

基于主成分分析和参数设计的 畦灌技术参数优化

徐家屯^{1,2}, 朱大炯³, 蔡焕杰^{1,2}, 王健^{1,2}

(1. 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;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 针对畦灌灌水质量评价指标较多、自然因素存在时空变异性和技术参数有控制误差而造成的灌水质量评价不合理、灌水质量不高且波动大的现状,在田间灌水试验的基础上,利用主成分分析计算灌水质量综合主成分作为评价指标,采用参数设计的方法对畦灌灌水技术参数进行了优化。结果表明,灌水质量综合主成分可以代表 99.99% 的灌水质量变异信息,且服从正态分布,同时自然参数的变异和技术参数的误差对灌水质量及其稳健性产生了较大影响,经模拟和实测结果验证,泾惠渠灌区畦灌技术参数优化组合为畦宽 3.5~4.5 m,畦长 120 m 左右,单宽流量 $9\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 左右,改水成数 7 成左右,此时具有很好的灌水质量和稳健性。

关键词: 畦灌; 灌水质量评价; 主成分分析; 参数设计; 稳健性; 灵敏度; 技术参数优化
中图分类号: S275.3 **文献标志码:** A

Optimization of technical parameters for border irrigation based on principal component analysis and parameter design

XU Jia-tun^{1,2}, ZHU Da-jiong³, CAI Huan-jie^{1,2}, WANG Jian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering of Northwest Agriculture and Forest University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Chinese Arid Area Research Institute of Water-saving Agriculture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. Henan Water Conservancy Survey and Design Research Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: Pointed at the current situation as unreasonable evaluation of irrigation quality, lower irrigation quality and high fluctuation caused by more evaluation indexes for the irrigation quality, existed the spatial and temporal variation for the natural elements and possessed control error for the technical parameters. Based on the field irrigation experiment, using the principal component analysis calculated the comprehensive principal component of irrigation quality for the evaluation index. Utilized the parameter design method, carried out the optimization for the technical factors of the border irrigation. The results showed that: The comprehensive principle component of of irrigation quality can be represented 99.99% of variation information of irrigation quality and obeyed the normal distribution. Meanwhile the variation of natural parameter and technical parameters error can be produced higher influence for the irrigation quality and its robustness. Through simulation and validation by the measured results, the optimal combination for the technical parameters of border irrigation in Jinghuiqu Irrigatin Distract were border width 3.5 to 4.5 m, border length around 120m, the unit width discharge about $9\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ and inflow cutoff ratio approximately 0.7. At this time, it will be a good irrigation quality and robustness.

Keywords: border irrigation; evaluation of irrigation quality; principal component analysis; parameter design; robustness; sensitivity; optimization of technical parameter

畦灌是目前中国大田作物广泛采用的主要灌水方式,但由于灌水技术参数不合理而导致的灌水

收稿日期: 2015-12-29
基金项目: 国家科技支撑计划课题(2011BAD29B01); 高等学校学科创新引智计划(B12007)
作者简介: 徐家屯(1990—), 男, 山东聊城人, 硕士生, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: xujt125@163.com。
通讯作者: 蔡焕杰(1962—), 男, 河北藁城人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水与水资源高效利用研究。E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn。

质量不高且波动性较大仍是其在应用中面临的主要问题。对灌水质量进行分析与评价进而优化灌水技术参数,是提高灌水质量及其稳健性的有效手段。影响灌水质量的因素较多^[1],各自然因素(入渗参数、糙率、坡度和田面平整度等)存在着时空变异性且灌水技术参数(畦田规格、单宽流量、改水成数等)又有控制误差,这些因素都对灌水质量产生了显著的影响^[2-9]。对此,国内外学者从不同方面做了大量的研究^[10-17],但只采用少数灌水质量指标针对个别因素进行灌水质量分析优化的技术方案在实际应用中遭遇了灌水质量波动性大和合格率低的挑战。李世瑶等^[18]采用灌水质量综合主成分进行灌水质量分析和评价,表明该指标具有较好的代表性和客观性。而虞晓彬等^[19]采用 SRFR 模型模拟求得了畦灌技术参数的非劣解集;王维汉等^[20]和缴锡云等^[21]运用稳健设计理论分别进行了灌水质量敏感性分析和稳健性分析,这些方法考虑到了参数波动和变异的影响,但都只以灌水效率和均匀度为质量指标,存在评价不够全面、系统的问题,也没有在稳健解集的基础上进一步优化,并且其稳健解也缺少大田实测资料的验证。

