

考虑初始含水率沿程不均匀分布的畦灌技术要素调控

李江¹ 黄增健¹ 李涛¹ 缴锡云^{1,2} 史传萌¹ 张状状¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 畦田土壤初始含水率是影响灌水质量的重要因素之一,由降雨产流导致的畦田土壤含水率沿程不均匀分布是华北平原农田常见的现象。为探究土壤初始含水率空间变异性对畦灌水流运动以及灌水质量的影响,本文开展一维土柱入渗试验与二维土槽灌溉试验,结合 WinSRFR 地面灌溉模拟模型,优化求解初始含水率沿程不均匀条件下的畦灌技术要素。结果表明:畦田土壤初始含水率沿程增幅越大,畦灌田面水流推进速度越快,田面水流消退速度越慢;相较于初始含水率均匀分布,畦田土壤初始含水率沿程不均匀分布条件下,灌水效率和灌水均匀度有所下降,储水效率无明显变化;当畦田土壤初始含水率沿程增加时,灌水效率和储水效率受畦田长度、入畦单宽流量及改水成数的影响,而灌后土壤水分均匀度仅受畦田长度和单宽流量的影响;当畦田土壤初始含水率沿程由 $0.189\ 0\ \text{m}^3/\text{m}^3$ 均匀增大至 $0.464\ 3\ \text{m}^3/\text{m}^3$ 时,畦田长度 L 为 85 m、改水成数 G 为 6、单宽流量 q 为 $7.0\ \text{L}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时可取得最优灌水质量。本研究结果可为降雨产流带来的畦田土壤初始含水率不均匀条件下的灌水技术要素调控提供科学依据。

关键词: 畦灌; 土壤初始含水率; 灌水质量; 灌水技术要素; 优化调控

中图分类号: S275

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)08-0320-10

OSID:



Regulation of Border Irrigation Technical Elements Considering Condition of Uneven Initial Soil Moisture Content along Border

LI Jiang¹ HUANG Zengjian¹ LI Tao¹ JIAO Xiyun^{1,2} SHI Chuanmeng¹ ZHANG Zhuangzhuang¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Soil initial moisture content is one of the important factors affecting border irrigation quality. The uneven distribution of soil moisture content caused by runoff is a common phenomenon in the farmland of North China Plain. In order to explore the influence of spatial variability of initial soil moisture content on flow movement and irrigation quality of border irrigation, one-dimensional soil column infiltration test and two-dimensional soil tank irrigation test were carried out in this study. Combined with WinSRFR surface irrigation simulation model, the technical factors of border irrigation under the condition of uneven initial moisture content were optimized and solved. The results showed that the greater the increase of initial soil moisture content along the border, the faster the surface water flow of border irrigation, and the slower the surface water flow of border irrigation. Compared with the uniform distribution of initial moisture content, under the condition of uneven distribution of initial moisture content along the border soil, the irrigation efficiency and irrigation uniformity will decrease, and the water storage efficiency will not change significantly. When the initial soil moisture content increased along the border, the irrigation efficiency and water storage efficiency were affected by the length of the border, the flow rate per unit width of the border and the number of water improvement, while the soil moisture uniformity after irrigation was only affected by the length of the border and the flow rate per unit width. When the initial moisture content of the border soil increases uniformly from $0.189\ 0\ \text{m}^3/\text{m}^3$ to $0.464\ 3\ \text{m}^3/\text{m}^3$, the optimal border irrigation quality can be obtained when the border length $L = 85\ \text{m}$,

收稿日期: 2023-04-18 修回日期: 2023-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009030)、国家重点研发计划项目(2021YFD1700803-2)和江苏省重点研发计划项目(D21YFD17008)

作者简介: 李江(1989—),女,教授,博士,主要从事农业高效用水研究,E-mail: lijia@hhu.edu.cn

通信作者: 缴锡云(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: xyjiao@hhu.edu.cn

the number of water change $G = 6.0$, and the unit width flow $q = 7.0 \text{ L}/(\text{m}\cdot\text{s})$. The results of this study can provide a scientific basis for the regulation of irrigation technology elements under the initial moisture content of border soil caused by rainfall runoff.

Key words: border irrigation; initial soil moisture content; irrigation performance; irrigation technical elements; regulation and optimization

0 引言

畦灌是常用的地面灌水方式之一,具有田间设施简单、运行成本低、易于实施等优点,同时也存在灌水质量不高的问题^[1-2]。在畦灌过程中,土壤水分参与与地表水流运动同时进行,两者密切联系、相互作用,共同影响灌水质量。田面坡降是畦田的自然特征,自然坡降使得灌溉水在重力及水流推动作用下从畦首顺坡降流向畦尾。在我国半干旱半湿润地区以及湿润地区,降雨亦会通过畦田的自然坡降发生入渗以及产生径流,若降雨历时过长或雨强过大,在封闭畦田的尾部还可能形成积水,降雨产流之后的畦田沿畦长方向会出现一定程度上的土壤水分分布不均匀现象^[3]。土壤水分状态是影响土壤入渗性能以及农田作物耗水的重要因素,早期关于畦灌技术要素设计的相关研究表明土壤入渗的空间变异性对灌水质量的影响尤为显著^[4-5]。因此,降雨产流所形成的土壤水分空间变异,将会通过影响土壤入渗性能进而影响畦灌水流运动特性,使得按一般情况设计的畦灌技术要素不能满足灌水质量最高的要求。

