

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.016

# 畦灌灌水技术要素组合优化\*

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】** 以杨陵区进行的畦灌大田试验为基础,采用 WinSRFR 软件对各试验点的灌水质量进行了模拟,并分析了畦长、田面坡度、入畦单宽流量和改口成数对灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  的影响;在此基础上,结合均匀试验设计与多元回归分析的方法,构建了包含灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  在内的单目标优化模型,以入畦单宽流量和灌水时间为变量,采用遗传算法对模型进行求解,提出了试验点不同计划灌水深度条件下畦灌灌水技术要素的优化组合,结果表明其可获得高的灌水质量,达到常规畦灌节水的目的。

**关键词:** 畦灌 灌水质量 灌水技术要素 优化模型

**中图分类号:** S275.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)01-0083-06

## Optimization for Combination of Irrigation Technique Element for Border Irrigation

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 and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

### Abstract

Based on the field experiments carried out in Yangling, the values of irrigation performance were simulated by the WinSRFR software, and the influence of border length, field slope, unit discharge and cutoff time on irrigation application efficiency, distribution uniformity and storage efficiency were analyzed. On this basis, combined with uniform design and multiple regression analysis, a single-objective optimization model was established including irrigation application efficiency, distribution uniformity and storage efficiency, and taking unit discharge and cutoff time as variables. The model was solved by genetic algorithms, the optimized combination of irrigation technique element under different theories of water requirement were proposed in Wangshang Village, the results show that it can realize a high irrigation performance and water saving for border irrigation through a proper selection of unit discharge and cutoff time.

**Key words** Border irrigation, Irrigation performance, Irrigation technique element, Optimization model

### 引言

畦灌是密植作物广泛采用的灌水技术,合理的畦灌灌水技术要素组合是人们长期探讨的问题。国

内外学者对其进行了大量的研究,提出了多种方法<sup>[1-13]</sup>。众多学者虽然对合理的灌水技术要素组合进行了大量的研究,但大多以灌水效率  $E_a$  和灌水均匀度  $E_d$  作为控制目标进行分析,其评价结果具有

收稿日期: 2011-02-16 修回日期: 2011-04-11

\* 国家自然科学基金资助项目(51079121)、陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ7010)、中国博士后科学基金资助项目、陕西省重点学科建设资助项目和西安理工大学博士科研启动基金资助项目

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

一定的不合理性。基于此,本文以杨凌区粘壤土进行的畦灌大田灌水试验为基础,在采用 SIPAR\_ID 软件准确估算其土壤入渗参数和田面糙率的前提下,分析不同因素对畦灌灌水质量的影响,采用 WinSRFR 软件模拟、均匀试验设计和多元回归分析相结合的方法,构建包含灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  在内的单目标优化模型,以入畦单宽流量和灌水时间为变量,应用遗传算法对其进行求解,寻求研究区域内最优的畦灌灌水技术要素组合。

表 1 灌水畦田基本参数与 SIPAR\_ID 模型估算入渗参数和糙率值

Tab. 1 Basic parameters, infiltration parameters and roughness estimated with SIPAR\_ID in border irrigation

试验地点	畦长 /m	田面坡降 $S_0$	种植作物	土壤质地	畦田编号	入畦单宽流量 $q$ /L·(s·m) <sup>-1</sup>	灌水时间 $t$ /min	SIPAR_ID 软件估算入渗参数值		田面糙率 $n$	误差绝对值均值/%	
								$k/\text{cm} \cdot \text{min}^{-\alpha}$	$\alpha$		水流推进距离 $x$	畦首水深 $h$
王上村	90	0.004	果树	粘壤土	W1	3.4	42.0	0.513	0.748	0.137	2.35	6.74
					W2	2.4	65.0	0.773	0.616	0.127	4.22	6.93
					W3	2.7	51.5	0.796	0.594	0.139	0.95	11.03
					W4	4.7	36.0	0.523	0.842	0.134	3.41	6.38
均值								0.651	0.700	0.134	2.73	7.77

