

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.016

基于温度资料估算参考作物腾发量的方法比较^{*}

张倩¹ 段爱旺² 高阳² 申孝军² 蔡焕杰^{1,3}

- (1. 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;
2. 中国农业科学院农田灌溉研究所农业部作物需水与调控重点实验室, 新乡 453002;
3. 西北农林科技大学旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 以 Penman - Monteith 方法计算的参考作物腾发量 ET_0 为标准, 与采用温度法和辐射法的 Penman - Monteith 温度法 (PMT)、修正的 PMT (PMT-cor)、Hargreaves - Samain (HG)、修正的 HG 公式 (HG - M1, HG - M2)、Thornthwaite 公式、Irmak 公式、修正的 Irmak 公式 (Irmak-cor)、McGuinness Bordne 公式 (M - B) 的估算值进行对比分析, 同时引入干旱指数对温度法中的 PMT 公式进行修正, 采用多元线性拟合对辐射法中的 Irmak 公式进行修正。结果表明: 温度法中的 PMT 公式、PMT-cor 公式、HG 公式和辐射法中 Irmak 公式、Irmak-cor 公式的计算值与 PM 法计算值间的回归系数 b 都接近于 1.0, 相关系数 R^2 大于 0.80, 相对误差 R_E 小于 20%, 一致性指数 d 大于 0.95。通过交叉比较发现, Irmak-cor 公式精度较高 ($b = 1.00$, $R^2 = 0.98$, $R_{MSE} = 0.17$ mm/d, $R_E = 7\%$, $d = 1.00$), 其次是 Irmak 公式 ($b = 1.03$, $R^2 = 0.95$, $R_{MSE} = 0.31$ mm/d, $R_E = 12\%$, $d = 0.99$), 再次是 PMT、PMT-cor、HG 方法。考虑计算结果的精确度, 该地区首选 Irmak-cor 公式估算 ET_0 ; 如果考虑计算简便, 该地区可选 HG 公式估算 ET_0 。

关键词: 温度资料 参考作物蒸发蒸腾量 Penman - Monteith 公式 PMT 公式

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0104-06

Comparative Analysis of Reference Evapotranspiration Estimation Methods Using Temperature Data

Zhang Qian¹ Duan Aiwang² Gao Yang² Shen Xiaojun² Cai Huanjie^{1,3}

(1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory for Crop Water Requirement and Regulation, Ministry of Agriculture, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China

3. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Accurate estimation of reference evapotranspiration (ET_0) is the basis of irrigation water management. When weather data is lacking or only temperature data is available, ET_0 has to be estimated with limited weather data. An attempt was made to estimate daily ET_0 by using temperature-based and radiation-based methods, i. e., Penman - Monteith temperature method (PMT), corrected PMT method (PMT-cor), HG equation, modified HG (HG - M1, HG - M2), Thornthwaite equation and Irmak equation, corrected Irmak equation (Irmak-cor), McGuinness Bordne equation (M - B). These equations were evaluated against the PM model in Xinxiang. When using the PMT method to estimate ET_0 , the adjustment of T_{min} for estimating T_{dew} was adopted, when using the Irmak equation, the multiple linear regression was adopted to modify this equation. Results showed that the performance of PMT, PMT-cor, HG, Irmak and Irmak-cor methods were similar, which got the best ET_0 estimation with

收稿日期: 2014-06-25 修回日期: 2014-08-07

^{*} “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B01)、公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203077)和现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-3-1-30)

作者简介: 张倩, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究, E-mail: zhangqian864@163.com

通讯作者: 蔡焕杰, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水和水资源高效利用研究, E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

coefficient of regression (b) and determination (R^2) around 1.0, relative error $R_E < 20\%$, index of agreement $d > 0.95$, five models fitted the standard of good model. Cross-comparison of the five good models showed that Irmak-cor equation was the best method which had the highest accuracy in all models with $b = 1.00$, $R^2 = 0.98$, $R_{MSE} = 0.17$ mm/d, $R_E = 7\%$, $d = 1.00$; secondly, the Irmak equation, with $b = 1.03$, $R^2 = 0.95$, $R_{MSE} = 0.31$ mm/d, $R_E = 12\%$, $d = 0.99$. The precision of five models was in turn as Irmak-cor, Irmak, PMT-cor, PMT and HG equation. When considering the precision of the formula, the Irmak-cor equation was the best-suited equation for estimating ET_0 among the methods, but it was likely more appropriate to use HG equation, due to it was easy to compute and no requirements of temperature adjustment.