针对以上情况,本文以田间试验资料为基础,考虑自然因素的变异性和技术参数的控制误差,以灌水效率、灌水均匀度、储水效率和深层渗漏率的综合主成分为灌水质量评价指标,采用参数设计方法^[22](田口方法)进行稳健性和灵敏度分析,并在稳健解的基础上进行优化和验证,以期在当地提供高质量、可操作性强、抗干扰性好的优化灌水技术方案。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在陕西省泾惠渠灌区进行,试验地点位于咸阳市泾阳县桥底镇(34°36' N, 108°42' E),灌溉水为泾惠渠渠水。该灌区位于陕西省关中平原中部,为关中九大灌区之一的大(Ⅱ)型灌区(108°34' 34" ~ 109°21' 35" E, 34°25' 20" ~ 34°41' 40" N),灌区多年平均降水量 538.9 mm,年蒸发量 1 212 mm,总日照时数 2 200 h,多年平均气温 13.4℃。该灌区农作物种植方式为冬小麦—夏玉米轮作模式,灌区以占全省 2.4% 的耕地,生产了占全省 5.8% 的粮食,提供了全省 10% 的商品粮,是陕西省重要的粮食生产基地。土壤类型为灌淤土,田间持水量约为 24% (质量含水量)。

1.2 试验设计

试验区面积共 2.2 hm² 左右,试验时间为 2013

年 6 月至 2015 年 6 月。试验区设置 4 个畦长,分别为 80、120、160、235 m,畦宽在 3 ~ 5 m 之间,坡度在 0.0017 ~ 0.0053 之间。具体畦田设计见文献[18]。种植作物类型为冬小麦、夏玉米,冬小麦种植品种为西农 979,夏玉米种植品种为武科 2 号。冬小麦—夏玉米轮作期间根据当地农民习惯灌水。该研究取 2013 年冬小麦冬灌水作为研究,即灌水日期为 2013 年 1 月 10 日,入畦流量 38 L·s⁻¹ 左右,灌水定额为 90 mm。

1.3 测定项目及方法

灌水前分别测量每个畦田的宽度、坡度、土壤入渗参数;灌水时测量入畦流量、畦田内水流推进、消退过程和畦首水深。

(1) 土壤入渗参数:入渗公式采用 Kostikov 公式

$$I(t) = Kt^\alpha \quad (1)$$

式中, $I(t)$ 为某时刻土壤累积入渗量(mm); t 为土壤入渗时间(h); K 为入渗系数(mm·h⁻¹); α 为入渗指数。

田间现场测量采用双环法,该仪器外环 65 cm,内环 31 cm。灌水前在畦田的首、中、尾分别测量记录累计入渗量和入渗时间,本研究选取其中差异性较小的 15 块畦田作为研究对象,共计 45 组入渗试验,然后经 Excel 2010 中幂函数拟合求各测点的入渗参数。

(2) 流量测定:通过斗渠上无喉道量水槽测量,并使用 LS45A 型旋杯式流速仪在农渠上每间隔 4 小时测量一次进行校正。

(3) 水流推进、消退过程测量:灌水前沿水流推进方向每隔 10 m 设定位观测点,灌水时观测和记录水流推进和消退到达各观测点的时间(采用秒表计时)。

(4) 畦首水深测量:在畦首观测点断面上等间距插 3 把塑料直尺,水流每推进到一个观测点时记录直尺的读数,取其均值作为畦首水深,直至畦首积水消退。

(5) 坡度测量:每块畦田的坡度通过水准测量仪测高程计算得到。

(6) 粗糙系数确定:根据坡度 S 、单宽流量 q 和畦首水深 h 利用曼宁公式(式 2) 估算

$$n = \frac{\frac{1}{2} h^{\frac{5}{3}}}{q} \quad (2)$$

(7) 土壤含水量测量:在灌水前和灌水后 2 ~ 3 d,在畦田中部从畦首到畦尾每隔 30 ~ 40 m 采用人工土钻取土,深度为 2 m,1 m 内每 10 cm 取土样一

个,1 m 以下土层每 20 cm 取土样一个,采用室内烘干法测量土壤质量含水率。

2 田面参数确定和参数设计

2.1 田面参数确定

田面参数包括入渗系数 K 、入渗指数 α 和糙率

n 。郑和祥等^[23]和李佳宝等^[24]分别采用 SIRMOD 模型和 SRFR 模型求解田面参数,取得了很好的效果。本文采用 WinSRFR4.1 模型根据灌水资料反推和田间实测相结合的方法进行估算,且以前者为主。选择 16 组独立完整的畦田灌水过程和 17 组双环入渗试验数据,按照上述方法进行估算,结果见表 1。

表 1 WinSRFR4.1 模拟和大田实测田面参数统计量及均值检验
Table 1 Simulated by WinSRFR4.1 and field measured parameters, statistics and mean values testing

参数 Parameters	极差 Range		平均值 Mean value		标准差 Standard deviation		均值检验 Testing	
	模拟 Simulated	实测 Measured	模拟 Simulated	实测 Measured	模拟 Simulated	实测 Measured	t	显著性 Sig.
入渗系数 $K/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$ Infiltration coefficient	83.460	147.200	127.980	109.682	20.626	47.742	0.729	0.473
入渗指数 α Infiltration index	0.393	0.500	0.510	0.560	0.114	0.144	0.730	0.473
糙率 n Roughness	0.134	0.080	0.107	0.114	0.040	0.022	1.576	0.125

注:坡度田间测量的均值为 0.0037,标准偏差为 0.0008。
Note: Mean value of field measured slope was 0.0037, standard deviation was 0.0008.

