

水稻作物系数与稻田渗漏模型参数的同步估算

石艳芬^{1,2}, 缴锡云^{1,2}, 罗玉峰^{1,2}, 虞晓彬^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:根据田间水量平衡模型,以田面水层深度误差平方和最小为目标函数,采用多变量非线性规划方法同步估算水稻作物系数和稻田渗漏模型参数,并利用统计学方法中的模型效率系数、平均相对误差、平均绝对误差等指标对模拟效果进行评价。实例计算结果表明,计算得到的水稻作物系数和稻田渗漏模型参数与经验值接近,田面水层深度的模拟值与实测值吻合良好,所提出的同步估算方法可用于水稻作物系数与稻田渗漏模型参数的估算。

关键词:水稻;作物系数;作物腾发量;稻田渗漏量;田面水层深度

中图分类号:S274.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)04-0027-04

Synchronous estimation of the crop coefficient for rice and the seepage model parameters for paddy fields//SHI Yanfen^{1,2}, JIAO Xiyun^{1,2}, LUO Yufeng^{1,2}, YU Xiaobin^{1,2} (1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Based on a water balance model, a multivariate nonlinear programming approach was employed to synchronously estimating the crop coefficients for rice and the seepage model parameters for paddy fields, with the objective function being to minimize the sum of square-error between the simulated face water depth and the observed one. Then, the model efficiency coefficient, the average relative error and the average absolute error were calculated to evaluate the simulation results of the approach. Case study shows that the simulated values for crop coefficients and seepage model parameters are both close to the empirical ones, and the simulated value for face water depth is in good agreement with the measured one. Hence, the approach presented in this paper can be used to estimate the crop coefficient for rice and the seepage model parameters for paddy fields.

Key words: rice; crop coefficient; crop evapotranspiration; paddy field seepage; face water depth

水稻各生长阶段的需水量和稻田渗漏量是指导稻田灌溉管理的重要参数。作物系数-参考作物腾发量法是计算作物需水量最普遍的方法^[1],作物系数作为该方法的重要参数,对它的研究一直备受关注。Vu 等^[2-3]曾采用 FAO-56 分段单值法来研究水稻的作物系数;Shah 等^[4]根据作物腾发量和参考作物腾发量的比值来确定水稻作物系数。由于气象条件、耕地措施、土壤类型、水分管理方式、作物品种和生长季节等因素对作物系数造成显著的影响,从而导致作物系数在不同区域和不同作物上的不可移用性^[5]。雷志栋等^[6-10]对中国不同地区、不同作物的作物系数确定方法和数值计算进行了大量的研究,并取得了许多成果,同时也证明不同地区、不同生长阶

段的水稻作物系数还存在较大差异,应利用实地的试验资料计算各地区、各类作物的作物系数实际值。

如何计算稻田渗漏量是国内外学者共同关注的焦点。Huang 等^[11]利用田间水量平衡模型计算了田间水平和垂直渗漏量;龚元石等^[12]利用田间水量平衡模型估算了冬小麦-夏玉米及冬小麦-裸地条件下历年 1 m 土层稻田渗漏量。稻田渗漏量属于作物需水的一部分,其大小与土壤质地、土壤结构、地下水位、田面水层深度以及边界出流条件等有密切关系,因此精确测定稻田渗漏量非常困难^[13]。利用观测的田面水层深度、灌溉排水资料和气象数据,根据田间水量平衡模型估算稻田渗漏量是常用的方法之一。

本文根据 2009 年高邮灌区观测的稻田田面水

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50839002-5)

作者简介:石艳芬(1984—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: happyxiaoshitou@163.com

通信作者:缴锡云(1962—),男,河北文安人,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: xjjiao@hhu.edu.cn

层深度、灌溉排水资料和气象数据资料,利用田间水量平衡模型同步估算各生长阶段的水稻作物系数和稻田渗漏模型参数,为精确计算作物需水量以及制定灌溉制度提供基础数据。

1 田间水量平衡模型

田间的水量平衡模型可用式(1)表示:

h_i - h_{i-1} = R_i + I_i - D_i - S_i - ET_i (1)

式中:h_i、h_{i-1}分别为第 i 天、第 i-1 天的田面水层深度,mm;R_i、I_i、D_i、S_i 分别为第 i 天的降雨量、灌水量、排水量、渗漏量,mm;ET_i 为第 i 天的作物腾发量,mm。

2 作物腾发量与稻田渗漏量的计算

2.1 作物腾发量

参考作物腾发量 ET_0 的计算广泛应用 Penman-Monteith 公式:

ET_{0i} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900}{T + 273}\gamma U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} (2)