Key words: Temperature data Reference evapotranspiration Penman – Monteith equation PMT equation

引言

参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)是计算作物需水量的重要参数,它的精确估算是灌溉管理、水资源评价和流域管理的重要依据^[1-4]。研究表明,对世界范围内不同气候区进行比较时,综合法中的 FAO 56 Penman – Monteith(PM)公式的计算精度是最高的,被联合国粮农组织推荐为计算 ET_0 的标准公式^[5-11],但是该公式需要空气温度、湿度、太阳辐射、风速等诸多气象观测资料,在某些地区的应用受到很大的限制。而基于温度的 ET_0 估算方法由于对数据需求较低、温度资料的获取较为简便而得到广泛应用,Allen 等推荐 Hargreaves(HG)公式和 PMT 方法^[5]来估算 ET_0 ,并得到了较为满意的结果^[12-16]。刘钰等提出在仅有气温观测数据时,可用 PMT 方法和 HG 方法估算 ET_0 ,得到了较为满意的结果^[14]。陶国通等仅用温度数据代入 PMT 公式和 HG 公式估算 ET_0 ,结果发现两者的精度接近,但 PMT 公式的精度稍高于 HG 公式^[17]。还有学者利用天气预报中的温度数据代入修正后的 HG 公式进行预报期为 4 d 或 7 d 的 ET_0 估算,其建立的 HG 模型的预测精度较高,可为灌溉管理提供决策支持^[18-19]。Cai 等^[3]指出在干旱度显著的地区应用 PMT 方法估算 ET_0 需要进行温度修正,但具体的修正方法没有给出。以上研究大多采用温度法中的一些公式(PMT、HG)来估算 ET_0 ,当气象数据缺失仅有温度资料可用时,很少用辐射法来估算 ET_0 ,并且在干旱特征显著的地区应用 PMT 公式时并没有涉及温度的修正。

本文采用温度法和辐射法中 9 个公式来估算 ET_0 ,以 PM 公式计算的 ET_0 作为参照进行比较分析,同时在 PMT 方法中引入干旱指数对露点温度进行修正,采用多元线性拟合对辐射法中的 Irmak 公

式进行修正,通过交叉比较找出基于温度数据的 ET_0 的最佳估算模型,为实现简便而精确的参考作物蒸发蒸腾量的估算方法提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验区位于中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场(35°19' N,113°53' E),该地区海拔高度 73.2 m,年均气温 14.1℃,无霜期 210 d,日照时数 2 398.8 h,年均降水量 582 mm,7—9 月份降水量占全年降水量的 65% ~ 75%,年均蒸发量 2 000 mm。采用新乡市气象局 2003 年 1 月—2012 年 12 月间的逐日气象资料,包括最高温度、最低温度、日照时数、风速、相对湿度等。

1.2 ET_0 估算模型

1.2.1 FAO 56 Penman – Monteith(PM)方法

计算逐日 ET_0 的 FAO Penman – Monteith 公式为

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

式中 ET_0 ——参考作物蒸发蒸腾量,mm/d

R_n ——作物表面净辐射,MJ/($m^2 \cdot d$)

G ——土壤热通量密度,MJ/($m^2 \cdot d$)

T ——2 m 高处的平均气温,℃

u_2 ——2 m 高处的风速,m/s

e_s ——饱和水汽压,kPa

e_a ——实际水汽压,kPa

Δ ——温度水汽压曲线的斜率,kPa/℃

γ ——湿度计常数,kPa/℃

式中各个参数的具体计算式参照文献[5]。

1.2.2 温度法

(1) PMT 方法

当只有温度资料可以利用时,可以利用最小温

度来代替露点温度估算实际水汽压,太阳短波辐射 R_s 表示为温度的函数,并假设 2 m 高处的风速为 2 m/s,具体公式为

$$e_a = e^0(T_{\min}) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right) \quad (2)$$

$$R_s = k_{RS} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a \quad (3)$$

式中 $e^0(T_{\min})$ ——最小温度时的饱和水汽压, kPa
 R_s ——太阳短波辐射, MJ/(m²·d)
 k_{RS} ——辐射调整系数,对于内陆地区取值为 0.16~0.17,沿海地区取值为 0.19~0.20
 R_a ——地外辐射, MJ/(m²·d)
 T_{\min} ——最小温度, °C
 T_{\max} ——最大温度, °C