畦田规格、田面坡度、入畦流量、改水成数等灌水技术要素是影响畦灌灌水质量的重要因素^[6-11],试验观测与模型模拟是研究不同技术要素控制条件下畦灌水流运动的有效手段。畦灌模型模拟可以减少试验次数,通过数值计算的方式很好地描述和再现畦灌水流运动过程,帮助学者对比大量预设灌水技术条件下的灌水质量,并从中推荐较优的灌水技术方案^[12-15]。目前常用的畦灌模拟软件有 WinSRFR 和 SIRMOD,二者被广泛地应用于解决不同单宽流量、改水成数、土壤特性、畦田规格等因素对于灌水质量的影响问题^[2, 16-19]。针对土壤入渗性能的空间变异性,已有学者对不同土壤入渗性能条件下的畦灌灌水质量进行评价以及对灌水技术要素进行设计^[20-22]。

然而,现有考虑土壤入渗性能空间变异性的研究多是将土壤入渗性能作为土壤的固定属性来进行统计上的分析,并且假定灌水前畦田土壤初始含水率为均匀的分布状态,很少考虑初始土壤水分空间变异性对于畦灌水流运动以及灌水质量的影响。降

雨产流等因素导致的畦田土壤含水率分布不均匀,及其对畦田作物耗水强度、灌水前土壤入渗性能以及灌水质量的影响等相关问题还有待进一步探讨。因此,针对降雨产流后畦田土壤初始含水率沿程不均匀分布的情况,本研究开展一维土柱入渗试验、二维土槽灌溉试验,进一步结合 WinSRFR 地面灌溉模拟模型,探讨初始含水率沿程不均匀对畦灌田面水流运动和灌水质量的影响规律,优化求解畦灌技术要素,以期土壤初始含水率沿程不均匀条件下畦灌技术要素调控提供科学依据。

1 材料与方法

本研究首先获取不同初始含水率条件下的入渗参数,进一步对畦田灌水技术要素进行调控。具体来说,开展一维土柱入渗试验,确定 Koistiakov 模型中入渗参数随初始含水率的变化关系式;同时,在土槽中开展含水率沿程不均匀条件下的畦灌试验,观测田面水流运动状况,利用拟合好的入渗参数随初始含水率变化的函数计算沿程入渗量,并对不同处理下的灌水质量进行评价;其次,将拟合的入渗参数随初始含水率的变化关系式代入 WinSRFR 模型,对土槽试验中的畦灌水流运动进行模拟,对比实测数据与模拟数据,对模型进行验证;最后,设置不同畦灌技术要素组合,利用验证好的 WinsSRFR 模型开展初始含水率沿程不均匀条件下的畦灌技术要素优化,最终针对由降雨产流导致的畦田水分不均匀状态,对畦灌技术要素进行调控。具体研究方法如图 1 所示。

1.1 不同初始含水率条件下入渗参数获取

1.1.1 试验设计

试验于 2021 年 6 月在河海大学节水园区节水与农业生态试验场(31°86'N,118°60'E)开展,供试土壤为粉砂壤土,其砂粒、粉粒、黏粒质量分数分别为 17.92%、80.97%、1.11%,容重 $1.30 \text{ g}/\text{cm}^3$,电导率 $2.18 \text{ dS}/\text{m}$ 。土柱试验采用直径 10 cm、高 100 cm 的有机玻璃土柱以及直径 15 cm 的马氏瓶开展;一维土柱入渗试验共设置 8 个处理,其初始土壤体积含水率分别为 0.11、0.15、0.17、0.19、0.20、0.22、0.23、0.25 m^3/m^3 (T1 ~ T8);各处理入渗水深均为 20 mm;入渗时长为 70 min;试验过程中实时观测并

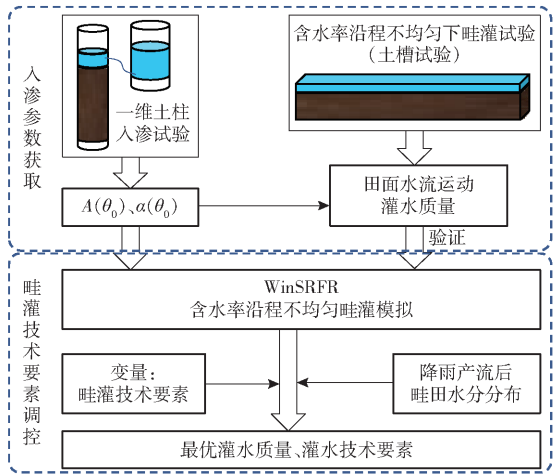


图1 土壤初始含水率沿程不均匀条件下畦灌灌水技术要素调控流程图

Fig.1 Flowchart of border irrigation technical elements regulation under uneven initial soil moisture condition

