文章编号:1000-7601(2016)06-0117-06 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2016.06.18

灌水沟微地形及断面形状变异性对灌水质量影响及敏感性分析

倪东宁[1],李瑞平[1],史海滨[1],苗庆丰[1],边利军[2],李茂华[3]

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;
2.乌兰布和灌域管理局沙区灌溉试验站, 内蒙古 巴彦高勒 015200;
3.内蒙古巴彦淖尔市磴口县水务局, 内蒙古 巴彦高勒 015200)

摘 要: 为研究沟灌受水界面的时空变异性对灌水质量的影响,本文通过田间试验测试了灌水前后沟底微地形及断面形状的变化情况,并对实测数据进行了计算分析。结果表明:随时间推移,在灌水等多因素的影响下,表征沟底微地形起伏状况的 S_d 值呈现减小趋势,平均由 3.45 降至 1.17,变异性逐渐减小,变异系数平均由 0.17 降至 0.09,沟底微地形逐渐趋于平整;表征沟断面形状变异情况的 P_1 值标准差及变异性呈现增加趋势,标准差平均由 1.68 增至 1.95,变异系数平均由 0.47 增至 0.53,但总体来说属弱变异性;随沟底相对高程及断面形状参数标准差的增加,灌水质量指标均呈现降低趋势;通过敏感性分析,两影响因素对灌水均匀度的影响大于灌水效率,平均敏感系数大 9.46%和 11.84%,且沟底微地形变异的影响大于沟断面形状变异。

关键词: 沟灌;沟底微地形;沟断面形状;变异性;灌水均匀度;灌水效率;敏感系数

中图分类号: S275.3;S274.2 **文献标志码:** A

Effects of furrow microtopography and variability of section shape on irrigation quality and sensitivity analysis

NI Dong-ning[1], LI Rui-ping[1], SHI Hai-bin[1], MIAO Qing-feng[1], BIAN Li-jun[2], LI Mao-hua[3]

(1. *Water Conservancy and Civil Engineering College*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot Inner Mongolia* 010018, *China*;
2. *Sandy Area Irrigation Experiment Station*, *Ulanbuh Irrigation Field Administration*, *Bayannur*, *Inner Mongolia* 015200, *China*;
3. *Water Authority of Bayannur Deng Kou*, *Bayannur*, *Inner Mongolia* 015200, *China*)

Abstract: In order to research the affect of spatial and temporal variability of furrow in water interface on irrigation quality, this paper made a statistical analysis to the measured data based on field experiments about variation of microtopography and section shape of furrow before and after irrigation. The results showed that: Over time, influence of irrigation and other factors, the S_d value that characterized furrow microtopography presented a decreasing trend and average reduced from 3.45 to 1.17, and the variability decreasing. The coefficient of variation was reduced from 0.17 to 0.09, the microtopography was tended to flat gradually. The standard deviation of P_1 values that reflected the variation of the section shape showed an increasing trend, the standard deviation increased from 1.68 to 1.95, and the coefficient of variation increased from 0.47 to 0.53, but belonged to the weak variability. With the increase of the relative elevation of furrow bottom and the standard deviation of the section shape parameter, the irrigation quality indexes total showed a decreasing trend. Through the sensitivity analysis, the influence of two factors on irrigation uniformity was more than the irrigation efficiency, the average sensitivity coefficients were higher than 9.46% and 11.84%, and the effect of variation of microtopography was larger than section shape.

Keywords: furrow irrigation; microtopography of furrow bottom; furrow section shape; variability; irrigation uniformity; irrigation efficiency; sensitivity coefficient

收稿日期:2015-11-17
基金项目:"十二五"国家科技支撑计划项目(2011BAD29B03);国家自然科学基金项目(51369018;51269015)
作者简介:倪东宁(1990—),男,蒙古族,内蒙古赤峰市人,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:ndn901021@163.com。
通信作者:史海滨(1961—),男,山西太谷人,博士,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉原理及应用方面的研究。E-mail:shi-haibin@sohu.com。

地面灌溉是目前世界上广泛采用的灌水方式[1],沟灌作为一种常用的地面灌水方式,因其具有对土壤团粒结构的破坏性小、土壤入渗效果好、能够保持作物垄面土质疏松等优点,广泛应用于玉米、棉花等宽行作物种植[2]。