(2) PMT-cor 方法

在上述 PMT 方法中,假设最小温度等于露点温度的方法在一些干旱半干旱地区会引起误差,Allen 等、Jensen 等和 Temesgen 等指出当某地点温度很高,空气湿度很小时,最小温度有可能高于露点温度,需要对该地点的露点温度进行干旱指数修正^[20-22]。根据全球干旱指数定义^[23],即近 30 a 平均每年的降水量 P 与 ET_o 的比值,得出新乡地区处于半干旱气候区(0.20 < P/ET_o = 0.35 < 0.50)。在半干旱气候区,露点温度的修正式为^[2]

$$T_{\text{dew}} = T_{\min} - 1 \quad (4)$$

$$e_a = e^0(T_{\min} - 1) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27(T_{\min} - 1)}{T_{\min} - 1 + 237.3}\right) \quad (5)$$

式中 T_{dew} ——露点温度, °C

(3) HG 方法和改进的 HG 方法

Hargreaves 公式(HG)^[6]为

$$ET_o = 0.408 \times 0.0023(T + 17.8)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} R_a \quad (6)$$

Droogers 等报道了几种改进后的 Hargreaves (HG)公式^[24],其计算式为

$$ET_o = 0.408 \times 0.0030(T + 20)(T_{\max} - T_{\min})^{0.4} R_a \quad (7)$$

$$ET_o = 0.408 \times 0.0025(T + 16.8)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} R_a \quad (8)$$

将式(7)和式(8)分别记为 HG-M1 和 HG-M2。

(4) 索恩思威特桑斯威特(Thornthwaite)公式^[25]为

$$ET_{oi} = 1.6K_d \left(\frac{10T_i}{I}\right)^a \quad (9)$$

其中

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514} \quad (10)$$

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49239 \quad (11)$$

式中 ET_{oi} ——某月的参考作物蒸发蒸腾量, cm
 T_i ——该月平均温度, °C
 K_d ——平均昼长改正系数,即以每月 30 d、每天 12 h 作标准,各地各月时间改正值
 I ——热效应指标

1.2.3 辐射法

在辐射法中需要日照时数来估算太阳辐射,如果缺少这一数据可利用式(3)来估算太阳辐射。辐射法计算 ET_o 的公式有:

(1) McGuinness 和 Bordne(M-B)公式^[26]

$$ET_o = 2.54(0.0082T_i - 0.19) \frac{R_s}{1500} \quad (12)$$

式中 ET_o 为月平均参考作物蒸发蒸腾量, cm/月; T_i 为华氏温度(°F); R_s 单位为 cal/(cm²·d)。

(2) Irmak 公式^[27]

$$ET_o = -0.611 + 0.149R_s + 0.079T \quad (13)$$

(3) Irmak-cor 公式

用多元线性回归方法对式(13)进行修正,以 PM 方法算得的参考作物蒸发蒸腾量作为独立变量, T_{\max} 、 T_{\min} 、 T 、 R_s 为自变量进行回归分析得 Irmak-cor 公式为

$$ET_o = -0.50947 - 0.09602T_{\max} - 0.05142T_{\min} + 0.193809R_s + 0.19149T \quad (14)$$

1.3 评价方法

用温度数据估算的 ET_o 与完整气象资料计算的 ET_o 比较,并以以下统计参数评价各个估算模型的性能^[3,28]。

(1) 回归系数 b

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n o_i p_i}{\sum_{i=1}^n o_i^2} \quad (15)$$

(2) 决定系数 R^2

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(o_i - \bar{o})\right]^2}{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (16)$$

(3) 均方根误差 R_{MSE}

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}} \quad (17)$$

(4) 相对误差 R_E

$$R_E = \frac{R_{MSE}}{\bar{o}} \times 100\% \quad (18)$$

(5) 一致性指数 d

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|p_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (19)$$