将表 1 中各畦田的基本参数和水流推进数据以及畦首水深资料输入 SIPAR\_ID 软件,以水流推进过程和畦首水深模拟值分别与实测值的误差最小为目标,可估算各畦田的入渗参数和田面糙率值,其结果见表 1。从表 1 可知,相同地块中各畦田采用 SIPAR\_ID 软件估算的入渗参数值之间有一定的差异,这主要是由于土壤的空间变异性引起的;其估算的糙率值同样也互有差异,其原因主要为不同的入畦单宽流量和土壤的空间变异性等诸多因素的作用。由 SIPAR\_ID 软件估算结果模拟的畦灌水流推进距离误差绝对值均值均控制在 5% 以内;畦首水深误差绝对值均值的最大值为 11.03%,最小值为 6.38%。其原因一方面为大田畦灌试验中水深数据由于观测方法的限制,易引起较大的观测误差;另一方面根据曼宁公式推求正常水深数据,在很大程度上依赖于该软件估算的田面糙率值,而实际灌水过程中影响田面糙率的因素很多,故引起畦首水深数据的模拟误差相对较大。但从总体上来说,试验点所有畦田水流推进距离误差绝对值均值为 2.73%;畦首水深误差绝对值均值为 7.77%,其误差均控制在较小的范围内。由此表明,采用 SIPAR\_ID 软件估算土壤入渗参数和田面糙率值是可行的,具有高的估算精度。

## 2 灌水质量影响因素分析

### 2.1 灌水质量评价指标

畦灌的灌水质量评价指标通常包括:灌水效率

## 1 畦灌土壤参数确定

大田畦灌试验于 2007 年冬季在杨凌区三级阶地粘壤土上进行,种植作物为果树。畦尾闭合,水流推进至畦尾停水。灌水前测定田面坡降(均为顺坡);灌水时沿畦长方向,每 10 m 打一木桩作为测点,观测水流推进到各点的时间,并测定不同时间点的畦首水深;用三角堰板计量入畦流量,为保证入畦流量的稳定性,在每个田块入口前修筑一临时储水槽;计划灌水深度 80 mm,畦田的基本参数见表 1。

$E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$ ,其中  $E_a$  是指储存于计划湿润作物根系土壤区内的水量与实际灌入田间总水量的比值, $E_d$  是指田间灌溉水入渗的均匀程度, $E_s$  是指灌后储存在计划湿润层中的水量与灌前需水量的比值,通常采用的计算公式为<sup>[14]</sup>

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

$$E_s = \frac{W_s}{W_n} \times 100\% = \frac{W_f - D_p - R_0}{W_n} \times 100\%$$

式中  $W_s$ ——灌后储存于土壤计划湿润层中的水量,mm

$W_f$ ——灌入田间的总水量,mm

$Z_{Lq}$ ——沿田块长度方向上土壤受水最少的 1/4 段内平均入渗水深,mm

$Z_{av}$ ——田块上的平均入渗水深,mm

$W_n$ ——计划湿润层理论需水量,mm

$D_p$ ——深层渗漏量,mm

$R_0$ ——畦尾弃水量(若畦尾闭合,则  $R_0 = 0$ ),mm

### 2.2 灌水质量评价

根据文献[15]的研究表明,WinSRFR 软件可很好地模拟上述试验点的畦灌灌水质量。由于文中采用尾部闭合条件下的畦灌试验,故本文选取零惯量模型进行畦灌灌水质量模拟,即

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

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

式中  $A$ ——过水断面面积  $S_f$ ——阻力坡降  
 $Z$ ——单位面积上的累积入渗量

将表 1 各畦田的基本资料输入 WinSRFR 软件, 计划灌水深度 80 mm, 其中土壤入渗参数和田面糙率值采用 SIPAR\_ID 软件的估算结果, 模拟结果见表 2。

