al. Monthly reference crop evapotranspiration estimation model based on air temperature and DC - BP - NN in Hexi corridor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12):140 - 147. (in Chinese)
- 16 王升, 陈洪松, 聂云鹏, 等. 基于基因表达式编程算法的参考作物腾发量模拟计算[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4):106 - 112.  
WANG Sheng, CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, et al. Simulation of reference evapotranspiration based on gene-expression programming method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4):106 - 112. (in Chinese)
- 17 张倩, 段爱旺, 高阳, 等. 基于温度资料估算参考作物腾发量的方法比较[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2):104 - 109.  
ZHANG Qian, DUAN Aiwang, GAO Yang, et al. Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation methods using temperature data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2):104 - 109. (in Chinese)
- 18 张倩, 段爱旺, 王广帅, 等. 基于天气预报的参照作物腾发量中短期预报模型研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(5):107 - 114.  
ZHANG Qian, DUAN Aiwang, WANG Guangshuai, et al. Middle and short term forecasting models for reference evapotranspiration based on daily weather forecast[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5):107 - 114. (in Chinese)
- 19 JI J, CAI H, HE J, et al. Performance evaluation of CERES-Wheat model in Guanzhong Plain of Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 144(2):1 - 10.
- 20 SOLER A. Statistical comparison for 77 European stations of 7 sunshine-based models[J]. *Solar Energy*, 1990, 45(6):365 - 370.
- 21 PODESTA G P, NUNEZ L, VILLANUEVA C A, et al. Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123(1 - 2): 41 - 53.
- 22 MANZANO A, MARTIN M L, VALERO F, et al. A single method to estimate the daily global solar radiation from monthly data [J]. *Atmospheric Research*, 2015, 166:70 - 82.
- 23 HUSSAIN M, RAHMAN L, RAHMAN M M. Techniques to obtain improved predictions of global radiation from sunshine duration [J]. *Renew Energy*, 1999, 18(2): 63 - 75.
- 24 WILD M. Global dimming and brightening: a review[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114, D00D16. doi:10.1029/2008JD011470, 2009.