式中 o_i ——第 i 个观测数据

p_i ——第 i 个预测数据

\bar{o} ——观测数据组的平均值

\bar{p} ——预测数据组的平均值

n ——统计样本数

当 b 接近于 1.0, $R^2 > 0.80$, $R_E \leq 20\%$, $d \geq 0.95$ 时,说明该模型较好。

2 结果与分析

2.1 温度法公式比较

利用新乡市 2003—2012 年间逐日气象资料计算的月平均 ET_0 (PM 方法) 与用温度法估算的月平均 ET_0 相比较 (表 1、图 1), 图 1 可以看出, 温度法 (除 Thornthwaite 公式) 估算的月均值变化趋势与 PM 方法基本一致, 均是从 1 月份逐渐增加, 在 6 月份达到最大值, 然后逐渐减小, 温度法 (除 Thornthwaite 公式) 估算的 ET_0 值比 PM 方法计算值稍高一些。由表 1 中的统计参数可看出, 温度法中 PMT-cor 方法精度较高 ($b = 1.09$, $R^2 = 0.98$, $R_{MSE} = 0.34$ mm/d, $R_E = 13\%$, $d = 0.98$), 其次是 PMT 方法 ($b = 1.10$, $R^2 = 0.98$, $R_{MSE} = 0.35$ mm/d, $R_E = 13\%$, $d = 0.98$), 再次是 HG 方法 ($b = 1.15$, $R^2 = 0.98$, $R_{MSE} = 0.51$ mm/d, $R_E = 19\%$, $d = 0.97$)。国内外许多文献也有报道, 当气象资料不完整或难以获得时, 应用 PMT 方法估算的 ET_0 与用 PM 公式算得 ET_0 有较好的相关性^[1-4, 12-13]。从表 1 可以看出 PMT、PMT-cor 和 HG 方法的 R_E 分别是 13%、13%、19%, 而且回归系数 b 、决定系数 R^2 和 d 都接近 1.0, 说明这 3 种模型都较好。PMT 和 PMT-cor 方法的 R_{MSE} 比 HG 方法分别低 31% 和 33%, 是由于 HG 公式中缺少风速和湿度变量, 所以该公式精度略低于 PMT 和 PMT-cor 方法。PMT 方法中引入干旱指数对露点温度进行修正, 在本文研究的地区并没有明显的减小误差, 模型精度也没有明显提高, 这可能与数据质量有关, 这种修正方法有待在其他干旱特征显著的地区进行验证。有报道称在干旱特征显著的地区, 这种修正方法可以得到很好的效果^[1-2]。对于 Droogers 等提出的 HG 公式的修正式 HG-M1 和 HG-M2 并没有减小 HG 公式的计算误差, 相反这两个修正式的 R_{MSE} 比 HG 高 63% 和 39%, 回归系数 b 高 10% 和 6%, d 低 4% 和 2%, 因此 HG 的修正式在

该地区不合适。Thornthwaite 方法的 R_{MSE} 在上述温度法中最大, 为 1.08 mm/d, $R^2 = 0.73 < 0.80$, $d = 0.89 < 0.95$, 所以 Thornthwaite 方法不适合用于新乡地区 ET_0 估算。5 种模型的精度依次为 PMT-cor > PMT > HG > HG-M1 > HG-M2, PMT 方法和 PMT-cor、HG 方法均能满足好模型的标准, 如果从方法的简易性和应用广泛性考虑, 首选 HG 公式, 因为该公式只需要温度资料便可以直接计算, 而 PMT 公式需要进行温度修正及利用温度资料去估算其他变量。

表 1 温度法和 PM 法算得的月平均 ET_0 的统计分析结果
Tab. 1 Statistical analyses between temperature methods and PM model for estimating monthly ET_0 .

温度法	b	R^2	$R_{MSE}/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	$R_E/\%$	d
PMT	1.10	0.98	0.35	13	0.98
PMT-cor	1.09	0.98	0.34	13	0.98
HG-M1	1.27	0.98	0.83	31	0.93
HG-M2	1.22	0.97	0.71	26	0.95
HG	1.15	0.98	0.51	19	0.97
Thornthwaite	1.01	0.73	1.08	41	0.89

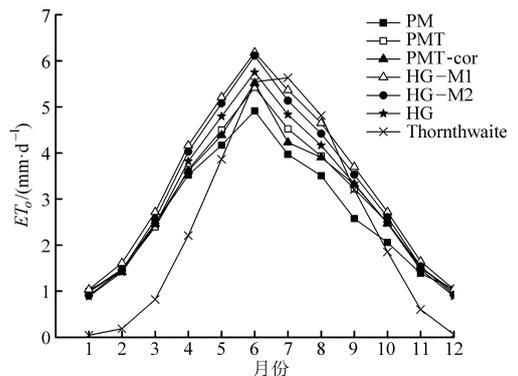


图 1 温度法和 PM 法算得的 10 a 间月平均 ET_0 对比
Fig. 1 Comparison of ten years mean monthly ET_0 calculated from temperature methods and PM model

