

# 不同畦面结构下地面灌溉效果的对比分析

陈博<sup>1,3</sup>, 欧阳竹<sup>1\*</sup>, 刘恩民<sup>2</sup>, 张艳玲<sup>4</sup>, 陈俊旭<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室 禹城综合试验站, 北京 100101;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710064)

**摘要:** 为研究畦面结构变化对地面灌溉效果的影响, 在 4 种不同畦面结构的大田灌溉试验基础上, 用 WinSRFR3.1 模型对平作畦灌、细沟灌、畦作浅沟灌和微垄沟灌的田面土壤特性参数和灌水效果进行估算和模拟, 比较了不同灌溉方式由于畦面结构改变引起的田面土壤特性和灌水效果差异, 并提出不同畦面结构的适宜畦田规格。研究认为, 不同畦面结构的田面糙率系数和土壤入渗特性差异明显, 微垄沟灌糙率系数最大而平作畦灌糙率系数最小, 平作畦灌入渗速率最快而畦作浅沟灌入渗速率最慢; 对长畦田来说, 畦作浅沟灌灌水效果最好, 微垄沟灌次之, 平作畦灌最差; 在单宽流量为 4.5 L/(m·s) 条件下, 畦作浅沟灌灌水效率达到 80% 的最大优化畦长为 200~220 m, 微垄沟灌为 170~190 m, 细沟灌为 150~170 m, 平作畦灌为 150~170 m。畦面结构是影响地面灌溉效果的重要因素, 在地面灌溉研究和实践中都需考虑进去。

**关键词:** 灌溉, 模型, 入渗, 土壤湿度, 畦面结构, 地面灌溉, 田面糙率系数, 灌溉效果

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.006

中图分类号: S275.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0030-07

陈博, 欧阳竹, 刘恩民, 等. 不同畦面结构下地面灌溉效果的对比分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 30-36.

Chen Bo, Ouyang Zhu, Liu Enmin, et al. Comparison of border irrigation practices in different morphologic fields[J].

Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 30-36. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

地面灌溉具有灌溉成本低、田间工程简单和易于实施等优点, 是目前国内外最主要的灌溉方法。与有压灌溉系统相比, 地面灌溉系统影响因素众多, 如果设计和管理适当, 可以获得与有压灌溉系统相当的灌水效率<sup>[1]</sup>。漫灌、水平畦灌、有坡畦灌和沟灌是地面灌溉中的主导方式并各有其特点, 畦灌对田间微地形要求较高, 一般要求田块平坦, 沟灌对地形条件的要求低, 更能适应恶劣的地形条件<sup>[2]</sup>。目前对地面灌溉效率改进的研究多集中在对畦灌或沟灌灌水技术要素的优化组合上<sup>[3-7]</sup>, 畦面微地形是影响畦灌灌水效果的重要因素, 它显著影响到单次灌水过程的田面水流推进和消退过程<sup>[2,8]</sup>。Clemmens 等<sup>[9]</sup>和李益农等<sup>[10]</sup>分析了田面平整精度对畦灌的影响, 并提出优化的田间灌溉技术要素组合; 白美健等<sup>[11-13]</sup>研究了畦面微地形空间变异性对畦灌系统的影响。

本研究提出畦面结构这一概念, 通过畦面结构把沟灌和畦灌结合起来, 探索提高地面灌溉效果的改进方法。

畦面结构是指在农田管理过程中, 由于机械耕作或人为措施造成畦面发生匀质变化并长时间存在的一种结构状态。研究把田间试验和模型模拟相结合, 在大田试验基础上, 利用 WinSRFR3.1 模型对试验田块的水流运动特性、灌水效果和影响因素进行数学模拟和分析, 为通过改变畦面结构提高地面灌溉效果提供思路和一定依据。

## 1 研究方法

为深入分析不同畦面结构下地面灌溉效果的差异, 并分析其机理过程, 采用田间试验和模型模拟相结合的方法。首先通过田间试验数据获得模型模拟所必须的土壤入渗特性参数和糙率系数等输入参数, 在验证模型适用不同畦面结构地面灌溉的基础上, 利用已知参数值设定不同的灌溉技术条件进行模拟分析, 比较不同畦面结构下田面水流运动过程和地面灌溉效果, 最终得到适用于不同畦面结构的灌溉管理优化措施。

### 1.1 田间灌溉试验设计

本次灌溉试验在中国科学院禹城农业综合试验站伦镇万亩示范区唐王村示范田进行, 该村土壤以潮土和盐化潮土为主, 表土质地为轻、中壤土, 种植作物为冬小麦。

唐王村示范田灌溉试验于 2009 年 3 月 30 日至 4 月 1 日进行, 包括 4 种不同畦面结构下的灌溉: 平作畦灌、细沟灌、畦作浅沟灌和微垄沟灌。平作畦灌即传统耕作方式下的畦灌; 细沟灌的畦面结构是正在华北平原大面积推广的一种免耕播种机形成的; 微垄沟灌畦面结构是正在山东省大面积推广的一种免耕播种机形成的; 畦作

