

不同灌水参数组合时田面坡度对灌水质量的影响研究

郑和祥¹, 史海滨², 郭克贞¹, 郝万龙³

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 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; 3. 呼和浩特市水文勘测局, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要: 田面坡度是影响畦灌灌水质量的重要因素, 研究田面坡度对灌水性能的影响时, 要结合灌水定额、平整精度、田面糙率和单宽流量等参数进行分析。通过对常规平地技术条件下多组合灌溉参数模拟分析得出: 不同灌水定额、平整精度、田面糙率和单宽流量组合对应不同的最佳田面坡度, 当灌水定额为 60.00 mm, 平整精度为 4.25 cm, 田面糙率为 0.12, 单宽流量分别为 4.3 L/(s·m) 和 2 L/(s·m) 时, 反向模拟出最佳的田面坡度分别为 1.6‰、1.8‰和 2.2‰; 并通过研究田面坡度对水流推进和消退过程的影响得出: 田面坡度为 2.0‰的水流推进和消退过程曲线明显比 1.6‰和 1.2‰的曲线平滑, 说明在较小的单宽流量条件下, 相对较大的田面坡度可使田面水流运动更加稳定, 有利于改善灌水质量。

关键词: 畦灌; 灌水质量; 田面坡度; 单宽流量; 田面糙率

中图分类号: S274.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)06-0043-06

畦灌是当前农业灌溉中最主要的灌水方式, 而灌水定额、田面坡度、田面平整精度、田面糙率和单宽流量等参数是影响畦灌灌水效果的主要因素, 为此国内外学者从多个角度分析了各参数对灌水质量的影响, 得出适宜的灌水参数是提高灌水质量、减少深层渗漏损失的重要措施。田面各参数对灌水质量的影响不是独立的, 而是相互影响相互制约的, 田面坡度是田面参数的一个重要指标, 对灌水质量的影响十分显著^[1]。如果畦田田面坡度过小, 单宽流量较小时会使畦首处深层渗漏增大, 而畦尾入渗水深达不到灌水要求; 畦田田面坡度过大, 当单宽流量较大时会使畦首处入渗水深达不到灌水要求, 而畦尾产生大量的深层渗漏, 并且容易冲刷土壤引发水土流失。因此在分析田面坡度对灌水性能的影响时, 要结合田面其它参数进行研究。一些学者对田面参数对灌水质量的影响进行了研究, 李益农等从田面平整精度方面对畦灌系统性能影响进行了分析, 得出较好的田面平整状况可获得较高的灌溉效果^[2]。刘群昌等在研究波涌灌溉技术时, 对畦田规格、入畦流量和平整精度对灌水质量的影响进行了对比分析^[3]。白美健等采用随机模拟畦面微地形分布及其差异性对畦灌性能的影响, 对不同平整精度下的畦田进行了灌水质量评价^[4]。聂卫波等采用水量平衡原理对畦灌水流推进过程进行了研究^[5]。

由于上述研究多集中在通过田间试验分析某个影响参数作用评价某一次的灌水效果, 采用的方法多是根据水量平衡原理, 需要大量的土壤、灌溉、作物的实测资料外, 计算工作量大。本文引入模拟地面灌溉的 SIRM0D 模型, 该模型模拟灌溉的基础是水动力守恒原理, 其突出优点是通过标定一次灌水试验测定的参数, 可以对不同灌水情景进行模拟, 以得出优化的参数组合。

1 研究区概况与试验设计

本研究以内蒙古河套灌区中上游的临河治丰节水改造示范区为研究对象, 属永济灌域永刚分干渠灌域上游。内蒙古河套灌区是一个具有悠久灌溉历史的大型自流灌区, 泥沙含量高、渠系坡降小、水流速度低。本研究区属于典型的缓坡降低流速灌区, 田间灌水方式主要为地面灌溉的畦灌, 畦田的入畦流量相对较小, 多在 15.0~30.0 L/s; 畦田的大小多以责任田块为单位, 田块大小不一, 平整性差, 串灌现象严重, 灌水效果较差。田间试验在治丰节水改造示范区小麦田中进行, 灌溉方式为畦灌; 试验区畦田土壤质地为粉壤土, 1.0 m 土层内平均土壤容重 1.43 g/cm³; 根据示范区规划, 毛渠间距大多在 100 m 左右, 双向灌水, 畦田长度设计多为 45 m, 图 1 为研究区畦田布置示意图。