由表 1 可以看出,采用 SRFR 模型利用灌水资料模拟所求田面参数与实测田面参数没有显著差异(各参数经 SPSS 22.0 中独立样本 T 检验的显著性水平均大于 0.1),并且模拟糙率与美国农业部水土保持局推荐的 0.1(小的粮食作物)经 SPSS 22.0 中单样本 T 检验,显著性为 0.541,即无显著差别。这表明采用 SRFR 模拟法反求田面参数是可行的和可靠的,从而为参数设计的模拟试验提供了基础参数。

入渗参数实测值的变异均大于模拟值,这是因为采用 SRFR 模型反求的入渗参数在一定程度上代表了整块畦田的均值,实测法仅估算了一个测点的值,不能体现参数的空间变异性。糙率实测值的变异反而小于模拟值,这是因为实测法仅以畦首的水深计算了畦首区域的糙率,没有考虑畦田其它区域糙率的变化,再加上单宽流量和畦首水深变化不大使得实测值的变异降低。因此,采用 SRFR 模型反求田面参数具有很好的代表性和可靠性。

2.2 参数设计

参数设计是广泛使用的三次设计的第二阶段,地面灌溉的灌水质量评价有着较为成熟的基础理论,因此不进行第一阶段的系统设计,也不考虑容差设计,直接进行参数设计,把各因素分为可控因子和噪声因子(产生变异和控制误差),采用内、外两个正交表来安排模拟实验。

2.2.1 可控因子水平及内表设计 内表为对可控因子及其水平安排试验的正交表。将单宽流量、畦

长和改水成数作为可控因子,考虑灌区的实际情况,各设置 3 个水平:单宽流量 q 分别为 6、12、18 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$,畦长 L 分别为 80、120、160 m,改水成数 g 分别为 0.7、0.8、0.9。对于该 3 因素 3 水平的情况,采用正交表 $L_9(3^4)$ 安排内表的模拟试验方案,试验方案依次编为 A1 ~ A9,见表 2。

2.2.2 误差水平及外表设计 外表为考虑各因素的变异或误差来安排试验的正交表。各种因素的误差或变异会对某一技术参数组合下的灌水质量产生干扰,为了获得稳健的设计方案,针对各因素的时空变异性和技术参数的控制误差,对内表($L_9(3^4)$ 正交表)中的每个方案进行外表设计。在外表设计中,单宽流量、改水成数及畦长这三个因素的控制误差分别按内表设计值的 $\pm 5\%$ 计。将考虑控制误差后的 3 个水平值分别记为 q' 、 L' 和 g' 。入渗系数 K 、入渗指数 α 、糙率 n 和坡度 S 属于不可控制和难以控制因素,因此作为灌水试验和质量评价的噪声因素,依照参数设计,4 个噪声因素取其均值作为设计水平(水平 2),将“均值 $\pm \sqrt{1.5 \times \text{标准差}}$ ”分别作为参数的高水平值(水平 3)和低水平值(水平 1)。对于内表中 A1 ~ A9 的每个模拟试验方案,均对应着一个 $L_{18}(3^7)$ 正交表,外表方案次编为 B1 ~ B18,依据外表中的方案,采用 winSRFR 模型进行模拟试验,计算综合主成分 F 和灌水质量损失指标 P_L ,如表 3 所示。由于篇幅有限,本文仅列出了相应于内表 A6 方案的外表实验方案及综合主成分和质量损失指标计算结果。

表 2 内表模拟试验方案设计

Table 2 Simulated experimental scheme design of Internal table

试验编号 Number	单宽流量 $q/(L\cdot s^{-1}\cdot m^{-1})$ Unit wide flow		畦长 L/m Border length		改水成数 g Inflow cutoff	
	水平 Level	取值 Value	水平 Level	取值 Value	水平 Level	取值 Value
A1	1	6	1	80	1	0.7
A2	1	6	2	120	2	0.8
A3	1	6	3	160	3	0.9
A4	2	12	1	80	2	0.8
A5	2	12	2	120	3	0.9
A6	2	12	3	160	1	0.7
A7	3	18	1	80	3	0.9
A8	3	18	2	120	1	0.7
A9	3	18	3	160	2	0.8

