

# 遗传算法率定参照作物腾发量相关参数的研究\*

刘艳伟<sup>1</sup> 朱仲元<sup>2</sup> 荆玉龙<sup>3</sup>

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院 昆明 650500; 2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院 呼和浩特 010018;  
3. 内蒙古开鲁县林业局 开鲁 028400)

**摘 要** 用气象资料计算参照作物腾发量( $ET_0$ )的方法需要各种气象(候)和物理参数,净辐射是其中的重要数据之一,而专业测量净辐射的设备在农业气象站里很少安装。为解决计算  $ET_0$  时缺少太阳净辐射( $R_n$ )测量值这一实际问题,该文采用浑善达克沙地东南缘南沙梁草甸草原区气象站观测的气象资料,用遗传算法模型对联合国粮农组织 56 号文本(FAO56)推荐值( $a_s$  和  $b_s$ )进行率定,计算了对应夏半年(4—9 月)和冬半年(1—3 月和 10—12 月)的太阳净辐射和参照作物腾发量,并将率定前后的模拟太阳辐射进行对比分析,用残差估计指数法对该方法模拟的参照作物腾发量模拟精度进行了分析。结果表明:在缺少太阳净辐射测量值的地区,采用 FAO56 参数( $a_s$  和  $b_s$ )推荐值与遗传算法模型率定参数( $a_s$  和  $b_s$ )相比,净辐射年内变化趋势一致,采用率定后参数计算的净辐射相对更不稳定,波动更大,但能有效提高参照作物腾发量计算精度。误差较大的模拟值均出现在降雨日前后,降雨虽然并未直接出现在 Penman-Monteith 公式中,但是降雨必然会对湿度和温度等气象条件造成一定影响,而  $a_s$  和  $b_s$  是受湿度等因素影响而变化的,其深层次的原因有待进一步分析。

**关键词** 遗传算法 浑善达克沙地 参数( $a_s$  和  $b_s$ ) 净辐射 参照作物腾发量

**中图分类号:** S161.4; S271 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2014)02-0241-05

## Calibration of relevant parameters of reference crop evapotranspiration with genetic algorithm

LIU Yanwei<sup>1</sup>, ZHU Zhongyuan<sup>2</sup>, JING Yulong<sup>3</sup>

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;  
2. College of Hydraulics and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China;  
3. Forestry Bureau of Kailu County, Kailu 028400, China)

**Abstract** The existing methods of calculating reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) from meteorological data need various climatic and physical parameters. Net radiation ( $R_n$ ) is one essential parameter for  $ET_0$ . However, professional measurement devices of  $R_n$  are seldom installed in agro-meteorological stations. To overcome problems in calculating  $ET_0$  without  $R_n$  data, a genetic algorithm model was used to calibrate recommended values ( $a_s$  and  $b_s$ ) of the FAO56 method, using meteorological data from Nanshaliang Meadow Steppe in the southeastern margin of Hunshandake.  $R_n$  and the corresponding  $ET_0$  for April to September and October to March were calculated and the pre-calibration solar radiation compared with that of post-calibration. The simulation accuracy of  $ET_0$  was analyzed using the estimated residual index method. From comparison of the result using recommended and calibrated values ( $a_s$  and  $b_s$ ), a consistent annual trend was noted for simulated  $R_n$  in areas without  $R_n$  data. Although  $R_n$  obtained from calibrated values was unstable with high fluctuations, the overall accuracy of  $ET_0$  improved. The analysis showed that large error immediately before and after precipitation events. Although precipitation factor is not directly included in the Penman-Monteith equation, it certainly influences local humidity and temperature. Apparent, both  $a_s$  and  $b_s$  were affected by changes in humidity. There was therefore the need to further analyze these parameters in relation to humidity.

