

# 土壤入渗特性和田面糙率的变异性对沟灌性能的影响\*

聂卫波<sup>1</sup> 费良军<sup>1</sup> 马孝义<sup>2</sup>

(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:**以杨凌区粘壤土和砂壤土区域进行的大田沟灌试验为基础,在假定各灌水沟内部土壤入渗特性和糙率均一的条件下,重点分析各灌水沟之间土壤入渗参数和田面糙率的不同组合对沟灌水流运动过程和灌水质量的影响,结果表明土壤入渗特性的变异性对沟灌水流推进过程和灌水质量指标影响较大,在模拟时必须充分考虑;而田面糙率的变异性对沟灌水流推进过程和灌水质量指标影响较小,可采用田块糙率均值代替各灌水沟的糙率。经实例验证,水流推进过程相对误差为7.28%,灌水效率、灌水均匀度和储水效率模拟值与实测值误差分别为5.74%、6.18%和4.07%,结果表明其模拟效果较好。

**关键词:** 沟灌 土壤入渗特性 田面糙率 变异性

**中图分类号:** S275.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0108-07

## 引言

沟灌是宽行距作物广泛采用的灌水技术,一直是灌溉领域重要的研究课题。采用数值模拟地面灌溉水流运动过程,评价其灌溉性能,已成为当前研究的重要手段<sup>[1-2]</sup>。众多学者对此进行了研究<sup>[3-11]</sup>,并取得一定研究成果。在以上研究中,土壤入渗参数和田面糙率作为模拟过程中必要的输入参数,其取值的合理性直接影响到模拟的结果。但对于沟灌系统而言,由于单沟控制面积有限,而整体田块面积相对较大,是否可以采用田块土壤入渗参数和糙率均值作为典型值模拟各灌水沟的水流推进过程和灌水质量需要深入研究。基于此,本文以大田沟灌试验为基础,在假定各灌水沟内部土壤入渗参数和糙率均一的条件下,采用数值模拟的方法,分析各灌水沟之间土壤入渗参数和田面糙率的不同组合对沟灌水流运动过程和灌水质量的影响,以期今后采用数值模拟方法研究沟灌灌水技术过程中土壤入渗参数和田面糙率的取值提供参考。

## 1 试验与方法

### 1.1 沟灌试验

大田沟灌试验于2007年冬季在杨凌区一级阶地砂壤土和三级阶地粘壤土上进行,2种不同土壤

质地田块种植的作物均为多年生果树。沟灌采用梯形断面,沟底宽度20 cm、沟深度15 cm、灌水沟边坡系数为1。沟尾闭合,水流推进至沟尾停水,计划灌水深度80 mm。沿沟长方向每10 m打一木桩作为测点,观测水流推进时间,并测定不同时间点的沟首水深;用三角堰板计量入沟流量,由于水的流量具有波动性,为保证入沟流量的稳定性,在每个田块入口前修筑一临时储水槽;在灌水前后各1 d,沿各灌水沟沟长方向选取5~8个测点,采用土钻分层(20 cm)取土样测定含水率,测量深度(计划湿润层)为1 m,为计算各灌水沟灌水质量指标提供基础数据,各灌水沟的基本参数见表1。各灌水沟的土壤入渗参数(采用Kostiakov入渗公式)和田面糙率值采用SIPAR\_ID软件进行反演,该模型的理论基础和求解结果的可靠性验证见文献[12],估算的各灌水沟土壤入渗参数和田面糙率结果见表1。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 水流推进过程和灌水质量模拟

WinSRFR软件包含零惯量和运动波2个模型<sup>[13]</sup>,由于文中采用尾部闭合条件下的沟灌试验,故选取零惯量模型进行沟灌水流推进过程和灌水质量模拟,即

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0$$

收稿日期: 2012-12-17 修回日期: 2013-01-22

\* 国家自然科学基金资助项目(51209171)、陕西省教育厅科研计划资助项目(11JK0640)和中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科资助项目(106-00X101、106-5X1205)

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

$$\frac{\partial h}{\partial x} = S_0 - S_f$$

式中  $A$ ——过水断面面积,  $\text{m}^2$   
 $q$ ——入沟流量,  $\text{m}^3/\text{min}$

$Z$ ——单位长度上的累积入渗量,  $\text{m}^3/\text{m}$   
 $t$ ——灌水时间,  $\text{min}$       $S_0$ ——沟底坡度  
 $S_f$ ——阻力坡降      $h$ ——田面水深,  $\text{m}$   
 $x$ ——水流推进距离,  $\text{m}$