收稿日期: 2010-03-01 修订日期: 2010-11-07

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KSCX1-YW-09-06); 国家重点基础研究发展计划 (2005CB121106); 国家科技支撑计划课题 (2007BAD89B09)

作者简介: 陈博 (1985-), 男, 河南邓州人, 博士生, 研究方向: 农业节水灌溉理论和技术。北京 北京市朝阳区安外大屯路甲 11 号 3213 室, 100101。Email: chenb.07s@igsnrr.ac.cn

\*通信作者: 欧阳竹 (1961-), 男, 江苏南京人, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 农田生态系统优化管理。北京 北京市朝阳区安外大屯路甲 11 号 3208 室, 100101。Email: ouyz@igsnrr.ac.cn

浅沟灌畦面结构是在灌溉实践中发现的一种节水的灌溉管理措施。不同灌溉方式畦面结构剖面如图 1 所示。

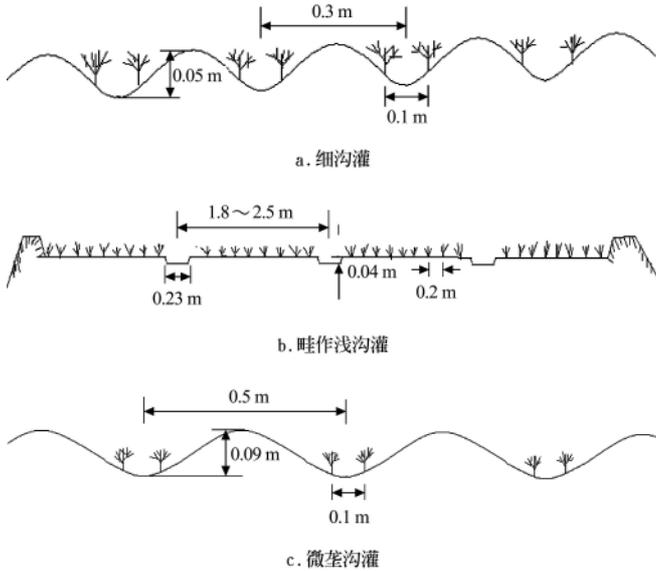


图 1 不同灌溉方式畦面结构横断面剖面

Fig.1 Cross-sections of rill irrigation, shallow-furrow-border irrigation, and border-furrow irrigation fields

灌溉试验测定项目包括畦田长宽、畦田坡度、入畦流量、灌水时间、田面水流推进过程、土壤稳定入渗率和灌水前后表层 100 cm 土壤含水率。畦田长宽利用卷尺实地量测；畦田坡度利用光学水准仪多次测定取平均值；入畦流量通过三角量水堰计算；灌水时间利用秒表计时；田面水流推进过程通过在田间沿畦长方向每隔 10 m 布设标杆记录水流到达的时间确定；土壤稳定入渗率利用双环入渗仪和马氏瓶多点测定，取均值；土壤含水率采用 CNC503B 中子水分仪测定，从土壤表层开始向下每 10 cm 测定 1 次。灌溉田块背景数据如表 1 所示。

表 1 试验田块背景数据

Table 1 Basic information of experimental fields

灌溉方式	畦田编号	畦田长度/m	畦田宽度/m	土壤稳定入渗率 $f_0/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	坡度 $S_0/(\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$
平作畦灌	1-1	200	8.0	18.0	0.0013
	1-2	194	5.4		
细沟灌	2-1	200	7.7	12.0	0.0013
	2-2	194	9.1		
畦作浅沟灌	3-1	200	10.0	18.0	0.0013
	3-2	194	5.3		
微垄沟灌	4-1	200	8.6	24.0	0.0013
	4-2	194	7.7		

### 1.2 WinSRFR3.1 模型

WinSRFR 模型是综合地面灌溉模拟模型 SRFR<sup>[14]</sup>、有坡畦田设计及管理模型 BORDER<sup>[15]</sup>和水平畦田设计及管理模型 BASIN<sup>[16]</sup> 3 类模型发展起来的，可以对不同灌溉系统包括沟灌、有坡畦田和水平畦田单次灌水过程的

水流运动和灌水效果进行分析和模拟，在此基础上进行畦田规格和地面灌溉管理措施的优化。

Bautista 等以 WinSRFR3.0.15 为例对 WinSRFR 模型的功能和构建基础进行了详细说明<sup>[17]</sup>，并利用 2009 年最新发布的 WinSRFR3.1 模型通过实例对模型的功能进行了验证<sup>[18]</sup>。本文即利用 WinSRFR3.1 模型对不同灌溉方式的效果进行评估并提出优化灌水效果的途径。