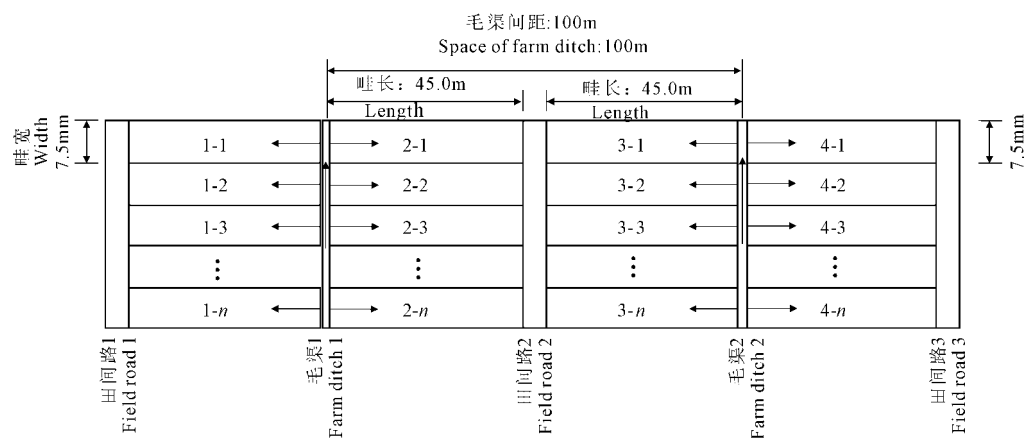


图 1 研究区畦田布置示意图

Fig. 1 Sketch of border in the study area

根据该研究区畦田灌水质量评价及水分利用效率研究的试验成果^[6],畦长 45 m,畦宽为 7.5 m 的田块为符合当地农业发展水平和易于推广的畦田规格。采用田间对比试验的研究方法,将试验田按畦长为 45 m、畦宽 7.5 m 规格进行设计,采用常规机械平地,设 1 个试验处理,3 次重复。灌水试验沿畦长方向每隔 5.0 m 设标杆 1 个,用于观测水流推进和消退过程;在畦首处设水尺,用于测量地表水深;入畦流量测定采用梯形量水堰,水流推进和消退时间

采用秒表计时,水流前锋每推进至一个标杆处,记录推进时间与畦首水深;水流消退至一个标杆处,记录消退时间。灌水前 1 d 和灌水后水流完全消退时分别在畦田中按照沿畦长方向分左、中、右,每隔 5 m 测定各点土壤含水率。2008 年小麦全生育期共灌水 3 次,采用田间实测灌水资料计算得到各畦田参数见表 1,表中给出的土壤参数和田面糙率是根据 3 次灌水试验资料所得平均值,基本能反映出土壤的入渗性能和田面阻水变化特性。

表 1 灌溉模拟各项参数

Table 1 Parameter of irrigation simulation

畦长 Length <i>L</i> (m)	畦宽 Width <i>D</i> (m)	灌水定额 Irrigation quota <i>Z_{req}</i> (mm)	田面坡度 Field surface slope <i>i</i> (‰)	平整精度 Leveling precision <i>S_d</i> (cm)	单宽流量 Flux per width <i>q</i> [L/(s·m)]	入渗系数 Infiltration coefficient <i>K</i> (cm/min ^{-α})	入渗指数 Infiltration exponent <i>α</i>	糙率 Land roughness <i>n</i>
45.0	7.5	60.0	1.20	4.25	4.03	0.403	0.487	0.130

2 灌溉模拟模型的原理和数据结构

2.1 SIRMOD 模型原理

SIRMOD 模型评价灌水质量是根据水动力守恒原理,采用的水流运动方程为:

$$\frac{1}{Ag} + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A^2g} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \left(1 - \frac{Q^2T}{A^3g}\right) \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f$$

(1)