表 1 各灌水沟基本参数与 SIPAR\_ID 软件估算的入渗参数和糙率

Tab. 1 Basic parameters and infiltration parameters and roughness estimated by SIPAR\_ID in furrow irrigation

试验地点	沟长/m	间距/m	沟底坡度 $S_0$	土壤质地	编号	流量 $q$ $/\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	入渗参数		糙率 $n$
							$k/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-\alpha}$	$\alpha$	
官村	60	0.9	0.003	粘壤土	G1	0.123	0.004 48	0.698	0.121
					G2	0.117	0.011 43	0.492	0.115
					G3	0.096	0.006 43	0.657	0.100
					G4	0.168	0.003 77	0.742	0.082
					G5	0.264	0.003 73	0.598	0.088
					G6	0.150	0.007 12	0.643	0.088
					G7	0.168	0.006 79	0.725	0.087
					G8	0.180	0.003 86	0.704	0.084
法喜村	60	1.0	0.004	砂壤土	F1	0.136	0.009 08	0.598	0.089
					F2	0.114	0.008 60	0.520	0.104
					F3	0.090	0.006 26	0.647	0.096
					F4	0.131	0.009 87	0.545	0.108
					F5	0.124	0.006 13	0.692	0.114

注:  $k$  和  $\alpha$  分别为 Kostiakov 入渗公式中的入渗系数和入渗指数。

根据研究表明, WinSRFR 软件可很好地模拟上述试验点的沟灌水流推进过程和灌水质量<sup>[14]</sup>。描述沟灌灌水质量的评价指标主要有: 灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $D_u$  和储水效率  $E_s$ , 常采用公式为<sup>[15]</sup>

$$E_a = \frac{W_s}{W_f} \times 100\% \quad D_u = \frac{Z_{Lq}}{Z_{av}} \times 100\% \quad E_s = \frac{W_s}{W_n} \times 100\%$$

式中  $W_s$ ——灌后储存于土壤计划湿润层中的水量,  $\text{mm}$

$W_f$ ——灌入沟中水量,  $\text{mm}$

$Z_{Lq}$ ——沿沟长方向土壤受水最少的 1/4 段内平均入渗水深,  $\text{mm}$

$Z_{av}$ ——沟中平均入渗水深,  $\text{mm}$

$W_n$ ——湿润层计划灌水量,  $\text{mm}$

为了分析各灌水沟之间土壤入渗参数和糙率变异性对模拟整个田块沟灌水流运动过程和灌水质量的影响, 采用零惯量模型进行沟灌水流推进过程和灌水质量模拟时, 所需输入土壤入渗参数和田面糙率值采用以下 3 种组合: 各灌水沟土壤入渗参数 + 各灌水沟糙率; 各灌水沟土壤入渗参数 + 田面糙率均值; 田块土壤入渗参数均值 + 各灌水沟糙率; 下文将其分别简称为: 模拟 1、模拟 2、模拟 3。其余所需输入参数采用各灌水沟实测值。

### 1.2.2 模拟效果评价指标

为分析土壤入渗特性和田面糙率变异性对水流推进过程的影响, 采用水流推进至各观测点的灌水时间预测值与实测值平均绝对误差  $A_{AE}$  和平均相对

误差  $A_{RE}$  作为评价指标, 计算公式为

$$A_{AE} = \frac{\sum_{i=1}^m |t_{ip} - t_{im}|}{m} \quad (1)$$

$$A_{RE} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{|t_{ip} - t_{im}|}{t_{im}}}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $A_{AE}$ ——水流推进至各观测点的灌水时间预测值与实测值平均绝对误差,  $\text{min}$

$A_{RE}$ ——水流推进至各观测点的灌水时间预测值与实测值平均相对误差, %

$t_{ip}$ ——水流推进至各观测点的灌水时间预测值,  $\text{min}$

$t_{im}$ ——水流推进至各观测点的灌水时间实测值,  $\text{min}$

$m$ ——各灌水沟观测点数

同理, 为分析土壤入渗特性和糙率变异性对灌水质量的影响, 采用各灌水沟灌水质量的模拟值与实测值相对误差  $R_E$  作为评价指标, 计算公式为

$$R_E = \frac{|I_{ps} - I_{pm}|}{I_{pm}} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $I_{ps}$ 、 $I_{pm}$ ——各灌水沟灌水质量模拟值、实测值