由于我国目前的田间输配水配套设施不够完善、土地平整度低、灌溉技术要素不合理等,在综合因素的影响下,田间灌水质量不高,灌溉水浪费问题严重[3],这是一个亟待解决的问题。灌水质量的评价一直是灌溉领域广泛关注的问题之一[4-5],其好坏受多重因素的综合影响,国内外学者针对此问题进行了大量的试验研究,白美健[6]等借助二维地面灌溉模型系统地评价了畦面微地形分布状况及差异性对畦灌性能的影响,并得出其对畦灌性能的影响取决于畦面相对高程标准偏差;郑和祥[7]等基于 SIRMOD 模型结合灌水定额、单宽流量和田面糙率等参数,研究了田面坡度对畦灌灌水性能的影响,并得出了不同组合条件下的适宜坡度值;Fangmeier 等[8]借助一维地面灌溉模型 SRFR 模拟研究了田面平整度对畦灌灌水质量的影响,并得出了定量的结论;王维汉[9]等模拟研究了畦灌糙率系数的变异规律对畦灌灌水质量的影响,指出在实际的灌溉模拟及灌水效果评价中,糙率系数差异性对其影响不可忽略;聂卫波[10]等基于 SRFR 地面灌溉模拟软件,模拟研究了区域尺度内畦沟灌溉各灌水技术要素对灌水质量的影响,并进行了定量的组合和优化;可见,国内外主要针对畦灌条件下各要素的变异性对灌水质量的影响进行了大量研究,而对沟灌的研究甚少,同时针对沟灌受水界面的时空变异性对沟灌性能影响的研究就更鲜有报道。本文根据田间实测数据,利用经典统计学方法定量描述了灌水沟微地形和断面形状的时空变异规律及其对灌水指标的影响,同时在定性分析的基础上定量描述了灌水质量指标对受水界面时空变异的敏感性,这也为沟灌灌水效果评价与管理中如何考虑受水界面的时空变异性提供科学依据,为沟灌的田间设计提供技术参考,对发展节水农业具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验在内蒙古自治区河套灌区磴口县坝楞村节水示范基地进行,该地区属典型的温带大陆性季风气候,年均气温 7.6℃,风速 2.75 $m \cdot s^{-1}$,降雨量 142.1 mm,蒸发量 2 346.4 mm。试验田 0 ~ 100 cm 土壤质地为砂质黏壤土、黏壤土和粉质黏壤土,土壤平均容重 1.48 $g \cdot cm^{-3}$;耕作层凋萎系数 8% 左右,田间持水量21.4%,灌溉水引自黄河水源,含泥沙量较大,平均矿化度 0.320 $g \cdot L^{-1}$,pH 值 8.1。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 播种前对试验田进行平地、耙地疏松表层土壤,采用内蒙古农业大学自行研制的一体式开沟机进行开沟起垄后进行人工修整,种植模式为小麦/玉米套种畦沟结合灌溉模式,一条玉米条带包含两条灌水沟,沟尾闭合;沟断面设计规格为沟顶宽 45 cm、沟底宽 30 cm,沟深 30 cm,灌水沟长 50 m。从田间毛渠取水按灌水定额进行灌溉,在试验田靠渠一侧修筑土埂进行分流灌溉,为了保证入沟流量的稳定性,在各田块入水口处填筑一储水槽,采用三角形量水堰测定入沟流量,选定其中 14 条灌水沟进行灌水试验,水流推进至沟尾后 5 min 关口,单沟流量在 1.2 ~ 1.5 $L \cdot s^{-1}$之间。

1.2.2 测定项目与方法 在玉米苗期和拔节期共进行 3 次灌水试验,灌水前后分别采用 DS-3 型水准仪和自制沟断面测量仪器,由沟首开始,每隔 5 m 进行灌水沟底相对高程和断面形状的测量;由于沟灌过程中,水分主要借助土壤毛细管作用从沟底和沟壁向周围渗透而湿润土壤,本研究过程中沿灌水沟方向,分别在 10 m、25 m 和 40 m 处,每次灌水前后在垄顶、沟底分别取样用烘干法测含水率,取样深度 100 cm,每 20 cm 为一层。

