

基于畦首水深和田面水流推进过程的畦灌流量反演方法

杨静^{1a,1b}, 缴锡云^{1a,1b}, 刘懿²

(1. 河海大学 a. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室; b. 水利水电学院,
江苏 南京 210098; 2. 三亚市水利水电勘测设计院, 海南 三亚 572000)

摘要: 针对畦灌稳健设计中单宽流量难以实现无干扰测量的问题, 研究入畦流量的反演方法。利用在中科院南皮生态农业试验站进行的灌水试验数据, 采用两点法估算入渗参数, 引入地表储水形状系数和地下储水形状系数, 根据畦首水深和水流推进的数据, 估算了畦田的单宽流量。与实测单宽流量相比, N_1 、 N_2 、 N_3 号畦田的相对误差分别为 13.27%、8.02%、11.24%。结果表明: 该方法用于畦灌稳健设计中单宽流量控制误差调查是可行的。

关键词: 畦灌; 入渗; 水深; 水流推进; 流量; 反演

中图分类号: S275.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0238-03

Inversion method of border flow based on headwater depth and advance process of surface water flow

YANG Jing^{1a,1b}, JIAO Xiyun^{1a,1b}, LIU Yi²

(1. a. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering; b. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Institute of Sanya Water Conservancy and Hydropower Investigation and Design, Sanya 572000, China)

Abstract: Aimed at the problem that the single wide flow is difficult to measure without interference in robust design of border irrigation system, the paper analyzed the inversion method of border flow rate. The infiltration parameters were estimated by two point method based on the data collected in Nanpi Eco – Agriculture experimental station. Then it estimated the single wide flow based on the data of border headwater depth and water advance process, and introduced two parameters of surface shape factor and underground shape factor. Compared with the measured single wide flow, the relative errors in N_1 , N_2 and N_3 border are 13.27%, 8.02% and 11.24% respectively. Results show that the inversion method is feasible for error control of single wide flow in the robust design of border irrigation.

Key words: border irrigation; infiltration; water depth; water advance process; flow rate; inversion

灌水质量的影响因素分为自然性能因素(入渗性能、田面糙率、土壤质地等)和灌水技术要素(灌水流量、田块规格、改水成数等)^[1], 各影响因素对畦灌质量的敏感性顺序从高到低依次为单宽流量、Kostiakov 公式入渗指数、Kostiakov 公式入渗系数、糙率系数、畦长、田面纵坡和改水成数, 研究表明单宽流量对灌水质量影响的贡献率高达 23.81%^[2], 因此在畦灌设计和管理中需要特别关注单宽流量的控制精度问题。朱霞^[3]研究 28 条灌水沟的入沟流量发现, 流量变异系数最大为 0.19, 最小仅为 0.04, 28 条灌水沟的入沟流量变异系数均值为 0.11, 可认为沟内流量具有中等变异强度, 陈云

武^[4]基于 Monte Calo 模型分析表明, 灌水流量的变异导致灌水均匀度敏感性大于灌水效率。为了克服流量及其它因素的控制误差和时空变异, 王维汉^[2]进行沟畦灌的稳健设计。提高灌水质量主要有两个途径: 一是工程措施, 通过田间工程改造, 如进行土地平整、压实灌水沟土壤、长畦改短畦等措施减小影响因素的变异性; 二是技术手段, 采用稳健设计理论, 结合地面灌溉数值模拟模型来优化田间灌水技术要素组合。其中利用数值模拟方法提高灌水质量的稳健性是最为有效的手段之一^[5]。进行稳健设计工作的基础之一就是对灌水流量等因素的控制误差以及糙率、入渗参数等的

收稿日期: 2015-07-31; 修回日期: 2015-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(50979025); 水利部公益性行业专项经费项目(201301014)

作者简介: 杨静(1991-), 女, 新疆昌吉人, 在读硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。

通讯作者: 缴锡云(1962-), 男, 河北廊坊人, 博士后, 教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。

空间变异性进行“调查”。流量的精确测量方法有很多,包括各种流量计、水量计等,但是对于以统计流量控制误差为目标的调查来说,这些方法均难以实现无干扰测量,不能满足要求。因此,有必要深入分析入畦流量调查的无干扰方法。本文利用两点法估算入渗参数,引入地表储水形状系数和地下储水形状系数,根据水量平衡方程估算入畦单宽流量。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于 2013 年 4 月中旬,在中科院南皮生态农业试验站(河北沧州)的冬小麦田进行。试验选取 3 条畦田(畦田自东向西编号为 N_1 、 N_2 、 N_3)进行灌水。畦田规格为畦长 80 m,畦宽 3.7 m,灌溉水源为机井抽取的地下水,设计单宽流量分别为 3、5、7 L/(s·m)。改水成数 G 分别为 0.85、0.8、0.8。试验区主要种植作物为冬小麦和夏玉米,土壤黏粒、粉粒、砂粒的质量分数分别为 7.79%、67.02% 和 25.19%。实验区不同深度的土壤干密度为 1.2~1.56 g/cm³。