## 2 结果与讨论

### 2.1 水流推进过程

采用零惯量模型对 3 种组合条件下的水流推进过程进行模拟, 其水流推进过程模拟值与田间实测

值的比较见图1。由图1可见,模拟1和模拟2条件下各灌水沟的水流推进过程预测结果与田间实测值具有较高的一致性,表明采用这2种组合形式均可以较好地模拟沟灌水推进过程,同时说明各灌水沟的糙率取值对水流推进过程的敏感性较低,可采用田面糙率均值代替各灌水沟的实际糙率以简化模拟要求;模拟3条件下各灌水沟的水流推进过程预测结果与田间实测值一致性较差,说明土壤入渗参数的取值对水流推进过程十

分敏感,若采用田间土壤入渗参数均值模拟各灌水沟的水流推进过程,将导致较大的模拟误差;各试验点其他灌水沟模拟结果与图1类似。为进一步分析土壤入渗参数和田面糙率变异性对沟灌水推进过程的影响,将零惯量模型模拟3种组合条件下的水流推进过程预测值与田间实测值分别代入式(1)和式(2),分别计算得出灌水时间预测值与实测值平均绝对误差  $A_{AE}$  和平均相对误差  $A_{RE}$ ,计算结果见表2。

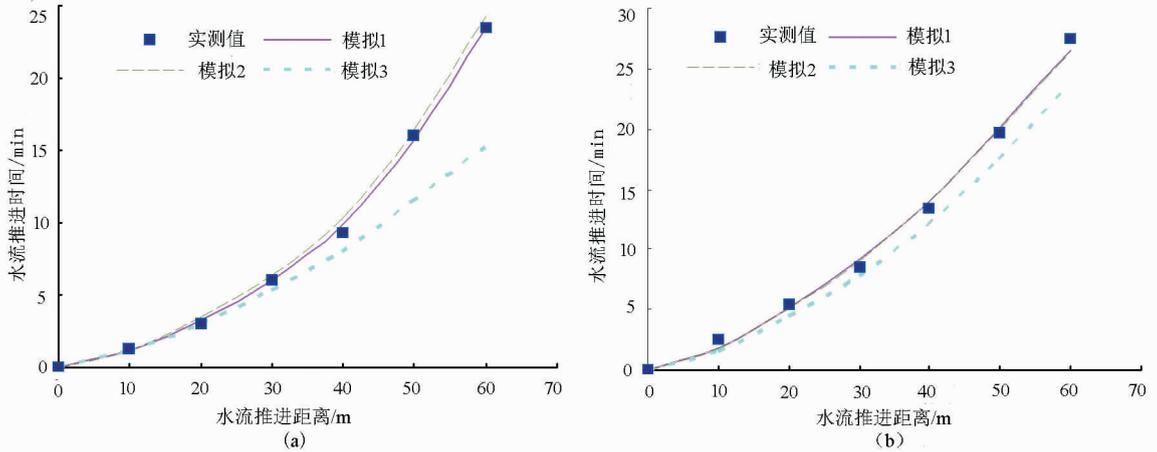


图1 典型灌水沟水流推进过程实测值与预测值比较

Fig. 1 Measured values of advance trajectory compared with predicted values of typical furrows

(a) 官村 G7 (b) 法喜村 F2

表2 不同模拟条件下水流推进过程预测值与实测值误差分析

Tab. 2 Error analysis of measured values and predicted values under the different simulation conditions

试验地点	编号	灌水时间 $t/\text{min}$				预测值与实测值平均绝对误差 $A_{AE}/\text{min}$			预测值与实测值平均相对误差 $A_{RE}/\%$		
		实测值	模拟1	模拟2	模拟3	模拟1	模拟2	模拟3	模拟1	模拟2	模拟3
官村	G1	21.50	22.05	19.87	26.12	0.32	0.92	1.89	5.71	10.28	16.92
	G2	35.80	34.57	33.03	27.40	0.57	1.11	4.32	6.11	9.10	28.97
	G3	45.50	44.90	44.52	36.73	0.49	0.52	3.00	4.89	5.14	12.97
	G4	11.65	12.02	13.12	14.81	0.36	0.91	1.53	7.39	17.07	25.03
	G5	8.50	8.59	9.04	10.14	0.23	0.41	0.79	8.33	10.54	16.36
	G6	22.52	21.48	22.17	17.48	0.67	0.73	1.48	10.12	10.47	16.53
	G7	23.50	23.50	24.28	15.22	0.22	0.51	2.50	4.76	7.24	17.26
	G8	11.00	11.28	12.16	13.89	0.31	0.73	1.35	3.88	5.66	12.59
法喜村	F1	29.50	28.67	29.73	23.72	0.44	0.56	1.96	3.88	5.66	12.59
	F2	27.50	26.55	26.38	23.53	0.55	0.57	1.72	7.95	7.99	16.72
	F3	45.00	43.85	44.40	48.88	0.62	0.72	2.77	7.56	8.48	18.74
	F4	29.50	28.73	28.25	26.60	0.38	0.42	1.30	4.61	4.79	11.67
	F5	31.00	30.72	29.73	29.23	0.35	0.60	0.95	6.15	7.82	10.04
均值					0.42	0.67	1.97	6.26	8.48	16.65	