本研究涉及 4 种灌溉方式，虽然畦面结构不同，细沟灌和微垄沟灌实质上仍然属于畦灌，和平作畦灌的不同之处在于灌溉过程中水流推进前锋在畦田宽度方向上并不是连续的；畦作浅沟灌和平作畦灌在水流推进前锋上的差异更小，所以认为 WinSRFR3.1 模型可以对这 4 种灌溉方式概化为一维有坡畦灌进行模拟。

## 2 土壤特性参数推求和田面水流运动数值模拟

### 2.1 两点法估算土壤入渗参数 $k$ 和 $a$

本研究对灌水过程进行分析时采用 Elliott-Walker 两点法<sup>[2]</sup>基于水量平衡原理估算土壤入渗参数。该法是估算土壤入渗参数最简单的非线性优化方法，可直接应用<sup>[19]</sup>或用来对其他方法的估算效果进行验证<sup>[20]</sup>。

该法假设之一是土壤入渗公式采用修正 Kostiakov 公式即 Kostiakov-Lewis 公式

$$Z = k\tau^a + f_0\tau \quad (1)$$

式中， $Z$  为土壤累计入渗深度，mm； $f_0$  为土壤稳定入渗率，mm/h； $a$  为土壤入渗指数； $k$  为土壤入渗系数， $\text{mm}/\text{h}^a$ ； $\tau$  为土壤入渗时间，h。

假设之二是畦内田面水流推进曲线用距离对时间的简化幂函数公式描述：

$$x = pt^r \quad (2)$$

式中， $t$  为灌水时间，min； $x$  为田面水流推进前锋在时间  $t$  的推进距离，m； $r$  和  $p$  分别是经验拟合参数。

基于这两个假设，在任何时候都有田间水量平衡方程

$$Q_0t = \sigma_y A_0 x + \sigma_z kt^a x + \frac{f_0 t x}{1+r} \quad (3)$$

式中， $Q_0$  为入畦流量， $\text{m}^3/\text{min}$ ； $\sigma_y$  为地表储水形状系数，为一变化范围在 0.70~0.80 的常数，WinSRFR3.1 默认值为 0.76<sup>[21]</sup>； $A_0$  为畦口水流横断面积， $\text{m}^2$ ； $\sigma_z$  为下渗形状系数。其中  $\sigma_z$ 、 $A_0$  的计算参考文献[2]。

在糙率系数  $n$  和土壤稳渗率  $f_0$  已知的前提下，选用水流推进曲线上任意 2 点数据  $(x, t)$  代入水量平衡方程联立可求解。为求解方便并使所选两点具有较高代表性，本研究先根据田面水流推进实测数据拟合得到水流推进幂函数，根据幂函数反算得到畦田中间位置和畦尾点数据  $(x_{0.5L}, t_{0.5L})$  和  $(x_L, t_L)$ ，将其分别代入水量平衡方程联立求解可得

$$a = \frac{\ln(V_L/V_{0.5L})}{\ln(t_L/t_{0.5L})} \quad (4)$$

式中  $L$  为畦长，m。

$$V_L = \frac{Q_0 t_L}{L} - \sigma_y A_0 - \frac{f_0 t_L}{1+r} \quad (5)$$

$$V_{0.5L} = \frac{2Q_0 t_{0.5L}}{L} - \sigma_y A_0 - \frac{f_0 t_{0.5L}}{1+r} \quad (6)$$

计算  $\sigma_z$ , 进而得到  $k$  值

$$k = \frac{V_L}{\sigma_z t_L^a} \quad (7)$$

## 2.2 糙率系数 $n$ 的获取

在估算土壤入渗参数  $k$  和  $a$  的过程中, 需要预先确定土壤稳定入渗率  $f_0$  和糙率系数  $n$  值。试验地稳定入渗率  $f_0$  的取值根据双环入渗试验确定 (见表 1)。

糙率系数  $n$  和入渗参数  $k$ 、 $a$  通过试算法确定, 即先采用模型推荐糙率系数  $n$  估算入渗参数  $k$  和  $a$ , 以此为基础运行模型, 根据模拟田面水流推进曲线和实测推进曲线的误差大小手工改变  $n$  值的大小, 反复调试, 当模拟田面水流推进曲线和实测推进曲线拟合最好时的糙率系数值即认为是该田块的实际糙率系数, 同时也得到入渗系数  $k$  和  $a$ 。为避免手工试算使参数取值陷入局部最优, 在调试时应当使糙率系数  $n$  的取值范围涵盖农田糙率系数分布区 0.03~0.25, 以获得唯一最佳的田面糙率系数和土壤入渗特性参数。