**Keywords** Genetic algorithm; Hunshandake sandy area; Parameters of  $a_s$  and  $b_s$ ; Net radiation; Reference crop evapotranspiration

(Received Aug. 27, 2013; accepted Dec. 9, 2013)

\* 云南省应用基础研究计划项目(KKSY201223076)和国家自然科学基金项目(50139040, 51379004)资助

刘艳伟, 主要从事生态水文及土壤水热模拟的教学和研究。E-mail: liu-xiaocao@sohu.com

收稿日期: 2013-08-27 接受日期: 2013-12-09

参照作物腾发量( $ET_0$ )是表示大气蒸发能力的气象参数,联合国粮农组织(FAO)采用的 Penman-Monteith 方法已被认为是计算  $ET_0$  的惟一标准方法<sup>[1]</sup>。许多学者在世界不同地区进行了应用,结果表明 Penman-Monteith 公式具有较高的精度和较好的适应性<sup>[2-10]</sup>。

用 Penman-Monteith 公式计算参照作物腾发量需要完善的观测数据及很多确定的参数,其中净辐射( $R_n$ )是必需的输入数据。但是,大多数气象站没有直接观测的  $R_n$ ,为解决  $ET_0$  计算缺乏  $R_n$  这一实际问题,学者们做了大量研究,并取得一定成果。国外关于参照作物腾发量的研究大多集中在不同计算方法的评价和气象数据缺测条件下  $ET_0$  的计算<sup>[11]</sup>,以及气象因子对  $ET_0$  的敏感性分析上<sup>[12-13]</sup>,对太阳辐射以及净辐射的研究还停留在对太阳辐射模拟的精度分析上<sup>[14-16]</sup>,对辐射相关参数进行地区校正的研究较少涉及<sup>[17]</sup>。在我国一些有条件地区,如长春、乌鲁木齐、济南、郑州、南京、长沙、成都等城市对  $R_n$  进行了地区校正,供大家参考<sup>[18-19]</sup>。同时许多学者提出了缺测气象数据时计算  $ET_0$  的办法。罗毅等<sup>[20]</sup>研究了潜在腾发量的季节变化规律后,提出  $ET_0$  的概率分布模型;刘钰等<sup>[21]</sup>在分析  $ET_0$  与气象因子的敏感性基础上,提出气象数据缺测地区计算  $ET_0$  的回归模型。刘布春等<sup>[22]</sup>依据大气辐射传输原理和地区太阳辐射特征提出晴天太阳总辐射的瞬时通量密度预报方法。

用气象资料计算  $ET_0$  的方法需要各种气象(候)和物理参数。一些参数可在气象台站直接测量到,另一些与测量数据有关,可用直接或经验关系求得。 $a_s$  为回归常数,表示在多云天气极地辐射到达地面的部分参数; $a_s+b_s$  为在晴天极地辐射到达地面的部分参数。彭世彰等<sup>[23]</sup>和商艳等<sup>[24]</sup>在研究该问题时均需有实测净辐射资料的参证站点资料,而对于该区域均没有参证站实测净辐射的问题没有解决。FAO56 文本中指出  $a_s$  和  $b_s$  的值随不同气象条件(湿度、尘埃)和太阳赤纬角(纬度、月份)而变化,具有一定地域性限制。FAO56 建议在没有可利用的实测太阳辐射资料和提高  $a_s$  和  $b_s$  参数的精度校正时,取  $a_s=0.25$ ,  $b_s=0.50$ <sup>[1]</sup>。本文提出了在没有实测净辐射作为参证站时,采用遗传算法模型对 FAO56 推荐值( $a_s$ 和 $b_s$ )进行率定,并进一步通过参照作物腾发量的精度来分析率定后的结果。

## 1 参照作物腾发量的计算公式

### 1.1 参照作物腾发量

为使参照作物腾发量  $ET_0$  的计算公式统一化、

标准化,提供所有地区不同气象条件  $ET_0$  的一致值,联合国粮农组织<sup>[1]</sup>推荐用修正的 Penman-Monteith 方法作为准确确定参照作物腾发量( $ET_0$ )的标准化方法。

以日为时段的计算公式如下:

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

式中:  $ET_0$  为参照作物腾发量,  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $R_n$  为日太阳净辐射,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $G$  为日土壤热通量,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $T$  为 2 m 高度处日平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $u_2$  为 2 m 高度处日平均风速,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $e_s$  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;  $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率,  $\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\gamma$  为湿度计常数,  $\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