注:表中  $A_{AE}$  和  $A_{RE}$  的计算过程中,官村和法喜村试验点各灌水沟均为6个观测点。

由表2可知,所有灌水沟基于模拟1条件下的水流推进过程预测值与实测值绝对误差均值  $A_{AE}$  为 0.42 min,相对误差均值  $A_{RE}$  为 6.26%,两者的一致性最高,其原因为单个灌水沟控制面积较小,其各灌

水沟内部土壤特性相对均一,虽然模拟过程中忽略了各灌水沟内部的土壤入渗特性和糙率变异性对水流推进过程的影响,导致灌水质量模拟值与实测值之间存在一定的差异,但总体来说,两者误差较小;

模拟 2 条件下预测值与实测值的一致性次之,所有灌水沟水流推进过程预测值与实测值绝对误差均值  $A_{AE}$  为 0.67 min, 相对误差均值  $A_{RE}$  为 8.48%, 其与模拟 1 相比绝对误差均值和相对误差均值分别增加了 0.25 min 和 2.22 个百分点, 原因为模拟 2 组合忽略了各灌水沟之间的糙率变异性对水流推进过程的影响, 导致预测结果与实测值之间的误差有所增加, 说明各灌水沟之间的糙率变异性对沟灌水流推进过程有一定程度的影响, 但影响相对较小, 可采用田面糙率均值代替各灌水沟糙率进行沟灌水流推进过程模拟; 模拟 3 条件下预测值与实测值的一致性最低, 所有灌水沟水流推进过程预测值与实测值绝对误差

$A_{AE}$  均值为 1.97 min, 相对误差均值  $A_{RE}$  为 16.65%, 其与模拟 1 相比绝对误差均值和相对误差均值分别增加了 1.55 min 和 9.39 个百分点, 由于模拟 3 组合忽略了各灌水沟之间的土壤入渗特性空间变异对水流推进过程的影响, 使预测值与实测值之间的误差显著增大, 说明在进行田间沟灌水流推进过程模拟时, 必须考虑各灌水沟之间土壤入渗特性变异性对其产生的影响, 否则可能导致较大的误差。