表 2 WinSRFR 软件模拟灌水质量结果

Tab. 2 Simulation of irrigation performance with WinSRFR software %

灌水质量 指标	畦田编号			
	W1	W2	W3	W4
$E_a$	84.00	77.00	86.10	70.90
$E_d$	88.97	87.45	88.12	87.09
$E_s$	100.00	100.00	100.00	100.00

由表 2 可知, 王上村试验点畦田 W1 和 W3 有着高的灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$ , 说明其具有高的灌水质量; 畦田 W2 和 W4 虽有高的灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$ , 但灌水效率  $E_a$  较低, 说明灌水过程中储存在计划湿润层中的水量等于计划灌水深度, 且土壤水分入渗分布也较为均匀, 但在灌水过程中同时也产生了大量的深层渗漏, 造成水资源的浪费, 这与当地农户的灌水习惯有关。

### 2.3 灌水质量影响因素分析

影响地面灌溉灌水质量的因素很多, 主要因素可分为两类: 自然性能因素, 包括土壤质地、入渗性能、田面糙率、灌前土壤含水率、作物种类和种植方

式等; 灌水技术要素, 包括田块长度、宽度、灌水流量、改口成数、田面坡降和平整程度等。自然性能因素不易控制, 而灌水技术要素是可改变的。以王上村试验点为例, 采用 WinSRFR 软件模拟不同灌水技术要素组合下的畦灌灌水质量, 计划灌水深度 80 mm, 入渗参数和田面糙率取试验点均值 ( $k = 0.651 \text{ cm/min}^\alpha$ ,  $\alpha = 0.70$  和  $n = 0.134$ ), 分析其灌水质量的变化规律, 模拟结果见图 1。

#### 2.3.1 畦长

由图 1a 可见, 灌水效率  $E_a$  随畦长的增大呈减小趋势, 灌水均匀度  $E_d$  随畦长的增加呈先增大后减小趋势, 而储水效率  $E_s$  随畦长的增大呈增大趋势且最终趋于稳定。其原因为畦长较小时, 灌水时间相对较短, 灌水过程中较少发生深层渗漏, 但当大量水分聚集在畦尾后, 使畦尾部分土壤入渗水量远大于畦首, 且储存在计划湿润层中的水量远小于计划灌水深度, 其灌水量不足, 故使得灌水效率  $E_a$  较高, 而灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  均较低; 当畦长过大时, 灌水时间相对较长, 虽然储存在计划湿润层中的水量等于计划灌水深度, 但灌水过程中产生了大量的深层渗漏, 造成水资源的浪费, 且大量水分聚集在畦尾, 导致灌水效率  $E_a$  和灌水均匀度  $E_d$  较低, 而储水效率  $E_s$  较高。

#### 2.3.2 田面坡度

由图 1b 可见, 在研究区域内灌水效率  $E_a$  随着田面坡度的增大逐渐增大, 而灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  则逐渐减小。其原因为田面坡度的增大, 将缩短灌水时间, 从而减少深层渗漏量, 使其具有高的灌水效率  $E_a$ , 但同时由于灌水时间缩短, 导致储存