1.3 评价分析方法

1.3.1 沟底相对高程变异评价 灌水沟底微地形反映了灌水沟起伏状况,本研究采用平整精度指标 S_d 值予以定量描述,即:

$$S_d = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(h_i - \bar{h})/(n-1)} \quad (1)$$

式中,S_d 为沟底相对高程标准差(cm);h_i 为第 i 个测点的相对高程(cm);$\bar{h}$ 为第 i 个测点的相对期望高程(cm),一般为该点的平均设计高程,n 为沿灌水沟水流方向所有测点的数量。

1.3.2 沟断面形状参数计算 根据田间数据,用图示法把灌水沟深度以 1 cm 为步长进行等分,得到各个对应深度的过水断面面积值、湿周长度值;假定灌水沟的深度与湿周,深度与面积之间呈幂函数[12],即:

$$A = a_1 y^{a_2} \quad (2)$$

$$WP = b_1 y^{b_2} \quad (3)$$

结合式(2)、式(3)得出水力学断面经验公式:

$$AR^{0.67} = P_1AP_2 \tag{4}$$

$$P_2 = 1.667 - 0.667 \times b_2/a_2 \tag{5}$$

$$P_1 = \frac{a_1^{1.667} - P_2}{b_1^{0.667}} \tag{6}$$

式中,A 为断面横断面积(cm^2);WP 为断面湿周长(cm);R 为水力半径(cm);y 为灌水沟深度(cm);P_1、P_2 为沟断面形状参数,无量纲。

1.3.3　灌水质量评价指标　本文采用常用灌水质量指标灌水效率 E_a 和灌水均匀度 D_u 评价沟灌灌水质量,即:

$$E_a = \frac{Z_n}{Z_a} \tag{7}$$

$$D_u = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{n} |Z_i - \bar{Z}|}{n\bar{Z}} \tag{8}$$

式中,E_a 为灌水效率(%);D_u 为灌水均匀度(%);Z_n 为作物根系贮水层内平均增加水深(mm);Z_a 为田块的平均灌水水深(mm);Z_i 为第 i 个计算点的入渗水深(mm);$\bar{Z}$ 为各计算入渗水深的平均值(mm),n 为入渗水深计算点个数。

1.3.4　敏感性指标计算　敏感性分析是指从定量分析的角度,揭示有关因素发生某种变化后对某一个或一组项目的关键指标影响程度的一种不确定分析,衡量其对该项目变异的敏感程度,表征敏感程度的指标为敏感系数,其计算公式为:

$$\delta_i = \frac{|\Delta\theta_i/\theta_i|}{|\Delta\psi_i/\psi|} \tag{9}$$

式中,$\Delta\theta_i/\theta_i$ 为项目关键指标的相对变化率;$\Delta\psi_i/\psi$ 为有关影响因素的相对变化率。

2　结果与分析

2.1　沟底微地形变异特征

由表 1 可知,各灌水沟相对高程的标准偏差值 S_d 及变异系数 C_v 在整个观测期间呈现出逐渐降低的变异过程。开沟后土壤处于较松散状态,部分翻起的土块散落到沟底,平整度较差,随后受田间耕作的人为扰动、降雨及表土自然固结沉降的影响,灌一水前测试发现,反映灌水沟底微地形起伏状况的 S_d 值在 2.04 ~ 6.40 cm 之间变化,其均值为 3.45 cm;反映灌水沟底相对高程空间变异程度的 C_v 值在 0.10 ~ 0.33 之间变化,均值为 0.17(小于 1),属中等变异程度,综合来看此时沟底微地形平整度较好。但此时土壤结构仍然处于不稳定状态,表层土体仍较为松散,灌二水前受第一次灌溉时水流对表土的冲浸及浸泡作用使得疏松土壤沉降,沉降幅度在 16.94% ~ 32.84%,各灌水沟相对高程的标准偏差值 S_d 及变异系数 C_v 显著减小,减小幅度分别为 8.46% ~ 58.33% 和 10.42% ~ 69.70%,各灌水沟沟底微地形分布状况发生了明显变化。