1.2 畦田地表水流观测

对每条畦田地表水流推进与消退过程进行观测。在 N_1 畦东侧做一个临时性畦田,作为保护带。当机井出水后先进入保护带,一方面可以等出水流量逐渐平稳,另一方面可使 N_1 畦形成单边测渗,从而保证与其它畦田一致。灌水试验过程中,针对畦田地表水流运动过程与畦首水深进行观测。

1.2.1 水流推进消退过程观测 在进行畦灌试验时,根据沿畦长方向上布设的标杆(距畦首 0、5、10、…、75、80 m),确定观测水流推进过程和消退过程的控制点。由观测者用秒表计时,从灌溉时始,记录水流前锋推进到各个控制点处的时间和该控制点水

流消退结束的时间。
1.2.2 畦首水深观测 在畦首处布设电容式水位传感器(OdysseyTM4.5,精度 0.1mm,量程 0~0.5 m),记录畦田灌水过程中畦首水深的变化。

2 畦灌流量反演计算

2.1 参数的计算

2.1.1 土壤入渗参数计算 采用两点法估算土壤入渗参数。利用田间任意两个观测点的推进消退资料 and 灌水前后的土壤含水率分布资料,根据 Kostikov 入渗模型估算畦田入渗参数^[5],计算得到 N_1 、 N_2 和 N_3 畦入渗参数 k 、 α 分别为 0.0045、0.0075、0.0103 m/min ^{α} 和 0.757、0.567、0.564。

2.1.2 地表水流推进过程 大量学者研究表明畦灌地表水流推进过程符合幂函数关系^[6],后人利用大量的田间试验数据证明了这一结论,幂函数关系式为:

$$t = ax^b \tag{1}$$

式中: t 为畦灌地表水流前锋推进时间,min; x 为水流前锋推进距离,m; a 为水流推进拟合系数, min/m ^{b} ; b 为水流推进拟合指数,无量纲。

利用 1stOpt 软件中的麦夸特法拟合水流推进过程,拟合曲线见图 1,结果见表 1。结果表明:畦灌地表水流推进过程符合幂函数关系;均方差 $RMSE$ 小于 0.62 min,曲线拟合情况好;相关系数 R 均大于 0.998,呈极显著的相关关系。

表 1 畦灌地表水流推进过程拟合结果				
畦田	拟合系数 $a/(min \cdot m^{-b})$	拟合 指数 b	均方差 $RMSE/min$	相关 系数 R
N_1	0.0635	1.4830	0.62	0.9990
N_2	0.0503	1.4134	0.35	0.9990
N_3	0.0605	1.3387	0.25	0.9993

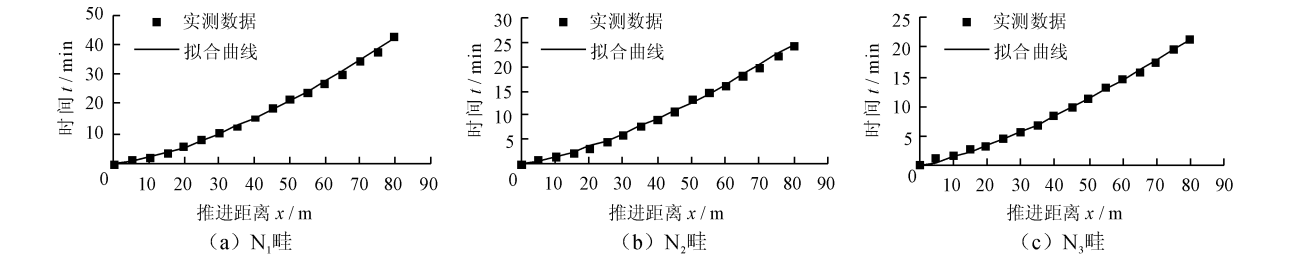


图 1 畦灌地表水流推进过程曲线拟合

2.1.3 地表储水形状系数计算 对于畦灌,在水流推进过程中,进入田间的水量分为两部分,地表储水量 V_s 和地下储水量 V_z ,m³。

$$V_s = \sigma_y h_0 x \tag{2}$$

式中: x 为水流推进距离,m; h_0 为水流推进至 x 处

时畦首水深,m; σ_y 为地表储水形状系数; V_s 为单位畦宽上的地表储水量,m²。

地表储水形状系数 σ_y 一般认为在 0.7~0.8 之间,且同一次灌水过程中认为其值恒定不变。缴锡云等^[7]分析了 σ_y 在 0.7~0.8 变化时对累计入渗量的

计算,结果影响不大。国外 Scaloppi 等^[8]建议取为 0.74, Renault 等^[9]建议取值为 0.79, Mailhol 等^[10]建议取值为 0.8。

