

秸秆覆盖畦田灌溉水流特性及灌水质量分析

吕 雯<sup>1,2</sup>, 汪有科<sup>2,3</sup>, 许晓平<sup>3</sup>

(1. 宁夏大学新技术应用研究开发中心, 银川 750021;  
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**在陕西杨凌张家岗村覆盖玉米秸秆的冬小麦地进行了畦田规格和灌水技术要素对灌水效率和灌溉均匀度影响的田间试验, 并 SRFR406 软件对秸秆覆盖畦灌的水流推进进行了数学模拟。结果表明, 给出的地面灌溉模型及软件可较好的模拟秸秆覆盖畦田水流运动。畦田规格与技术要素的选择对灌水效率及灌水均匀度均有影响。在覆盖秸秆畦田以畦长小于 50 m, 畦宽 2~ 3 m, 单宽流量以 6~ 8 L/(m·s), 坡度以 3‰~ 5‰为宜。为提高秸秆覆盖灌水效率, 应加强耕作管理, 消除反坡。  
**关键词:** 秸秆覆盖; 地面灌溉; 水流特性; 灌水技术要素; 灌溉效率; 灌水均匀度  
**中图分类号:** S274. 2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-3409(2007) 02-0236-03

Analysis of Water Flow Performance and Irrigation Efficiency of Boder Irrigation under Straw Mulch

LV Wen<sup>1,2</sup>, WANG You-ke<sup>1,2</sup>, XU Xiao-ping<sup>2</sup>

(1. Applied Reasearch and Development Center for the New Techology, Ningxia University, Yingchuan 750021, China;  
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
3. Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:**Field experiments were conducted to investigate the influences of border dimensions and irrigation variables on the performance of water advance under straw mulch, irrigation efficiency and distribution uniformity (DU). The commercial software, namely SRFR406, was used to simulate the performance of water advance. The results showed that the code simulated the performance of water advance successfully. The border dimensions had influences to application efficiency, borders having 2~ 3 m wide, not more than 50 m long, inflow rate of unit width is from 6 L/(m·s) to 8 L/(m·s), and border slope is from 3‰ to 5‰ can get high application efficiency.  
**Key words:** straw mulch; border irrigation; water flow performance; irrigation design and management variables; irrigation efficiency; distribution uniformity

冬小麦是陕西省重要的粮食作物,在其生育期间降水存在时空上分布不均的情况,保墒与补水灌溉成为冬小麦获得高产的重要手段。近年来,随着农业技术的发展以及国家 863 项目——西北半湿润渠灌区节水农业综合技术体系集成与示范课题组杨凌推广了两年的秸秆还田技术,秸秆覆盖灌溉在本地已有较大范围的应用,但在秸秆覆盖下的地面灌溉的水流及灌溉质量系统研究还较为匮乏。利用在陕西杨凌地区玉米秸秆覆盖冬小麦畦田灌溉试验获得的数据,并用 SRFR406 软件对秸秆覆盖畦灌的水流推进进行了数学模拟,研究该模型软件在秸秆覆盖畦灌的实用性,及畦田规格和灌水技术要素对灌水质量的影响,初步提出适宜规格本地的畦田及技术要素,为秸秆覆盖灌溉理论的系统研究提供科学依据。

1 地面灌溉模型

1.1 模型选择

对水流在田间地面流动进行描述时,通常存在着三类数学模型可供选择,即全水动力模型、零惯量模型和动力波模型,本文采用的 SRFR 模型是由美国水保实验室开发的一维地面灌溉模拟模型"可根据用户需求任选完全水动力模型、零惯量模型或动力波模型描述地面畦(沟)灌中的水流运动过程其中忽略完全水动力模型中加速度项的零惯量模型计算简便不受地段坡度条件的限制,具有较强的适用性。水流运动基本方程表示为:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0$$
$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f$$

(1)