### 1.2 日太阳净辐射

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2)$$

$$\text{其中: } R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (3)$$

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

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (5)$$

$$R_s = (a_s + b_s n / N) R_a \quad (6)$$

$$d_r = 1 + 0.33 \cos(2\pi/365J) \quad (7)$$

式中:  $R_n$  为日太阳净辐射,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $R_{ns}$  为日冠层表面净短波辐射,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $R_{nl}$  为日太阳净长波辐射,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $R_s$  为太阳短波辐射,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $\alpha$  为反射系数,假想的参考面  $\alpha=0.23$ ;  $T_{\max,K}$  为日最大绝对温度, K;  $T_{\min,K}$  为日最小绝对温度, K;  $R_{so}$  为晴天太阳短波辐射( $n=N$ ),  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzman 常数,  $4.903 \times 10^{-9}$ ,  $\text{MJ}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $R_a$  为极地(地外)辐射,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $G_{sc}$  为太阳常数(0.082 0),  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $d_r$  为日地间相对距离的倒数,无量纲;  $\omega_s$  为太阳时角, rad;  $\varphi$  为地理纬度, rad;  $\delta$  为太阳赤纬角, rad;  $n$  为实际日照持续时间,通过实际观测获得, h;  $N$  为最大可能的日照持续时间或日照时数, h;  $n/N$  为相对日照持续时间;  $a_s$  为多云天气极地辐射到达地面部分的参数;  $a_s+b_s$  为晴天( $N=n$ )极地辐射到达地面部分的参数;  $J$  为年内某天的日序数。各参数的物理意义及相关计算详见参考文献<sup>[1]</sup>。

## 2 计算实例

选择浑善达克沙地东南缘南沙梁草甸草原区(116°25'36"E, 42°9'18"N、高程 1 258 m), 该研究区气象站为内蒙古农业大学国家自然科学基金重点项目(50139040)安设, 该气象站有实测太阳辐射, 计算时段取 2005 年 1 月 1 日—12 月 30 日(选取以 5 和 0 结尾的

日序数天的气象资料), 采用遗传算法分夏半年(4—9月)和冬半年(1—3月和10—12月)对 $a_s$ 和 $b_s$ 进行修正。

## 2.1 遗传算法模型的建立及求解

### 2.1.1 模型的确定建立

把太阳短波辐射实测值与模拟值吻合程度用均方差表示, 以均方差最小为参数率定的目标函数。

$$\min y(a_s, b_s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [R_{si} - (a_s + b_s n_i / N_i) R_{ai}]^2}{m}} \quad (8)$$

式中:  $\min y(a_s, b_s)$  为目标函数(均方差);  $i$  为实测点序号;  $m$  为选取日的太阳短波辐射实测点总数;  $R_{si}$  为太阳短波辐射第  $i$  天实测值,  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $(a_s + b_s n_i / N_i) \times R_{ai}$  为太阳短波辐射第  $i$  天计算值,  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $R_{ai}$  为极地辐射第  $i$  天实测值,  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $a_s$  为多云天气极地辐射到达地面部分的参数的模拟值;  $a_i + b_s$  (当  $n_i = N_i$  时) 为晴天极地辐射到达地面部分的参数的模拟值;  $n_i$  为第  $i$  天实际日照持续时间(h);  $n_i / N_i$  为第  $i$  天相对日照持续时间。

在遗传算法中, 适应度函数用来区分群体中个体的优劣程度, 是算法演化过程的驱动力, 是进行自然选择的依据。相应于目标函数的标准适应度函数为:

$$f(a_s, b_s) = 1 / \left( 1 + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [R_{si} - (a_s + b_s n_i / N_i) R_{ai}]^2}{m}} \right) \quad (9)$$

式中,  $f(a_s, b_s)$  为适应度函数。

由于遗传算法仅靠适应度来评估和引导搜索, 所以需要把求解问题所固有的约束条件明确表示出来。

根据参数的物理意义及相关经验, 待求参数有如下的上下限约束:

$$\begin{cases} 0 < a_s + b_s < 1 \\ 0 < b_s < 1 \\ 0 < a_s < 1 \\ a_s < b_s \end{cases} \quad (10)$$