## 2.3 田面水流运动的零惯量模型

在对田面水流运动过程进行模拟时, WinSRFR3.1 提供了 2 种水流运动模型可供选择: 零惯量模型和运动波模型。运动波模型适用于坡度较大的灌溉过程 (坡度 > 0.004) [21], 零惯量模型适用于坡度较小畦田, 本研究采用零惯量模型。零惯量模型基于这样的假设, 在多数地面灌溉条件下水流运动方程中的惯性项和加速度项都可以忽略

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

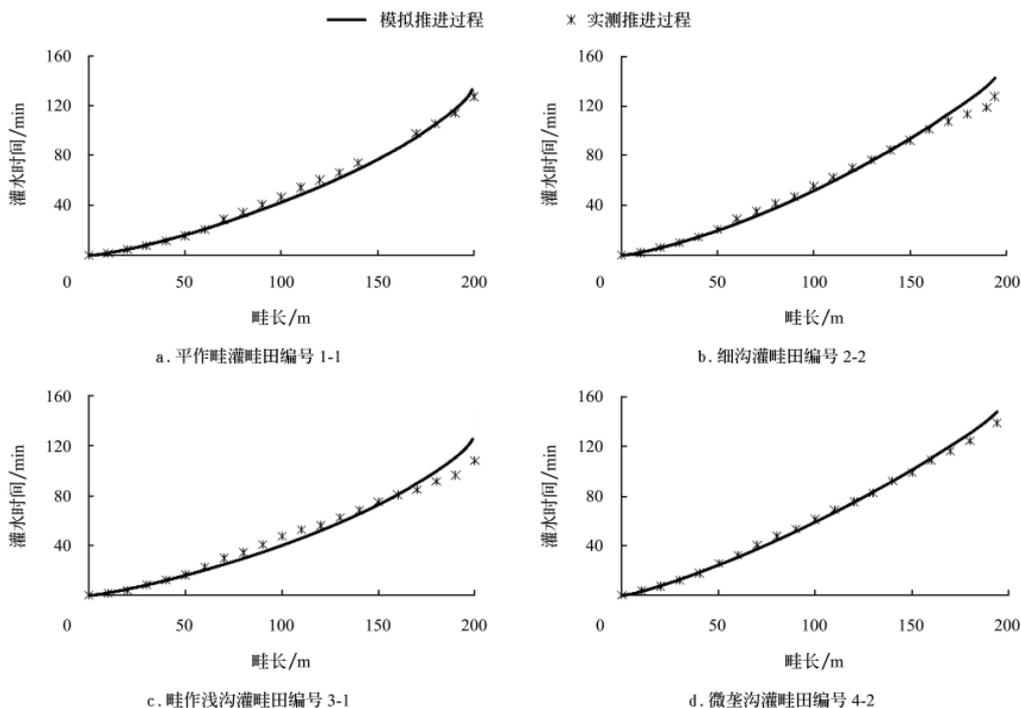
$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (9)$$

式中,  $A$  为入畦水流在任一时刻  $t$  的横断面积,  $m^2$ ;  $Q$  为入畦水流在任一时刻  $t$  的断面流量,  $m^3/min$ ;  $Z$  为  $(x, t)$  点在单位长度上的入渗水量,  $m$ ;  $y$  为时刻  $t$  的田面入流水深,  $m$ ;  $S_0$  为田面坡度,  $m/m$ ;  $S_f$  为摩擦坡度,  $m/m$ 。

## 3 模型模拟结果与分析

### 3.1 winSRFR 模型对不同畦面结构灌溉水流模拟的适用性分析

为检验 WinSRFR 模型对 4 种畦面结构下地面灌溉水流的模拟好坏, 比较灌溉试验实测田面水流推进过程和模型模拟 4 种畦面结构下田面水流推进过程 (如图 2), 可以看出: 在供水停止前 (田面水流推进前锋到达 170 m 处停止供水), WinSRFR 模型对 4 种不同畦面结构的灌溉水流推进过程模拟结果和实测结果误差较小, 模拟结果可以很好地反映不同畦面结构下田面水流运动过程; 在供水停止后, 模型对平作畦灌田面水流过程模拟较好, 而对细沟灌、畦作浅沟灌和微垄沟灌田面水流运动的模拟较差, 模拟水流运动速度明显低于实测水流运动速度, 这是由于模型对田面水流运动过程的模拟是基于明渠水流运动方程和连续性方程, 在供水停止后, 水流只在重力作用下顺坡向畦尾流动, 模型模拟的前提条件已经变化, 并且畦面结构改变也对此时的水流运动有重要影响, 所以模型难以对水流运动状态进行准确模拟。总体而言, WinSRFR 模型可以对不同畦面结构下的田面水流运动过程进行较好地模拟, 模型模拟结果可靠。