表 3 对应内表 A6 的外表试验设计及计算结果

Table 3 The external table experiment design and calculated results correspoding internal table A6

编号 Number	q' $/(L\cdot s^{-1}\cdot m^{-1})$	L'/m	g'	K $/(mm\cdot h^{-\alpha})$	α	n	S	计算结果 Calculated result	
								F	P_L
B1	11.4	152	0.67	102.719	0.241	0.058	0.0027	1.301	0.241
B2	11.4	160	0.70	127.980	0.381	0.107	0.0037	0.775	0.767
B3	11.4	168	0.74	153.241	0.521	0.156	0.0047	0.245	1.297
B4	12.0	152	0.67	127.980	0.381	0.156	0.0047	0.539	1.003
B5	12.0	160	0.70	153.241	0.521	0.058	0.0027	0.825	0.717
B6	12.0	168	0.74	102.719	0.241	0.107	0.0037	0.178	1.364
B7	12.6	152	0.70	102.719	0.521	0.107	0.0047	0.389	1.153
B8	12.6	160	0.74	127.980	0.241	0.156	0.0027	-0.623	2.165
B9	12.6	168	0.67	153.241	0.381	0.058	0.0037	0.304	1.238
B10	11.4	152	0.74	153.241	0.381	0.107	0.0027	0.155	1.387
B11	11.4	160	0.67	102.719	0.521	0.156	0.0037	0.915	0.627
B12	11.4	168	0.70	127.980	0.241	0.058	0.0047	0.564	0.978
B13	12.0	152	0.70	153.241	0.241	0.156	0.0037	-0.353	1.895
B14	12.0	160	0.74	102.719	0.381	0.058	0.0047	0.773	0.769
B15	12.0	168	0.67	127.980	0.521	0.107	0.0027	1.117	0.425
B16	12.6	152	0.74	127.980	0.521	0.058	0.0037	0.757	0.785
B17	12.6	160	0.67	153.241	0.241	0.107	0.0047	0.102	1.440
B18	12.6	168	0.70	102.719	0.381	0.156	0.0027	0.032	1.510

3 灌水质量主成分分析

3.1 灌水质量指标

采用灌水效率 E_a 、灌水均匀度 E_d 、储水效率 E_s 和深层渗漏率 D_p 的综合主成分来评价灌水质量。

(1) 灌水效率 E_a 是指灌水后存储于计划湿润层内的水量与实际灌入田间的总水量的比值,即

$$E_a = \frac{W_1}{W_1 + W_2 + W_3} \times 100\%$$

(3)

式中, W_1 、 W_2 和 W_3 分别为灌入计划湿润层的水量、深层渗漏量和径流损失水量(m^3)。

(2) 灌水均匀度 E_d 是指灌入田间水量最少部分田块的平均入渗深度与整个畦(沟)长的平均入渗深度的比值^[20],即

$$E_d = \frac{Z_{\min}}{Z_{aw}} \times 100\%$$

(4)

式中, Z_{aw} 为整个畦(沟)长的平均入渗深度(m); $Z_{\min}$ 为田间入渗水量最少部分田块的平均入渗水深(m),通常用入渗最少的 1/4 畦(沟)长的平均入渗水深来表示。 Z_{aw} 可以表示为:

$$Z_{aw} = \frac{\int_0^L z dx}{L}$$

(5)

式中, Z 为单位面积累积入渗量(m); L 为畦(沟)长(m)。

(3) 储水效率 E_s 是指灌水后存储在土壤计划湿润层内的水量占计划湿润层所需水量的百分比,即

$$E_s = \frac{W_1}{W_1 + W_4} \times 100\%$$

(6)

式中, W_4 为灌水量不足区域所欠缺的水量(m^3);其余符号同式(3)。

(4) 深层渗漏率 D_p 是指田间深层渗漏损失的水量与输入田间的总水量之比,即

$$D_p = \frac{W_2}{W_1 + W_2 + W_3} \times 100\%$$

(7)

式中符号同式(3)。

针对多个灌水质量指标存在相关性和重叠,为

便于综合、全面同时又简便、快捷地评价灌水质量,对以上 4 个指标提取主成分,然后采用综合主成分进行分析。

3.2 灌水质量主成分分析

采用 winSRFR 4.1 模型对所有外表的共 162 个设计方案进行模拟,得到灌水效率、灌水均匀度、储水效率和深层渗漏率,先对深层渗漏率同趋化处理,记为 D'_p ($D'_p = -D_p$),然后采用 SPSS 22.0 对 4 个标准化的灌水质量指标进行主成分分析。为了使抽取的主成分更具有代表性和可解释性,在主成分分析时进行最大四次方值法正交旋转。主成分分析前先进行适宜性检验,经检验,4 个灌水质量指标在 0.05 水平上显著相关,且 Bartlett 球形检验显著性小于 0.01,KMO 统计量为 0.586,所以适宜对 4 个灌水质量指标做主成分分析,分析结果见表 4。