### 2.1.2 模型的求解

遗传算法模型的求解过程中, 采用决策变量实数编码方法计算, 初始父代群体个数=300, 优秀个体数=20, 优化变量个数=2, 收敛误差=0.000 001, 要求输出最优解的个数为 20。结合约束条件(10)产生率定结果为:  $a_s=0.210$ ,  $b_s=0.521$ (夏半年);  $a_s=0.177$ ,  $b_s=0.569$ (冬半年)。

## 2.2 率定参数的检验和确定

为了保证模拟结果的准确性, 需要对率定后的参数进行检验和确定。按照实测太阳辐射计算的  $ET_0$  称为实测值, 按照 FAO56 推荐的  $a_s$  和  $b_s$  参数值计算的  $ET_0$  称为 FAO56 推荐值, 按照遗传算法模型率定的  $a_s$  和  $b_s$  值计算的  $ET_0$  称为地区校正值。FAO56 推荐值、地区校正值与实测值间进行了拟合相关图、拟合优度参数法的有效性检验(图 1)。

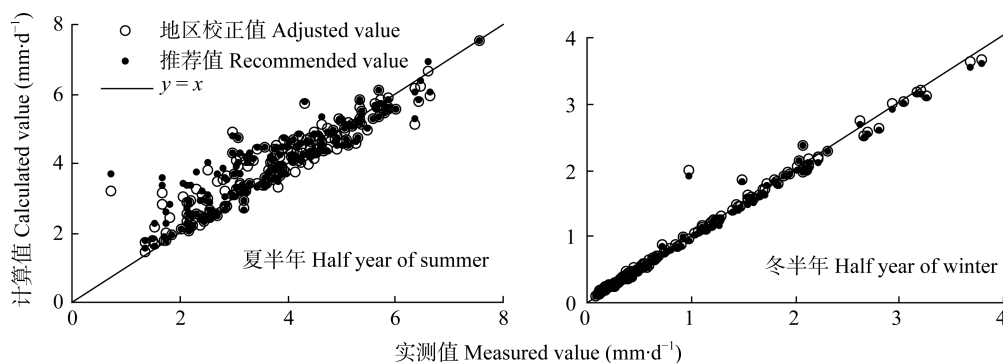


图 1  $ET_0$  推荐值、地区校正值与实测值计算的参照作物腾发量拟合图

Fig. 1 Fitting curves of calculated reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) by recommended values, adjusted values, and measured values

图 1 显示, 2 种参数取值计算的  $ET_0$  都与实测  $R_n$  计算的  $ET_0$  偏差不大, 数据均匀分布在  $y=x$  的直线两侧。以上拟合相关图只能定性给出 2 种参数取值计算的  $ET_0$  与实测太阳辐射计算的  $ET_0$  间拟合优度的趋势。

为了定量说明拟合优度, 采用残差估计误差指示法计算了 2 种参数取值计算的  $ET_0$  与实测太阳辐射计算的  $ET_0$  误差方差  $Var(ER)$ 、平均绝对误差 ( $AAE$ )、平均相对误差 ( $ARE$ )、一致性指数 ( $d_{LA}$ )、回归系数 ( $b$ ) 和确定系数 ( $R^2$ ) 等残差估计参数(表 1)。

由表 1 看出, 采用 FAO56 推荐值计算的  $ET_0$  与实测太阳辐射计算的  $ET_0$  的  $b$ 、 $R^2$  和  $d_{LA}$  分别为 0.978、0.976 和 0.987,  $Var(ER)$  为 0.167,  $AAE$  为 0.224,  $ARE$  为 10.252%。地区校正值计算的  $ET_0$  与实测太阳辐射计算的  $ET_0$  的  $b$ 、 $R^2$  和  $d_{LA}$  分别为 0.987、0.981 和 0.990,  $Var(ER)$  为 0.130,  $AAE$  为 0.195,  $ARE$  为 8.663%。这些残差估计误差定量说明地区校正值计算的  $ET_0$  较 FAO56 推荐值计算  $ET_0$  误差小, 在一定程度上有效地提高了计算精度。