2.2 辐射法比较

表 2 给出了辐射法估算的新乡地区 2003—2012 年间月平均 ET_0 与 PM 公式计算的月平均 ET_0 的统计分析结果, 这 3 种辐射法的相关系数 R^2 均较高 (大于 0.90), 从统计分析的参数来看, Irmak 公式修正式是精度较高的估算模型 ($b = 1.00$, $R^2 = 0.98$, $R_E = 7\%$, $d = 1.00$), 其次是 Irmak 公式 ($b = 1.03$, $R^2 = 0.95$, $R_E = 12\%$, $d = 0.99$), 再次是 M-B 公式 ($b = 0.78$, $R^2 = 0.91$, $R_E = 28\%$, $d = 0.92$)。Irmak 公式和 Irmak-cor 公式的回归系数 b 都接近 1.0, $R^2 > 0.80$, $R_E < 20\%$, $d \geq 0.95$, 是表现较好的模型, Irmak-cor 是在 Irmak 公式的基础上添加了变量 T_{max} 、 T_{min} , 可见模型中的相关变量越多, 模型的精度越高。从图 2 可以看出 Irmak 公式高估了 ET_0 , 而

M-B公式低估了 ET_0 。且 R_{MSE} 最大(0.75 mm/d), 比 Irmak 公式和 Irmak-cor 公式分别高了 58.67% 和 77.33%。比较辐射法的 3 个公式, Irmak-cor 公式的估算精度较高, 其次是 Irmak 公式, 最后是 M-B 公式。所以在该地区应用辐射法基于温度数据估算 ET_0 应该首选 Irmak-cor 公式, 其次是 Irmak 公式, M-B 公式由于较高的估算误差不适合在该地区应用。

表 2 辐射法和 PM 法算得的月平均 ET_0 的统计分析结果

Tab.2 Statistical analyses between radiation methods and PM model for estimating monthly ET_0 .

辐射法	b	R^2	$R_{MSE}/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	$R_E/\%$	d
M-B	0.78	0.91	0.75	28	0.92
Irmak	1.03	0.95	0.31	12	0.99
Irmak-cor	1.00	0.98	0.17	7	1.00

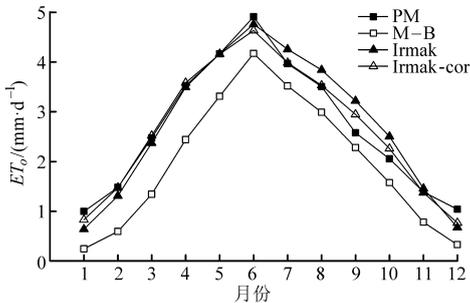


图 2 辐射法和 PM 法算得的 10 a 间月平均 ET_0 对比
Fig.2 Comparison of ten years mean monthly ET_0 calculated from radiation methods and PM model

2.3 ET_0 估算方法的交叉比较

根据各估算方法的 R_{MSE} 值, 从温度法和辐射法中找出 5 种最好的方法进行比较, 如图 3 所示 Irmak-cor 公式的 R_{MSE} 最小, 为 0.17 mm/d, 其次是 Irmak 公式, 为 0.31 mm/d, 温度法中 PMT 法和 PMT-cor 方法 R_{MSE} 分别为 0.35 mm/d、0.34 mm/d, HG 公式的 R_{MSE} 为 0.51 mm/d, 比较结果显示在新乡地区当只有温度数据可用时, 首选辐射法中 Irmak-

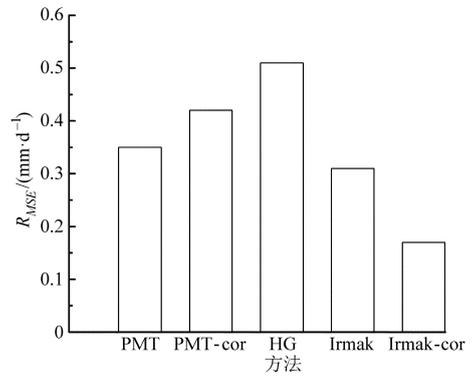


图 3 估算 ET_0 的 5 个最好方法的 R_{MSE} 值比较
Fig.3 Comparison of R_{MSE} values for the five best ET_0 estimation methods

cor 和 Irmak 公式估算 ET_0 , 其次是温度法中 PMT-cor、PMT、HG 公式。虽然 HG 公式的 R^2 、 R_{MSE} 、 d 略低于 Irmak-cor、Irmak 公式和 PMT-cor、PMT 方法, 但是由于该公式要求输入的变量少且不需要进行温度修正, 而且相对于其他方法计算简便, 估算精度也能满足要求, 因此在新乡地区 HG 公式也适合于 ET_0 的估算。本文得出的结论具有一定的地域特征, 研究工作还应在不同气候区对 ET_0 的最佳估算模型进行验证, 以求得到更精确的结果。