注: a、b、c、d 图的实测入畦单宽流量分别是 4.35、3.95、3.78、3.97 L/(m·s)

图 2 不同畦面结构下田面水流推进过程实测值和模拟值的对比

Fig.2 Measured vs. simulated water advance curves in border-strip, rill, shallow-furrow-border, and border-furrow fields

### 3.2 不同畦面结构下田面糙率系数和土壤入渗参数估算

根据灌溉实测田面水流推进数据，人工试算法得到各灌溉田块糙率系数和土壤入渗参数如表 2 所示。可以看出，不同畦面结构田面糙率系数和土壤入渗强度是有差异的：平作畦灌的糙率系数最小，微垄沟灌的糙率系

数最大，细沟灌和畦作浅沟灌糙率系数略有差异；平作畦灌入渗速度最快，100 mm 水深入渗时间仅 55.7 min，细沟灌入渗速度次之，畦作浅沟灌的入渗速度最慢，100 mm 水深入渗时间高达 92.1 min。

表 2 不同畦面结构下畦田入渗参数和糙率系数估值

Table 2 Estimated values of soil infiltration parameters and roughness coefficients in different morphologic fields

畦田编号	土壤入渗系数 $k(\text{mm} \cdot \text{h}^{-3})$	土壤入渗指数 $a$	土壤稳定入渗率 $f_0(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	100 mm 水深入渗时间/min	100 mm 水深平均入渗时间/min	糙率系数 $n$	平均糙率系数 $n_{ave}$
1-1	73.921	0.641	18	67.6		0.14	
1-2	98.773	0.403	18	43.7	55.7	0.11	0.13
2-1	86.293	0.519	12	61.8		0.16	
2-2	81.949	0.499	12	67.1	64.5	0.15	0.16
3-1	52.660	0.747	18	91.9		0.15	
3-2	54.407	0.662	18	92.3	92.1	0.15	0.15
4-1	59.231	0.381	24	82.7		0.22	
4-2	67.409	0.305	24	72.0	77.4	0.19	0.21

糙率系数是衡量畦面粗糙程度的一个综合性系数，其取值大小和作物密度、土壤松紧度和平整度等有关；土壤入渗特性则受土壤初始含水率、土壤质地、土壤裂隙发育情况和坡度等影响。在本试验中，所有畦田的初始条件包括土壤质地、初始含水率、坡度和作物发育情况均一致，只有耕作方式不同引起的畦面结构有差异，所以认为糙率系数和土壤入渗特性的差异主要是由畦面结构不同导致。

### 3.3 不同畦面结构下灌水效果对比和影响因素分析

本研究中地面灌溉效果的评价指标包括 3 个：灌水定额  $Dapp$ 、灌水效率  $AE$  和灌水均匀度  $DUmin$ 。灌水定

额  $Dapp$  为单次灌水的平均深度；灌水效率  $AE$  和灌水均匀度  $DUmin$  如下式所示

$$AE = \left( \frac{\text{根区中贮存的灌溉水的平均深度}}{\text{单次灌水的平均深度}} \right) \times 100\% \quad (10)$$

$$DUmin = \left( \frac{\text{沿畦长方向最小入渗水深}}{\text{单次灌水的平均深度}} \right) \times 100\% \quad (11)$$

为比较不同畦面结构的灌溉效果，获得不同畦面结构土壤特性参数值后，设定统一的灌溉管理条件进行模拟分析。不同畦田的模拟灌溉效果如表 3 所示。

表 3 不同畦面结构下地面灌溉效果对比

Table 3 Simulated irrigation performance in different morphologic fields

畦田编号	改水成数 $R$	平均改水成数 $R_{ave}$	灌水定额 $Dapp/\text{mm}$	平均灌水定额 $Dapp_{ave}/\text{mm}$	灌水效率 $AE/\%$	平均灌水效率 $AE_{ave}/\%$	灌水均匀度 $DUmin/\%$	平均灌水均匀度 $DUmin_{ave}/\%$
1-1	0.93		145.0		69.2		77.4	
1-2	0.88	0.91	157.0	151.0	63.9	66.6	70.7	74.1
2-1	0.86		144.0		69.4		77.1	
2-2	0.86	0.86	134.0	139.0	74.7	72.1	80.9	79.0
3-1	0.93		115.0		86.7		86.1	
3-2	0.91	0.92	115.0	115.0	86.7	86.7	86.5	86.3
4-1	0.78		127.0		79.1		83.1	
4-2	0.78	0.78	129.0	128.0	77.5	78.3	83.1	83.1