表 1 两种参数取值和实测太阳辐射值计算的  $ET_0$  之间的残差估计误差定量

Table 1 Residual estimation errors between calculated reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) and measured values

取值 Value	误差方差 $Var(ER)$ Error variance	平均绝对误差 ( $AAE$ ) Mean absolute error	平均相对误差 ( $ARE$ ) Mean relative error (%)	一致性指数 ( $d_{LA}$ ) Index of conformity	回归系数( $b$ ) Regression coefficient	确定系数( $R^2$ ) Coefficient of determination
FAO56 推荐值 FAO56 recommended value	0.167	0.224	10.252	0.987	0.978	0.976
地区校正值 Adjusted value	0.130	0.195	8.663	0.990	0.987	0.981

2.3  $ET_0$  的模拟计算结果分析

图 2 给出了采用推荐值计算的净辐射和采用遗传算法进行地区校正的净辐射, 以及参照作物腾发量的计算结果。从中可以看出, 采用 FAO56 参数( $a_s$  和  $b_s$ )推荐值和遗传算法模型率定参数( $a_s$  和  $b_s$ )相比, 净辐射年内变化趋势一致, 但采用率定后参数计算的净辐射相对更不稳定, 波动更大。结合图 1 和表 1 可以看出, 通过遗传算

法进行地区校正的参数计算  $ET_0$  能有效提高其精度。

虽然通过遗传算法进行地区校正的参数计算  $ET_0$  的精度明显优于采用 FAO56 推荐值计算的结果, 但不论按何种方法取参数, 相对误差大于 20% 的仍然占一定比率, 并且最大相对误差仍高达 70%。特别是夏半年(4—9 月)相对误差大于 20% 的数据所占比率相对冬半年大, 相对误差大于 20% 的数据均发生在雨天(图 3)。

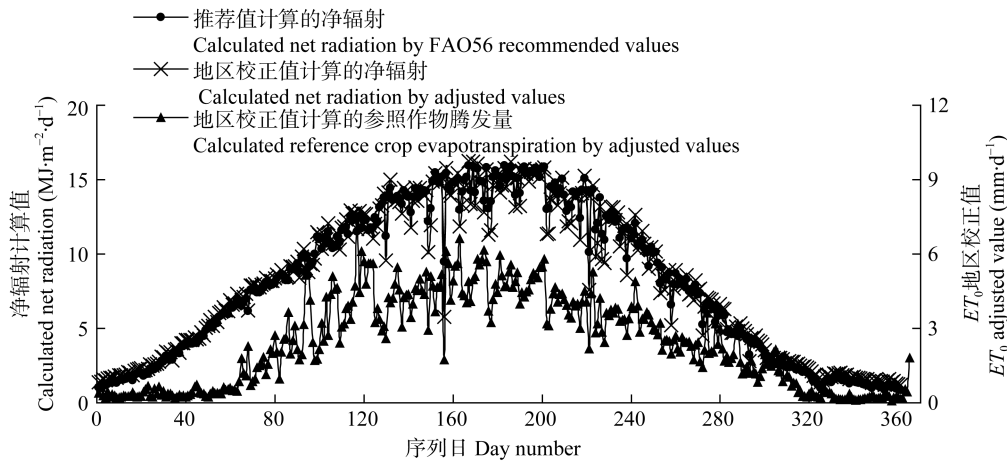


图 2 采用 FAO56 推荐值和地区校正值计算的净辐射和地区校正值计算的参照作物腾发量

Fig. 2 Calculated net radiation by FAO56 recommended values and adjusted values, and calculated reference crop evapotranspiration by adjusted values