## 2.2 灌水质量

采用 WinSRFR 软件的零惯量模型对 3 种组合条件下的灌水质量进行模拟, 其灌水质量模拟值与田间实测值的比较见图 2。

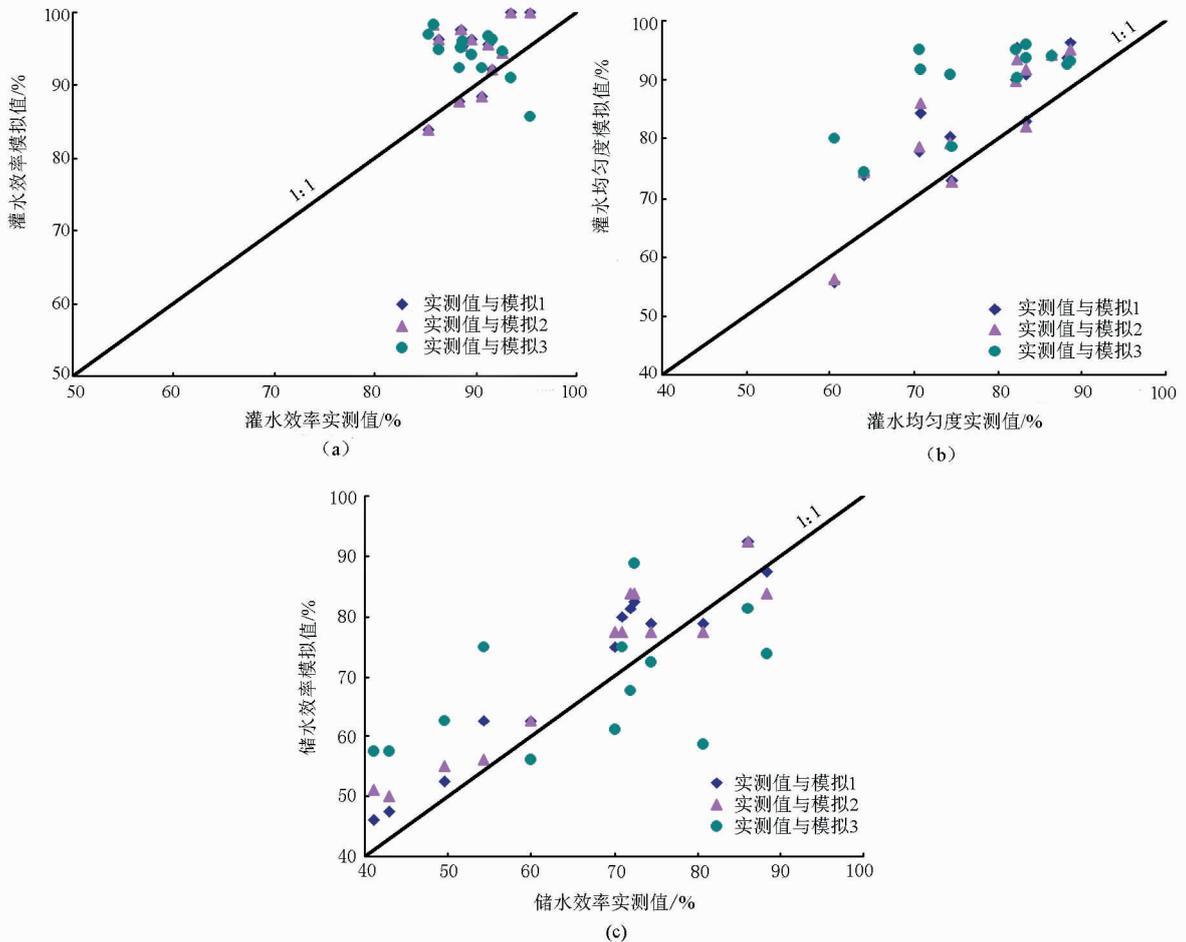


图 2 不同组合条件下灌水质量模拟值与实测值比较

Fig. 2 Measured values of irrigation performance compared with simulated values under the different simulation conditions

(a) 灌水效率 (b) 灌水均匀度 (c) 储水效率

由图 2 可见, 模拟 1 和模拟 2 条件下各灌水沟的灌水质量模拟值与田间实测值一致性较高, 表明采用这 2 种组合形式均可以较好地模拟沟灌的灌水质量, 同时说明采用田面糙率均值模拟对各灌水沟的灌水质量影响较小; 模拟 3 条件下各灌水沟的灌水质量模拟值与田间实测值一致性较差, 说明土壤入渗参数的取值对灌水质量的影响十分敏感, 若采用田间土壤入渗参数均值模拟各灌水沟的灌水质

量, 将导致较大的模拟误差。为进一步分析土壤入渗参数和田面糙率变异对沟灌灌水质量的影响, 将零惯量模型模拟 3 种组合条件下的灌水质量指标模拟值与田间实测值代入式 (3), 计算得出两者相对误差  $R_E$ , 计算结果见表 3。

由表 3 可知, 模拟 1 条件下灌水质量模拟值与实测值比较, 其相对误差较小, 大多控制在 10% 以下, 其原因为模拟过程中忽略了各灌水沟内部的土

表3 不同组合条件下灌水质量模拟值与实测值误差分析

Tab.3 Error analysis of irrigation performance of measured and simulated values under the different simulation conditions