注：灌溉管理条件统一设定为：畦田长度为 200 m，宽度为 6 m，坡度为 0.0013，入畦流量为 27 L/s，灌溉需水量设定为 100 mm，灌水时间根据模型水量平衡法模拟不同畦田最小入渗深度达到灌溉需水量 100 mm 所需灌水时间确定，田面糙率和土壤入渗参数根据表 2 输入。模拟时所有畦田畦尾封闭，并且要求沿畦长最小入渗深度不小于灌溉需水量。

在统一的灌溉管理条件下，达到灌溉要求即最小入渗深度不小于灌溉需水量，不同畦面结构的灌水效果是不同的：不论是灌水定额、灌水效率还是灌水均匀度，畦作浅沟灌的效果均是最优的，微垄沟灌次之，平作畦灌最差。畦作浅沟灌、微垄沟灌和细沟灌的  $Dapp_{ave}$  分别比平作畦灌少 36.0、23.0 和 12.0 mm； $AE_{ave}$  分别比平作畦灌高 20.1、11.7 和 5.5 百分点； $DUmin_{ave}$  分别比平作畦

灌高 12.2、9.0 和 4.9 百分点。这表明畦面结构改变会对地面灌溉效果产生重要影响。

田面水流推进过程是决定地面灌溉效果的重要过程，图 3 表明不同畦面结构田面水流推进过程明显不同。可以看出微垄沟灌田面水流推进速度最慢，畦作浅沟灌田面水流推进速度最快，平作畦灌和细沟灌田面水流推进速度差异不大。在满足灌溉要求和灌溉管理条件完全

相同的条件下, 畦作浅沟灌推进到畦尾的时间比平作畦灌快 30 min, 这表明田间开浅沟有助于更快地把畦首端田面积水输送到畦尾端; 微垄沟灌沟型过大, 畦面对水流的阻力较大, 田面水流推进缓慢; 细沟灌沟型小, 对田面水流推进的影响不大。

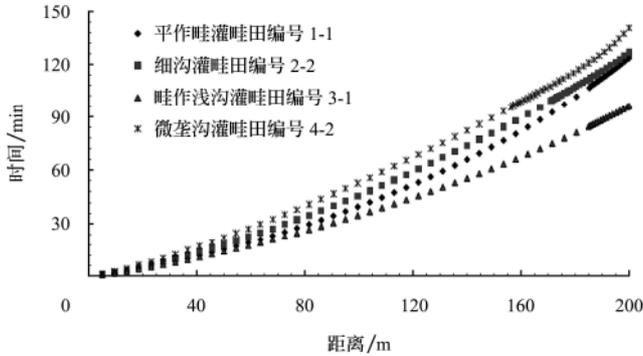


图3 不同畦面结构下田面水流推进曲线对比

Fig.3 Water advance curves in different morphologic fields

地面灌溉效果的直接体现就是沿畦长方向水分入渗深度的分布情况, 图 4 显示灌水结束不同畦面结构下沿畦长方向水流入渗深度分布。图 4 的结果和表 3 的结果是相一致的, 不论是灌水定额、灌水效率还是灌水均匀度, 畦作浅沟灌均优于其他 3 种灌溉方式, 平作畦灌的灌溉效果最差。畦作浅沟灌可有效地把畦首端积水快速输送到畦尾端, 减小畦田首尾两端入渗时间的差异, 改善灌溉均匀度, 大幅提高灌水效率; 细沟灌和微垄沟灌也可在一定程度上改善灌溉均匀度, 提高灌水效率。

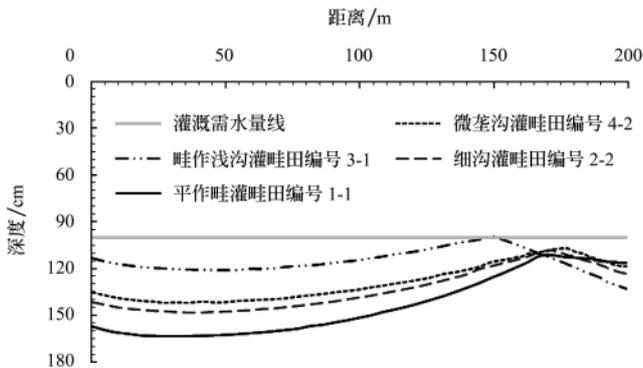


图4 不同畦面结构下灌水结束沿畦长入渗深度分布

Fig.4 Simulated infiltration depths along field length in different morphologic fields when irrigation finished

### 3.4 不同畦面结构下的畦田长度优化

明确不同畦面结构畦田的土壤特性参数和灌水效果后, 为深入研究畦田长度和灌水效果的关系, 通过调整畦田规格达到节约用水的目的, 统一设定灌溉管理条件, 利用 WinSRFR 模型对畦田长度进行优化研究。根据水量平衡法模拟所得不同畦面结构的优化畦长如表 4 所示。

