

新疆塔里木盆地北缘日参考作物 腾发量计算模型评价

曹 伟¹, 魏光辉², 卢震林¹

(1. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049; 2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 采用 4 种常用的腾发量模型(Makkink 模型, Turc 模型, Priestley-Taylor 模型以及 Hargreaves 模型)计算日腾发量, 并以 Penman-Monteith FAO 56 公式计算结果为标准值进行对比, 旨在寻找出建模数据少、模拟精度高以及适合研究区的腾发量计算模型。结果表明: Turc 模型的日参考作物蒸发蒸腾量与 Penman-Monteith FAO 56 差异较小, 其次是 Makkink 模型与 Priestley-Taylor 模型, Hargreaves 模型的差异最大。

关键词: 参考作物腾发量; Penman-Monteith FAO56; 干旱区; 塔里木盆地

中图分类号: S274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)04-0061-05

Evaluation of calculation models for daily reference crop evapotranspiration in north Tarim Basin

CAO Wei¹, WEI Guang-hui², LU Zhen-lin¹

(1. Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830049, China;

2. School of Water Resources & Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: By using the calculation results of Penman – Monteith FAO 56 as standard values, four models including Makkink model, Turc model, Priestley-Taylor model and Hargreaves model, which were commonly used to estimate daily reference crop evapotranspiration values, were evaluated to determine the suitable model for estimating ET_0 with few data requirements and high accuracy for north Tarim Basin. The results showed that Turc model was the best model in estimating ET_0 , followed by Makkink model and Priestley-Taylor model, but Hargreaves model turned out to be the most imprecise model in the study area.

Keywords: reference crop evapotranspiration; Penman-Monteith FAO 56; arid areas; Tarim Basin

作物需水量是农田水分循环系统中最重要的因素之一,其准确计算是水利工程规划设计及节水农业研究必不可少的组成部分,而计算作物需水量的关键环节是参照作物腾发量的计算。参照作物腾发量(Reference crop evapotranspiration,简称 ET_0)指高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面而不缺水的 8 ~ 15 cm 高的绿色矮秆作物的蒸发蒸腾量^[1],它只与气象因素有关。Priestley-Taylor^[2]与 Penman^[3]方法都是计算参照作物腾发量的常用方法,而在我国应用最多的是 Penman 方法^[4-5]。在过去的 50 多年,国内外对参考作物蒸发蒸腾量的研究很多,总结出多种计算模型^[6-15]。利用气象数据计算参考作物蒸发蒸腾量的方法可以概括为 4 类^[16]:水面蒸发量法、温度法、辐射法和综合法,如 FAO24 Blaney-Criddel 公式、Thornthwait 公式和 Hargreaves-Samani 等基于温度的计算方法;Priestley-Taylor 以及 FAO24 Radiation 等基于辐射的方法;1948 Penman-Monteith、FAO24 Penman、Kimberley Penman 以及 FAO56 Penman-Monteith 等综合方法^[1],这些研究使作物需水量的计算有了统一的基础,但这些方法的应用都存在一定的地域性限制。国内外应用最多的是联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations,简称 FAO)推荐的基于能量平衡和空气动力学原理的 Penman-Monteith FAO 56 模型,但是该模型在应用中存在不足之处,即该模型计算中需要大量的气象资料,例如太阳辐射等。而在我国气象部门所

收稿日期:2012-08-01
基金项目:绿洲灌区节水安全关键技术研究(201130103-3);水利部公益性项目“塔河流域水量分配关键技术研究”(201101049)
作者简介:曹 伟(1977—),男,新疆呼图壁人,工程师,硕士,主要从事农业节水灌溉研究。E-mail:skycaov@163.com。

属的各基本气象站的观测项目中能够观测太阳辐射的站点很少,这就给作物腾发量的计算带来一定困难。因此,必须结合现有气象站观测项目的基础上,寻找出一种简单适用的作物腾发量计算模型。