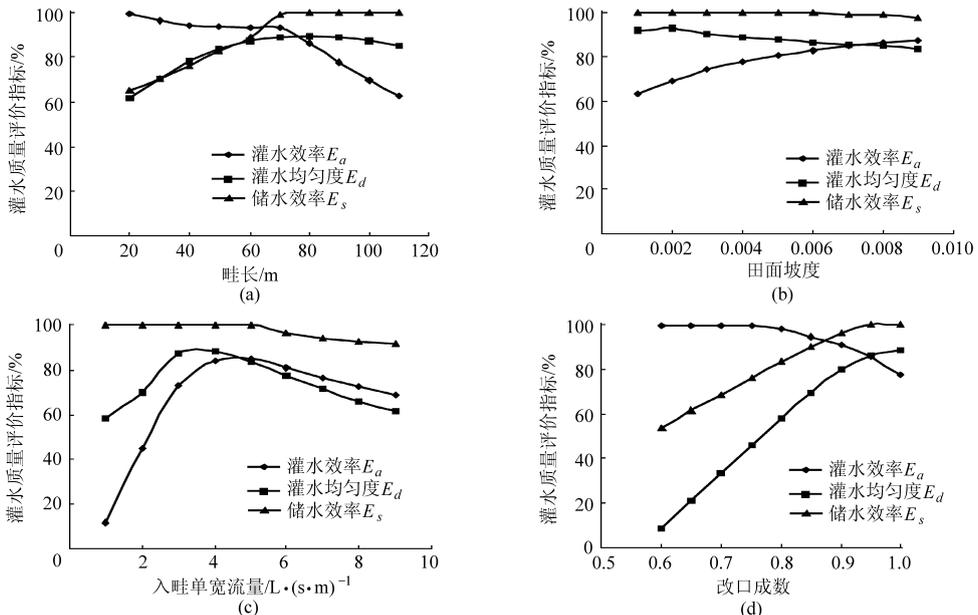


图 1 不同畦灌灌水因素对灌水质量影响的变化规律

Fig. 1 Change of irrigation performance under different factors in border irrigation

在计划湿润层的水量小于计划灌水量,且较大的田面坡度使得水流快速推进至畦尾,在畦尾部分聚集大量灌水,导致畦尾入渗水量远大于畦首部分,故使灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  降低。

### 2.3.3 入畦单宽流量

由图 1c 可见,灌水效率  $E_a$  和灌水均匀度  $E_d$  随着入畦单宽流量的增大呈现先增大后减小的趋势,而储水效率  $E_s$  呈现减小的趋势。其原因为入畦单宽流量较小时,灌水时间增长,导致大量的深层渗漏,使得灌水效率  $E_a$  和灌水均匀度  $E_d$  较低,但储存在计划湿润层中的水量近似等于计划灌水深度,使其具有高的储水效率  $E_s$ ; 当入畦单宽流量较大时,灌水时间减小,水流快速推进至畦尾,但畦尾部分聚集大量灌水,易引起深层渗漏,而在畦首存在灌水量不足,故导致较低的灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$ 。

### 2.3.4 改口成数

由图 1d 可见,灌水效率  $E_a$  随着改口成数的增大逐渐减小,而灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  则逐渐增大。其原因为改口成数较小时,水流未推进至畦尾,导致畦尾部分灌水严重不足,而灌水量几乎全部储存在计划湿润层内,较少产生渗漏,故导致高的灌水效率  $E_a$ 、较低的灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$ ; 当改口成数逐渐增大,水流推进至畦尾,土壤入渗水量分布相对较为均匀,且储存在计划湿润层的水量近似等于计划灌水量,但在灌水过程中产生了较大的深层渗漏量,故使得灌水效率  $E_a$  随着改口成数的增大逐渐减小,而灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  则逐渐增大。

## 3 灌水技术要素优化组合的确定

### 3.1 优化模型的建立

由上文可知畦长、田面坡度、入畦单宽流量和改口成数对灌水质量具有明显的影响,但上述分析是在其他条件相同情况下,以单个影响因素为自变量的研究结果,在实际应用中具有很大的局限性。结合我国北方灌区的实际情况,畦田长度和田面坡度通常已由田块实际情况确定,因此,最为有效的方法就是对入畦单宽流量和灌水时间(或改口成数)进行优化,以提高灌水质量。故下文以入畦单宽流量和灌水时间作为决策变量,采用 WinSRFR 软件模拟与均匀试验设计、多元回归分析相结合的方法,构建包含灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  在内的单目标优化模型,应用遗传算法对模型进行求解,寻求研究区域内畦灌灌水技术要素的优化组合,其优化模型为

$$\max Y(q, t) = aE_a(q, t) + bE_d(q, t) + cE_s(q, t) \quad (1)$$

式中  $Y(q, t)$ ——目标函数,其值在 0~100% 之间  
 $a, b, c$ ——权重系数,且  $a + b + c = 1$ , 本文取  
 $a = b = c = 1/3$