\* 收稿日期: 2006-05-23  
基金项目: 国家“863”节水农业重大专项 (2002AA2Z4211)  
作者简介: 吕 雯 (1979-), 女, 硕士, 助教, 主要从事节水灌溉, 水土保持方面研究。

式中: $x$ ——水流推进距离, m;  $y$ ——水深, m;  $t$ ——灌水时间, s;  $Z$ ——单位长度的入渗量,  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ;  $A$ ——过流断面的截面积,  $\text{m}^2$ ;  $Q$ ——灌水流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $S_0$ ——地面坡度;  $S_f$ ——摩阻坡度。

SRFR 模型的输入参数分为 3 类: 系统几何参数, 包括畦田长度、宽度、微地形条件; 管理参数, 包括作物灌溉需水量、入畦流量及灌溉供水时间等; 土壤参数, 包括糙率系数和土壤入渗参数等。其中曼宁系数  $n$ 、土壤入渗参数  $k$  和  $\alpha$  可根据田间实测数据进行推算。

1.2 土壤参数的确定

1.2.1 土壤入渗参数的确定

SRFR 模型中使用 Kostakov 公式描述土壤入渗性能, 计算累计的入渗量

$$I = k t^{\alpha} \tag{2}$$

式中: $I$ ——累计入渗深度;  $t$ ——土壤入渗受水时间, 可根据实测的水流推进时间与积水消退时间之差计算得到;  $k$ 、 $\alpha$ ——待定的土壤入渗参数。测定土壤入渗性能的方法为双环入渗法。

1.2.2 糙率系数  $n$  的确定

在畦灌地面水流运动过程中, 糙率(曼宁)系数  $n$  与畦田水面坡度  $S_w$ 、过水单宽流量  $q_m$  以及水流深度  $y$  有关。计算公式为:

$$n = 60 S_w^{1/2} q_m^{-1} y^{5/3} \tag{3}$$

式中: $q_m$ ——单宽流量,  $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ ;  $y$ ——水流深度, m; 田间试验中沿畦田纵坡方向布设测点, 使用水深标尺观测该值;  $S_w$ ——畦田水面坡度, 可根据各测点的水深值与地面高程确定。

1.2.3 灌水质量评价指标

采用常用的灌水均匀度  $DU(\%)$ 、灌水效率  $E_a(\%)$  评价灌水质量,

$$DU = Z_{lq} / Z_{avg} \tag{4}$$

$$E_a = Z_{s0} / D \tag{5}$$

$Z_{s0}$  可以根据灌前和灌后的土壤含水量差值确定,

$$Z_{s0} = (\theta_a - \theta_b) D_r \tag{6}$$

式中: $Z_{s0}$ ——根层土壤内的平均水深, mm;  $D$ ——进入田块的平均灌水水深, mm;  $Z_{lq}$ ——沿田块长度方向上土壤受水最少的  $1/4$  畦段内的平均入渗水深, mm;  $Z_{avg}$ ——整个田块上的平均入渗水深, mm; 分别为根层土壤灌水后、灌水前的平均体积含水量;  $D_r$ ——根层深度, mm。地面灌溉灌水质量可由(1)~(3)式计算, 但计算时选用的计划湿润层深度, 对灌溉质量的评价会有直接影响。一个优良的畦田设计和管理要求  $DU$ 、 $E_a$  同时趋于最大值即 100%。由于灌水量过大或不足, 都会引起水量浪费或农作物减产造成经济损失, 因而  $DU$ 、 $E_a$  任何偏离最大值都是不合理的。畦田设计和管理标准, 就是要求选择适当的影响畦田灌溉的因子, 使上述畦灌质量参数达到最大值或最经济的结合值。

2 田间试验

2.1 田间试验处理与观测

于 2005 年 3 月~4 月在陕西杨凌张家岗村种植的冬小麦地上进行秸秆覆盖畦田灌溉田间试验。前茬作物为夏玉米, 覆盖量为前茬作物秸秆产量。土壤类型为中壤土, 容重  $1.45 \text{ g/cm}^3$ , 田间持水量采用围堰法测得 23.4%。