表 4 旋转主成分的载荷矩阵及贡献率

Table 4 The load matrix of revolved main principle components and contribution rate

主成分 Principle component	灌水效率 E_a	灌水均匀度 E_d	同趋化渗 漏率 D'_p	储水效率 E_s	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate /%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
F ₁	0.994	0.123	0.994	-0.528	2.270	56.762	56.762
F ₂	0.074	0.983	0.075	0.282	1.057	26.419	83.181
F ₃	-0.079	0.136	-0.078	0.801	0.672	16.809	99.990
F ₄	0.014	0.000	-0.014	0.000	0.000	0.010	100.000

由表 4 可见,第一主成分 F_1 主要解释灌水效率,代表了 E_a 和 D_p ;第二主成分 F_2 和第三主成分 F_3 分别解释均匀度 E_d 和储水效率 E_s 。这与李世瑶等^[18]采用田间实测灌水质量指标进行主成分分析的结果一致,表明采用 SRFR 模拟试验及对灌水质量指标提取主成分是可靠的和准确的。与文献^[18]相比,本文中第一主成分 F_1 和第二主成分 F_2 的比重有所减少,第三主成分 F_3 的比重增加,主要是由于文献^[18]中灌水定额较大(平均 $1\,459\,\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$),畦田尾部积水较多,造成其深层渗漏量较大,灌水效率和均匀度降低并且波动较大(变异系数分别为 0.207 和 0.177),储水效率增加且波动较小(变异系数为 0.060)。

前三个主成分的累计贡献率达 99.99%,满足提取主成分的要求。因此,对前三个主成分按各自的贡献率进行加权线性组合,得到综合主成分 F ,用来进行灌水质量分析评价及畦灌技术参数优化。采用上述方法,对外表的 162 组设计方案进行分析,得到各自的标准化综合主成分 F 。由于样本数小于 5000,因此采用 SPSS 22.0 中的 Shapiro-wilk(w 检验)方法对 F 进行正态性检验^[25],显著性为 0.191,

认为标准化综合主成分是正态分布的,具有较好的客观代表性。

4 灌水质量评价及灌水技术参数优化

4.1 灌水质量评价

在采用参数设计进行灌水质量分析前,需要确定质量损失指标,然后依据该指标进行稳健性和敏感度分析。

(1) 损失指标:灌水效率、灌水均匀度、储水效率和深层渗漏率分别取理想值为 100%、100%、100% 和 0%,得到该组合的标准化综合主成分为 $F_{op} = 1.542$ 。从而得到灌水质量损失指标为 $P_L = F_{op} - F$ 。

(2) 灵敏度指标:采用每张外表中各个方案的灌水质量损失的平均值 $\bar{P}_L$ 作为相应内表方案灵敏度,计算结果见表 5,该值越小越好。

(3) 稳健性指标:采用信噪比 η 来表示噪声因素对灌水质量产生的干扰,损失指标具有望小特性,因此,每张外表方案组的信噪比为:

$$\eta = 10\lg\left(\frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} P_L^2\right)$$

(8)

该值越小越好。按照式(6) 分别计算各个外表方案组的 η 值,计算结果见表 5。

由表 5 可见,各方案的平均质量损失都大于 1,而信噪比都大于 0,说明控制误差和噪声因素的变异对灌水质量产生了很大干扰,这与一些学者^[2-9]的研究结论相一致。但同时也表明,在进行畦田技

术参数优化时,只以各参数的均值进行优化设计而不考虑参数的变异或误差是不妥的。

分别以单宽流量、畦长、改水成数各水平的平均信噪比和灵敏度为纵坐标,得到灌水质量稳健性和质量损失值随 3 个控制因素各水平的变化图,如图 1 所示。

表 5 内表各方案模拟结果

Table 5 The simulated results for each scheme of internal table

方案编号 Numbers	单宽流量 q Unit wide flow/($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)	畦长 L Border length/m	改水成数 g Inflow cutoff	灵敏度 $\bar{P}_L$ Sensitivity	信噪比 η Signal-to-noise ratio/dB
A1	6	80	0.7	1.130	1.704
A2	6	120	0.8	1.141	1.889
A3	6	160	0.9	1.671	4.876
A4	12	80	0.8	1.390	3.412
A5	12	120	0.9	1.853	5.736
A6	12	160	0.7	1.098	1.574
A7	18	80	0.9	2.277	7.310
A8	18	120	0.7	1.419	3.726
A9	18	160	0.8	1.899	5.959