3 结论

(1) 当仅有温度数据可用时, 选用辐射法和温度法中 9 种公式估算 ET_0 , 通过统计参数的比较分析发现辐射法中的 Irmak-cor 和 Irmak 公式是估算精度最高的 2 个公式, 其次是温度法中的 PMT-cor、PMT 和 HG 公式。

(2) 仅利用温度资料, 在该地区用 HG 方法或者 Irmak-cor、Irmak、PMT-cor、PMT 方法估算 ET_0 都可以获得较为满意的结果, 温度资料可以在中国气象网获取, 这一方法不仅节约了购买气象数据和建造自动气象站的费用, 而且可以用来科学合理的指导灌溉。

参 考 文 献

- Raziei T, Pereira L S. Estimation of ET_0 with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran[J]. Agricultural Water Management, 2013, 121: 1-18.
- Todorovic M, Karic B, Pereira L S. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates[J]. Journal of Hydrology, 2013, 481: 166-176.
- Cai J B, Liu Y, Lei T W, et al. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 145(1-2): 22-35.
- Cai J B, Liu Y, Xu D, et al. Simulation of the soil water balance of wheat using daily weather forecast messages to estimate the reference evapotranspiration[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(7): 1045-1059.
- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998.
- Hargreaves G H, Allen R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. Journal of Irrigation and

- Drainage Engineering, 2003, 129(1): 53 - 63.
- 7 Pereira A R, Pruitt W O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration[J]. Agricultural Water Management, 2004, 66(1): 251 - 257.
- 8 Berengena J, Gavilán P. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(2): 147 - 163.
- 9 Smith M. The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(1 - 2): 99 - 108.
- 10 Gavilán P, Lorite I J, Tornero S, et al. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(3): 257 - 281.
- 11 Temesgen B, Eching 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 Jabloun M, Sahli A. Evaluation of FAO - 56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(6): 707 - 715.
- 13 Popova Z, Kercheva M, Pereira L S. Validation of the FAO methodology for computing ET_0 with missing climatic data. Application to South Bulgaria[J]. Irrigation and Drainage, 2006, 55(2): 201 - 215.
- 14 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 Yu, Pereira L S. Calculation methods for reference evapotranspiration with limited weather data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(3): 11 - 17. (in Chinese)
- 15 Pereira L S, Cai L G, Hann M J. Farm water and soil management for improved water use in the North China Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 52(4): 299 - 317.
- 16 Gocic M, Trajkovic S. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(2): 158 - 162.
- 17 陶国通, 王景雷, 南纪琴, 等. 基于温度的作物需水量估算方法[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 7 - 10.
Tao Guotong, Wang Jinglei, Nan Jiqin, et al. Calculating method for crop water requirement based on air temperature[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 7 - 10. (in Chinese)
- 18 罗玉峰, 李思, 彭世彰, 等. 基于气温预报和 HS 公式的参考作物腾发量预报[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(11): 987 - 992.
Luo Yufeng, Li Si, Peng Shizhang, et al. Forecasting reference evapotranspiration based on temperature forecast and Hargreaves-Samani equation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(11): 987 - 992. (in Chinese)
- 19 Luo Yufeng, Chang Xiaomin, Peng Shizhang, et al. Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the Hargreaves-Samani model and temperature forecasts[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 42 - 51.
- 20 Allen R G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996, 122(2): 97 - 106.
- 21 Jensen D T, Hargreaves G H, Temesgen B, et al. Computation of ET_0 under nonideal conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, 123(5): 394 - 400.
- 22 Temesgen B, Allen R G, Jensen D T. Adjusting temperature parameters to reflect well-watered conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1999, 125(1): 26 - 33.
- 23 UNEP. World atlas of desertification, seconded[M]. London: United Nations Environment Programme, 1997: 182.
- 24 Droogers P, Allen R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(1): 33 - 45.
- 25 Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review, 1948, 38(1): 55 - 94.
- 26 McGuinness J L, Bordne E F. A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values[M]. USA: USDA Technical Bulletin, 1972.
- 27 Irmak S, Irmak A, Allen R G, et al. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(5): 336 - 347.
- 28 Tabari H, Grismer M E, Trajkovic S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions[J]. Irrigation Science, 2013, 31(2): 107 - 117.