试验地点	编号	灌水质量模拟值与实测值相对误差 $R_E/\%$											
		灌水质量实测值/ $\%$			模拟1与实测值比较			模拟2与实测值比较			模拟3与实测值比较		
		$E_a$	$D_u$	$E_s$	$E_a$	$D_u$	$E_s$	$E_a$	$D_u$	$E_s$	$E_a$	$D_u$	$E_s$
官村	G1	88.74	88.76	54.32	15.06	8.55	17.71	15.17	7.35	5.94	15.17	5.01	41.25
	G2	91.25	82.31	88.47	9.48	15.82	5.96	9.48	13.57	1.72	9.48	9.88	16.64
	G3	85.21	74.54	86.16	2.65	6.67	1.41	3.09	9.16	1.41	10.85	14.77	10.92
	G4	90.56	82.12	41.03	5.65	9.80	7.96	5.65	9.32	19.63	5.65	15.85	34.22
	G5	95.31	60.59	49.51	4.92	19.34	6.04	4.92	20.88	11.09	4.82	72.05	26.24
	G6	89.57	83.26	70.04	11.53	9.27	7.08	11.53	10.32	10.65	11.53	15.40	12.55
	G7	88.28	70.54	80.68	9.88	10.26	11.55	11.46	11.44	14.65	13.16	34.80	27.18
	G8	93.41	83.35	42.81	6.95	8.63	10.95	6.95	7.69	16.79	6.95	22.78	34.31
法喜村	F1	86.23	70.86	72.07	15.85	18.88	12.73	15.89	21.34	16.20	16.24	29.48	6.35
	F2	91.61	86.49	59.83	9.05	9.00	4.46	9.05	8.95	4.46	9.05	8.58	5.99
	F3	85.71	64.12	72.32	16.56	15.19	14.08	16.56	16.09	15.81	13.76	15.94	22.72
	F4	92.56	88.21	74.52	9.23	6.41	5.68	10.83	8.80	4.00	7.93	4.85	2.71
	F5	88.54	74.35	70.91	12.83	8.15	12.83	12.83	6.52	9.30	12.83	22.25	5.77
均值				9.97	11.23	9.11	10.26	11.65	10.13	10.57	20.90	18.99	

壤入渗特性和糙率变异性对灌水质量的影响,导致其指标的模拟值与实测值之间存在一定差异,但误差总体较小,其所有灌水沟灌水效率  $E_a$  的相对误差均值为 9.97%,灌水均匀度  $D_u$  和储水效率  $E_s$  的相对误差均值分别为 11.23% 和 9.11%;模拟2条件下灌水质量模拟值与实测值比较,其误差有所增大,原因为模拟2条件下不但忽略了各灌水沟内部的土壤入渗特性和糙率的变异性,而且忽略了各灌水沟之间糙率的变异性,导致误差有所增加,若扣除模拟过程中各灌水沟内部的土壤入渗特性和糙率变异性的影响,模拟2与模拟1相比较,灌水质量模拟值之间的相对误差增加微弱,所有灌水沟灌水效率  $E_a$  的相对误差增大均值为 0.29 个百分点,灌水均匀度  $D_u$  和储水效率  $E_s$  的相对误差增大均值分别为 0.42 个百分点和 1.02 个百分点,表明各灌水沟之间的糙率变异性对灌水质量的影响较小,在模拟过程中可采用田面糙率均值代替各灌水的糙率值,以简化灌水质量的模拟要求;模拟3条件下的灌水质量模拟值与实测值比较,其误差最大,原因为模拟3条件下不但忽略了各灌水沟内部的土壤入渗特性和糙率的空间变异,而且忽略了各灌水沟之间土壤入渗特性的变异性,导致两者误差显著增加,若扣除模拟过程中各灌水沟内部土壤入渗特性和糙率的变异性影响,模拟3与模拟1相比较,灌水质量模拟值之间的相对误差增加明显,所有灌水沟灌水效率  $E_a$  的相对误差增大均值为 0.60 个百分点,灌水均匀度  $D_u$  和储水效率  $E_s$  的相对误差增大均值分别为 9.67 个百分点和 9.88 个百分点,表明各灌水沟之间土壤入渗特性的变异性对灌水质量的影响较大,在模拟过程

中若采用田块土壤入渗参数均值作为典型代表值模拟各灌水沟的灌水质量,将导致较大的模拟误差。

### 3 实例验证

由上述分析可知,采用模拟1和模拟2组合均可较好地模拟沟灌水流推进过程和灌水质量,但模拟2组合可以简化模拟过程中对糙率取值的要求,虽然由此所产生的误差较模拟1组合有所增大,但增加幅度较小,故采用模拟2组合模拟沟灌水流推进过程和灌水质量可满足实际生产的需要。为进一步验证该结论,利用2007年冬季在杨陵区三级阶王上村(粘壤土)进行的沟灌试验对其进行检验,其沟长80m,沟间距0.9m,沟底坡度0.006,灌水沟采用梯形断面,其断面尺寸、灌水基本要求和各指标测定方法同前。各灌水沟的基本参数见表4。