2.2 水流推进与消退过程观测

在两次灌水试验期间, 分别在田间采用双环入渗法各完成 7 组入渗试验, 利用最小二乘法回归计算, 确定公式(2)中

的土壤入渗参数  $k$ 、 $\alpha$ 。根据地块长度延纵向每 5~10 m 处设立定位观测点, 观测点处打入水深标尺, 记录灌溉供水的水流推进时间和地面水深。结合畦灌试验在田间实测水流深度, 利用公式(3)分别计算两次灌水期间的田面糙率系数。灌溉中改口成数取 1.0 在灌前和灌后 24 h, 分别在畦块的首部、中部和尾部采集土样, 采用烘干称重法(土钻法)测定土壤含水量, 取土深度为 100 cm, 每层 10 cm, 共分为 10 层。入畦流量采用薄壁直角三角堰测量。

3 结果分析

3.1 水流推进模拟评价

利用田间实测资料对 SRFR 模型进行了验证。

表 2 3 月 5 日和 4 月 23 日灌水的水流推进过程实测与模拟数据的对比

3 月 5 日						4 月 23 日					
畦田 编号	距 离  / m	水流推 进 时间/ min		相关关系		畦田 编号	距离  /m	水流推进 时间/min		相关关系	
		实测	模拟	$b$	$r^2$			实测	模拟	$b$	$r^2$
1	25	6.00	5.97	1.00	0.99	8	25	3.58	4.05	0.88	0.99
2	25	8.00	7.91	1.01	0.99	9	25	12.42	11.30	1.10	0.99
3	25	10.50	10.86	0.97	0.99	10	25	17.83	17.80	1.00	0.97
4	45	22.95	21.49	1.07	0.99	11	50	16.50	16.47	1.00	0.98
5	45	40.33	37.62	1.07	1.00	12	50	29.00	25.24	1.15	0.98
6	45	15.08	15.24	0.99	1.00	13	50	42.00	35.04	1.20	0.97
7	70	70.00	73.09	0.96	0.97	14	70	45.00	39.74	1.13	0.95
平均值				1.01	0.99	平均值				1.07	0.98

从表 2 的统计结果来看, 3 月 5 日推进阶段的模拟结果与实测结果非常相近, 其中  $b$  的平均值为 1.01, 其变化范围为 0.97~1.07, 而  $r^2$  的平均值为 0.99, 近似等于 1, 说明在覆盖秸秆的地面灌溉模拟中运用该模型可以非常准确的模拟出水流推进过程。4 月 23 日灌水推进阶段  $b$ 、 $r^2$  的平均值为 1.07、0.98, 变化范围分别为 0.88~1.20、0.95~0.99, 从结果来看推进阶段观测值与模有拟值之间较好的相关性, 模拟值或者整体趋势比观测值大, 或者比观测值小, 但也有个别模拟结果与实测之间差距比较大。例如 8 号与 13 号, 虽然相关系数较接近 1, 但  $b$  值分别为 0.88、1.20。造成 8 号模拟结果与实测结果时间有差距的原因有可能是观测者对水流推进时间有误差, 有可能不同观测者观测时掌握时间不同, 因观测时间较短, 在相差数秒钟内的得到的不同值对结果影响较大。

从两次灌水的水流推进观测值与模拟值总体来看, 观测值与模拟值之间有较好的吻合度, 而且 25 m 畦田吻合得最好, 基本重合; 45 m 与 50 m 畦田吻合得较好, 70 m 畦田吻合度略低于前两者。模拟的精度随畦长的增加会略有下降, 因此在应用该软件模拟秸秆覆盖畦灌水流推进过程时, 应考虑畦长对模拟值精度的影响。