记录马氏瓶水位变化。

土槽畦灌试验装置长 10 m、宽 1.5 m、高 1.05 m,土槽内土壤深度 85 cm、表面坡度 0.2%、灌水定额 40 mm,入畦单宽流量 q 为 1.0 L/(m·s),改水成数 G 为 9.0,根据曼宁公式计算田面糙率为 0.20。土槽试验共设置 3 个处理(TC1、TC2、TC3),各处理畦首土壤初始体积含水率均为 0.17 m³/m³,其初始体积含水率沿程每 2.5 m 增加 0.3%、5%。试验过程中观测累积灌水量、田面水流推进及消退时间以及土槽底部深层渗漏量。

1.1.2 入渗参数拟合及累积入渗量计算

采用 Koistiakov 模型进行一维土壤入渗量计算,其公式为

$$I = A(\theta_0) t^{\alpha(\theta_0)}$$

式中 I ——累积入渗量,m

t ——入渗时间,s

$\alpha(\theta_0)$ ——入渗指数

$A(\theta_0)$ ——入渗系数

通过一维土柱入渗试验得到不同初始含水率下的累积入渗量,对入渗系数 $A(\theta_0)$ 及入渗指数 $\alpha(\theta_0)$ 进行公式拟合,将拟合的公式代入 Kostivakov 模型,计算土槽试验中土槽沿程各点的累积入渗量,并对比各点累积入渗量与计划灌水量之间的关系。

1.2 畦灌技术要素调控

1.2.1 WinSRFR 模型应用

WinSRFR^[23] 是基于零惯性量模型的田面水流运动模拟软件,它可以通过数值分析的方法,模拟地面灌溉过程的进行动态,直观地反映田面水流的推进和消退过程,且能够较准确地评价灌水质量。该

软件输入数据有:田块规格(田块的长、宽和田面坡度)、土壤参数(入渗参数和田面糙率)、灌溉管理参数(计划灌水量、单宽流量和灌水时间(改水成数))。输出结果包括:田面水流推进、消退曲线,入渗水深和累积入渗量沿程分布情况,灌水效率以及储水效率等数据。对比土槽试验中实测的田面水流推进时间、消退时间及灌水质量指标与 WinSRFR 模拟结果,计算决定系数 R^2 和均方根误差(RMSE),对 WinSRFR 模型进行验证。

1.2.2 灌水技术要素优化

选择常见的灌水效率 E_a 、灌水均匀度 E_d 和储水效率 E_s 3 个指标对土槽试验中不同处理的灌水质量进行评价,其公式分别为

$$\begin{cases} E_a = \frac{W_s}{W_f} \times 100\% \\ E_d = \frac{Z_{\min}}{Z_{av}} \times 100\% \\ E_s = \frac{W_s}{Z_r} \times 100\% \end{cases} \quad (2)$$

式中 W_s ——灌后计划湿润层水量,用水深表示,mm

W_f ——灌入田间总水量,mm

Z_{av} ——畦田平均入渗深度,mm

$Z_{\min}$ ——畦田最小入渗深度,mm

Z_r ——计划湿润层理论需水量,mm

从式(2)可知,灌水均匀度 E_d 无法准确反映灌后土壤水分分布的均匀情况,而针对初始含水率不均匀分布的畦灌来说灌后水分的均匀程度尤为重要,因此针对初始含水率沿程不均匀的情况,引入灌后土壤水分均匀度 E_u 对灌水质量进行评价,其公式为

$$E_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left| Z_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \right|}{\sum_{i=1}^n Z_i} \quad (3)$$

其中 $Z_i = Z + \theta_i h$

式中 Z_i ——观测点总水深,观测点沿畦长方向均匀分布,mm

n ——观测点总数,根据畦田长度,每 1.0 m 取一个观测点

Z ——观测点累积入渗量,mm

θ_i ——观测点初始含水率,m³/m³

h ——计划湿润层深度,取 500 mm

初始含水率沿程不均匀条件下畦田灌水技术要素调控的目标函数为

$$\max E_m = \max(aE_a + bE_u + cE_s) \quad (4)$$

式中 E_m ——灌水质量综合评价指标,其与 E_a 、 E_u 、 E_s 均是关于灌水技术要素组合的函数

a 、 b 、 c ——权重系数,取值均为 1/3

本文选择位于半湿润半干旱地区的河北省沧州市为研究区,根据当地的实际情况,选择入畦单宽流量 q 、畦田长度 L 和改水成数 G 作为灌水技术要素变量,其取值范围分别为:3 ~ 9 L/(m·s)、60 ~ 100 m、6 ~ 8,在各取值范围内将单宽流量平均分为 7 个水平、畦田长度平均分为 9 个水平、改水成数平均分为 5 个水平,一共 315 种灌水技术要素组合,利用验证好的 WinSRFR 模型进行模拟,寻求畦田土壤初始含水率沿程增加情况下的最优灌水技术要素组合,最终实现对由降雨径流产生的初始含水率沿程不均匀分布下的畦田灌水技术要素调控。