其中 R_n = R_{ns} - R_{nl} 式中:ET_{0i}为第 i 天的参考作物腾发量,mm;R_n、R_{ns}、R_{nl}分别为净辐射、净短波辐射、净长波辐射,MJ/(m^2 \cdot d);G 为土壤热通量,MJ/(m^2 \cdot d);T 为平均气温,℃;U_2 为 2 m 高度处的风速,m/s;e_a、e_d 分别为饱和水汽压和实际水汽压,kPa;Δ 为温度-饱和水汽压关系曲线在 T 处的切线斜率,kPa/℃;γ 为湿度计常数,kPa/℃。

采用单作物系数法计算水稻的腾发量:

ET_i = K_{ci} ET_{0i} (3)

式中:K_{ci}为第 i 天的作物系数。

2.2 稻田渗漏量

稻田渗漏量分为田埂渗漏和底层渗漏,简称水平渗漏和垂直渗漏,它是水稻耗水的重要组成部分。由于地形、土壤条件与水文条件的差异较大,我国各地稻田渗漏量的变幅很大。根据田间有水层和无水层两种情况,分别按线性模型与非线性模型计算稻田渗漏量。

a. 田间有水层时。假定稻田渗漏量与田面水层深度之间为线性关系:

S_i = ah_i + b (4)

式中:S_i 为第 i 天的稻田渗漏量,mm;a、b 为拟合参数。

b. 田间无水层时。水稻生长后期,田面常出现无水层状况,此时,由于稻田土壤含水率高于田间持

水率,水稻根层内的土壤水分下移仍然比较显著。稻田渗漏量可按式(5)估算^[14]:

S_i = \frac{1\,000K_0}{1 + K_0\alpha \frac{t_i}{H}} (5)

式中:S_i 为第 i 天的稻田渗漏量,mm;K_0 为饱和水力传导度,主要与土壤质地有关,土壤越黏重,其值越小,一般取 0.1 ~ 1.0 m/d;α 为经验常数,一般为 50 ~ 250,土壤越黏重,其值越大;t_i 为土壤含水率饱和状态达到第 i 天水平时所经历的时间,d;H 为水稻主根层深度,m。

3 作物系数与渗漏模型参数的估算

3.1 目标函数

在建立田间水量平衡模型的基础上,将田面水层深度实测值与模拟值之差的平方和最小作为目标函数,同步估算作物系数与稻田渗漏模型参数。目标函数可表示为

\min W = \sum_{i=1}^n (h_{si} - h_i)^2 (6)

式中:W 为目标函数;h_{si}为第 i 天的田面水层深度实测值,mm。

3.2 约束条件

一般将作物系数随作物生长期的变化概化为梯形函数。对于水稻来说,将其生长阶段划分为初始期、发展期、中期和末期等 4 个阶段,生长时间分别为 20 d、20 d、50 d、30 d,于是梯形函数有 4 个特征点 A、B、C、D,其作物系数分别表示为 K_{c,ini}(A 点)、K_{c,mid}(B、C 点)、K_{c,end}(D 点)。按经验,3 个特征值在 0.9 ~ 1.5 之间取值。

根据式(4)、式(5),在有水层和无水层条件下要估算的渗漏模型参数包括 a、b、K_0 和 α。a 在 0 ~ 1 之间;b 在 0 ~ 5 之间;K_0 一般取 0.1 ~ 1.0,土壤越黏重,其值越小;α 一般为 50 ~ 250,土壤越黏重,其值越大。

3.3 计算方法

以 K_{ci}、K_0、a、b 和 α 为变量,以田面水层深度的实测值和模拟值之差的平方和最小为目标,采用多变量非线性规划方法进行求解,实现水稻作物系数与稻田渗漏模型参数的同步估算。

4 实例计算

试验区位于江苏省高邮市卸甲镇周庄村境内,属北亚热带季风气候区,年平均气温 14.6℃,常年降雨量 1 037 mm,多年平均蒸发量 1 060 mm。无霜期 242 天,最高气温 38.5℃,最低气温 -18.5℃,相

对湿度 75% 左右,寒暑分明,易旱易涝。受海洋季风的影响,6—9 月降雨偏多,多年平均汛期降雨量占多年平均雨量的 59.5%。浅层地下水位埋深 0.5~1.2 m,土壤耕层质地为黏壤土,适宜水稻、小麦、棉花、油菜等多种粮食与经济作物生长。

2009 年 6—10 月对试验区典型田块的田面水层深度进行逐日观测。利用灌水量、排水量、降雨量等数据资料,根据田间水量平衡模型率定不同生长期的不同作物系数及稻田渗漏模型参数。

以田面水层深度实测值和模拟值之差的平方和最小为目标,利用多变量非线性规划方法进行求解,实现水稻作物系数与稻田渗漏模型参数的同步计算。计算得到的水稻作物系数和稻田渗漏模型参数与经验值接近,分别为 $K_{c,ini}=0.942$, $K_{c,mid}=1.488$, $K_{c,end}=0.94$ 。水稻作物系数曲线见图 1,渗漏模型参数见表 1。