水流消退资料规律性不显著, 它与地面坡降、微地形、积水深度及不同观测者对水流消退时间的判断等都有关系。

综合上述结果表明, SRFR 模型在覆盖秸秆畦灌过程中具有较高精度的水流推进模拟能力, 可以用来分析评价秸秆覆盖灌水质量、性能。

3.2 畦长对灌水效率、灌水均匀度的影响

根据试验资料计算得出灌水效率、灌水均匀度见表 1。

表 1 畦灌试验灌水效率

畦田 编号	畦长 /m	畦宽 /m	单宽流量 ( $L \cdot ms^{-1}$ )	坡度 /‰( $cm \cdot min^{-1}$ )	$k$	$\alpha$	$n$	灌水效率 /%	灌水均匀 度/%
1	25	2	4.42	4.63				94.39	86.45
2	25	3	3.36	2.40				82.00	79.32
3	25	4	2.34	0.45				62.66	80.46
4	45	2	2.50	4.25	1.49	0.6082	0.26	80.00	80.57
5	45	3	1.67	2.27				76.69	73.00
6	45	4	3.45	3.36				79.10	72.11
7	70	3	3.36	2.89				72.43	76.05
8	25	2	8.34	4.63	1.02	0.8462	0.18	90.76	87.46
9	25	3	2.67	2.40				91.90	79.86
10	25	4	4.17	0.45				52.05	82.56
11	50	2	8.34	4.54				83.21	84.80
12	50	3	5.56	2.27				79.09	80.60
13	50	4	4.17	3.36				77.08	75.30
14	70	3	5.56	2.89				55.73	72.10

选取 14 块畦田中单宽流量、坡度相近的畦田绘制图 1。从图 1 可看出,随着畦长的增加,灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $DU$  都有所下降,尤其灌水效率降低显著,灌水效率由 94.39 下降到 55.73;畦长在 20 m~50 m 时,灌水效率降低幅度较小,畦长  $L > 50$  m 后灌水效率降低较快。因此畦长的大小

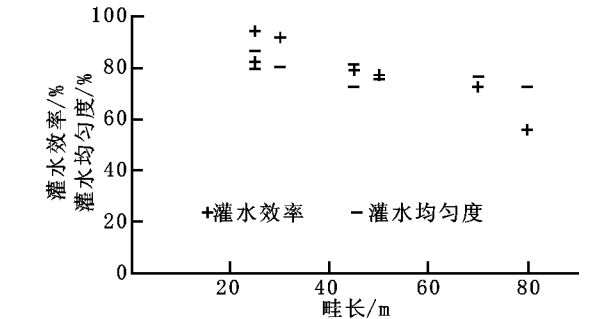


图 1 畦长对灌水效率、均匀度的影响

3.4 坡度对灌水效率、灌水均匀度的影响

从表 1 的计算结果可看出,覆盖秸秆的畦田在田面有较一致的坡度时,灌水效率、灌水均匀度较高。以往研究中无覆盖畦田灌水时,接近水平的小坡度畦田灌水效率、灌水均匀度较高,随着坡度的增大灌水效率逐渐降低。秸秆覆盖后灌水时,坡度对其灌溉质量的影响发生了一些变化。过于平坦的地形反而使覆盖处理地块灌溉效率降低,当略有坡度 (3‰~5‰) 时,水流由于坡面向下流动较快,克服一定程度的秸秆在地面水流推进过程中增加的阻力,促使水流在覆盖秸秆的畦田内的推进速度加快,缩短推进历时,使得田间土壤入渗受水分布更为均匀,有利于提高秸秆覆盖畦田的灌水效率和灌水均匀度。为避免因为过陡的纵坡造成田面秸秆、土壤冲刷,根据田间实测结果,建议秸秆覆盖畦田坡度控制在 3‰~5‰范围内。10 号畦田畦尾为反坡,尽管灌水均匀度达到了 80% 以上,但是灌水效率仅为 52.05%,说明达到 80% 以上的均匀度是以大量的深层渗漏为代价的。田间反

参考文献:

[1] 李益农,许迪. 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,(4):43- 48.  
[2] Walker W R. Guidelines for designing surface irrigation systems[Z]. FAO Irrigation and Drainage Paper ,1992. 45.  
[3] 闫庆键,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(4): 62- 66.  
[4] 许迪,蔡林根. 农业持续发展的农田水管理研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.  
[5] 农业气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,1993. 1- 212.