2 结果与分析

2.1 初始含水率对入渗性能的影响

图 2a(图中 ob 表示观测值;sim 表示 Koistiakov 模型模拟值)中散点表示不同初始含水率状态下土壤累积入渗量的实测值,试验结果显示不同初始含水率条件下累积入渗量随时间的推移而逐渐增加,先表现为非线性特征,而后逐渐转变为线性变化,即土壤入渗由非稳定入渗阶段变为稳定入渗,且随着初始含水率的增加达到稳定入渗的时间逐渐提前,说明初始含水率越高土柱内形成稳定入渗通道所需要的时间越短。当初始含水率大于等于 0.25 m³/m³(T8 处理)时,入渗很快达到稳定入渗状态,图 2a 中该处理累积入渗量的曲线可近似为一条直线。在入渗试验的 0 ~ 20 min 之间,T1 ~ T6 处理的累积入渗量差异不大;试验开始 20 min 后各处理表现出明显差异,初始含水率越低,同一时刻的累积入渗量越高。图 2a 中不同颜色直线表示用 Koistiakov 模型模拟的不同初始含水率条件下的累积入渗量,T1 ~ T8 下 Koistiakov 模型模拟累积入渗量与实测值 R^2 分别为 0.994、0.987、0.982、0.994、0.969、0.945、0.890、0.899,可见 Koistiakov 模型适用于本试验。

图 2b 表示入渗系数 A 、入渗指数 α 与土壤初始体积含水率 θ_0 的关系,结果显示当初始体积含水率 θ_0 从 11.14% 增加到 25.45% 时,入渗系数 A 从 11.10 减小至 4.49,减小幅度为 59.5%,可见在相同土壤容重、灌水深度以及土壤质地条件下,初始体积含水率 θ_0 对 Koistiakov 模型入渗系数 A 的影响较大,入渗系数 A 随初始体积含水率 θ_0 的增大而下降,且当初始体积含水率 θ_0 增大到一定程度时,入渗系数 A 减小的趋势会趋于平缓。进一步对入渗

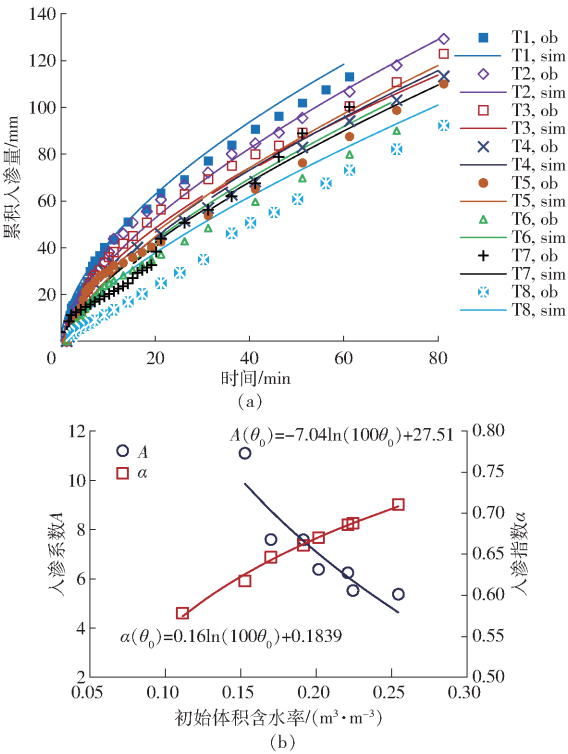


图 2 不同土壤初始含水率条件下累积入渗量随时间变化曲线和入渗系数、入渗指数随初始含水率的变化关系
Fig. 2 Cumulative irrigation, changes of irrigation coefficients and indexes under various initial soil moisture conditions

系数 A 与初始体积含水率 θ_0 进行对数拟合,拟合公式为 $A(\theta_0) = -7.04 \ln(100\theta_0) + 27.51$,拟合曲线的决定系数 R^2 为 0.98,说明入渗系数 A 与初始体积含水率 θ_0 之间符合对数关系,拟合公式的可信度较高,可用于推测不同初始含水率条件下 Koistiakov 模型的入渗系数 A 。入渗指数 α 与土壤初始体积含水率 θ_0 的变化结果显示,初始体积含水率 θ_0 对入渗指数有较大影响,入渗指数 α 随初始体积函数率 θ_0 的增大而增大,当初始体积含水率 θ_0 从 11.14% 增大到 25.45% 时,入渗指数 α 从 0.578 3 增长至 0.710 5,增大幅度为 22.86%。入渗指数 α 与初始体积含水率 θ_0 满足对数关系,其拟合公式为 $\alpha(\theta_0) = 0.16 \ln(100\theta_0) + 0.1839$,拟合曲线的 R^2 为 0.99,可信度较高,表明本公式可用于推测不同初始含水率条件下 Koistiakov 模型的入渗指数 α 。

2.2 初始含水率沿程不均匀对畦灌田面水流运动的影响

图 3a 散点表示土槽试验过程中不同初始含水率分布情况下的田面水流推进与消退情况,结果显示土槽初始含水率分布会影响田面水流推进情况,TC3 处理的初始含水率沿程增加幅度最大,其田面水流推进速度也最快,在试验开始后 5.41 min 推进至土槽末端;TC2 处理田面水流推进速度稍慢于 TC3 处理,在试验开始后 6.42 min 完成推进过程;而