由于第一次灌水的冲浸作用、观测期间降雨及风力等因素的综合影响,第二次灌水前表土的固结沉降程度已基本稳定,但河套灌区农业灌水的泥沙含量较大,加之灌水对灌水口处田面的冲刷,难免会有大量泥沙随水流推进流入灌水沟,同时产生对土壤孔隙的填充作用,进而影响沟底微地形的变化及土壤结构的稳定性,但通过上一次灌水轮次后实验结果不能定量表征。通过实测资料,二水后所表现出的变化规律为沟底相对高程、标准偏差及变异系数均有一定程度的降低,此时沟底微地形更为平整,同时也说明第二次灌溉引起的表土冲浸和沉降作用对沟底微地形分布状况的影响大为减弱,而水流对田块的冲刷携带泥沙及灌溉水源的高泥沙含量是影响沟底微地形的重要因素。整体来看,各灌水沟灌水前后微地形平整程度较好,且纵向起伏状况的差异不大。

表 1　灌水沟相对高程统计特征值

Table 1　The statistical characteristic values of relative elevation of furrow

灌水轮次 Irrigation times	均值 Z/cm Average value		标准偏差 S_d/cm Standard deviation		变异系数 C_v Variation coefficient	
	变化范围 Variation range	均值 Average value	变化范围 Variation range	均值 Average value	变化范围 Variation range	均值 Average value
一水前 Before the first irrigation	19.18 ~ 23.17	20.92	2.04 ~ 6.40	3.45	0.10 ~ 0.33	0.17
二水前 Before the second irrigation	22.43 ~ 30.78	25.41	0.85 ~ 5.38	2.78	0.03 ~ 0.23	0.11
三水前 Before the third irrigation	18.02 ~ 24.30	20.66	0.73 ~ 3.23	1.77	0.04 ~ 0.19	0.09

2.2 沟断面形状变异特征

每次灌水随水流沿沟运动,灌水沟形状在土壤侵蚀及固结沉降等作用下不断发生变化,而由于断面形状的突变造成的行水界面不规则会导致水流推进时间延长,进而影响灌水质量,所以沟灌评价中,测量垄沟横断面的几何形状是非常必要的。

有研究表明,对于大多数沟灌条件来说,沟水力学对经验系数 P_2 的变化不敏感,且通常取值在 1.3 ~ 1.5 之间[12],本研究通过对 14 条灌水沟的 2 次断面测量计算得出 P_2 变化范围 1.326 ~ 1.471 之间,变化较小,而 P_1 值随垄沟形状和大小的变化较为明显,故本文采用参数 P_1 值来描述灌水沟断面形状的变异情况。

由表 2 沟断面形状变化统计特征值可知,各灌水沟内反映沟断面形状变化情况的 P_1 值变化较大,反映沟断面形状空间变异性的 C_v 值在 0.27 ~ 0.62 之间,总体来说变异性较弱,属中等变异程度。同时研究发现,二水前各统计值要明显大于一水前,这是由于一水前断面各处土壤较为松散,灌溉水在重力和毛管力作用下下渗浸润土壤,同时在降雨、自然沉降等综合因素的影响下,沟断面形状变化较大。

2.3 沟底微地形及沟断面形状变异对灌水质量的影响

沟畦灌溉灌水质量受多重因素的共同影响,彼此之间往往都具有一定的内在联系,本研究根据田间实测数据计算出每次灌水前后灌水质量相关指标(文中灌水质量指标采用值为根据各次灌水前后垄顶和沟底含水率计算所得平均值),在定量的基础上定性分析微地形及沟断面形状变异对灌水质量的影响及两者响应关系。

2.3.1 *沟底微地形变异对灌水质量的影响* 在考虑单一因素对灌水质量指标影响时,很难说清其它因素对其的影响,同样如果考虑多方面因素对灌水质量的影响同样很难说清问题,所以本文在大量田间试验观测数据的基础上,选择其它因素相近且无显著差异的沟道条件,取单因素对灌水质量的影响进行分析。以沟底高程的标准偏差值作为灌水沟微地形的量化指标,选择其它因素相近(土壤特性、单沟流量、纵坡、断面形状变异参数标准差等),沟底相对高程偏差 S_d 相差较大的 4 条灌水沟(F_2、F_5、F_7、F_9)进行取样对比分析(表 3)。