考虑到气象资料的可获取性,本文以新疆塔里木盆地北缘的尉犁县为例,利用四种简单的 ET_0 计算模型(Makkink 模型, Turc 模型, PriestleyTaylor 模型及 Hargreaves 模型)与 PenmanMonteith FAO 56 (PMF-56)模型计算结果进行比较。以探讨在气象资料缺失地区如何做好参考作物腾发量的估算工作,进而为当地干旱预测和农田灌溉管理的理论研究和推广应用提供参考。

1 参考作物腾发量计算模型

在估算参考作物腾发量(ET_0)的众多模型中,有四种模型由于计算相对简单且所需气象参数较少而应用广泛,分别介绍如下:

1.1 Makkink 模型(MK 模型)

Makkink 模型最早来自荷兰,它是根据 Penman 模型和蒸渗仪观测数据经过对比、修正而得到的。目前,该模型在西欧各国以及美国得到广泛应用,其模型表达式为^[17]:

$$ET_0 = \frac{0.61\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (1)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); R_s 为太阳辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); γ 为湿度计常数($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); λ 为汽化潜热($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.2 Turc 模型

Turc 模型^[18]最早来自于荷兰,目前 Turc 模型在美国的部分地区已经推广应用,其模型表达式为^[19]:

$$ET_0 = a_T \frac{0.013 T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}} + 15} \times \frac{23.8856 R_s + 50}{\lambda} - 0.12 \quad (2)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); T_{mean} 为月均大气温度($^\circ\text{C}$); R_s 为太阳辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); λ 为汽化潜热($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); a_T 为一基于相对湿度值的系数,定义为:如果日均相对湿度大于或等于 50%,则取 a_T 为 1;反之,如果日均相对湿度小于 50%,则 a_T 按照下式进行计算:

$$a_T = 1 + \frac{50 - RH_{\text{mean}}}{70} \quad (3)$$

1.3 Priestley-Taylor 模型(P-T 模型)

Priestley-Taylor 模型是早期 Penman 1948 模型的简化形式,该方法由于需要参数较少而广泛应

用^[20]。如具有较大影响力的美国 CERES 系列作物模型,还有 COTTAM、CROPSIM 和 EPIC 等模型也采用了这一方法。目前中国应用 CERES 模型模拟估产的研究也很多,但该模型需要气温、日照时数和地理位置等资料。

P-T 模型表达式为^[21]:

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

式中, ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); a 为一经验系数,取 1.26; Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); γ 为湿度计常数($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n 为作物冠层表面净辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),逐日计算时 $G = 0$ 。

1.4 Hargreaves 模型

Hargreaves 和 Samani 根据加利福尼亚州 8 a 的牛毛草蒸渗仪数据,推导出基于温差的参考作物蒸发蒸腾量计算公式 Hargreaves-Samani(1985) 公式,该方法在缺少气象资料的地区广泛应用,并被证明是一个有效的估算方法,需要气温(平均、最高、最低气温)和地理位置数据^[22]。

Hargreaves 模型的表达式如下:

$$ET_0 = 0.0023 R_a (T_a + 17.8) (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5} \quad (5)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_a 大气顶太阳辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T_a 为环境日平均温度($^\circ\text{C}$); T_{max} 为日环境最高温度($^\circ\text{C}$); T_{min} 为日环境最低温度($^\circ\text{C}$)。

1.5 Penman-Monteith FAO 56 (PMF-56) 模型

Penman-Monteith FAO 56 模型是以能量平衡和水汽扩散理论为基础,既考虑了空气动力学和辐射项的作用,又涉及了作物的生理特征,弥补了 FAO 24 Penman 模型忽略土壤对水汽传输的表面阻力作用的缺点。故本文采用 1998 年联合国粮农组织提出的 Penman-Monteith FAO 56 (PMF-56) 模型来计算参考作物腾发量的标准值,其公式如下^[23]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \quad (6)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T 为环境平均温度($^\circ\text{C}$); R_n 为作物冠层表面净辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),逐日计算时 $G = 0$; γ 为温度表常数($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); u 为 2 m 高处的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为空气饱和水汽压(kPa); e_a 为空气实际水汽压(kPa)。对于计算所用气

象数据非 2 m 高度的,需要进行公式转换,具体计算公式见文献[24]。

在上述模型中,净辐射利用 FAO56 推荐的方法以太阳辐射计算^[25]:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$
$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$
$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left[1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right]$$