式中, *A* 为过流断面的截面积(m²); *Q* 为灌水流量(m³/s); *t* 为灌水时间(s); *x* 为水流推进距离(m); *g* 为重力加速度,9.81m/s²; *y* 为水深(m); *S*₀ 为地面坡度(m/m); *S*_{*f*} 为阻力坡降(m/m); *T* 为畦首宽度(m)。

畦灌地表水完全入渗后涉及的区域包括 3 部分:作物根层区、未渗到根层区和深层渗漏区。未渗到根层区是检验田尾灌水是否满足计划湿润层要

求,只有当未渗到根层区最小,趋近于零,同时深层渗漏区最小时,才是理想的灌水,通过 SIRMOD 模型进行灌溉模拟可以找到较适宜的灌溉参数^[7~9]。

2.2 SIRMOD 模型数据结构

应用 SIRMOD 模型进行灌溉模拟时,根据估算的土壤入渗系数 *K* 和入渗指数 *α*,将畦田长度、宽度、坡度、计划湿润层深度、水分亏缺量等输入模型,在不同水分亏缺量的条件下,通过调整灌水量、灌水流量和灌水时间对不同畦田进行多组合灌水模拟,输出量为灌水效率、灌水均匀度和深层渗漏量等。得出适宜的灌水流量,在保证计划湿润层入渗程度较高的条件下,使深层渗漏量较小,获得较高的灌水效率和灌水均匀度。

SIRMOD 模型的输入参数分为 3 类:畦田长度 *L*、宽度 *D*、田面坡度 *i*、计划湿润层深度 *H* 等;土壤

入渗系数 K 、入渗指数 α 、田面糙率系数 n 等;灌水定额 Q_w 、入畦流量 Q 、灌水时间 t 等。模型输出为深层渗漏量 H_L 、灌水效率 E_a 和灌水均匀度 D_u 等。

3 不同灌水参数组合时田面坡度对灌水质量影响的模拟分析

在研究田面坡度对灌水质量的影响时,以试验畦田 2008 年 6 月 1 日的灌水试验资料为基本样本,具体参数根据见表 1。

常规方法平地技术所能达到的最小田面精度 S_d 值在美国为 2.0~3.5 cm,在葡萄牙是 3.0~4.5 cm,我国采用常规平地技术,田面平整精度一般能达到 3.5~5.0 cm^[10,11]。

田面平整精度的实测值采用畦田内观测点的地面高程标准偏差值计算^[12~15],即:

$$S_d = \sqrt{\sum_{i=1}^m (h_i - h_{ii})^2 / (m - 1)}$$
 (2)

式中, h_i 为田块内第 i 个测点的高程(cm); h_{ii} 为第 i 个测点的期望高程,为该点的设计坡度高程(cm); m 为田块内所有测点的数量。田块高程测量采用水准仪,沿畦长方向分左、中、右 3 条纵线测量,测点间距 5 m。

田面坡度实测值根据畦田首尾观测点的地面高程差采用如下公式计算^[12~15]:

$$i = \frac{\Delta h}{100L}$$
 (3)

式中, i 为田面坡度(‰); Δh 为畦田首位高程差(cm); L 为畦田长度(m)。

田面糙率系数 n 受畦面坡度、过水状态和作物覆盖程度的影响,计算公式为^[12~15]:

$$n = 60 s_w^{1/2} q^{-1} y^{5/3}$$
 (4)

式中, n 为田面糙率; s_w 为畦田水面坡度(m/m),根据各测点的水深值与地面高程确定。

本文在进行灌溉模拟时,采用常规机械平地时,平整精度 S_d 值取现状的 4.25 cm,根据对本研究区

常规平地田面糙率的实际测定值,田面糙率一般在 0.12~0.20。采用 SIRMOD 模型进行模拟时分别采用典型值 $n=0.12, 0.15$ 和 0.20 。在上述条件下分析田面坡度对灌水质量的影响时,将田面糙率各典型值和不同单宽流量分别组合进行灌溉模拟,组合方式见表 2。

表 2 常规机械平地灌溉模拟组合
Table 2 Irrigation simulation combination with flat land by conventional machine