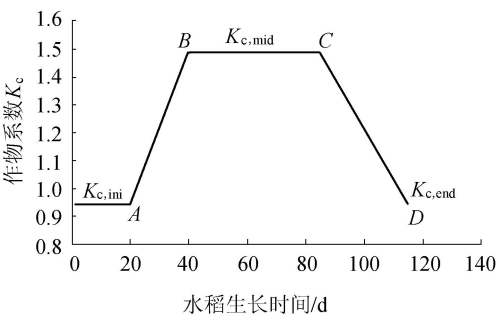


图 1 水稻作物系数曲线

表 1 稻田渗漏模型参数模拟值

田块	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>K</i> ₀	α
A2	0.043	0.465	0.4	120
A3	0.084	0.558	0.4	120
B4	0.044	0.552	0.4	120
B5	0.053	0.653	0.3	120
对照田块 1	0.141	1.000	0.4	150
对照田块 2	0.160	1.000	0.3	200

将 2010 年同期的田间试验观测数据,利用统计学方法中的模型效率系数、平均相对误差、平均绝对误差等指标对模拟效果进行评价,定量检验模拟值与实测值的差异程度:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \overline{Y_i})^2} \tag{7}$$

$$\Delta_{ME} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i) \tag{8}$$

$$\Delta_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| \tag{9}$$

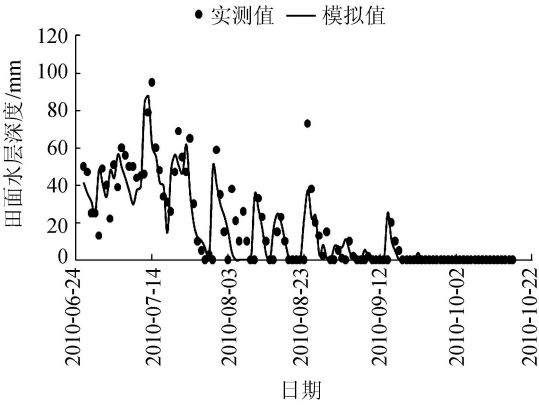
式中: R^2 为模型效率系数; Δ_{ME} 为平均相对误差;

Δ_{MAE} 为平均绝对误差; X_i 为模拟值; Y_i 为实测值; $\overline{Y_i}$ 为实测值的平均值。

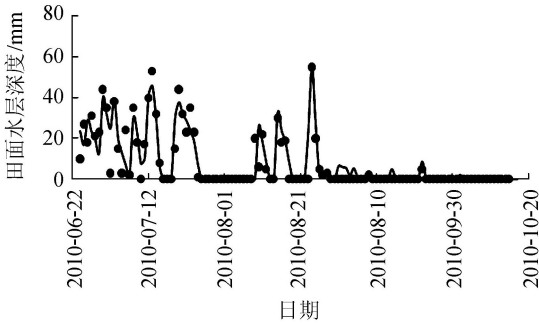
根据测定灌排水量等数据资料和田间水量平衡模型计算作物腾发量和田面水层深度,利用统计检验和图形对比来验证模拟效果,如表 2 和图 2 所示。从表 2 看出,模型效率系数都超过了 0.9,模拟效果较好。由图 2 可知,田面水层深度的实测值和模拟值吻合良好。

表 2 各田块田面水层深度的模拟效果评价指标

田块	<i>R</i> ²	Δ_{ME}	Δ_{MAE}
A2	0.93	-0.23	4.26
A3	0.90	0.71	2.94
C8	0.92	-2.16	8.72
C9	0.94	-1.93	6.62
对照田块	0.95	1.40	2.81



(a) A2 田块



(b) A3 田块

图 2 不同田块田面水层深度实测值与模拟值对比

5 结 语

根据建立的田间水量平衡模型,以田面水层深度之差的平方和最小为目标函数,采用多变量非线性规划方法,同步估算水稻作物系数和稻田渗漏模型参数,利用统计学方法中的模型效率系数、平均相对误差、平均绝对误差等指标对模拟效果进行评价。实例计算结果表明,计算得到的水稻作物系数和稻田渗漏模型参数与经验值接近,田面水层深度的模拟值与实测值吻合良好。

参考文献:

[1] 丁加丽,彭世彰,徐俊增,等. 控制灌溉条件下水稻蒸发蒸腾量及作物系数试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(3):239-242. (DING Jiali, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Experimental study on evapotranspiration and crop coefficient of rice under controlled irrigation [J]. Journal of Hohai University: Natural Science,2006,34(3) ,239-242. (in Chinese))

[2] VU S H, WATANABE H, TAKAGI K. Application of FAO-56 for evaluating evapotranspiration in simulation of pollutant runoff from paddy rice field in Japan [J]. Agricultural Water Management, 2005, 76 (3) : 195-210. (in Chinese))

[3] BETHUNE M, AUSTIN N, MAHER S. Quantifying the water budget of irrigated rice in the shepparton irrigation region, Australia [J]. Irrigation Science, 2001, 20 (3) : 99-105.