(7)

式中, R_n 为净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R_{ns} 为净短波辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R_{nl} 为净长波辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R_s 为太阳辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); α 为反射率,本文取 $\alpha = 0.23$, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数,取 $4.093 \times 10^{-9}(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{d}^{-1})$; $T_{\max,K}$ 、 $T_{\min,K}$ 为绝对温度值的最高温度、最低温度(K); R_{so} 为晴天太阳辐射。

1.6 模型效果评价

日参考作物腾发量的模型评价指标包括:决定系数 R^2 (Coefficient of determination)、平方根误差 $RMSE$ (Root mean square error)、平均绝对误差 MAE (Mean absolute error),用这 3 个评价指标表明模型模拟值偏离实际值的程度及模拟效果。

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

(8)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

(9)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n}$$

(10)

式中, X_i 分为 Makkink 模型、Turc 模型、Priestley-Taylor 模型、Hargreaves 模型的模拟值, $\bar{X}$ 为其对应的模拟平均值。 Y_i 为 PMF-56 模型计算值, $\bar{Y}$ 为其计算平均值。

2 模型计算

2.1 研究区概况

新疆尉犁县地处天山南麓,塔里木盆地北缘,行政上隶属于新疆巴音郭楞蒙古自治州。地理位置介于 $84^{\circ}01'50'' \sim 89^{\circ}58'50''\text{E}$ 与 $40^{\circ}10'33'' \sim 41^{\circ}39'47''\text{N}$ 之间,东西长 502 km、南北宽 165 km,总面积 $59\,234.5\text{ km}^2$ 。区域属暖温带大陆性荒漠气候,灌区内多年平均降水量 $53.3 \sim 62.7\text{ mm}$,集中于 6—8 月份。多年平均蒸发量 $2\,273 \sim 2\,788\text{ mm}$,平均相对湿度为 $45\% \sim 47\%$,多年平均气温 11.5°C ,夏季炎热,

极端最高气温 43.6°C ,冬季寒冷少雪。全年以晴天为主,日照时间长,年日照时数 $3\,036.2\text{ h}$,大于 10°C 的年积温 $4\,000^{\circ}\text{C}$ 以上。气候条件有利于喜温作物生长和作物积累糖分,适宜种植棉花、瓜果等作物。

由于农业是尉犁县的主要产业,农田灌溉用水量,水量不足制约了当地农业与经济的发展,进行作物需水量的精确估算,提高农业水资源效率是很必要的。本文利用尉犁县 2009 年 1—12 月的日气象资料,选取所需参数较少的模型(Makkink 模型, Turc 模型, Priestley-Taylor 模型及 Hargreaves 模型)计算参考作物腾发量的日值,并以 PMF-56 模型计算结果为标准,探讨上述模型在研究区的适用性。

2.2 模型计算

根据前述的 ET_0 计算模型(Makkink 模型, Turc 模型, PriestleyTaylor 模型及 Hargreaves 模型)以及 PenmanMonteith FAO 56(PMF-56)模型计算得到各种模型下的参考作物腾发量值。

2.2.1 日计算值的比较 图 1 为利用日气象资料计算的日参考作物蒸发蒸腾量的年内变化。由图 1 可以看出,不同计算方法得到的日参考作物蒸发蒸腾量在一年中的变化趋势基本相同,都是 7 月最大, 1 月或 12 月最小;夏季差异相对较大,冬、春季相对较小。