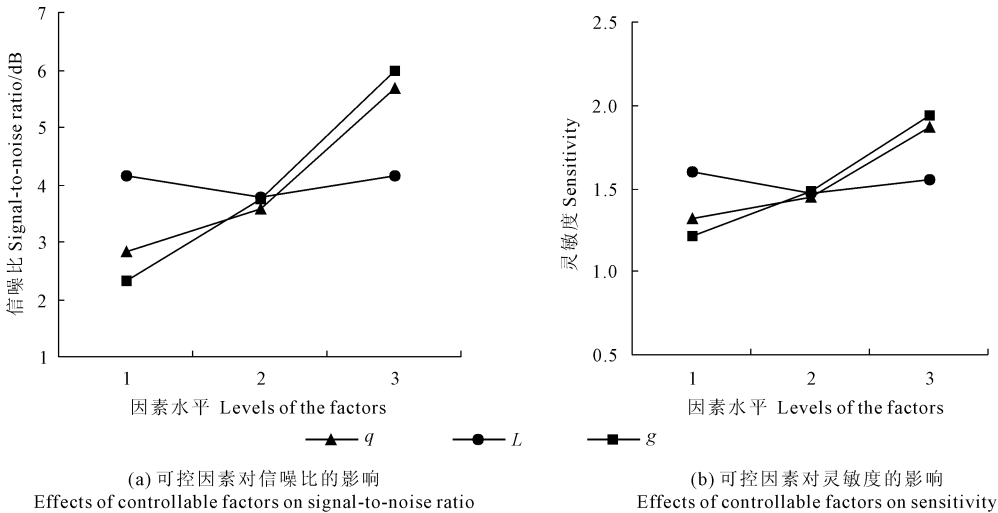


图 1 可控因素各水平对信噪比和灵敏度的影响

Fig.1 Effects of controllable factors on each level signal-to-noise ratio and sensitivity

从表 5 及图 1 可以看出,自然参数的变异和技术参数的控制误差对灌水质量的稳健性的波动性影响较大,灌水质量不是很理想,需要进一步优化提高。信噪比和灵敏度均随单宽流量和改水成数的减小而减小,而在试验设计范围内畦长对信噪比和灵敏度的影响不显著,这说明在试验区内调整单宽流量和改水成数是提高灌水质量水平和稳健型的关键环节。

4.2 灌水技术参数优化

分别以信噪比和平均质量损失为因变量,单宽

流量、畦长和改水成数为自变量对内表各方案的模拟结果进行稳健性分析和灵敏度分析(不考虑各因素的交互作用),以得到稳健因素和调节因素,为畦灌的稳健性优化和提高灌水质量提供依据。稳健性和灵敏度分析的结果见表 6。

由表 6 可见,线性方差分析模型只在 0.1 水平上显著,主要是因为模型中没有单独考虑噪声因素的作用以及没有考虑田面平整度、土壤质地和灌前土壤含水量等因素的作用。单宽流量和改水成数在两项分析中都显著,且改水成数的显著性更大些,而

畦长在两项分析中都不显著,因此, q 和 g 既是稳健因素又是调节因素。这一方面是因为自然参数的变异和技术参数的控制误差以及其它未考虑的因素对灌水质量产生了较大的影响,都计入了误差项了;另一方面是因为在较大的单宽流量和坡度下,灌水质量在设计的畦长水平区间内变化不大,这与刘群昌等^[26]在研究田间波涌灌溉技术时畦长在 100 ~ 150 m 变化对灌水质量影响不大的结论类似。

表 6 稳健性和灵敏度分析结果

Table 6 Analysis results of robustness and sensitivity				
因子 Factors	稳健性分析		灵敏度分析	
	Robustness analysis		Sensitivity analysis	
	均方 Mean square	显著性 Sig.	均方 Mean square	显著性 Sig.
模型 Model	5.576	0.096 *	0.219	0.071 *
截距 Intercept	145.475	0.004 **	21.400	0.001 **
单宽流量 q Unit wide flow /($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)	6.507	0.081 *	0.248	0.062 *
畦长 L Border length/m	0.126	0.820	0.013	0.565
改水成数 g Inflow cutoff	10.095	0.054 *	0.396	0.040 **
误差 Error	0.575	—	0.016	—

注: * 表示 0.1 水平上显著; ** 表示 0.05 水平上显著。稳健性分析和灵敏度分析的拟合度分别为 0.967 和 0.976。
Note: * and ** are significant at 0.1 and 0.05 levels. Fitting degree on robustness and sensitivity analysis are 0.967 and 0.976.