灌水定额 Irrigation quota Z_{req} (mm)	平整精度 Leveling precision S_d (cm)	糙率 Land roughness n	单宽流量 Flux per width q [L/(s·m)]	田面坡度 Field surface slope i (‰)
60.0	4.25	0.12	4.0	1.0~3.0
			3.0	1.0~3.0
			2.0	1.0~3.0
		0.15	4.0	1.0~3.0
			3.0	1.0~3.0
			2.0	1.0~3.0
	4.25	0.20	4.0	1.0~3.0
			3.0	1.0~3.0
			2.0	1.0~3.0
		0.20	4.0	1.0~3.0
			3.0	1.0~3.0
			2.0	1.0~3.0

3.1 田面坡度对灌水质量的模拟分析

以灌水定额为 60.00 mm,平整精度 S_d 为 4.25 cm,田面糙率取 0.12 为例进行田面坡度对灌水质量的影响分析。当单宽流量分别取值为 4 L/(s·m)、3 L/(s·m)和 2 L/(s·m),对田面坡度 $i=1‰\sim3‰$ 的不同取值分别进行模拟。输出结果为田面坡度与深层渗漏量、灌水效率和灌水均匀度的关系。图 2、3 和图 4 分别为单宽流量在 4 L/(s·m)、3 L/(s·m)和 2 L/(s·m)时模拟的不同田面坡度对深层渗漏量、灌水效率和灌水均匀度的影响曲线。由于该畦田灌溉为封闭状态,无畦尾排水,当实际灌水量恰好为理论需水量时,灌水效率和储水效率相等,下述研究中不同参数组合对储水效率的影响规律与对灌水效率影响具有相同的结果。