模型进行畦田规格优化时以最小入渗深度等于灌溉需水量为优化原则, 故只要灌水效率 > 80.0%, 必有灌水定额 < 125.0 mm 和灌水均匀度 > 80.0%。本文仅列出不同

畦田长度下的模拟灌水效率做比较。从表 4 可以看出, 优化畦长畦作浅沟灌适宜畦长取值区间明显最高, 微垄沟灌次之, 平作畦灌最低; 畦作浅沟灌最大优化畦长达到 200~220 m, 微垄沟灌为 170~190 m, 细沟灌、平作畦灌为 150~170 m。

在获得同等灌水效率前提下, 畦作浅沟灌是最佳的灌水方式, 可适用较大畦长, 节约田间工程, 便于机械耕作; 平作畦灌适合畦长比较短的情况。这一结果和表 3 的结论是相一致的, 从表 3 可以看出畦长较大条件下, 畦作浅沟灌灌水效果最佳, 平作畦灌灌水效果最差。

表 4 不同畦面结构下畦田规格优化

Table 4 Optimized field sizes in different morphologic fields				
灌溉方式	畦田编号	灌水效率 > 80% 对应畦长/m	优化畦长/m	最大优化畦长/m
平作畦灌	1-1	105~170	60~170	150~170
	1-2	60~134		
细沟灌	2-1	83~157	80~170	150~170
	2-2	96~176		
畦作浅沟灌	3-1	153~218	150~220	200~220
	3-2	153~222		
微垄沟灌	4-1	106~192	90~190	170~190
	4-2	90~185		

注: 灌溉管理条件统一设定为: 坡度为 0.0013, 入畦单宽流量为 4.5 L/(m·s), 灌溉需水量设定为 100 mm, 田面糙率和土壤入渗参数根据表 2 输入。模拟时所有畦田畦尾封闭, 并且要求沿畦长最小入渗深度不小于灌溉需水量。本文中优化畦长是指在既定灌溉管理条件下, 地面灌溉灌水效率 > 80.0%, 灌水定额 < 125.0 mm, 同时灌水均匀度 > 80.0% 所对应的畦田长度。最大优化畦长则是考虑到减少田间工程, 便于机械耕作, 同时又满足灌溉要求的最大优化畦长, 其取值范围通过选取优化畦长中的高值区间确定。

## 4 结论

本研究在 4 种不同畦面结构大田灌溉试验基础上, 利用 WinSRFR3.1 模型对 4 种灌溉方式即平作畦灌、细沟灌、畦作浅沟灌和微垄沟灌的田面土壤特性、水流运动和灌水效果进行了模拟分析, 并提出适合不同畦面结构的畦田长度。研究认为:

1) WinSRFR 模型对 4 种畦面结构下的田面水流运动过程模拟结果可靠。在灌溉供水停止前, WinSRFR 模型可以对 4 种不同畦面结构下的地面灌溉水流运动过程进行很好的模拟; 在供水停止后, 模型对细沟灌、畦作浅沟灌和微垄沟灌的模拟误差较大。

2) 不同畦面结构的田面糙率系数和土壤入渗特性差异明显。模型估算结果表明, 微垄沟灌糙率系数最大而平作畦灌糙率系数最小; 平作畦灌入渗速率最快而畦作浅沟灌入渗速率最慢, 这为通过改变畦面结构改善地面灌水效果提供了理论依据。

3) 不同畦面结构的地面灌溉效果差异明显, 畦作浅沟灌效果最优, 微垄沟灌次之, 平作畦灌效果最差。不同畦面结构田面水流推进过程和沿畦长方向水分入渗深度分布发生变化, 二者综合作用导致地面灌溉效果的改变。

4) 对不同畦面结构下的畦田长度优化表明, 在同等灌溉管理条件下, 要使灌水效率 $>80.0\%$ , 畦作浅沟灌最大优化畦长可达 200~220 m, 微垄沟灌为 170~190 m, 细沟灌、平作畦灌为 150~170 m。