表4 各灌水沟基本参数

Tab.4 Basic parameters in furrow irrigation

编号	流量 $q$ $/\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	入渗参数		糙率 $n$
		$k/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-\alpha}$	$\alpha$	
W1	0.189	0.00636	0.698	0.085
W2	0.143	0.00556	0.687	0.100
W3	0.172	0.00656	0.688	0.110
W4	0.107	0.00575	0.705	0.111
W5	0.142	0.01023	0.597	0.099
W6	0.171	0.00939	0.627	0.088
W7	0.194	0.00887	0.580	0.085

采用零惯量模型对模拟2组合下的水流推进过程和灌水质量进行模拟,其中各灌水沟所需输入的糙率值采用田块均值0.097,土壤入渗参数值采用

各灌水沟估算值,将其模拟值与田间实测值分别代入式(1)~(3),计算得出模拟值与实测值误差,计算结果见表 5。

由表 5 可知,各灌水沟基于模拟 2 组合下的水流推进过程预测值与实测值绝对误差均值  $A_{AE}$  均小于 1.50 min,其所有灌水沟均值为 0.78 min,各灌水沟相对误差均值  $A_{RE}$  均控制在 10% 以内,其均值为 7.28%,考虑田间工程实际,可认为水流推进过程预测值和实测值误差在合理的范围内,进一步说明可采用田面糙率均值代替各灌水沟糙率值进行沟灌水

流推进过程的模拟。同时由表 5 可知,各灌水沟基于模拟 2 组合下的灌水质量模拟值与实测值之间保持较高的一致性,除个别评价指标外,其余相对误差  $R_E$  均控制在 10% 以内,所有灌水沟灌水效率  $E_a$  模拟值与实测值相对误差  $R_E$  均值为 5.74%,灌水均匀度  $D_u$  和储水效率  $E_s$  分别为 6.18% 和 4.07%,由此进一步说明采用田面糙率均值代替各灌水沟糙率值进行灌水质量的模拟,可取得较高精度的模拟结果,且可以简化灌水质量模拟过程中对糙率取值的要求。

表 5 模拟 2 组合下水流推进过程和灌水质量预测值与实测值误差分析

Tab.5 Error analysis of advance trajectory and irrigation performance of measured and simulated values under the setting 2

试验地点	编号	停水时间 实测值 $t$ /min	灌水质量实测值/%			水流推进过程误差		灌水质量相对误差 $R_E$ /%		
			$E_a$	$D_u$	$E_s$	平均绝对误差 $A_{AE}$ /min	平均相对误差 $A_{RE}$ /%	$E_a$	$D_u$	$E_s$
王上村	W1	26.15	93.21	77.82	79.98	0.61	7.08	7.18	12.53	6.28
	W2	32.48	91.45	79.54	73.74	0.57	7.94	9.24	4.76	10.18
	W3	31.96	98.64	85.47	94.14	0.74	6.37	1.87	3.56	1.74
	W4	89.50	56.89	60.21	97.50	1.48	6.59	8.45	7.91	1.28
	W5	58.65	66.89	74.26	96.72	0.81	5.97	6.14	0.83	2.10
	W6	42.85	77.59	84.5	98.75	0.74	8.69	2.85	8.14	0.00
	W7	24.32	95.64	86.06	78.34	0.52	8.30	4.45	5.59	6.91
均值						0.78	7.28	5.74	6.18	4.07

注:表中  $A_{AE}$  和  $A_{RE}$  的计算过程中,王上村各灌水沟均为 8 个观测点。

## 4 结论

(1)对沟灌水推进过程和灌水质量指标进行模拟时,必须充分考虑各灌水沟之间土壤入渗特性的变异性。在研究区域内,采用田块土壤入渗参数均值代替各灌水土壤入渗参数值预测水流推进过程,所有灌水沟水流推进过程预测值与实测值误差较大,其全部灌水沟平均绝对误差为 1.97 min,平均相对误差为 10.57%;采用田块土壤入渗参数均值代替各灌水土壤入渗参数值模拟灌水质量指标时,所有灌水沟的模拟值与实测值相对误差显著增大,其中灌水效率  $E_a$  相对误差均值为 10.11%,灌水均匀度  $D_u$  和储水效率  $E_s$  相对误差均值分别为