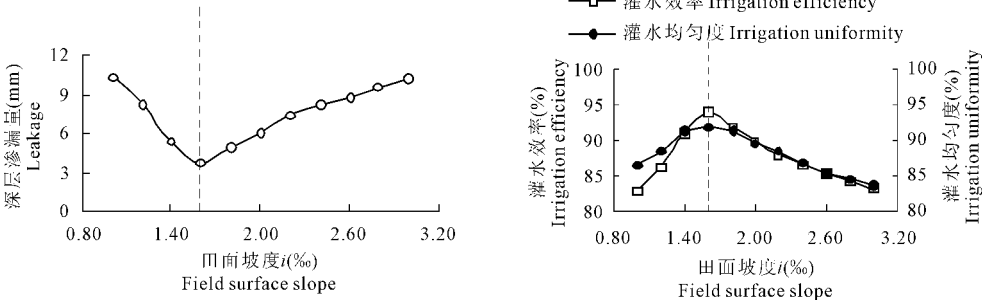


图 2 单宽流量为 4 L/(s·m) 时不同田面坡度的模拟结果

Fig. 2 Results of simulation of single flux of 4 L/(s·m) in different slopes

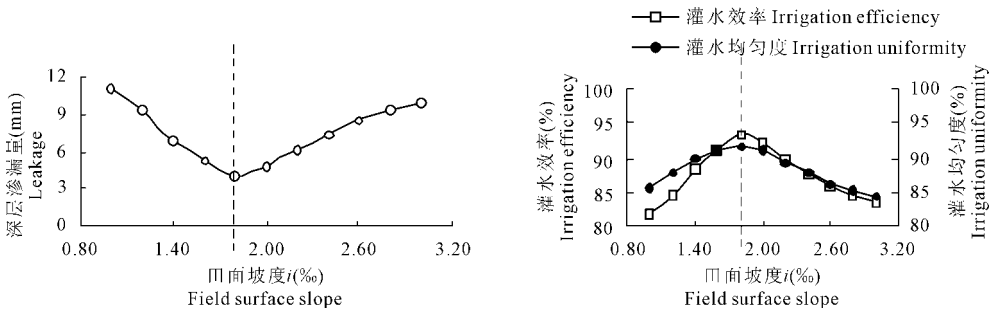


图 3 单宽流量为 3 L/(s·m) 时不同田面坡度的模拟结果

Fig. 3 Results of simulation of single flux of 3 L/(s·m) in different slopes

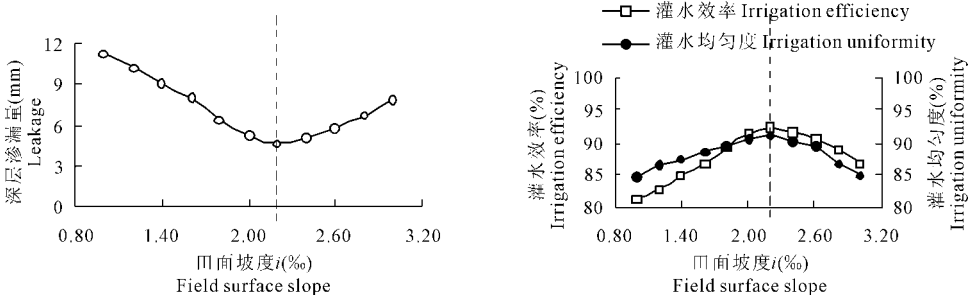


图 4 单宽流量为 2 L/(s·m) 时不同田面坡度的模拟结果

Fig. 4 Results of simulation of single flux of 2 L/(s·m) in different slopes

对比分析 3 幅图中曲线的变化得出:不同单宽流量下田面坡度对灌水质量的影响规律基本一致,均是随着田面坡度的增大,深层渗漏量 h 逐渐减小,灌水效率 E_a 和灌水均匀度 D_u 逐渐增大;当田面坡度增大到一定值时,再增大田面坡度,深层渗漏量 h 也逐渐增加,而灌水效率 E_a 和灌水均匀度 D_u 均逐渐降低,根据变化曲线可以得到不同田面参数的最佳坡度。从图 2 可以看出,单宽流量为 4 L/(s·m),田面坡度 i 由 1.0‰增大到 1.6‰时,深层渗漏量 h 由 10.36 mm 降低到 3.63 mm,灌水效率 E_a 和灌水均匀度 D_u 分别由 82.73%和 86.37%增大到 93.95%和 91.96%。但不是田面坡度 i 越大灌水效果越好,当田面坡度 i 由 1.6‰增大到 3.0‰时,深层渗漏量逐渐增加到 10.15 cm,灌水效率 E_a 和灌水均匀度 D_u 分别降低至 83.08%和 83.58%,根据分析得出该条件下的最佳田面坡度为 1.6‰,同理根据图 3 和图 4 得出相应条件下的最佳田面坡度分别为 1.8‰和 2.2‰。

对灌水定额为 60.00 mm,平整精度 S_d 为 4.25 cm,田面糙率取 0.15 和 0.20 时也有相同的变化规律,由此说明不同田面参数条件下有不同的最佳田面坡度,选定适宜的田面坡度可以获得较佳的灌水效果。但在实际的畦田灌溉中,由于每次灌水田面糙率,单宽流量等均为不确定值,因此在选定田面坡

度时要综合考虑不同作物和不同灌溉要素的影响。

3.2 田面坡度对水流推进和消退过程的模拟分析

对不同的灌水定额、平整精度、单宽流量和田面糙率等灌水参数组合进行模拟时,SIRMOD 模型均对应输出模拟的水流推进和消退过程。图 5~7 是在灌水定额为 60.00 mm,平整精度 S_d 为 4.25 cm,田面糙率取 0.12 的条件下,当单宽流量分别为 $q=4$ L/(s·m)、3 L/(s·m)和 2 L/(s·m)时典型田面坡度和最佳田面坡度的水流推进与消退过程曲线。分析不同单宽流量时的水流推进过程得出:单宽流量对水流推进的影响十分明显,单宽流量大的,水流推进速度快。从图 5 中可以看出:单宽流量为 4 L/(s·m)时,在其它田面参数相同的条件下,与最佳田面坡度为 1.6‰的推进时间相比,田面坡度为 1.2‰的推进时间增大了 15.70%,田面坡度为 2.0‰时的推进时间减少了 11.21%,说明田面坡度对水流推进过程影响较大。田面坡度为 2.0‰的水流推进过程为比较平滑的曲线,随着田面坡度的减小,当田面坡度为 1.6‰时的水流推进过程线出现了轻微的波动,当田面坡度降低到 $i=1.2‰$ 时,水流推进过程线变得凹凸不平,说明在单宽流量相对较小的条件下,较大的田面坡度使得田面水流运动更加稳定。图 6 和图 7 中由于单宽流量的减小,水流的推进过程更加不稳定,特别是田面坡度较小时波动更大。