因此,单宽流量和改水成数是灌水质量优化设计的重要调节因子,可在相对优异的 A6 方案基础上对技术参数 q 和 g 进行优化调整。由表 5 及图 1 看出,单宽流量和改水成数的低水平(1 水平)都具有更好的稳健性和灵敏度,考虑田间农户的实际灌水耕作习惯、减少畦埂占地及推广的适用性,取优化方案的三个参数分别是单宽流量 $9 L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$,畦长 120 m,七成改水。这与刘洪禄等^[27]在田间试验基础上研究冬小麦灌水技术参数时取粘壤土的合理畦长为 120 ~ 150 m 相一致,这也与杨玫等^[28]推荐的七成或八成改水相吻合。在不造成冲刷或轻微冲刷的情况下,选择较大的单宽流量有利于水流推进过程中克服入渗参数和糙率的变异对灌水质量造成的不利影响,可加强水流对土块的消散破碎作用和对土壤颗粒的运移作用以提高田面平整度从而改善灌水质量。较大单宽流量可以提高水流推进速度便于低灌水定额的田间实现。

4.3 优化方案的验证

首先采用模拟验证,同样考虑控制误差和噪声

因素,且采用同样的因素水平设置方法,用 L18(37) 正交表安排试验。然后从这次田间灌水试验中选出技术参数和优化方案技术参数接近的 4 个独立完整的灌水纪录,计算实测的灌水质量,模拟结果和实测结果见图 2。

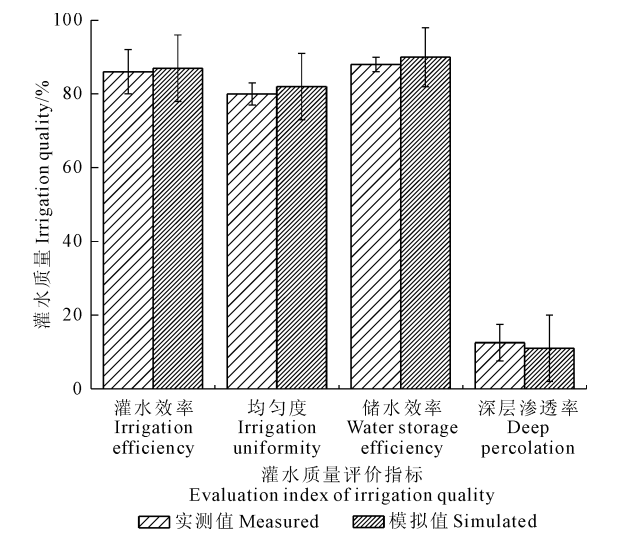


图 2 优化方案的模拟结果和实测结果比较

Fig.2 Comparison of simulated results and measured results of optimal schemes

由图 2 可见,田间实测的灌水效率、灌水均匀度和储水效率低于模拟值而深层渗透率高于模拟值,这主要是因为模拟时没有考虑田面平整度和灌前土壤含水率等因素的作用,而实测法没有考虑灌水过程及灌水后取土测量前水面、地面的蒸发及作物的耗水。灌水均匀度比灌水效率和储水效率低,波动性大,说明自然参数的变异和技术参数的控制误差对灌水均匀度的影响更大,因此,后续的研究工作应该从如何提高灌水均匀度这一关键指标入手。

可以看出,优化方案在数值试验和田间试验中均取得了较好的灌水效果,达到了令人满意的程度;可得模拟结果的平均质量损失为 1.050,信噪比为 1.052,该方案优于 A6 方案。因此,该优化方案技术参数组合是可靠的和稳健的,可以在灌区进行推广。

5 结论与讨论

针对灌水质量评价指标的重叠性和相关性给灌水质量评价带来的不便,建立了具有代表性和可信度的综合主成分评价指标。针对灌水量的波动性和抗干扰能力低,进行了参数设计及灌水技术参数优化。得出以下主要结论:

(1) 采用 SRFR 模型依据灌水资料可以快速、简洁地反推入渗系数、入渗指数和糙率,结果与实测一

致,具有可靠性和代表性。

(2) 采用主成分分析对灌水效率、灌水均匀度、储水效率和深层渗漏率 4 个灌水质量指标提取主成分进行综合,可以在不损失或较少损失原有指标变异信息的情况下,将 4 个灌水质量指标转换为一个服从正态分布的灌水质量综合主成分评价变量,具有较好的代表性与可靠性,可用于灌水质量的评价分析和灌水技术参数的优化。