对灌水效率  $E_a$ 、灌水均匀度  $DU$  都有影响,对灌溉效率的尤其显著,建议在田间栽培管理允许的范围内,秸秆覆盖畦田的畦长尽量采用短畦,畦长  $L < 50$  m。

3.3 单宽流量、畦宽对灌水效率、灌水均匀度的影响

在表 1 中选取畦长 45~50 m、坡度相近的田块绘制图 2。从图 2 可以看出,随着单宽流量  $q_{in}$  的增大,灌水效率、灌溉均匀度整体呈上升趋势。较大的  $q_{in}$  能克服一定程度的秸秆在地面水流推进过程中增加的阻力,促使水流在覆盖秸秆的畦田内的推进速度加快,缩短推进历时,使得田间土壤入渗受水分布更为均匀,有利于提高秸秆覆盖畦田的灌水效率和灌水均匀度。随着  $q_{in}$  值的增大,供水时间  $t$  减小,灌水效率也会随之提高。因此,加大入畦单宽流量  $q_{in}$  有助于秸秆覆盖畦田获得较好的灌溉质量。当然  $q_{in}$  的大小与当地水源条件和畦田宽度有关。在井灌区,由于机井出水常受到诸如井泵类型、地下水状况、机泵运行状态等因素的影响,可调节的范围有限,故畦块宽度是制约  $q_{in}$  值大小的主要因素。从田间实测结果来看,为避免流量过大对田面覆盖的秸秆与土壤的冲刷,有秸秆覆盖的地块入畦单宽流量的适宜值应结合畦块宽度并视田间土壤质地,在 6~8 L/(m·s) 的范围内选择,最大值不超过 8 L/(m·s) 为佳。在陕西农用灌溉机井出水量多在 15~20 L/s 范围内,因此有秸秆覆盖田块的畦宽选择 2~3 m 为宜。

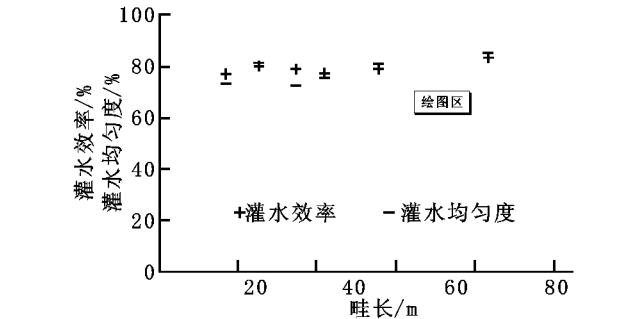


图 2 单宽流量对灌水效率、灌水均匀度的影响

坡对均匀度影响不显著,却对灌水效率作用明显。因此,在田间实际应用中应尽量消除畦尾的地面反坡。

4 结 论

- (1) 秸秆覆盖畦田灌溉水流推进过程可用本文给出的地面灌溉模型描述,该模型模拟水流运动的精度随畦长的增大有所降低。
- (2) 畦长、单宽流量、坡度等技术要素对秸秆覆盖灌水效率与灌水均匀度有显著影响。在陕西机井灌溉畦田,土壤为中壤土,入渗能力中等时,秸秆覆盖畦田畦长以小于 50 m,畦宽 2~3 m,单宽流量以 6~8 L/(m·s),坡度以 3‰~5‰为宜。
- (3) 秸秆覆盖畦田为缩短水流推进时间,提高灌水质量,建议畦田坡度控制在 3‰~5‰范围内。畦尾反坡对反坡对均匀度影响不显著,却对灌水效率作用明显,应加强耕作管理,尽量消除畦尾存在的地面反坡。