

基于水量平衡原理的沟灌水流推进解析模型研究*

聂卫波¹ 马孝义² 费良军¹

(1. 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048;

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】 传统的基于水量平衡原理的沟灌水流推进模型研究,必须给定下渗水形状系数 σ_s 的具体值,导致模型精度受到一定影响。本文通过对下渗水形状系数 σ_s 与水流推进关系的理论分析,建立基于水量平衡原理的沟灌水流推进解析模型,确定其迭代算法,研究地表储水形状系数不同取值(介于0.70~0.80之间)对模型计算精度的影响,并结合已有的文献资料和田间试验对模型验证。研究表明:所建模型可解决沟灌过程中下渗水形状系数难以直接给定的问题,提高了模型的精度;地表储水形状系数在0.70~0.80之间的不同取值对模拟结果影响较小,且取0.75时的模拟值优于取0.70或0.80时的计算结果。验证结果表明所建立的解析模型有较为严谨的物理基础,计算方便,精度较高,具有较强的实用性。

关键词: 水量平衡模型 沟灌 地表储水形状系数 下渗水形状系数 解析解

中图分类号: S275.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)05-0042-05

Research on Analytic Model of Furrow Irrigation Water Movement
Based on Water Balance Method

Nie Weibo¹ Ma Xiaoyi² Fei Liangjun¹

(1. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

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

Abstract

In the traditional water movement model of the furrow irrigation based on water balance method, it is necessary to determine the value of the figure coefficient of infiltration water (σ_s) before simulating water flow of the furrow irrigation, which affected the precision of the model. The relationship between the figure coefficient of infiltration water and water flow under furrow irrigation was analyzed, an analytic model of furrow irrigation on the basis of water balance method was set up, and the iterative algorithm to the analytic model was determined. The influence of different σ_s values in 0.70~0.80 on the model compute results was studied, the model results were verified with some research results and field experimental values. The results showed that the problem of getting σ_s directly with difficulty was solved and the accuracy of the model was improved. It is also found that different σ_s values in 0.70~0.80 has little influence on the model compute results and when the σ_s value is 0.75, it has better accuracy for the model than that when the σ_s value is 0.70 or 0.80. The study indicated that the analytic model has some advantages, such as simple calculation method and solution, high accuracy.

Key words Water balance model, Furrow irrigation, Figure coefficient of surface storage, Figure coefficient of infiltration water, Analytic solution

收稿日期: 2009-06-15 修回日期: 2009-09-17

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11B04)、国家自然科学基金资助项目(50579064)、西安理工大学博士科研启动资金资助项目(106-210916)、陕西省重点学科建设资助项目和西北农林科技大学人才专项资金项目(BJRC-2009-001)

作者简介: 聂卫波, 讲师, 博士生, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: nwbo2000@163.com

通讯作者: 马孝义, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: xiaoyimasl@yahoo.com.cn

引言

沟灌是宽行距作物广泛采用的灌水方法,分析沟灌水流推进过程对确定灌水技术指标有重要的作用,同时也可反推沟灌田间平均入渗参数值和糙率等^[1-3]。目前描述沟灌水流运动主要有完全水动力学、水量平衡、零惯量、动力波 4 种数学模型^[4]。其中水量平衡模型具有严谨的物理基础、简便易用而被广泛应用。Hall 等^[5]提出该模型求解畦灌水流推进过程的方法,引入了地表储水形状系数和下渗水形状系数,但其对下渗水形状系数的取值过于简单,导致计算出的入渗量与试验值有较大误差,使得模型精度降低且计算过程比较繁琐;Alazba 和 Strelkoff^[6]提出以水量平衡原理为基础模拟水流运动规律的计算模型克服了 Hall 方法的缺点,但其求解过程复杂,使其应用受到了一定的限制;Vailantzas^[7]用该模型对沟灌水流运动过程进行了模拟,其模拟结果令人满意,但对水流推进方程中 γ 的计算过于复杂,导致模型求解计算过程烦琐,使用不够方便;Alvarez^[8]假设同一田块不同流量下各灌水沟的入渗指数 α 值(Kostiakov 模型)和 γ 值(水流推进方程)保持不变,采用该模型模拟水流运动过程,但假设条件与实际有所不符,使其具有一定的局限性。本文针对传统的基于水量平衡原理的沟灌水流推进模型研究中需给定下渗水形状系数 σ_s 的具体值,而造成模型精度不高的问题,试图通过分析得出地面储水形状系数的合理取值范围,并采用迭代算法以克服下渗水形状系数难以直接给定的问题,以此为基础建立计算精度较高的模拟沟灌水流推进过程的解析模型。