灌水沟相对高程的标准偏差值 S_d 代表灌水沟底的起伏状况,其值越大沟底平整度越低,这直接影响到水流推进速度和灌水入渗历时,进而影响灌水质量。由图 1 可知,每次灌水前后灌水沟间灌水质量指标部分具有显著性差异($P < 0.05$),随 S_d 值的增大,灌水效率及灌水均匀度值整体呈现出减小趋势;各次灌水前后,灌水沟 F5、F7、F9 较 F2 的 S_d 值大 28.41% ~ 60.15%、22.44% ~ 64.39% 和 47.15% ~ 74.80%,相应的平均灌水效率低 1.52% ~ 4.44%、1.09% ~ 4.31% 和 2.13% ~ 2.74%,平均灌水均匀度低 1.75% ~ 4.54%、1.25% ~ 5.44% 和 3.38% ~ 4.04%,可见沟底微地形变异对灌水质量指标影响显著,且对灌水均匀度的影响大于灌水效率。

表 2 沟断面形状变化统计特征值

Table 2 The statistical characteristic values of furrow section shape change

灌水轮次 Irrigation times	P_1 值 P_1 value		标准偏差 S_d/cm Standard deviation		变异系数 C_v Variation coefficient	
	变化范围 Variation range	均值 Average value	变化范围 Variation range	均值 Average value	变化范围 Variation range	均值 Average value
一水前 Before the first irrigation	0.946 ~ 7.983	3.555	1.05 ~ 2.48	1.68	0.27 ~ 0.60	0.47
二水前 Before the second irrigation	1.132 ~ 8.027	4.349	1.35 ~ 2.87	1.95	0.34 ~ 0.62	0.53

表 3 4 条灌水沟相对高程统计特征值

Table 3 The statistical characteristic values of relative elevation for four irrigation furrows

灌水轮次 Irrigation times	F_2		F_5		F_7		F_9	
	S_d 值 S_d value	纵坡 Longitudinal slope	S_d 值 S_d value	纵坡 Longitudinal slope	S_d 值 S_d value	纵坡 Longitudinal slope	S_d 值 S_d value	纵坡 Longitudinal slope
一水前 Before the first irrigation	2.71	0.0023	3.48	0.0025	4.34	0.0023	4.03	0.0021
二水前 Before the second irrigation	2.05	0.0019	2.51	0.0017	3.37	0.0016	2.94	0.0016
三水前 Before the third irrigation	1.23	0.0018	2.15	0.0017	2.07	0.0016	1.81	0.0016

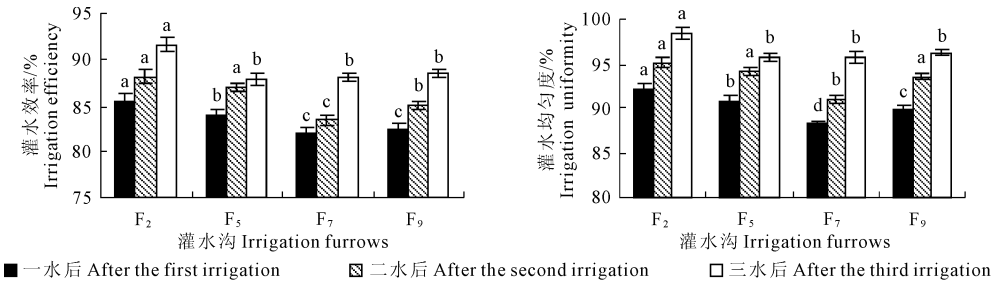

图 1　4 条灌水沟灌水效率和灌水均匀度对比

Fig.1　Comparison of irrigation efficiency and uniformity for four irrigation furrows

2.3.2　*沟断面形状变异对灌水质量的影响*　以沟断面形状参数 P_1 的标准偏差值作为沟断面形状变异的量化指标,选择其它因素相近,沟断面参数 P_1 的标准偏差值 S_d 相差较大的 3 条灌水沟(F_1、F_8、F_{10})进行取样对比分析(表 4)。由图 2 可知各灌水沟灌水效率和灌水均匀度总体上随沟断面参数 P_1 的标准偏差值 S_d 的增大呈现减小趋势;灌一水前 F_1、F_8 的 S_d 值较 F_{10}分别高 4.49%和 8.99%,灌水后发现相应的平均灌水效率低 0.24% ~ 0.47%,平均灌水均匀度低 1.05% ~ 1.37%;灌二水前 F_1、F_{10}的 S_d 值较 F_{10}分别高 46.43%和 11.22%,平均灌水效率低 0.47% ~ 0.71%,平均灌水均匀度低 0.09% ~ 1.29%,综合来看沟断面形状的变异性对灌水均匀度的影响大于灌水效率。