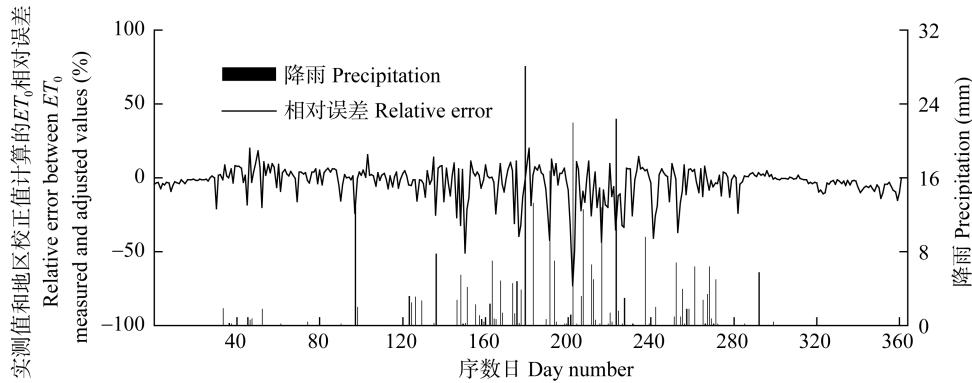


图 3 计算时段内实测值和地区校正值计算的  $ET_0$  的日相对误差及日降水量

Fig. 3 Relative error between calculated  $ET_0$  by measured and adjusted values, and daily precipitation in calculated period

3 讨论和结论

目前, 专业测量净辐射的设备在农业气象站里很少安装, 在太阳净辐射缺测时, 采用 FAO56 建议值( $a_s=0.25$ ,  $b_s=0.50$ )计算净辐射。而  $a_s$  和  $b_s$  的值随不同气象条件(湿度、尘埃)和太阳赤纬角(纬度、月份)变化, 为了取得更精确的净辐射, 有必要对其进行地区校正。

针对研究区域均没有参证站实测净辐射的问题, 采用遗传算法模型, 利用太阳辐射等气象数据对推荐值进行地区校正:  $a_s=0.210$ ,  $b_s=0.521$ (夏半年);  $a_s=0.177$ ,  $b_s=0.569$ (冬半年), 对结果进行了拟合相关图、拟合优度参数法的有效性检验, 也有效提高了参照作物腾发量计算精度。

采用 FAO56 参数( $a_s$  和  $b_s$ )推荐值和遗传算法模型率

定参数( $a_s$  和  $b_s$ )相比, 净辐射年内变化趋势一致, 但采用率定后参数计算的净辐射相对更不稳定, 波动更大。

相对误差大于 20% 的数据仍占一定比率, 夏半年(4—9 月)相对误差大于 20% 的数据所占比率相对冬半年大, 且夏半年参照作物腾发量相对误差大于 20% 的数据均发生在雨天。降雨虽然并未直接出现在 Penman-Monteith 公式中, 但是降雨必然会对湿度和温度等气象条件造成一定影响, 而  $a_s$  和  $b_s$  是受湿度等因素影响而变化的, 其中深层次分析待进一步研究。

在实测太阳净辐射缺测的地区, 采用 FAO56 建议值计算的参照作物腾发量具有一定精度, 在要求计算精度不高时可以采用。在有条件地区根据实测辐射资料及其他气象资料可以通过遗传算法模型对  $a_s$ 、 $b_s$  进行校正, 建议在有条件的地区按季度进行修正, 确定更加适合当地情况的参数值很有必要, 能取得更加精确的结果。