1 理论分析与模型建立

在沟灌灌水过程中,从水流进入灌水沟首部开始,水流推进到某一距离时的地表水面线与湿润范围,如图 1 所示。

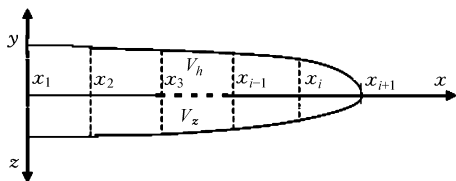


图 1 沟灌地表水面线与湿润范围示意

Fig. 1 Concept diagram of the surface water line and humidity dimension in furrow irrigation

根据水量平衡原理,沟灌水流在推进过程中进入沟中的总水量等于入渗量与地表积水量之和,即

$$q_0 t = V_h + V_z \quad (1)$$

式中 q_0 ——入沟流量, m^3/min
 t ——灌水时间, min
 V_h ——灌水时储存于地表上的水量, m^3
 V_z ——灌水时累积入渗的水量, m^3

1.1 沟灌地表储水量

由图 1 可知,当水流前锋推进到 x 处时,灌水沟中的地表储水量为

$$V_h = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) (x_{i+1} - x_i) \quad (2)$$

式中 i ——沿沟长的观测点号
 N ——观测个数
 x_i, x_{i+1} ——第 $i, i+1$ 个观测点距沟首的距离, m
 A_i, A_{i+1} —— x_i 和 x_{i+1} 处的过水断面面积, m^2

由于 A 值较难确定,引入地表储水形状系数 σ_s ,其计算式为

$$\sigma_s = \frac{V_h}{A_0 x} \quad (3)$$

将式(3)进行变换,可得地表储水量简化计算公式,即

$$V_h = \sigma_s A_0 x \quad (4)$$

式中 x ——水流前锋距沟首的距离, m
 A_0 ——沟首平均过水断面面积, m^2

对于 σ_s 的取值,Alazba^[9]等建议在 0.7 ~ 0.9 之间取值,缴锡云^[10]等建议在 0.7 ~ 0.8 之间取值,并分析其对计算累积入渗量的影响,结果表明影响不大。缴锡云^[10]、Sepaskhah^[11]等建议取其均值 0.75, Kanya^[12]等建议取 0.77, 本文综合考虑以上建议,拟对 σ_s 分别取 0.70、0.75、0.80 进行计算。 A_0 可根据 Walker^[13]提出的方法进行计算,其假定灌水沟的湿周 W_p 和过水断面面积 A 分别与沟中水深 h 呈幂函数关系,即

$$W_p = b_1 h^{b_2} \quad (5)$$

$$A = a_1 h^{a_2} \quad (6)$$

式中 a_1, a_2, b_1, b_2 ——拟合参数

由于沟灌过程中水流变化缓慢,可近似按均匀流处理,根据水力学原理,沟灌过程中的曼宁公式可表示为

$$q = \frac{60}{n} A R^{2/3} J^{1/2} \quad (7)$$

其中 $R = A/W_p$
式中 n ——曼宁糙率系数 J ——沟底坡降
 R ——水力半径

将 $R = A/W_p$ 代入式(7),并结合式(5)和式(6)可得

$$\frac{A^{5/3-2b_2/(3a_2)}}{b_1^{2/3}a_1^{-2b_2/(3a_2)}} = \frac{qn}{60J^{1/2}} \quad (8)$$

对式(8)进行变换,可得过水断面面积的计算公式为

$$A = \left(\frac{qn}{60b_1^{2/3}a_1^{-2b_2/(3a_2)}J^{1/2}} \right)^{\frac{1}{5/3-2b_2/(3a_2)}} \quad (9)$$