TC1 处理土壤初始含水率为均匀分布,其田面水流推进速度最慢,试验开始后 7.11 min 推进至土槽末端。观察田面水流推进曲线,可以发现 3 种处理在土槽 0~3 m 处田面水流推进速度无明显差距,水流推进超过 3 m 后,田面水流推进速度开始出现差距,其速度由大到小依次为 TC3、TC2、TC1,且随着田面水流继续向前推进,田面水流推进的差距逐渐扩大。由此可以看出,随着初始含水率的增加,田面水流推进速度也随之变大,水流推进至末端所需时间减少。当改水成数不变时,土壤初始含水率越高,聚积在土槽末端的水量越大,容易形成深层渗漏,可见当土壤初始含水率沿程增加时,原定灌水方案将会造成畦田灌水质量下降。

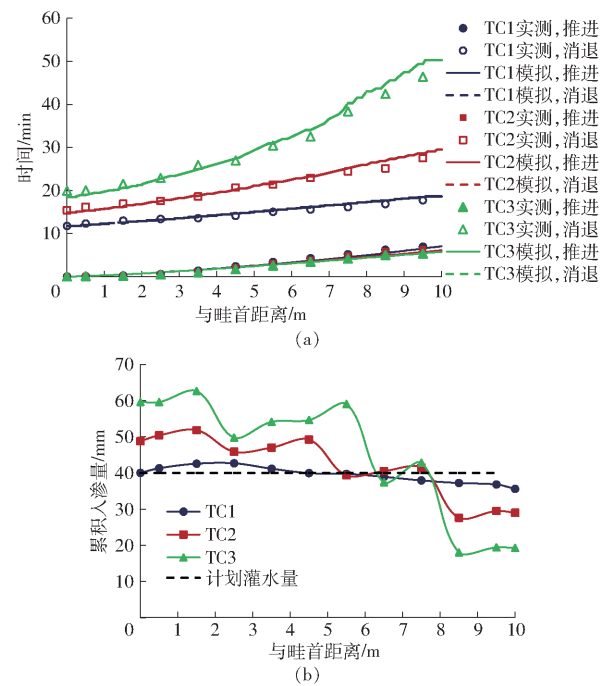


图3 不同初始含水率条件下土槽试验水流推进及消退曲线和累积入渗量分布

Fig. 3 Advances and recessions of border irrigation, and cumulative irrigation along soil box under various initial soil moisture conditions

各处理田面水流消退状况均是土槽首部最先完全消退、末端后消退。田面水流消退速度受土槽土壤初始含水率的影响较大,TC1 处理的土槽土壤初始含水率最低,且沿程均匀分布,其田面水流消退速度最快,在 17.52 min 左右完全消退,土槽首尾消退时间差只有 5.77 min;TC2 处理的田面水流消退速度相较于 TC1 出现了明显降低,在 27.48 min 左右完全消退,土槽首尾消退时间差变大,为 12.08 min,超过 TC1 处理的 2 倍;TC3 处理土壤初始含水率沿程增加幅度最大,该处理田面水流消退速度较 TC1 处理下降更为剧烈,在 46.41 min 时可实现完全

消退,且首尾消退时间差进一步拉大,达到 27.27 min,约为 TC1 处理的 5 倍。

图 3b 为土槽试验不同处理的累积入渗情况,结果显示各处理累积入渗量沿畦长方向整体上均呈下降趋势,其中 TC1 处理累积入渗量分布更加均匀,最大、最小值分别为 43.57 mm 和 35.97 mm,差距仅为 7.60 mm,但是仅距畦首 5.5 m 处满足了计划灌水需求;TC2 处理下最大、最小累积入渗量分别为 51.82、29.48 mm,两者差值为 22.34 mm,其中土槽前 0~7.5 m 部分超过了灌水定额;TC3 处理最大累积入渗量高达 62.60 mm,累积入渗量最小值仅为 18.01 mm,差距高达 44.59 mm,该处理也能保证土槽前 7.5 m 处的灌水量。由此可见,土壤初始含水率沿程增加的情况下,随着土壤初始含水率的升高,田面水流虽然会向土槽末端汇聚,但由于土槽首部初始含水率低,土壤入渗能力更强,田面水位下降速度快,停止灌水后,田面水流会出现倒流现象,首尾初始含水率差值越大,倒流现象越明显,因此累积入渗量差值也越大,换言之当土壤初始含水率沿程增加的幅度越大,其灌水均匀性越差。

2.3 初始含水率沿程不均匀对畦田灌水质量的影响

灌溉后不同处理土槽土壤含水率分布如图 4a 所示,结合土槽土壤初始含水率分布情况分析可知,灌溉后各处理土槽首部表层土壤含水率最高(体积含水率均超过 $0.50 \text{ m}^3/\text{m}^3$)。TC1 处理土壤初始含水率较低且沿程均匀分布,其入渗深度较为均匀,均在 40 cm 左右;TC2 处理距畦首 1.0 m 处入渗深度达到 55 cm,而 9~10 m 处入渗深度较小,仅为 35 cm;TC3 处理整体入渗深度大于前 2 个处理,平均入渗深度为 60 cm,距畦首 2.0 m 处入渗深度超过 70 cm,可形成深层渗漏。