式(1)可变为

$$\max Y(q, t) = (E_a(q, t) + E_d(q, t) + E_s(q, t))/3 \quad (2)$$

待求灌水技术要素的约束条件为

$$\begin{cases} q_{\min} \leq q \leq q_{\max} \\ t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

考虑研究区域畦灌的实际情况,对入畦单宽流量和灌水时间取值范围为

$$\begin{cases} 2 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}) \leq q \leq 5 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}) \\ 20 \text{ min} \leq t \leq 80 \text{ min} \end{cases} \quad (4)$$

### 3.2 灌水质量模拟与回归分析

将上述 2 因素均分为 16 水平,选择  $U_{16}^*(16^2)$  均匀试验设计表<sup>[16]</sup>,均匀试验设计因素水平编码见表 3。

表 3 均匀试验设计方案与灌水质量模拟结果

Tab.3 Uniform design testing program and simulation of irrigation performance with WinSRFR software

水平	因素		灌水质量 /%		
	$q/\text{L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$	$t/\text{min}$	$E_a$	$E_d$	$E_s$
1	2.00	56.0	76.90	2.15	72.50
2	2.20	28.0	99.60	0*	51.25
3	2.40	76.0	64.40	66.41	97.50
4	2.60	40.0	90.00	26.34	77.50
5	2.80	48.0	82.40	61.78	91.25
6	3.00	68.0	58.80	90.63	100.00
7	3.20	20.0	99.60	4.15	53.75
8	3.40	64.0	55.20	86.78	100.00
9	3.60	36.0	91.10	86.99	98.75
10	3.80	80.0	39.50	74.17	100.00
11	4.00	30.0	96.10	87.37	96.25
12	4.20	52.0	55.00	78.24	100.00
13	4.40	60.0	45.50	71.16	100.00
14	4.60	24.0	97.20	87.99	88.75
15	4.80	72.0	34.70	61.23	100.00
16	5.00	44.0	91.10	86.99	98.75

注: \* 为灌水过程中,水流未推进至畦尾,模拟所得灌水均匀度  $E_d$  为 0。

采用 WinSRFR 软件模拟表 3 中各灌水技术要素组合条件下的灌水质量,在模拟过程中,需输入土壤入渗参数和田面糙率值,为使所求结果具有一定

的代表性,故对试验点的入渗参数与田面糙率取均值,即  $k = 0.651 \text{ cm}/\text{min}^{\alpha}$ 、 $\alpha = 0.70$  和  $n = 0.134$ ;畦长和田面坡度采用试验点实际情况,计划灌水深度 80 mm,畦尾闭合,采用 WinSRFR 软件模拟的结果见表 3。

采用 SPSS 软件中的回归分析工具分别对表 3 中的灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  进行多元回归分析,以入畦单宽流量和灌水时间为自变量,其回归结果为

$$\begin{cases} E_a = (1.12051 + 0.13005q - 0.00832t - \\ \quad 0.00224qt - 0.01707q^2 + 0.000059t^2) \times 100\% \\ E_d = (-4.47347 + 1.95488q + 0.05529t - \\ \quad 0.00869qt - 0.1879q^2 - 0.000194t^2) \times 100\% \\ E_s = (-1.36222 + 0.69202q + 0.03402t - \\ \quad 0.00349qt - 0.0598q^2 - 0.000166t^2) \times 100\% \end{cases} \quad (5)$$

式(5)为研究区域内畦灌各灌水指标以入畦单宽流量和灌水时间为自变量的回归方程。采用式(5)计算得到的灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  与 WinSRFR 软件模拟值具有高的一致性,其相关系数分别为 0.982、0.920 和 0.962。为进一步验证式(5)计算结果的可靠性,采用 SPSS 软件对其计算值与表 3 中的模拟值进行显著性检验,在 0.05 的

显著水平下,其显著性指标分别为 0.965、0.973 和 0.871,说明式(5)计算值和模拟值之间无显著性差异,表明采用式(5)计算灌水质量评价指标是可靠的。