表 4　3 条灌水沟断面形状参数 P_1 统计特征值

Table 4　The statistical characteristic values of the section shape parameter P_1 for three irrigation furrows

灌水轮次 Irrigation times	F_1/S_d	F_8/S_d	F_{10}/S_d
一水前 Before the first irrigation	1.86	1.94	1.78
二水前 Before the second irrigation	2.87	1.96	2.18

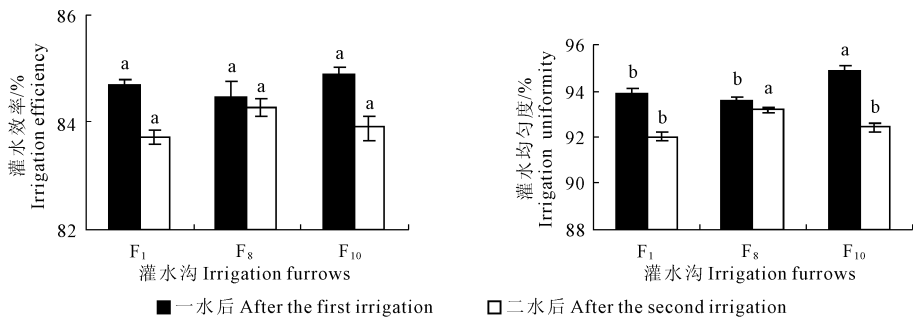

图 2　3 条灌水沟灌水效率和灌水均匀度对比

Fig.2　Comparison of irrigation efficiency and uniformity for three irrigation furrows

2.4　各影响因素变异对灌水质量影响的敏感性分析

根据式(9),采用表征各沟相对高程变异情况及表征断面形状的形状参数 P_1 值变异情况的 S_d 值作为有关影响因素,灌水质量指标、灌水效率和灌水均匀度的变化率作为关键指标。其中 $\Delta\psi_i$ 为表征各灌水沟沟底相对高程及断面形状参数变异情况对应后一次灌水与前一次灌水 S_d 值的差值,ψ_i 为对应的前一次灌水 S_d 值;$\Delta\theta_i$ 为各灌水沟后一次灌水与对应前一次灌水质量指标的差值,θ_i 为对应的前一次灌水质量指标,平均敏感系数计算结果如表 5 所示。

表 5　灌水质量指标对各影响因素的敏感系数

Table 5　The sensitivity coefficients of irrigation quality index to each influence factors

影响因素 Influence factor	敏感系数 Sensitivity coefficient	
	灌水效率 Irrigation efficiency	灌水均匀度 Irrigation uniformity
微地形变异 Microtopography variation	0.168	0.193
	0.099	0.103
断面形状变异 Section shape variation	0.076	0.085

由表 5 可知,灌水均匀度对影响因素的敏感程度明显大于灌水效率,各次灌水前后平均敏感系数大 14.88%、4.04%和 11.84%,这也进一步说明两影响因素对灌水均匀度的影响要大于对灌水效率的影响,且沟底微地形变异对灌水质量的影响要大于沟断面形状;随灌水次数的增加,微地形影响下两灌水指标的平均敏感系数分别下降 41.07%和 46.63%,原因是在多因素作用下微地形变异趋于稳定,对灌水质量指标影响减弱,而针对沟断面形状随灌水次数增加的变异情况对灌水质量的影响还有待于进一步研究。