[4] SHAH S B, EDLING R J. Daily evapotranspiration prediction from Louisiana flooded rice field [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce, 2000, 126 (1) : 8-13.

[5] 丁加丽. 控制灌溉水稻水分利用规律及蒸发蒸腾量模拟研究 [D]. 南京:河海大学,2007.

[6] 雷志栋,罗毅,杨诗秀,等. 利用常规气象资料模拟计算作物系数的探讨 [J]. 农业工程学报,1999,15 (3) : 119-122. (LEI Zhidong, LUO Yi, YANG Shixiu, et al. Calculation of crop coefficient with meteorological data [J]. Transations of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15 (3) : 119-122. (in Chinese))

[7] TYAGI N K, SHARMA D K, LUTHRA S K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter [J]. Agricultural Water Management, 2000, 45 (1) : 41-54.

[8] 王笑影,梁文举,闻大中. 北方稻田蒸散需水分析及其作物系数确定 [J]. 应用生态学报,2005,16 (1) : 69-72.

(上接第 26 页)

[8] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction [J]. Geotechnique, 1999, 49 (6) : 835-840.

[9] 郑宏,李春光,李焯芬,等. 求解安全系数的有限元法 [J]. 岩土工程学报,2002,24 (5) : 626-628. (ZHENG Hong, LI Chunguang, LEE C F, et al. Finite element method for solving the factor of safety [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (5) : 626-628. (in Chinese))

[10] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

[11] HASSIOTIS S J, HAMEAU L, GUNARATNE M. Design method

(WANG Xiaoying, LIANG Wenju, WEN Dazhong. Analysis of paddy field evapotranspiration in North China and calculation of crop coefficient [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16 (1) : 69-72. (in Chinese))

[9] 杨晓光,BOUMAN B A M,张秋平,等. 华北平原旱稻作物系数试验研究 [J]. 农业工程学报,2006,22 (2) : 37-41. (YANG Xiaoguang, BOUMAN B A M, ZHANG Qiuping, et al. Crop coefficient of aerobic rice in North China [J]. Transations of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 (2) : 37-41. (in Chinese))

[10] 彭世彰,丁加丽,茆智,等. 用 FAO-56 作物系数法推求控制灌溉条件下晚稻作物系数及验证 [J]. 农业工程学报,2007,23 (7) : 30-34. (PENG Shizhang, DING Jiali, MAO Zhi, et al. Estimation and verification of crop coefficient for water saving irrigation of late rice using the FAO-56 method [J]. Transations of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (7) : 30-34. (in Chinese))

[11] HUANG H C, LIU C W, CHEN S K, et al. Analysis of percolation and seepage through paddy bunds [J]. Journal of Hydrology, 2003, 284 (1/2/3/4) : 13-25.

[12] 龚元石,李保国. 应用农田水量平衡模型估算土壤水渗漏量 [J]. 水科学进展, 1995, 6 (1) : 16-20. (GONG Yuanshi, LI Baoguo. Using field water balance model to estimate the percolation of soil water [J]. Advances in Water Science, 1995, 6 (1) : 16-20. (in Chinese))

[13] 陈家宙,何圆球,陈明亮. 用大型 Lysimeter 和 TDR 测算赣东北红壤农田的渗漏量 [J]. 水土保持学报,2002,16 (1) : 88-91. (CHEN Jiazhou, HE Yuanqiu, CHEN Mingliang. Estimating water leakage in red soil farmland using lysimeter and TDR in Northeast Jiangxi Province [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16 (1) : 88-91. (in Chinese))

[14] 李远华,罗金耀. 节水灌溉理论与技术 [M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.

(收稿日期:2012-08-07 编辑:周红梅)

for stabilization of slopes with piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, 123 (4) : 314-323

[12] BISHOP A W. The use of the slip circle in stability analysis of slopes [J]. Geotechnique, 1955, 5 (1) : 7-17.

[13] 刘金龙,王吉利,梁昌望,等. 库水位变化对边坡稳定性影响的有限元模拟 [J]. 水力发电,2007,33 (10) : 41-44. (LIU Jinlong, WANG Jili, LIANG Changwang, et al. EFM Simulation on the influence of water level fluctuation on slope stability [J]. Water Power, 2007, 33 (10) : 41-44. (in Chinese))

[14] GB 50286—1998 堤防工程设计规范 [S].

(收稿日期:2012-07-19 编辑:周红梅)