### 3.3 灌水技术要素优化组合的确定

理想的畦灌灌水技术要素组合应是灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$  同时达到最高值。将式(5)代入式(2)建立单目标优化模型,以式(4)为约束条件,即

$$\begin{cases} \max Y(q,t) = (-1.57173 + 0.92565q + 0.0270t - \\ \quad 0.00481qt - 0.08826q^2 - 0.00010t^2) \times 100\% \\ 2L/(s \cdot m) \leq q \leq 5L/(s \cdot m) \\ 20 \text{ min} \leq t \leq 80 \text{ min} \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)采用遗传算法进行求解,求得研究区域内最优的畦灌灌水技术要素组合,即

$$\begin{cases} q = 4.54 \text{ L}/(s \cdot m) \\ t = 25.78 \text{ min} \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)中所求参数代入式(5),可得  $E_a = 92.17\%$ ,  $E_d = 80.82\%$ ,  $E_s = 90.52\%$ ,  $\max Y(q,t) = 87.83\%$ ;同时,将式(7)中所求参数代入 WinSRFR 软件,可得  $E_a = 95.60\%$ ,  $E_d = 88.23\%$ ,  $E_s = 93.75\%$ ,并模拟水流运动过程与土壤入渗分布曲线,见图 2。

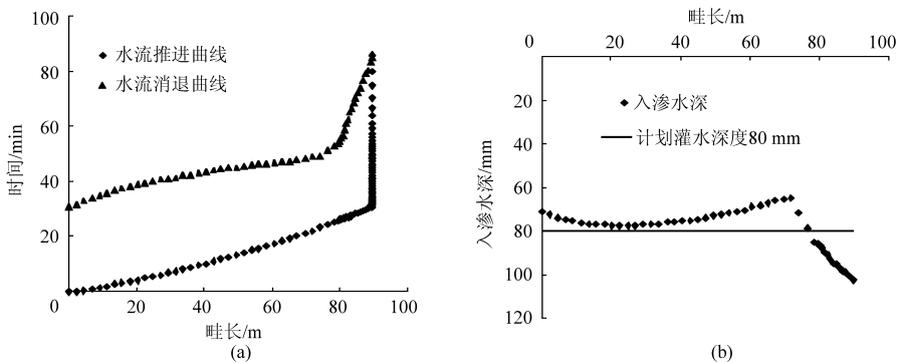


图 2 WinSRFR 软件模拟王上村畦灌水流运动过程

Fig. 2 Simulation process of water movement of furrow irrigation with WinSRFR software in Wangshang Village

(a) 最优灌水技术要素组合下水流运动过程 (b) 最优灌水技术要素组合下土壤入渗分布曲线

由图 2 可知,尽管畦长 80 m 以后,出现深层渗透,但整体而言水流推进曲线与消退曲线基本平行,沿畦长方向各点的受水历时(水流推进曲线与退水曲线纵坐标的差值)均匀,沿畦长方向各点入渗深度相对均匀,表明灌水过程中较少发生深层渗率,且灌水深度近似等于计划灌水深度,即所求最优灌水技术要素组合具有高的灌水质量。同理,对于王上村试验点不同计划灌水深度条件下的最优灌水技术要素组合可采用同样的方法,其结果见表 4。

## 4 结论

(1) 畦田 W1 和 W3 有着高的灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$ ,说明其具有高的灌水质量,畦田 W2 和 W4 虽有高的灌水均匀度  $E_d$  和储水效率  $E_s$ ,但灌水效率  $E_a$  较低,说明在灌水过程中同时也产生了大量的深层渗漏,造成水资源的浪费。

(2) 畦灌过程中不同畦长、田面坡度、入畦单宽流量和改口成数等因素对灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度