令 $\rho_2 = 5/3 - 2b_2/(3a_2)$, $\rho_1 = \frac{a_1^{5/3-\rho_2}}{b_1^{2/3}}$, 则沟首处的过水断面面积可将式(9)变为

$$A_0 = \left(\frac{q_0 n}{60\rho_1 J^{0.5}} \right)^{1/\rho_2} \quad (10)$$

1.2 沟灌地下储水量

由图1可知,当水流前锋推进到 x 处时,灌水沟中的累积入渗水量为

$$V_z = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \right) (x_{i+1} - x_i) \quad (11)$$

式中 Z_i, Z_{i+1} —— x_i 和 x_{i+1} 处的累积入渗水量, m^2

引入下渗水形状系数 σ_z , 将其代入式(11), 则可得利用沟首累积入渗水量 Z_0 计算入渗总水量的简化式

$$V_z = \sigma_z Z_0 x \quad (12)$$

沟灌属于二维入渗,不仅具有垂向入渗,而且具有侧向入渗。Serralheiro^[14] 分别采用 Kostikov 模型、Kostikov-Lewis 模型、Philip 模型对沟灌累积入渗量进行计算,结果表明 Kostikov 模型精度高;且 Kostikov 模型所含参数少,故本文采用其计算沟中的累积入渗水量,则式(12)可变为

$$V_z = \sigma_z k t^\alpha x \quad (13)$$

式中 k, α ——入渗参数

对于 σ_z 的取值,张新民等^[15] 建议 σ_z 取值在 0.5~1.0 之间。Fok 和 Bishop^[16] 在假定地表水流推进过程符合幂函数规律、土壤入渗符合 Kostikov 模型基础上,推导得出下渗水形状系数的计算式为

$$\sigma_z = \frac{\alpha + \gamma(1 - \alpha) + 1}{(1 + \alpha)(1 + \gamma)} \quad (14)$$

式中 γ ——拟合参数

$$x = Pt^\gamma \quad (15)$$

式中 P ——水流推进函数系数

1.3 模型建立

将式(4)和式(13)代入式(1)中,可得

$$q_0 t = \sigma_z A_0 x + \sigma_z k t^\alpha x \quad (16)$$

对式(16)进行变换可得

$$x = \frac{q_0 t}{\sigma_z A_0 + \sigma_z k t^\alpha} \quad (17)$$

对于式(17)的求解,需假定在灌水时的入沟流量 q_0 , 而其他参数都可直接或间接求得, 则式(17)

就成为一个沟灌时水流推进距离 x 与时间 t 的解析函数模型。但由于下渗水形状系数为一随灌水过程而变化的量,无法直接给定,为此本文利用逐渐逼近的方法的进行计算。具体步骤为:① 幂函数回归。令 $\sigma_s = 0.70$; γ 取值范围在 0~1 之间,为加快收敛速度,建议其在 0.5~1 之间取任意初值,记为 γ_0 并代入式(14),求得 σ_z 初值,记为 σ_{z0} 。将 $\sigma_s = 0.70$ 和 σ_{z0} 代入式(17),可计算得出不同灌水时间 t_i 所对应的沟中水流推进距离 x_i , 对 t_i 和 x_i 采用式(15)进行幂函数回归,可得到式(15)指数 γ , 记为 γ_1 。② 迭代计算。用第1次回归的结果 γ_1 代替 γ_0 , 可得 σ_{z1} 值,重复步骤①的计算过程,得到第2次回归值,记为 γ_2, σ_{z2} 。如此进行 n 次迭代计算直到满足精度要求,便可得到不同灌水时间 t_i 所对应的水流推进距离 x_i 。③ 精度控制。误差控制计算式为

$$|\sigma_{zn} - \sigma_{zn-1}| \leq \xi \quad (18)$$

式中 ξ 为下渗水形状系数 σ_z 的允许计算误差。如果 σ_{zn} 和 σ_{zn-1} 之差满足式(18), 则将 σ_{zn} 代入式(17), 得出最终不同灌水时间 t_i 所对应的水流推进距离 x_i 。