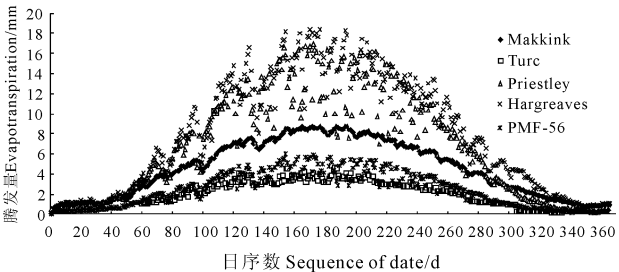


图 1 参考作物腾发量的日变化

Fig.1 Daily changes of reference crop evapotranspiration

2.2.2 相关性比较 通过日气象资料、不同计算方法得到的作物蒸腾量与 PMF-56 模型计算结果间的决定系数见图 2~图 5。

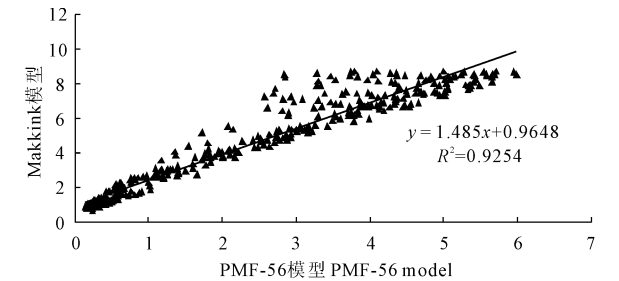


图 2 Makkink 模型与 PMF-56 模型作物蒸腾量计算值(mm)的相关性

Fig.2 Correlation between Makkink model and PMF-56 model

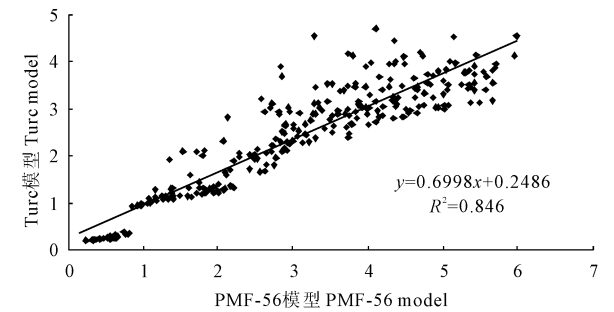


图3 Turc 模型与 PMF-56 模型作物蒸腾量计算值(mm)的相关性
Fig.3 Correlation between Turc model and PMF-56 model

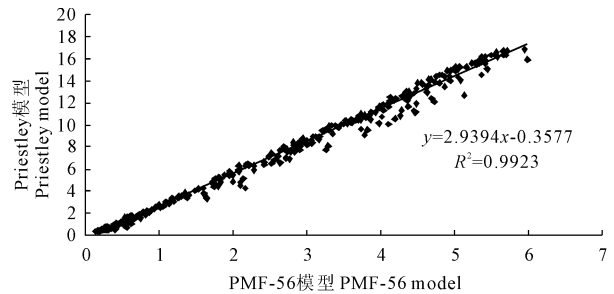


图4 Priestley 模型与 PMF-56 模型作物蒸腾量计算值(mm)的相关性
Fig.4 Correlation between Priestley model and PMF-56 model

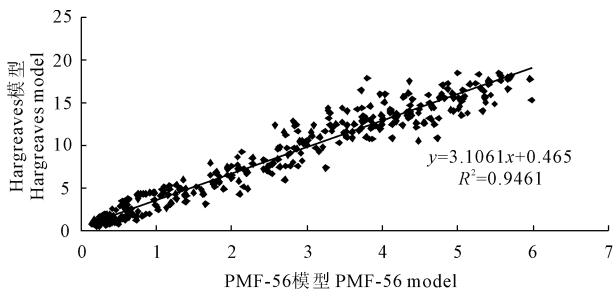


图5 Hargreaves 模型与 PMF-56 模型作物蒸腾量
计算值(mm)的相关性

Fig.5 Correlation between Hargreaves model and PMF-56 model

由图 2~5 可以看出,各种模型的相关系数都达到极显著水平($P=0.01$, $r_{\text{临界}}=0.135$),并且 Priestley 模型的相关系数最大,其次为 Hargreaves 模型和 Makkink 模型;Turc 模型的相关系数最小。

2.3 模型检验

根据式(8)~(10)对模型进行检验,结果见表 1。

表 1 模型计算结果对比

Table 1 Comparison of model results

模型 Model	R^2	RMSE/mm	MAE/mm
Makkink	0.9254	2.42	2.14
Turc	0.8460	0.94	0.75
Priestley	0.9932	5.56	4.36
Hargreaves	0.9461	6.83	5.59