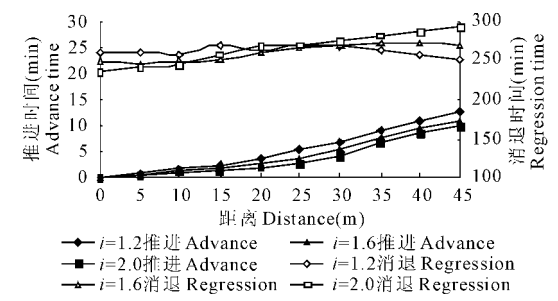


图 5 单宽流量为 4 L/(s·m)不同田面坡度时的水流推进与消退过程

Fig.5 Advance and recession of water current of single flux of 4 L/(s·m) in different slopes

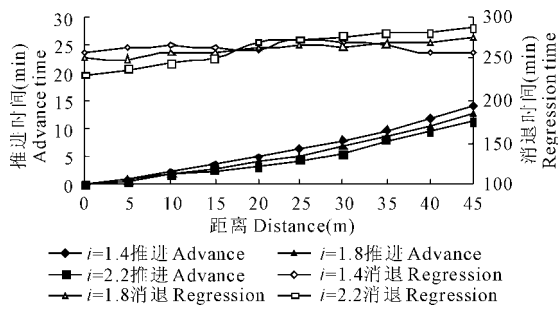


图 6 单宽流量为 3 L/(s·m)不同田面坡度时的水流推进与消退过程

Fig.6 Advance and recession of water current of single flux of 3 L/(s·m) in different slopes

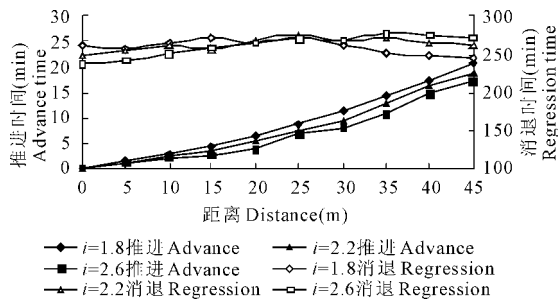


图 7 单宽流量为 2 L/(s·m)不同田面坡度时的水流推进与消退过程

Fig.7 Advance and recession of water current of single flux of 2 L/(s·m) in different slopes

对比分析图 5~7 中 3 种单宽流量时的水流消退过程得出,单宽流量为 4 L/(s·m),最佳田面坡度为 1.6‰时的畦首消退时间较畦尾消退时间稍短,并且整个畦田的水流消退过程线较为平滑,凹凸程度较小。田面坡度为 1.2‰的畦首消退时间较畦尾消退时间稍长,再加上水流推进时间内的入渗水量,畦首的总入渗时间较畦尾大,使得畦首处产生深层渗漏,而畦尾的入渗水深达不到需水深度。田面坡度为 2.0‰的消退规律与此恰好相反,畦尾出现深

层渗漏,畦首处入渗水深达不到需水深度,灌水效果较差。

单宽流量为 3 L/(s·m)和 2 L/(s·m)的水流消退过程也有相同的规律,单宽流量为 3 L/(s·m)时的最佳田面坡度为 1.8‰,比单宽流量为 4 L/(s·m)时的最佳田面坡度增大了 12.5%,田面坡度的增大一方面会增大水流对土壤的冲刷,另一方面将会增加土地平整时的工程量,并且该条件下的水流消退过程比单宽流量为 3 L/(s·m)时的更加复杂。单宽流量为 2 L/(s·m)时的最佳田面坡度比单宽流量为 4 L/(s·m)的最佳田面坡度增大了 37.5%,该单宽流量条件下不同田面坡度的消退过程变得更加凹凸不平,虽然增大田面坡度,有利于水流的推进,但整个畦田的水流消退效果最差,与模拟结果中灌水效率和灌水均匀度均较低的结果相一致。当灌水定额为 60.00 mm,平整精度 S_d 为 4.25 cm,田面糙率取 0.15 和 0.20 时,水流的推进和消退过程也有相同的变化规律。