对以上过程采用 Matlab 软件编制迭代计算程序,经计算表明该算法对各算例均是收敛的,一般迭代 3~4 次即可稳定。对于 σ_s 分别取 0.75、0.80 时,其计算步骤和上述过程相同。

2 模型检验

为检验式(17)模型的可靠性,以相关文献的试验资料^[8] 和田间沟灌试验对模型进行了验证。表1中 5~8 号沟各沟基本参数、水流推进距离与时间取原文献测定值。田间试验在陕西杨凌区三级阶地中壤土质地的田块中进行,试验处理如表1所示。灌水前测得土壤含水率为 21.5%,在田块前端修筑储水槽,以保证灌水流量的稳定,入沟流量在 2~4 L/s 间选取,沟中水深结合工程实际一般控制在 8~10 cm 之间,并修筑临时灌水沟,其形状统一采用梯形断面,其沟底宽 20 cm、沟深 15 cm、边坡 1:1;并进行入渗试验,在每条沟首、中、尾部各测 1 个点,取其所测点均值得出各沟入渗参数 k, α 值;入沟流量用三角薄壁堰测定,在沟中每隔 10 m 设立观测点并记录水流推进时间。田间试验中各灌水沟的曼宁糙率系数 n 用零惯量模型反推方法确定,参见文献[17~20],其值均在 0.12~0.18 之间变化,为保证本文所建模型求解的简便性,综合考虑其曼宁糙率系数 n 统一取值 0.15。

将表1中的参数代入式(9),求得不同流量下

表 1 各灌水沟试验参数与模型验证

Tab.1 Parameters of experimental and model testify in furrow irrigation

沟号	沟长 /m	q_0 / $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	$J_0 /$ %	ρ_1	ρ_2	入渗参数		n	误差绝对值均值/%		
						$k/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-\alpha}$	α		$\sigma_s = 0.70$	$\sigma_s = 0.75$	$\sigma_s = 0.80$
1	80	0.171 6	0.6	1.322 7	1.537 8	0.003 66	0.882	0.15	4.13	3.68	4.46
2	90	0.142 2	0.6	1.322 7	1.537 8	0.005 65	0.759	0.15	4.80	3.22	1.77
3	80	0.171 0	0.6	1.322 7	1.537 8	0.004 81	0.832	0.15	3.60	2.36	2.75
4	80	0.193 8	0.6	1.322 7	1.537 8	0.006 79	0.767	0.15	2.14	3.84	6.12
5 ^[8]	240	0.120 0	0.2	0.529 0	1.337 0	0.010 65	0.367	0.02	2.19	1.80	1.70
6 ^[8]	240	0.180 0	0.2	0.529 0	1.337 0	0.014 45	0.372	0.02	2.09	1.99	1.79
7 ^[8]	240	0.240 0	0.2	0.529 0	1.337 0	0.014 36	0.391	0.02	2.77	2.30	2.27
8 ^[8]	380	0.192 0	0.09	0.463 2	1.333 0	0.004 50	0.499	0.04	5.60	4.14	3.82
均值									3.42	2.92	3.08

注:误差绝对值均值分别为灌水沟内多点 $|x$ 模拟值 $-x$ 实测值 $|/x$ 实测值的均值,灌水沟内的观测点在7到13个之间变化。

的各沟沟首过水断面面积 A_0 ,将其值代入式(17),时间 t 以记录值代入,并结合式(14)和式(15),对其进行逐渐逼近的计算,可得到水流推进距离的模拟值,对式(18)按照 $\xi = 0.001$ 进行精度控制。将最终的水流推进模拟值与实测值进行比较,如图2所示,由于篇幅的限制,仅列举部分模型求解值与实测值的对比结果;同时计算了模拟值与实测值之间误差绝对值均值,如表1中 σ_s 所示。