根据表 1 可知,Turc 模型的模拟效果较好,其 RMSE 值为 0.94 mm,MAE 值为 0.75 mm;Hargreaves 模型的效果最差(尽管其决定系数值较大),其 RMSE 值为 6.83 mm,MAE 值为 5.59 mm。

3 讨论

1) 本文在 ET_0 计算时采用的时间尺度是以日为单位,倘若采用的时间计算尺度为旬、月、年时,模型拟合精度如何?哪一种模型为最优?这还有待于检验。

2) 新疆尉犁县地处西北内陆干旱区,塔里木盆地北缘。气候特点表现为夏季炎热少雨,冬季寒冷漫长。在此气候背景下,经检验计算 Turc 模型的模拟效果较好。然而,由于所处区域的气候背景不同,可能会导致模型的适用性存在局限性,这还需要进行比较分析。

4 结论

本文以新疆尉犁县为例,采用四种简化模型(Makkink 模型、Turc 模型、PriestleyTaylor 模型、Hargreaves 模型)对研究区的 ET_0 进行模拟计算,并将所得结果与 PMF-56 模型比较。结果表明:Turc 模型的日参考作物蒸发蒸腾量与 Penman-Monteith FAO 56 差异较小,适合用于研究区的 ET_0 计算,其次是 Makkink 模型与 PriestleyTaylor 模型,Hargreaves 模型的模拟效果最差。

一般来说,采用蒸渗仪数据来计算 ET_0 是比较科学合理的。但考虑到技术及经济的局限性,将这一技术应用到我国各地是有一定困难的。因此,通过理论推导方程并结合气象资料来计算 ET_0 便成为国内及国际的通用做法。但是在采用 PMF-56 模型时,也会遇到一个问题,即需要获取当地的气象资料,在这种情况下,通常需要简化方程来计算 ET_0 。因此,本研究结果对于气象数据缺失地区的 ET_0 计算有一定的帮助。与此同时,研究结果也为当地行政主管部门在灌溉需水量预测、规划及水资源利用效率等方面提供了一定参考。

参考文献:

[1] Allen R G, Luis S Pereira, Dirk Raes, et al. Crop evapotranspiration guidelines for comouting crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrig and Drain Paper 56, 1998.

[2] Priestley C H B, R J Taylor. On the assessment of surface heat and e-vaporation using large-scale parameters[J]. Mon Weather Rev, 1972, 100:81-92.

[3] Batchner C H. The accuracy of evapotranspiration estimated with the

FAO modified Penman equation[J]. Irrig Sci, 1984,5:223-233.

[4] 陈玉民,郭国双.中国主要农作物需水量等值线图研究[M].北京:中国农业科技出版社,1993.

[5] 龚元石. Penman-Monteith 公式与 FAO-PPP-17Penman 修正式计算参考作物蒸散量的比较[J].北京农业大学学报,1995,21(1):68-75.

[6] Kashyap PS, Panda RK. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in sub-humid region[J]. Agric Water Manag, 2001,50:9-25.

[7] Xu CY, Singh VP. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland[J]. Water Resour Manag, 2002,16(3):197-219.

[8] Sumner DM, Jacobs JM. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration[J]. J Hydrol, 2005,308:81-104.

[9] Nandagiri L, Kooroor GM. Performance evaluation of reference evapotranspiration equation across a range on Indian climate[J]. J Irrig Drain Eng, 2006,132(3):238-249.

[10] Landeraas G, Ortiz-Barredo A, López JJ. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain)[J]. Agric Water Manag, 2008,95:553-565.

[11] George BA, Reddy BRS, Raghuvanshi NS, et al. Decision support system for estimating reference evapotranspiration[J]. J Irrig Drain Eng, 2002,128(1):1-10.

[12] Hargreaves GH, Allen RG. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. J Irrig Drain Eng, 2003,129(1):53-63.

[13] Hargreaves GH, Samani ZA. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. Appl Eng Agric, 1985,1(2):96-99.

[14] Irmak S, Allen RG, Whitty EB. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida[J]. J Irrig Drain Eng, 2003,129(5):360-370.