(3) 采用 SRFR 模型所求参数,考虑灌水技术参数的控制误差和自然参数的变异性,针对灌水质量的波动性进行了参数设计和模拟试验,结果表明,内表各方案的灌水质量和稳健性都不是很理性,各自然参数的变异和技术参数的控制误差对灌水质量产生了较大干扰。通过对内表 9 个方案模拟结果的稳健性和灵敏度分析,发现单宽流量和改水成数是重要调节因子,灌水质量及其稳健性随单宽流量和改水成数的减小而增大,而试验设计范围内畦长对灌水质量的影响不显著,结合灌区实际,经模拟和实测资料验证,得出优化技术参数为畦宽 3.5 ~ 4.5 m,畦长 120 m 左右,单宽流量 $9 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 左右,改水成数七成左右,该方案具有较好的灌水质量和稳定性。从模拟的结果和灌溉的实际结果来看,优化方案所采用的技术参数具有较好的灌水效果和抗干扰性。因此,该方案具有很好的适应性,有利于提高灌区的水资源利用率、节约农户灌水成本和减少农药、肥料的淋渗对地下水的污染及提高其利用效率。

本研究中没有考虑田面平整度(试验区 S_d 在 4.02 ~ 13.48 cm 之间)等因素影响,噪声因素对灌水质量的稳健性产生了影响,但其影响规律需要进一步研究。本研究优化方案的波动性仍较大,也需要在后续研究中进一步分析和完善。另外,鉴于研究方法和田间试验条件的限制,优化方案需要在灌水试验中进一步验证。

参 考 文 献:

- [1] 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].灌溉排水学报,2001,20(4):10-14.
- [2] Zappata N, Playan E. Simulation elevation and infiltration in level-basin irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2000, 126(2): 78-84.
- [3] Zappata N, Playan E. Elevation and infiltration in a level basin I. Characterizing variability[J]. Irrigation Science, 2000, (19): 155-164.
- [4] 白美健,许迪,李益农.随机模拟畦面微地形分布及其差异性对畦灌性能的影响[J].农业工程学报,2006,22(6):28-32.
- [5] 聂卫波,费良军,马孝义.基于土壤入渗参数空间变异性的畦灌灌水质量评价[J].农业工程学报,2012,28(1):100-105.
- [6] 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.
- [7] 王维汉,缴锡云,朱艳,等.畦灌改水成数的控制误差及其对灌水质量的影响[J].中国农学通报,2010,26(2):291-294.
- [8] 郑和祥,史海滨,郭贞克,等.不同灌水参数组合时田面坡度对灌水质量的影响研究[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):43-48.
- [9] 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.
- [10] Strelkoff T S, Clemmens A J. Dimensional analysis in surface irrigation[J]. Irrigation Science, 1994, 15(2):57-82.
- [11] Chen B, Ouyang Z, Sun Z G, et al. Evaluation on the potential of improving border irrigation performance through border dimensions optimization: a case study on the irrigation districts along the lower Yellow River[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4):715-728.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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].灌溉排水学报,2005,24(2):62-66.
- [15] 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.
- [16] 聂卫波,任长江,费良军,等.基于量纲分析的畦灌灌水质量评价模型[J].农业工程学报,2014,30(6):46-53.
- [17] 吕雯,汪有科,许晓平.秸秆覆盖畦田灌溉水流特性及灌水质量分析[J].水土保持研究,2007,14(2):236-238.
- [18] 李世瑶,蔡焕杰,陈新明.基于主成分分析的畦灌质量评价[J].农业工程学报,2013,29(24):86-93.
- [19] 虞晓彬,缴锡云,许建武.基于 SRFR 模型的畦灌技术要素非劣解[J].灌溉排水学报,2013,32(2):44-47.
- [20] 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.
- [21] 缴锡云,王维汉,王志涛,等.基于田口方法的畦灌稳健设计[J].水利学报,2013,44(3):349-353.
- [22] 茆诗松,周纪芃,陈颖.实验设计[M].北京:中国统计出版社,2012:223-235.
- [23] 郑和祥,史海滨,朱敏,等.基于 SIRM 模型的畦灌入渗参数估算及灌溉模拟[J].农业工程学报,2009,29(11):29-34.
- [24] 李佳宝,魏占民,徐睿智,等.基于 SRFR 模型的畦灌入渗参数推求及模拟分析[J].节水灌溉,2014,2(1):1-3.
- [25] 刘庆武,胡志艳.如何用 SPSS、SAS 统计软件进行正态性检验[J].湘南学院学报(自然科学版),2005,7(3):56-58.
- [26] 刘群昌,许迪,谢崇宝,等.波涌灌溉技术田间适应性分析[J].农业工程学报,2002,18(1):35-40.
- [27] 刘洪禄,杨培岭,曾德超.地面灌田面行水流动的数值模拟及应用[J].农业工程学报,1997,13(3):71-75.
- [28] 杨玫,孙西欢.畦灌水流特性与灌水效率的田间试验研究[J].太原理工大学学报,2007,38(6):543-546.