不同处理灌水质量评价结果显示(图 4b),在灌水技术要素保持不变的条件下,各处理储水效率均保持在一个较高的水平,分别为 98.57%、97.12% 和 100%;TC1 处理灌水效率和灌水均匀度最高,分别为 100% 和 92.50%,TC3 处理最低,灌水效率和灌水均匀度分别为 91.56% 和 45.50%,说明 TC1 处理对灌入水分的利用效率最高,灌溉水量沿畦长方向上分布更加均匀。综合灌水质量指标 E_m 结果显示,TC1 处理灌水质量综合评价指标最高(97.86%),TC3 处理最低(91.85%)。由此可见,土壤初始含水率沿程增加时,按初始含水率均匀分布状态下的灌水技术要素组合进行灌溉会导致灌水质量下降,且土壤初始含水率沿程增幅越大,灌水质量下降越明显。

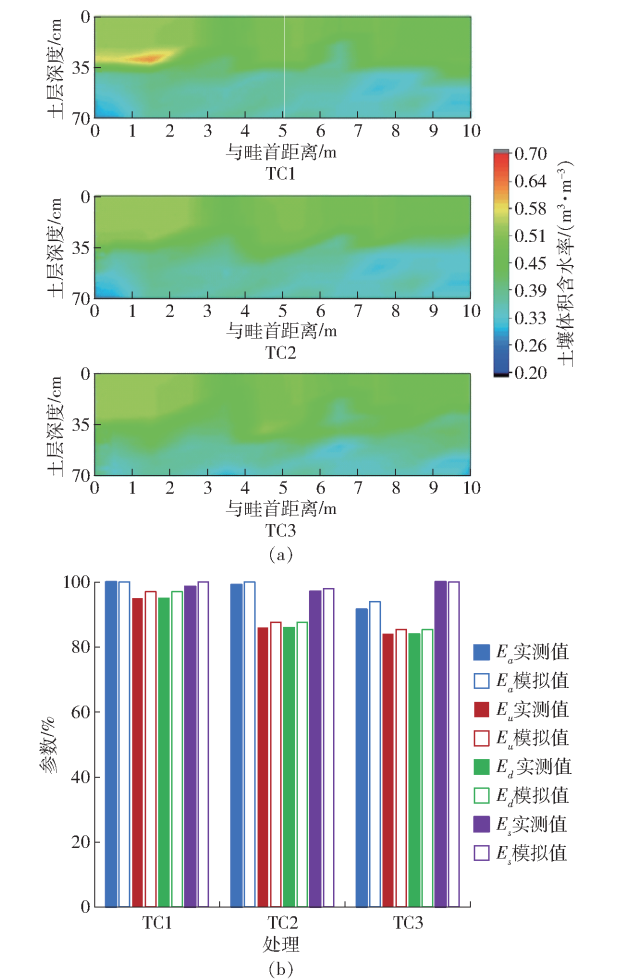


图 4 不同处理灌后土槽土壤水分分布和灌水质量评价指标
Fig. 4 Distributions of soil moisture and evaluation indexes of irrigation quality under different experiment treatments

2.4 土壤初始含水率沿程不均匀条件下畦灌技术要素优化

2.4.1 WinSRFR 模型验证

基于土槽试验土壤初始含水率分布情况,结合土柱试验得到的入渗系数、入渗指数与土壤初始含水率关系式,得到 WinSRFR 模型所需的模拟参数(表 1)。利用 WinSRFR 模型模拟土槽灌溉试验中的田面水流运动,模拟结果如图 3a 实线所示,结果显示,各处理土槽中后段田面水流推进速度实测值小于模拟值,这是由于试验过程中田面实际水深大于试验设计值,导致实际土壤入渗能力大于理论计算值,使得田面水流推进实际速度小于模拟值。而同样在土槽中后段,实测水流消退速度较模拟结果更快,这是因为 WinSRFR 数学模型假定只存在垂向入渗,实际试验中存在的水平入渗使得消退速度变快。TC1 处理实测和模拟水流推进、消退曲线均属于强相关性, R^2 均大于 0.99,两者推进时间的 RMSE 仅有 0.41 min,占整体推进时间的 5.77%,消退曲线 RMSE 为 0.56 min,占总时间的 3.16%;TC2 处理实

测和模拟水流推进、消退曲线也属于强相关性, R^2 均大于 0.99,其水流推进模拟与实测 RMSE 为 0.46 min,占整体推进时间的 7.29%,TC2 处理田面水流消退模拟与实测 RMSE 为 0.82 min,占总时间的 2.98%;TC3 处理实测和模拟水流推进、消退曲线相关性良好, R^2 均大于 0.99,其水流推进模拟与实测 RMSE 为 0.38 min,占整体推进时间的 7.13%,TC3 处理田面水流消退模拟与实测 RMSE 为 1.55 min,占总时间的 3.36%。