## 参考文献

- [1] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. FAO irrigation and drainage paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 65–67
- [2] Sau F, Boote K J, Bostick W M, et al. Testing and improving evapotranspiration and soil water balance of the DSSAT crop models[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(5): 1243–1257
- [3] Earls J, Dixon B. A comparison of SWAT model-predicted potential evapotranspiration using real and modeled meteorological data[J]. Soil Science Society of America, 2008, 5(7): 570–580
- [4] 刘钰, Pereira L S, Teixeira J L, 等. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报, 1997(6): 27–33  
Liu Y, Pereira L S, Teixeira J L, et al. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(6): 27–33
- [5] 刘钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26–30  
Liu Y, Pereira L S. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(5): 26–30
- [6] 杜尧东, 刘作新, 张运福. 参考作物蒸散计算方法及其评价[J]. 河南农业大学学报, 2001, 35(1): 57–61  
Du Y D, Liu Z X, Zhang Y F. Evaluation of two reference crop evapotranspiration calculation methods[J]. Journal of He'nan Agricultural University, 2001, 35(1): 57–61
- [7] 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 372–376  
Li Y L, Cui J Y, Zhang T H. Comparative study on calculation methods of reference evapotranspiration[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(4): 372–376
- [8] 彭世彰, 徐俊增. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(6): 5–9  
Peng S Z, Xu J Z. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(6): 5–9
- [9] 史晓楠, 王全九, 王新, 等. 参考作物腾发量计算方法在新疆地区的适用性研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 19–23  
Shi X N, Wang Q J, Wang X, et al. Adaptability of different reference evapotranspiration estimation methods in Xinjiang region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(6): 19–23
- [10] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 45–90  
Chen Y M, Guo G S, Wang G X, et al. Main Crop Water Requirement and Irrigation of China[M]. Beijing: Water Power Press, 1995: 45–90
- [11] Temesgen B, Echings S, Davidoff B, et al. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1): 73–84
- [12] Saxton K E. Sensitivity analysis of the combination evapotranspiration equation[J]. Agricultural Meteorology, 1975, 15(3): 343–353
- [13] Goyal P K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India)[J]. Agricultural Water Management, 2004, 69(1): 1–11
- [14] Stone R J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models[J]. Solar Energy, 1993, 5(1): 289–291
- [15] Belcher B N, DeGaetano A T. A revised empirical model to estimate solar radiation using automated surface weather observations[J]. Solar Energy, 2007, 81(3): 329–345
- [16] Trnka M, Zalud Z, Eitzinger J, et al. Global solar radiation in Central European lowlands estimated by various empirical formulae[J]. Agricultural Forest Meteorology, 2005, 131(1/2): 54–76
- [17] Iziomon M G, Mayer H. Assessment of some global solar radiation parameterizations[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2002, 64(15): 1631–1643
- [18] 李晓军, 李取生. 东北地区参考作物蒸散确定方法研究[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 212–216  
Li X J, Li Q S. Study on calculating methods for reference crop evapotranspiration in Northeastern China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(2): 212–216
- [19] 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  
Feng Z M, Yang Y Z, Ding X Q, et al. Temporalspatial changing characteristics of reference crop evapotranspiration in Gansu Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(1): 99–103
- [20] 罗毅, 雷志栋, 杨诗秀. 潜在腾发量的季节性变化趋势及概率分布特性研究[J]. 水科学进展, 1997, 8(4): 9–13  
Luo Y, Lei Z D, Yang S X. Seasonal variation trend and probability distribution pattern of potential evapotranspiration[J]. Advances in Water Science, 1997, 8(4): 9–13
- [21] 刘钰, Pereira L S. 气象数据缺测条件下参照腾发量的计算方法[J]. 水利学报, 2001(3): 11–17  
Liu Y, Pereira L S. Calculation methods for reference evapotranspiration with limited weather data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(3): 11–17
- [22] 刘布春, 卢志光, 高景底, 等. 干旱、半干旱地区紫外线辐射强度及其预报方法的研究[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1): 44–47  
Liu B C, Lu Z G, Gao J D, et al. Studies on intensity of ultraviolet radiation and its forecasting method in the arid and semiarid areas[J]. Agricultural Meteorology, 2003, 24(1): 44–47
- [23] 彭世彰, 徐俊增, 丁加丽, 等.  $a_s$  和  $b_s$  取值对参考作物蒸发蒸腾量计算结果的影响[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(3): 5–6  
Peng S Z, Xu J Z, Ding J L, et al. Influence of  $a_s$  and  $b_s$  values on determination of reference crop evapotranspiration by Penman-Monteith Formula[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(3): 5–6
- [24] 商艳, 朝伦巴根, 达布希, 等. 利用太阳常数等参数估算参考作物蒸散速率( $ET_0$ )的可行性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(4): 11–14  
Shang Y, Chao-lun B G, Da B X, et al. Reliability analysis for estimation of  $ET_0$  by using the solar constant[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005, 16(4): 11–14