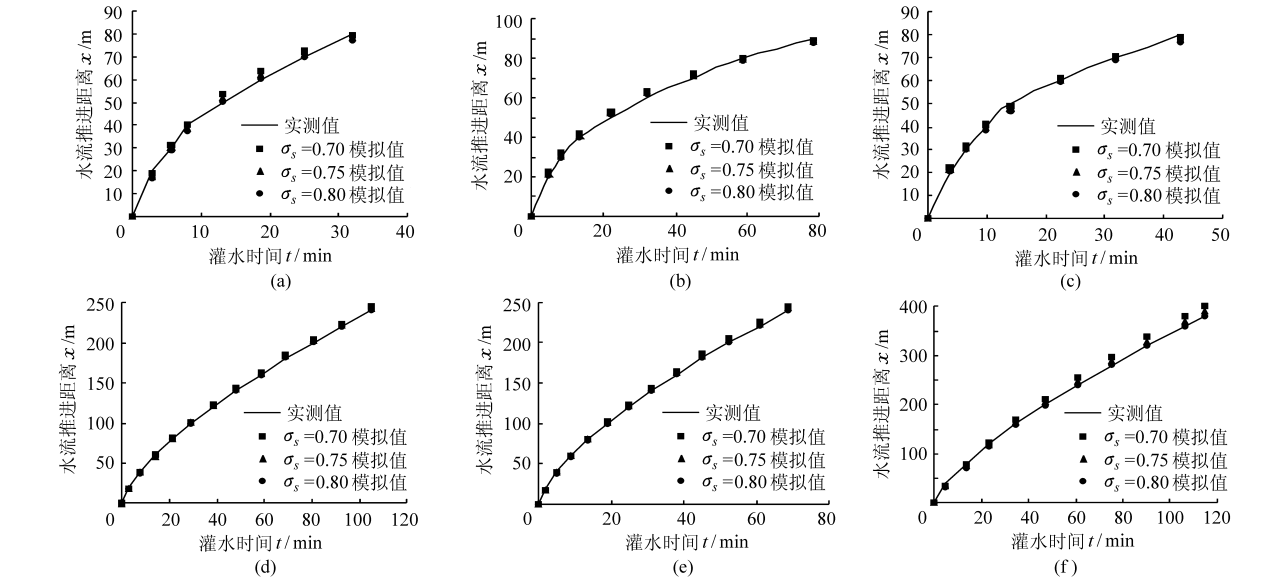


图 2 沟灌解析模型的验证

Fig.2 Testify of furrow irrigation analytic model

(a) 1 号 (b) 2 号 (c) 3 号 (d) 5 号 (e) 7 号 (f) 8 号

从表 1 和图 2 可以看出,不同的 σ_s 取值对式(17)的计算精度影响较小,且 $\sigma_s = 0.75$ 时多组灌水沟误差绝对值均值最小,其大多数灌水沟模拟结果优于 σ_s 分别取 0.70 和 0.80 时的情况,说明对于地面储水形状系数在 0.70 到 0.80 之间取值是合理的。从对已有文献资料和田间试验验证的模型计算误差绝对值均值分析可知,对于各灌水沟除个别组误差绝对值均值大于 5% 外,其余均在 5% 以下;多组灌水沟的误差绝对值均值小于 4%,表明本文模型计算精度较高,方法简便,实用性强。同时对本

文提出的解析模型进一步研究,可用于水流推进成果反推田间曼宁糙率系数和平均入渗参数值。

3 结束语

以水量平衡原理为基础,通过对下渗水形状系数与水流推进关系的理论分析,建立了模拟沟灌水流推进过程解析模型;采用 Matlab 软件对模型进行迭代计算,克服了下渗水形状系数难以直接给定的问题;通过已有的文献资料和田间试验对模型验证,结果表明模拟值与实测值之间误差小,同时也表明

沟灌水流推进过程中地表储水因子在 0.70 ~ 0.80 之间取值是合理的, 并发现 σ_s 取 0.75 时模拟结果优于其取 0.70、0.80 时的情况。表明本文建立的简化解析模型有较为严谨的物理基础, 计算方便, 精度较高, 具有较强的实用性。由于本文所建解析模型需将曼宁糙率系数作为已知参数进行求解, 但田间曼宁糙率系数的影响因素较多, 对不同田块各灌水沟的糙率取值还需进一步研究。

参 考 文 献

1 Walker W R. Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(2):129 ~ 136.

2 Gillies M H, Smith R J. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data[J]. Irrigation Science, 2005, 24(1):25 ~ 35.