表 1 WinSRFR 模拟所需入渗参数
Tab.1 List of parameters for irrigation in WinSRFR model

试验处理	与畦首距离/m	初始体积分水率 $\theta_0/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$	入渗参数	
			入渗系数 A	入渗指数 α
TC1	0 ~ 2.5	0.175 0	6.59	0.732 3
	2.5 ~ 5	0.176 8	6.49	0.734 5
	5 ~ 7.5	0.176 4	6.51	0.734 1
	7.5 ~ 10	0.173 7	6.66	0.730 6
TC2	0 ~ 2.5	0.175 0	6.59	0.732 3
	2.5 ~ 5	0.200 5	5.30	0.762 2
	5 ~ 7.5	0.231 8	3.92	0.794 1
	7.5 ~ 10	0.273 2	2.35	0.830 3
TC3	0 ~ 2.5	0.172 3	7.47	0.681 9
	2.5 ~ 5	0.221 6	5.70	0.722 1
	5 ~ 7.5	0.275 7	4.16	0.757 1
	7.5 ~ 10	0.322 2	3.06	0.782 0

由图 4b 可知, E_a 、 E_u 和 E_s 的模拟值均高于实测值,其误差均在 5% 以内,均方根误差分别为 1.49%、1.65% 和 0.97%。综合田面水流运动及灌水质量评价指标模拟与实测对比结果可见,将本研究得到的土壤初始含水率与入渗指数、入渗系数关系式代入 WinSRFR 模型来模拟畦灌田面水流运动以及评价畦灌灌水质量的准确性良好,结果可靠,可用于进行初始含水率沿程不均匀的畦灌水流运动模拟及灌水技术要素优化。

2.4.2 降雨后畦田参数分布

参考文献[24-28],假定畦田降雨产流后土壤含水率沿程均匀增加,并且设定畦首土壤含水率为 $0.1890\text{ m}^3/\text{m}^3$,畦尾土壤含水率为 $0.4643\text{ m}^3/\text{m}^3$,则畦田土壤初始含水率分布函数为

$$\theta_0(x)=0.189+\frac{0.2753x}{L}$$

(5)

式中 $\theta_0(x)$ ——与畦首距离 x 处土壤初始体积分水率, m^3/m^3

x ——与畦首距离,m

将降雨后畦田土壤初始体积分水率分布函数(式(5))代入土柱试验得到入渗系数和入渗指数与

土壤初始含水率的对数关系式,得到降雨产流后畦田入渗参数分布情况,即

$$\begin{cases} A(x) = -7.04\ln\left(18.90 + \frac{27.53x}{L}\right) + 27.51 \\ \alpha(x) = 0.16\ln\left(18.90 + \frac{27.53x}{L}\right) + 0.1839 \end{cases}$$

(6)

式中 $A(x)$ ——与畦首距离 x 处土壤入渗系数
 $\alpha(x)$ ——与畦首距离 x 处土壤入渗指数

2.4.3 畦灌技术要素优化

图 5 表示不同灌水技术要素组合下,降雨产流导致的畦田初始含水率不均匀情况下的灌水质量模拟结果。如图 5 所示,在畦田土壤初始含水率沿程增加的条件,当改水成数 G 在 6.0 ~ 6.5、单宽流量 q 在 5 ~ 9 L/(m·s)、畦田长度 L 在 80 ~ 100 m 之间时,灌水质量综合评价指标均高于

80.0%;当改水成数 G 在 7 ~ 8、单宽流量 q 在 4 ~ 5 L/(m·s)、畦田长度 L 在 75 ~ 100 m 之间时,畦田灌水质量综合评价指标均在 75.0% 以上;相同畦田长度 L 和入畦单宽流量 q 条件下,畦田灌水质量随着改水成数 G 的增大而逐渐减小,相同改水成数 G 和单宽流量 q 条件下,畦田灌水质量随着畦田长度 L 的增加而增加。当土壤初始体积含水率沿程由 0.189 0 m³/m³ 均匀增加至 0.464 3 m³/m³ 时,为保证畦田灌水质量、提高水分利用率,改水成数 G 宜取 6.0 ~ 6.5、单宽流量 q 应控制在 5 ~ 9 L/(m·s) 之间,畦田长度 L 宜设定为 80 ~ 100 m 之间。当畦田长度 L 为 85 m、单宽流量 q 为 7 L/(m·s)、改水成数 G 为 6 时,土壤初始含水率沿程增加的畦田灌水质量最高,其灌水效率 E_a 为 75.0%,土壤水分均匀度 E_u 为 78.3%,储水效率 E_s 为 100%,其灌水质量综合评价指标为 84.5%。