表4 王上村灌水技术要素优化组合

Tab.4 Correlation of irrigation optimize technique element in Wangshang Village

计划灌水 深度/mm	灌水技术要素优化组合		本文方法灌水质量评价指标				WinSRFR 软件评价指标		
	$q/L \cdot (s \cdot m)^{-1}$	$t/min$	$E_a/\%$	$E_d/\%$	$E_s/\%$	maxY	$E_a/\%$	$E_d/\%$	$E_s/\%$
60	4.73	21.64	81.66	81.15	98.75	87.19	87.40	87.85	100.00
80	4.54	25.78	92.17	80.82	90.52	87.83	95.60	88.23	93.75
100	4.15	40.70	88.24	86.43	93.02	89.23	87.50	84.77	98.00

$E_d$  和储水效率  $E_s$  有较大影响,其中以入畦单宽流量和改口成数的影响最为明显。

(3)结合试验点的实际情况,采用 WinSRFR 软件模拟、均匀试验设计和多元回归分析相结合的方法,构建了包含灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $E_d$  和储水

效率  $E_s$  在内的单目标优化模型,以入畦单宽流量和灌水时间为变量,采用遗传算法对模型进行求解,提出了试验点不同计划灌水深度条件下畦灌水技术要素的优化组合。

## 参 考 文 献

- 1 费良军,王云涛. 波涌畦灌灌水技术要素的优化组合研究[J]. 水利学报, 1996, 27(12):16~22.  
Fei Liangjun, Wang Yuntao. Study on optimization for combination of technical parameters in surge flow border irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 27(12):16~22. (in Chinese)
- 2 Zerihun D, Feyen J, Reddy J M. Empirical functions for dependent furrow irrigation variables. 1. methodology and equations [J]. Irrig. Sci., 1997, 17(3):111~120.
- 3 Zerihun D, Wang Z, Feyen J, et al. Empirical functions for dependent furrow irrigation variables. 2. application [J]. Irrig. Sci., 1997, 17(3):121~126.
- 4 李益农,许迪,李福祥. 影响水平畦田灌溉质量的灌水技术要素分析[J]. 灌溉排水, 2001, 20(4):10~14.  
Li Yinong, Xu Di, Li Fuxiang. Factors effected irrigation performance in level border irrigation [J]. Irrig. and Drain., 2001, 20(4):10~14. (in Chinese)
- 5 Eldeiry A, Garcia L, El-Zaher A S A, et al. Furrow irrigation system design for clay soils in arid regions [C]//Proceedings of AGU Hydrology Days, Colorado State University, Colorado, USA: 2004: 42~54.
- 6 闫庆健,李久生. 地面灌溉水流特性及水分利用率的数学模拟[J]. 灌溉排水, 2005,24(2):62~64.  
Yan Qingjian, Li Jiusheng. The simulation on the performance of water advance and recession, application efficiency of border irrigation[J]. Irrig. and Drain., 2005, 24(2):62~64. (in Chinese)
- 7 王京,史学斌,宋玲,等. 畦田水流特性及灌水质量的分析[J]. 中国农村水利水电, 2005(5):4~7.  
Wang Jing, Shi Xuebin, Song Ling, et al. Analysis of water flow performance and irrigation efficiency of border irrigation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(5):4~7. (in Chinese)
- 8 史学斌. 畦灌水流运动数值模拟与关中西部灌水技术指标研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2005.  
Shi Xuebin. Study on border irrigation water current movement mathematical simulation and irrigation technique index in the west of Guanzhong [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2005. (in Chinese)
- 9 朱霞,缴锡云,王维汉,等. 微地形及沟断面形状变异性对沟灌性能影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1):1~4.  
Zhu Xia, Jiao Xiyun, Wang Weihang, et al. Influences of spatial variability of micro-topography and section shape on furrow irrigation performance [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(1):1~4. (in Chinese)
- 10 郑和祥,史海滨,程满金,等. 畦田灌水质量评价及水分利用效率分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6):1~6.  
Zheng Hexiang, Shi Haibin, Cheng Manjin, et al. Analysis of irrigation efficiency and water use efficiency of border irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(6):1~6. (in Chinese)
- 11 马娟娟,孙西欢,郭向红,等. 畦灌灌水技术参数的多目标模糊优化模型[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(2):160~163,178.  
Ma Juanjuan, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Multi-objective fuzzy optimization model for border irrigation technical parameters [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(2):160~163,178. (in Chinese)