20.90% 和 18.99%。

(2)沟灌过程中可采用田面糙率均值对水流推进过程和灌水质量指标进行模拟。在研究区域内,采用田面糙率均值代替各灌水沟糙率值预测水流推进过程,所有灌水沟水流推进过程预测值与实测值误差较小,全部灌水沟预测值与实测值平均绝对误差为 0.67 min,平均相对误差为 8.48%;采用田面糙率均值代替各灌水沟糙率值模拟灌水质量指标时,所有灌水沟模拟值与实测值相对误差较小,其中灌水效率  $E_a$  相对误差均值为 10.26%,灌水均匀度  $D_u$  和储水效率  $E_s$  相对误差均值分别为 11.65% 和 10.13%;并通过实例验证,结果表明其模拟效果较好。

## 参 考 文 献

- 1 白美健. 微地形和入渗时空变异及其对畦灌系统影响的二维模拟评价[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2007.
- 2 Burguete J, Zapata N, García-Navarro P, et al. Fertigation in furrows and level furrow systems. I: model description and numerical tests [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009, 135(4):401~412.
- 3 Zapata N, Playan E. Elevation and infiltration in a level basin. I. characterizing variability [J]. Irrigation Science, 2000, 19(4):155~164.
- 4 Oyonarte N A, Mateos L. Accounting for soil variability in the evaluation of furrow irrigation [J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(1):85~94.
- 5 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.

- 6 Mateos L, Oyonarte N A. A spreadsheet model to evaluate sloping furrow irrigation accounting for infiltration variability [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 76(1):62~75.
- 7 Sanchez C A, Zerihun D, Farrell-Poe K L. Management guidelines for efficient irrigation of vegetables using closed-end level furrows [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(1):43~52.
- 8 王维汉, 缴锡云, 朱艳, 等. 畦灌糙率系数的变异规律及其对灌水质量的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(16):288~293. Wang Weihang, Jiao Xiyun, Zhu Yan, et al. Variability of roughness coefficient and its effect on border irrigation performance [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(16):288~293. (in Chinese)
- 9 朱艳, 缴锡云, 王维汉, 等. 畦灌土壤入渗参数的空间变异性及其对灌水质量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(3):46~49. Zhu Yan, Jiao Xiyun, Wang Weihang, et al. Spatial variability of infiltration parameters and its influences on border irrigation performance [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(3):46~49. (in Chinese)
- 10 Gillies M H, Smith R J, Raine S R. Evaluating whole field irrigation performance using statistical inference of inter-furrow infiltration variation [J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 110(2):134~143.
- 11 Reddy M, Jumaboev K, Matyakubov B, et al. Evaluation of furrow irrigation practices in Fergana Valley of Uzbekistan [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117(1):133~144.
- 12 聂卫波, 费良军, 马孝义. 沟灌土壤入渗参数和糙率估算及灌水技术要素组合研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(1):48~53. Nie Weibo, Fei Liangjun, Ma Xiaoyi. Estimation of infiltration parameters and Manning roughness and research of optimize technique elemental combination for furrow irrigation [J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1):48~53. (in Chinese)
- 13 Bautista E, Clemmens A J, Strelkoff T S, et al. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7):1146~1154.
- 14 聂卫波. 畦沟灌溉水流运动模型与数值模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009. Nie Weibo. Research on water flow model and numerical simulation for border and furrow irrigation [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- 15 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.

## Effects of Spatial Variability of Soil Infiltration Characteristics and Manning Roughness on Furrow Irrigation Performance

Nie Weibo<sup>1</sup> Fei Liangjun<sup>1</sup> Ma Xiaoyi<sup>2</sup>

(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 of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Based on the furrow irrigation which was conducted in Yangling District with the clay loam and sandy loam, effects of different combinations of soil infiltration characteristics and Manning roughness on the water advance trajectory and irrigation performance were analyzed. The results show that the spatial variability of soil infiltration characteristics has a great effect on the water advance trajectory and irrigation performance. When optimizing the design of the furrow irrigation, the spatial variability of soil infiltration characteristics must be taken into consideration. However, the spatial variability of Manning roughness affects slightly on the water advance trajectory and irrigation performance. When optimizing the design of the furrow irrigation, the average value of Manning roughness can be used in various irrigation ditches. Based on the above results and verified field experiments, the results show that the average relative error between the measured and simulated values of the water advance trajectory is 7.28%, and the application efficiency, distribution uniformity and storage efficiency between the measured and simulated values are 5.74%, 6.18% and 4.07%, respectively.

**Key words:** Furrow irrigation Soil infiltration characteristics Manning roughness Spatial variability