4 结 论

1) 不同单宽流量下田面坡度对灌水质量的影响规律均是随着田面坡度的增大,深层渗漏量逐渐减小,灌水效率和灌水均匀度逐渐增大;当田面坡度增大到一定值时,再增大田面坡度,深层渗漏量也逐渐增加,而灌水效率和灌水均匀度均逐渐降低,根据变化曲线可以反向模拟出不同灌水定额、平整精度、田面糙率和单宽流量组合的最佳田面坡度,对于畦田平整具有指导意义。

2) 田面坡度对水流推进和消退过程影响均较大,田面坡度为 2.0‰的水流推进和消退过程为比较平滑的曲线,随着田面坡度的减小,当田面坡度降低到 $i=1.6‰$ 时,水流推进和消退过程线均出现了轻微的波动,当田面坡度降低到 $i=1.2‰$ 时,水流推进和消退过程线变得凹凸不平,说明在单宽流量相对较小的条件下,相对较大的田面坡度使得田面水流运动更加稳定,有利于改善灌水效果。

参 考 文 献:

[1] 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,(6):4-7.
[2] 李益农.田面平整精度对畦灌系统性能影响的模拟分析[J].农业工程学报,2001,17(4):43-48.
[3] 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(4):35-40.
[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, 马孝义. 基于水量平衡原理的畦灌水流推进简化解析模型研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 82—85.

[6] 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研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 1—6.

[7] Hornbuckle J W, Christen E W, Faulkner R D. Use of SIRMOD as a quasi real time surface irrigation decision support system[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 15(2): 217—223.

[8] Raine S R, Walker W R. A design and management tool to improve surface irrigation efficiency [J]. Trans of the ASAE, 2004, 10(3): 19—23.

[9] Hornbuckle J W. Modeling furrow irrigation on tiled drained soils using SIRMOD in the murrumbidgee irrigation area [J]. Prentice Hall Inc, 1999, (4): 25—31.

[10] 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.

[11] 章少辉, 许迪, 李益农, 等. 基于 SGA 与 SRFR 的畦灌入渗参数与糙率系数优化反演模型 (I): 模型建立 [J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1297—1302.

[12] 王全九, 王文焰, 张江辉, 等. 根据畦田水流推进过程水力因素确定 Philip 入渗参数和田面平均糙率 [J]. 水利学报, 2005, (1): 125—128.

[13] 刘钰, 蔡甲冰, 白美健, 等. 黄河下游簸箕李灌区田间灌水技术评价与改进 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(1): 32—39.

[14] 史学斌, 马孝义. 关中西部畦灌优化灌水技术要素组合的初步研究 [J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(2): 39—43.

[15] 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.

Study on influence of field surface slope on irrigation efficiency in combination with different irrigation parameters

ZHENG He-xiang¹, SHI Hai-bin², GUO Ke-zhen¹, HAO Wan-long³

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Huhhot 010020, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China;

3. Hohhot Bureau of Hydrological Survey, Huhhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: As field surface slope is an important factor which influences irrigation efficiency in border irrigation, it is necessary to study its influence on irrigation capability in combination with irrigation quota, land leveling precision, land roughness and flux per width. Irrigation simulation in different irrigation factors by general technical level off border indicates: different irrigation quota, land leveling precision, land roughness and flux per width are corresponding to different optimum field surface slop, optimization slopes are 1.6‰, 1.8‰ and 2.2‰ by reverse simulation when irrigation quota is 60mm, land leveling precision is 4.25 cm, land roughness is 0.12 and flux per width are respectively 4 L/(s·m), 3 L/(s·m) and 2 L/(s·m). The study of water flux advance and regression process in different field surface slopes concludes that the curve of water flux advance and regression of process field surface slopes in 2.0‰ is more smooth than in 1.6‰ and 1.2‰, indicating that water flux advance in relatively larger field surface slope is stable and and is favorable for the improvement of irrigation quality in smaller flux per width.

Keywords: border irrigation; irrigation efficiency; field surface slope; flux per width; land roughness