- 11 沈明卫, 郝飞麟. 供水压力对穿孔管布水系统布水均匀性的影响[J]. 浙江大学学报:工学版, 2008, 42(6): 1 085 ~ 1 088.  
Shen Mingwei, Hao Feilin. Effect of water pressure on distribution uniformity in perforated pipeline system [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(6): 1 085 ~ 1 088. (in Chinese)
- 12 Ranganathan Panneerselvam, Sivarama Savithri, Gerald Devasagayam Surender. CFD modeling of gas-liquid-solid mechanically agitated contactor [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86(12): 1 331 ~ 1 344.
- 13 Xinyu Zhang, Goodarz Ahmadi. Eulerian-Lagrangian simulation of liquid-gas-solid flows in three-phase slurry reactors [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(18): 5 089 ~ 5 104.
- 14 Van Sint Annaland M, Dean N G, Kuipers J A M. Numerical simulation of gas-liquid-solid flows using a combined front tracking and discrete particle method [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(22): 6 188 ~ 6 198.
- 15 Pameerselvam R, Savithri S, Surender G D. CFD simulation of hydrodynamics of gas-liquid-solid fluidized bed reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(6): 1 119 ~ 1 135.
- 16 Wang Feng, Mao Zaisha, Wang Yuefa, et al. Measurement of phase holdups in liquid-liquid-solid three-phase stirred tanks and CFD simulation [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(22): 7 535 ~ 7 550.
- 17 ANSYS CFX. ANSYS CFX handbook version 12. 1[M]. UK: CFX Company, 2009.
- 18 Metcalf & Eddy Inc. Wastewater engineering: treatment and reuse I-III [M]. 4th ed. Beijing: McGraw-Hill Companies, Inc., 2003.
- 19 Torsten Pietsch, Ralf Mehrwald, Ralf Grajetzki, et al. Macro- and microscopic in-situ observation of gas bubbles and sludge particles in a biogas tower reactor [J]. Water Research, 2002, 36(11): 2 836 ~ 2 842.
- 20 刘永红, 贺延龄, 李耀中, 等. UASB 反应器中颗粒污泥的沉降性能与终端沉降速度[J]. 环境科学学报, 2005, 25(2): 176 ~ 179.  
Liu Yonghong, He Yanling, Li Yaozhong, et al. The settling characteristics and terminal velocity of granular sludge in UASB reactor [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(2): 176 ~ 179. (in Chinese)
- 21 杨世关, 赵青玲, 张杰, 等. 两种厌氧反应器培养颗粒污泥的对比试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 183 ~ 187.  
Yang Shiguan, Zhao Qingling, Zhang Jie, et al. Comparative experiment of anaerobic granular sludge cultivation in two kinds of anaerobic reactors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(1): 183 ~ 187. (in Chinese)
- 22 朱洪光, 毕峻玮, 石惠娴. 全混式厌氧反应器搅拌方式分析与优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 127 ~ 131.  
Zhu Hongguang, Bi Junwei, Shi Huixian. Analysis and optimization of different mixing method in completely mixed digesters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 127 ~ 131. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 88 页)

- 12 白美健, 许迪, 李益农. 不同微地形条件下入渗空间变异对畦灌性能影响分析[J]. 水利学报, 2010, 41(6): 732 ~ 738.  
Bai Meijian, Xu Di, Li Yinong. Effects of spatial variability of infiltration on basin irrigation performance under different microtopography conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 732 ~ 738. (in Chinese)
- 13 王维汉, 缴锡云, 彭世彰, 等. 基于稳健设计理论的畦灌质量敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 37 ~ 42.  
Wang Weihang, Jiao Xiyun, Peng Shizhang, et al. Sensitivity analysis of border irrigation performance using robust design theory [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 37 ~ 42. (in Chinese)
- 14 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 15 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)
- 16 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.