3 管孝艳, 杨培岭, 吕烨. 基于 IPARM 方法估算沟灌土壤入渗参数[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1):85 ~ 88.

4 路京选, 刘亶仁, 惠士博. 沟畦灌溉水流运动数学模拟简介[J]. 自然资源, 1989(1):74 ~ 80.
Lu Jingxuan, Liu Danren, Hui Shibo. Mathematical simulation synopsis about water movement of border and furrow irrigation [J]. Resources Science, 1989(1):74 ~ 80. (in Chinese)

5 Hall W A. Estimating irrigation border flow[J]. Agric. Eng., 1956, 37:263 ~ 265.

6 AlAzba A, Strelkoff T. Correct form of Hall technique for border irrigation advance[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1994, 120(2):292 ~ 307.

7 Valiantzas J D. Surface water storage independent equation for predicting furrow irrigation advance[J]. Irrigation Science, 2000, 19(3):115 ~ 123.

8 Alvarez J A R. Estimation of advance and infiltration equations in furrow irrigation for untested discharges[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(3):227 ~ 239.

9 Alazba A A. Design procedure for border irrigation[J]. Irrigation Science, 1997, 18(1):33 ~ 43.

10 缴锡云, 王文焰, 雷志栋, 等. 估算土壤入渗参数的改进 Maheshwari 法[J]. 水利学报, 2001, 32(1):62 ~ 67.
Jiao Xiyun, Wang Wenyan, Lei Zhidong, et al. Improve Maheshiwari method for estimating infiltration parameters of soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(1): 62 ~ 67. (in Chinese)

11 Sepaskhah A R, Afshar-Chamanabad H. Determination of infiltration rate for every-other furrow irrigation[J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(4):479 ~ 484.

12 Kanya L, Khatri R J S. Real-time prediction of soil infiltration characteristics for the management of furrow irrigation[J]. Irrigation Science, 2006, 25:33 ~ 43.

13 Walker W R. Guidelines for designing and evaluation surface irrigation systems[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper NO.45, 1989.

14 Serralheiro R P. Furrow irrigation advance and infiltration equations for a Mediterranean soil[J]. Journal of Agriculture Engineering Research, 1995, 62(2):117 ~ 126.

15 张新民, 王根绪, 胡想全, 等. 用畦灌试验资料推求土壤入渗参数的非线性回归法[J]. 水利学报, 2005, 36(1):28 ~ 34.
Zhang Xinmin, Wang Genxu, Hu Xiangquan, et al. Nonlinear regression method for estimating infiltration parameters according to border irrigation data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(1): 28 ~ 34. (in Chinese)

16 Fok Y S, Bishop A A. Analysis of water advances in surface irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1965, 91(1):99 ~ 117.

17 章少辉, 许迪, 李益农, 等. 基于 SGA 和 SRFR 的畦灌入渗参数与糙率系数优化反演模型(I) ——模型建立[J]. 水利学报, 2006, 37(11):1 297 ~ 1 302.

18 刘群昌, 刘文朝, 杨永振, 等. 微地形对波涌畦灌灌水质量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(1):73 ~ 75.
Liu Qunchang, Liu Wenzhao, Yang Yongzhen, et al. Influence of microtopography irrigation quality of surge-flow irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(1):73 ~ 75. (in Chinese)

19 闫庆健, 李久生. 地面灌溉水流特性及水分利用率率的数学模拟[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(2):62 ~ 66.
Yan Qingjian, Li Jiusheng. The simulation on the performance of water advance and recession, application efficiency of border irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(2):62 ~ 66. (in Chinese)

20 李益农, 许迪, 李福祥. 田面平整精度对畦灌系统性能影响的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4):43 ~ 48.
Li Yinong, Xu Di, Li Fuxiang. Modeling on influence of land leveling precision on basin irrigation performance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(4):43 ~ 48. (in Chinese)