图 2 和图 3 为 N_2 畦水流推进至 30、60 m 时沿畦长方向的地表水深,计算可得 σ_y 分别为 0.789、0.797; 平均值为 0.793, 在后面的计算中 σ_y 取为 0.793。

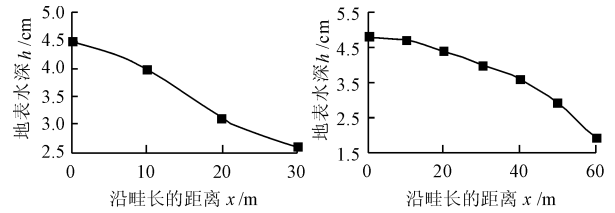


图 2 水流推进至 30 m 处

沿畦地表水深(畦长 80 m)

2.1.4 地下储水形状系数计算 引入地下储水形状系数 σ_z , 则地下储水量可表示为:

$$V_z = \sigma_z Z_0 x = \sigma_z k t_1^\alpha x \tag{3}$$

式中: Z_0 为水流推进至 x 处时畦首入渗水深, m; t_1 为畦首的入渗历时, min; V_z 为单位畦宽上的地下储水量, m^2 。

Fok 等基于土壤入渗符合 Kostikov 模型、地表水流推进过程符合幂函数规律条件下, 严格推导了下渗水形状系数公式:

$$\sigma_z = \frac{\alpha + \gamma(1 - \alpha) + 1}{(1 + \alpha)(1 + \gamma)} \tag{4}$$

式中: α 为 Kostikov 模型中的入渗指数, 无量纲; γ 为地表水流推进过程关系式 $x = pt^\gamma$ 中的经验指数, 无量纲。

入渗指数 α 和经验指数 γ 前文已求出, 计算得到 N_1 畦、 N_2 畦、 N_3 畦的地下储水形状系数分别为 0.693、0.700、0.692; 平均值 0.695。在后面的计算中, 取 σ_z 为 0.69。

2.2 基于畦首水深及地表水流运动过程反演入畦流量 根据式(2)、(3), 水量平衡方程可写为:

$$qt = \sigma_y h_0 x + \sigma_z k t_1^\alpha x \tag{5}$$

式中: q 为入畦单宽流量, m^2/min ; 其它符号意义同前。

将水流推进时间, 畦首水深以及求得的储水形状系数和前已得到的入渗参数代入式(5), 得入畦单宽流量。各畦田的计算流量及实测流量见表 2。

表 2 反演入畦流量结果

畦田编号	单宽流量 $q/(m^2 \cdot min^{-1})$		相对误差/%
	实测值	计算值	
N_1	0.19	0.16	13.27
N_2	0.34	0.31	8.02
N_3	0.41	0.36	11.24

由表 2 对比发现, 畦田单宽流量的计算值与实测值之间, N_1 畦田的相对误差最大为 13.2%; N_2 畦田的相对误差最小为 8.02%。如果畦田微地形观测更加精细、入渗参数估算更加精确, 则该畦田单宽流量的估算精度还有较大的提高空间, 不过对于用于畦灌稳健设计中单宽流量控制误差调查的目的来说, 相对误差不超过 15% 的精度也能够接受。

3 结 论

本文针对畦灌流量调查, 提出利用两点法估算入渗系数, 通过引入地表储水形状系数和地下水形状系数, 简化了计算过程, 进而可以根据水量平衡方程估算入畦单宽流量。该方法相比其他估算方法所需数据少, 计算过程简便, 精度基本满足实际需求。同时, 由于本文对于田面坡度的考虑不够, 在今后的研究中可以更加精确的测量田面微地形, 对于方法的精度将会有很大的提高。

参考文献:

[1] 聂卫波, 费良军, 马孝义. 畦灌灌水技术要素组合优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 83-88+107.

[2] 王维汉. 畦灌影响因素变异规律及灌水技术要素稳健设计[D]. 南京: 河海大学, 2009.

[3] 朱 霞. 沟灌技术要素变异规律及其对灌水质量的影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.

[4] 陈云武, 朱春光. 基于 Monte Carlo 模拟流量变异性对灌水质量影响的评价[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36): 22849-22851.

[5] 缴锡云, 王维汉. 沟畦灌溉稳健设计[M]. 南京: 河海大学出版社, 2012.

[6] Amer A M. Effects of water infiltration and storage in cultivated soil on surface irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(5): 815-822.

[7] 缴锡云, 王文焰, 雷志栋, 等. 估算土壤入渗参数的改进 Mahesh wari 法[J]. 水利学报, 2001, 32(1): 62-67.

[8] Scaloppi E J, Merkley G P, Willardson L S. Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995, 121(1): 57-70.

[9] Renault D, Wallender WW. Surface storage in furrow irrigation evaluation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, 123(6): 415-422.

[10] Mailhol J C, Gonzalez J M. Furrow irrigation model for real-time applications on cracking soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2014, 119(5): 768-783.