3 讨论与结论

灌水质量受多因素的影响,主要包括入口流量、改口成数、沟(畦)长、沟(畦)宽、田面纵坡和土壤特征参数等[12],而针对沟灌,受水界面的垄沟条件是影响灌水质量的又一重要因素[13-14],同时各因素又存在着显著的变异性[15-17]。各技术要素和参数的变异性直接影响灌水质量指标,但完全消除这些影响是不现实的,因此进行灌水质量评价及其敏感性分析是提高灌溉管理水平、改善灌溉质量的重要依据[18-19]。本文运用经典统计方法,对灌水沟受水界面微地形起伏状况及断面形状的时空变异性进行了系统的分析,评价了其对沟灌系统灌水性能的影响,在定性分析的基础上定量地描述了其对灌水质量影响的敏感性。

沟底微地形及断面形状的变异程度是表征灌水沟稳健性的主要指标,同时在其它因素相近的情况下,沟底微地形及断面形状的变异性对沟灌灌水性能影响显著,通过观测值统计发现,S_d 值的变化与变异系数 C_v 值呈现相同的变化规律,随灌水次数增加,表征灌水沟微地形变异的 S_d 值平均减小幅度为 48.70%,相应的 C_v 值减小幅度为 47.06%,而表征断面形状变异性的 S_d 值平均增加幅度为 16.07%,C_v 值增加幅度为 12.77%,说明随灌水次数的增加在一定程度上使得沟底微地形趋于平整和稳定,而使灌水沟形状变化趋于不规则;同时研究发现灌水质量指标均随 S_d 值的增大而呈现减小趋势,且沟底微地形对其影响更为显著,这与朱霞等[13]的研究成果具有一定的一致性。通过敏感性分析发现,灌水均匀度变化对两因素变异性的敏感度大于灌水效率,平均敏感系数值大 9.46%和 11.84%。综上可见沟底微地形及沟断面的时空变异性对灌水质量的影响显著,在沟灌灌水效果评价及灌溉技术要素优化时应加以考虑和重视。

本试验研究是在黏壤土质地田块上进行,而不同类型土壤的耕性、结构性及稳定性等具有很大的差异,针对其它类型土有待于进一步研究;同时灌水过程沟底微地形和断面形状的变异必然会影响到沟道坡降的变化,而对于坡降的影响本研究没有进行实质性的研究,后续研究中应加以考虑。但本研究所得相关成果和研究方法具有普适性,可为今后沟灌灌水性能的评价及沟灌灌溉系统的优化设计和管理提供参考。

参 考 文 献:

[1] Luciano M, Nicola's A, Oyonarte. A spreadsheet model to evaluate sloping furrow irrigation accounting for infiltration variability[J]. Agricultural Water Managemeng,2005,76(1):62-75.

[2] 孙景生,康绍忠,蔡焕杰,等.控制性交替灌溉技术的研究进展[J].农业工程学报,2001,17(4):1-5.

[3] 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.

[4] 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.

[5] Zerihun D, Feyen J, Reddy J M. Empirical functions for dependent furrow irrigation variables: I. Methodology and equations[J]. Irrigation Science, 1997,17(3):111-120.

[6] 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.

[7] 郑和祥,史海滨,郭克贞,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.

[8] Fangmeier D D, Clemmens A J. Influence of land leveling precision on level - basin advance and performance[J]. Transactions of the ASAE, 1999,42(4):1019-1025.

[9] 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.

[10] 聂卫波,费良军,马孝义,等.区域尺度内畦沟灌溉灌水技术要素组合的优化研究[J].水土保持通报,2010,30(5):122-127.

[11] 沃克 W R. 地面灌溉系统的设计和评价指南[M].北京:中国农业科技出版社,1992:44-46.

[12] 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.

[13] 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].灌溉排水报,2008,27(1):1-4.

[14] 张吉孝,张新民,单于洋,等.春小麦垄沟灌土壤水分入渗数值模拟[J].干旱区资源与环境,2014,28(6):165-170.

[15] Playan E, Faci J M. Characterizing microtopographical effects on level-basin irrigation performance[J]. Agricultural Water Management, 1996,29(2):129-145.

[16] 许 迪,李益农,李福祥,等.农田土地精细平整施工测量网格间距的适宜性分析[J].农业工程学报,2005,21(2):51-55.

[17] Or Dani, Walker W R. Effects of spatially variable intake on surface irrigation advance[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996,122(2):122-130.

[18] 缴锡云,王维汉.沟畦灌溉稳健设计[M].南京:河海大学出版社,2012:2-3.

[19] 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.