[15] Qiu G Y, Miyamoto K, Sase S, et al. Comparison of the three-temperature model and conventional models for estimating transpiration[J]. JPN Agric Res Quart, 2002,36(2):73-82.

[16] 陈玉民,郭国双.中国主要作物需水量与灌溉[M].北京:水利电力出版社,1995:45-50.

[17] Turc L. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour[J]. Annal Agron, 1961,12(1):13-49(in French).

[18] Amatya DM, Skaggs RW, Gregory JD. Comparison of methods for estimating REF – ET[J]. J Irrig Drain Eng,1995,121(6):427-435.

[19] Irmak S, Allen RG, Whitty EB. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida[J]. J Irrig Drain Eng, 2003,129(5):360-370.

[20] Priestley CHB, Taylor RJ. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters[J]. Mon Weather Rev, 1972,100:81-92.

[21] Jensen ME, Burman RD, Allen RG. Evapotranspiration and irrigation water requirements[J]. ASCE Manual,1990,70:332-333.

[22] 谢平,陈晓宏,刘丙军.湛江地区适宜参考作物蒸发蒸腾量计算模型分析[J].农业工程学报,2008,24(5):6-9.

[23] 史晓楠,王全九,王新,等.参考作物蒸发蒸腾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.

[24] 刘钰.气象数据缺失条件下参照腾发量的计算方法[J].水利学报,2001,(3):11-17.

[25] 高瑞,忠超伦巴根,于婵,等.基于随机样本的神经网络模型估算参考作物蒸发蒸腾量[J].农业工程学报,2006,22(2):42-45.

(上接第 60 页)

对于各潜水蒸发经验模型,都存在一些参数与土壤质地有关,因此对于砂壤土、细砂等其他类型土壤而言,其取值亦不相同。所以,对于不同情况,如何选取 E_0 值有助于提高计算精度需另做研究。

参 考 文 献:

[1] 郝振纯,陈玺,王加虎,等.淮北平原裸土潜水蒸发趋势及其影响因素分析[J].农业工程学报,2011,27(6):73-78.

[2] 赵成义,胡顺军,刘国庆,等.潜水蒸发经验公式分段拟合研究[J].水土保持学报,2000,14(5):122-126.

[3] 李红寿,汪万福,张国彬,等.极干旱区深埋潜水蒸发量的测定[J].生态学报,2010,30(24):6798-6803.

[4] 张振华,史文娟,褚桂红.干旱区潜水蒸发的影响因素和计算方法分析[J].水资源与水工程学报,2008,19(6):78-80.

[5] 孟伟超,孟翀,刘磊.不同地下水埋深、气象因子及作物影响的潜水蒸发模型研究[J].太原理工大学学报,2008,39(4):422-425.

[6] 阿维里扬诺夫 CF.防治灌溉土地盐渍化的水平排水设施[M].北京:中国工业出版社,1985.

[7] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.潜水稳定蒸发的分析与经验公式[J].水利学报,1984,(8):60-64.

[8] 叶水庭,施鑫源,苗晓芳.用潜水蒸发经验公式计算给水度问题的分析[J].水文地质工程地质,1981,(4):48-50,41.

[9] 金光炎.平原地下水资源评价[M].北京:水利出版社,1982.

[10] 张顺联.地下水资源计算与评价[M].北京:水利电力出版社,1992.

[11] 张永明,胡顺军,翟禄新,等.塔里木盆地裸地潜水蒸发计算模型[J].农业工程学报,2009,25(1):27-32.

[12] 唐海行,苏逸深,张和平.潜水蒸发的实验研究及其经验公式的改进[J].水利学报,1989,(10):37-44.

[13] 付秋萍,张江辉,王全九.常用潜水蒸发经验公式在新疆地区适用性研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):182-188.

[14] 付秋萍.旱区潜水蒸发特征与排水系统参数确定方法研究[D].西安:西安理工大学,2007:23-33.

[15] 来剑斌,王永平,蒋庆华,等.土壤质地对潜水蒸发的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(6):153-157.

[16] 胡顺军,康绍忠,宋郁东,等.塔里木盆地潜水蒸发规律与计算方法研究[J].农业工程学报,2004,20(2):49-53.