#### [参 考 文 献]

- [1] Clemmens A J. Achieving high irrigation efficiency with modern surface irrigation[R]. 1998 IA Expo Technical Conference, 1-3 November, 1998: 161—168.
- [2] Walker W R, Skogerboe G V. Surface Irrigation: Theory and Practice[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc, 1987.
- [3] 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]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(4): 10—14. (in Chinese with English abstract)
- [4] Pereira L S, Oweis T, Zairi A. Irrigation management under water scarcity[J]. Agricultural Water Management, 2002, 57(3): 175—206.
- [5] 李久生, 饶敏杰. 地面灌溉水流特性及水分利用率的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(03): 54—58.  
Li Jiusheng, Rao Minjie. Field evaluation of water flow performance and application efficiency for border irrigation[J]. Transaction of the CSAE, 2003, 19(3): 54—58. (in Chinese with English abstract)
- [6] Smith R J, Raine S R, Minkevich J. Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton[J]. Agricultural Water Management, 2005, 71(2): 117—130.
- [7] Horst M G, Shamutalov S S, Pereira L S, et al. Field assessment of the water saving petential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea basin[J]. Agricultural Water Management, 2005, 77(1/2/3): 210—231.
- [8] Fangmeier D D, Clemmens A J, El-Ansary M, et al. Influence of land leveling precision on level-basin advance and performance[J]. Trans ASAE, 1999, 42(4): 1019—1025.
- [9] Clemmens A J, El-Haddad Z, Fangmeier D D, et al. Statistical approach to incorporating the influence of land-grading precision on level-basin performance[J]. Trans ASAE, 1999, 42(4): 1009—1017.
- [10] 李益农, 许迪, 李福祥. 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.  
Li Yinong, Xu Di, Li Fuxiang. Modeling on influence of land leveling precision on basin irrigation performance[J]. Transaction of the CSAE, 2001, 17(4): 43—48. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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.  
Bai Meijian, Xu Di, Li Yinong. Impacts of stochastic modeling microtopograpy distribution and its discrepancy on basin irrigation performance[J]. Transaction of the CSAE, 2006, 22(6): 28—32. (in Chinese with English abstract)
- [12] 白美健, 许迪, 李益农. 模拟微地形空间变异对畦灌系统影响的田间验证[J]. 水利学报, 2008, 39(7): 801—808.  
Bai Meijian, Xu Di, Li Yinong. Field verification on simulation of microtopography spatial variability effect on basin irrigation system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(7): 801—808. (in Chinese with English abstract)
- [13] Bai Meijian, Xu Di, Li Yinong, et al. Stochastic modeling of basins microtopography: analysis of spatial variability and model testing[J]. Irrigation Science, 2010, 28(2): 157—172.
- [14] Strelkoff T S, Clemmens A J, Schmidt B V. SRFR, Version 3.31: A model for simulating surface irrigation in borders, basins and furrows[Z]. US Department of Agriculture Agricultural Research Service, US Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ, 1998.
- [15] Strelkoff T S, Clemmens A J, Schmidt B V, et al. BORDER: A design and management aid for sloping border irrigation systems[Z]. WCL Report 21. US Department of Agriculture Agricultural Research Service, US Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ, 1996.
- [16] Clemmens A J, Dedrick A R, Strand R J. BASIN: A computer program for the design of level-basin irrigation systems, version 2.0[Z]. WCL Report 19. USDA-ARS, US Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ, 1995.
- [17] 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.
- [18] Bautista E, Clemmens A J, Strelkoff T S, et al. Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR-Example application[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(7): 1162—1169.
- [19] 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.  
Yan Qingjian, Li Jiusheng. The simulation on the performance of water advance and recession, application efficiency of border irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(2): 62—66. (in Chinese with English abstract)
- [20] McClymont D J, Smith R J. Infiltration parameters from optimisation on furrow irrigation advance data[J]. Irrigation Science, 1996, 17(1): 15—22.
- [21] Arid-Land Agricultural Research Center. WinSRFR 3.1 User Manual[Z]. USDA-ARS, Arid-Land Agricultural Research Center, Maricopa, AZ, 2009.

## Comparison of border irrigation practices in different morphologic fields

Chen Bo<sup>1,3</sup>, Ouyang Zhu<sup>1\*</sup>, Liu Enmin<sup>2</sup>, Zhang Yanling<sup>4</sup>, Chen Junxu<sup>2</sup>

(1. *Yucheng Comprehensive Experimental Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

4. *College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)*

**Abstract:** To evaluate the effect of field morphologic change on irrigation performance, the field soil characteristics and irrigation performance of 4 types of irrigation fields i.e. border-strip irrigation (BSI), rill irrigation (RI), shallow-furrow-border irrigation (SFBI) and border-furrow irrigation (BFI) were calculated and simulated with WinSRFR3.1 model. The differences induced by the change of field morphologic between these irrigation patterns were compared, and reasonable border lengths for different morphologies were suggested. It was concluded that soil infiltration characteristics and field roughness were quite diverse in different morphologic fields, characterized with the highest roughness in BFI while lowest in BSI, and the rapidest infiltration rate in BSI while slowest in SFBI. For long border, the performance is in order of SFBI> BFI>RI>BSI. Under a feasible inflow rate of 4.5 L/(m·s), to obtain above 80% application efficiency, the optimum border length should be 200–220 m, 170–190 m, 150–170 m, and 150–170 m for SFBI, BFI, RI, and BSI, respectively. Field morphologic plays an important role in surface irrigation performance, and it is necessary to be considered in the further study and practice of surface irrigation.

**Key words:** irrigation, models, infiltration, soil moisture, field morphologic, surface irrigation, surface roughness, irrigation performance