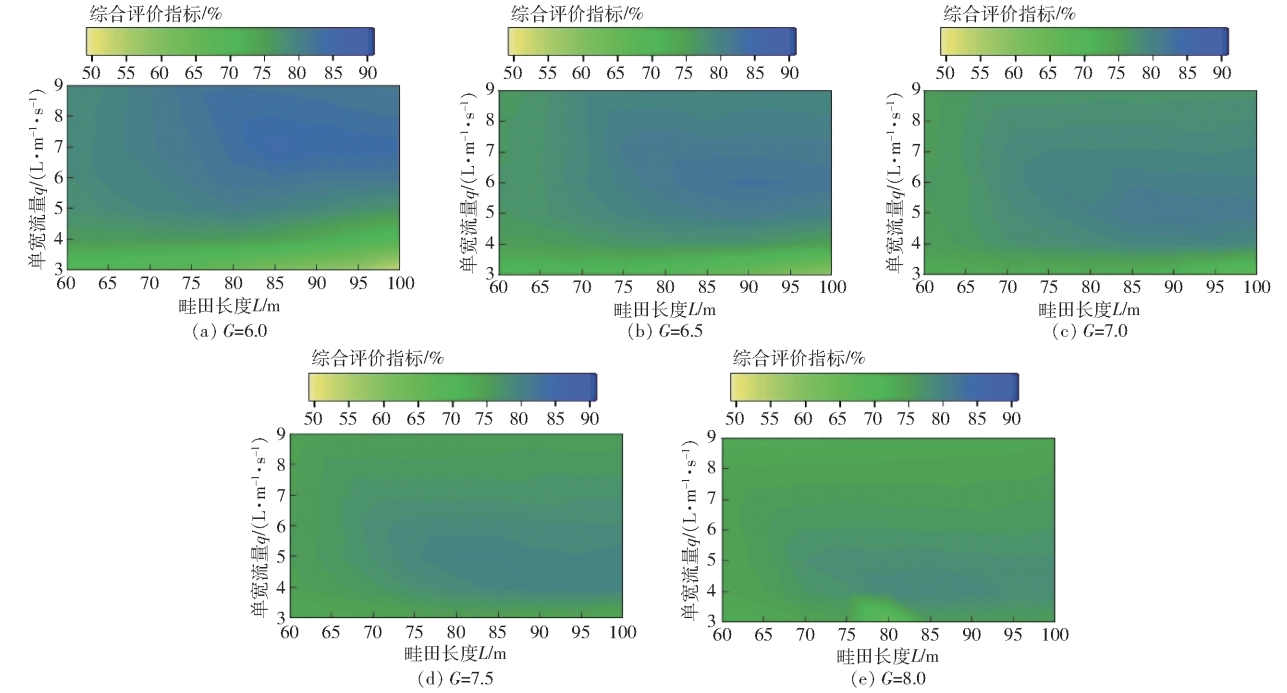


图 5 不同灌水技术要素组合下灌水质量分布图

Fig. 5 Irrigation quality distribution under different combinations of irrigation technical factors

3 讨论

土壤累积入渗量可反映土壤入渗能力,本研究发现入渗初期累积入渗量随初始含水率的增大而减小,这与张强伟等^[29]的试验结果一致,可见土壤初始含水率是影响水分入渗能力的关键因素^[30]。在土壤水分入渗初期,本研究各组初始体积含水率差异较大,随着入渗过程的推进各组含水率差异逐渐缩小,累积入渗量之间的差异也随之减小。当土壤初始含水率较低且处于非饱和状态时,水分入渗主要靠土壤基质势以及毛管力驱动,即因灌溉来水,上

层土壤含水率快速升高,与下层土壤间形成较大水势梯度,进而促进水分入渗^[31]。当土壤初始含水率较高时,土壤团聚体遇水易出现膨胀崩解现象使得土壤孔隙度降低,形成不透水结皮,从而降低土壤入渗速率^[32]。

Koistivakov 模型的入渗系数与土壤水势、结构和质地有关^[33]。在土壤结构和质地相同的条件下,土壤水势是影响入渗系数的唯一因素,而土壤水势与土壤含水率之间存在函数关系^[34]。土壤水分入渗中后期,表层土壤迅速饱和,水分运动可近似看成饱和土壤水分运动^[35];当过水面积不变时,土壤入

渗透量由水势梯度决定,而在此条件下水势梯度由土壤含水率决定,初始含水率越低水势梯度越高,入渗系数越大。入渗指数反映入渗过程中土壤入渗能力的衰减情况,其值与土壤水势以及土壤质地有关^[36-37]。在土壤质地相同的条件下,入渗指数只受土壤水势的影响。水分入渗过程中,土壤初始含水率越高,过水断面上下含水率差值越小,水势梯度越小,入渗过程越难,土壤入渗能力衰减得更加明显,入渗指数会有所增大^[38]。

畦灌水流运动可分为沿畦长方向推进以及向下入渗两部分,水流运动受畦田坡度、田面糙率以及畦田初始含水率等因素影响^[39-41]。土壤初始含水率是影响土壤入渗性能的关键因素,入渗速率影响畦灌水流消退过程^[42]。本研究中土槽试验结果显示,在土槽相同位置上田面水流消退时间由小到大依次为 TC1、TC2、TC3(图 3a),且各处理间消退时间差随着位置逐渐向土槽末端靠近而逐渐变大。这是由于初始含水率越高土壤入渗能力越低,当灌水定额和改水成数一定时,畦田土壤初始含水率沿程增加,会导致畦灌水流入渗逐渐受阻,田面水流消退沿程逐渐变慢。本试验还发现,初始含水率较高时,畦灌水流推进速度较快,这是由于高含水率条件下土壤颗粒蓄水能力较弱,土壤水力传导度提高,减少了水流在水平方向上的运移阻力^[43],加之初始含水率较高处水流消退速度较慢,会导致此处土壤表面受水时间过长,即入渗过程偏长,但由于初始含水率升高会降低土壤的入渗能力,故初始含水率对畦田灌水质量的影响还有待进一步研究。畦田初始含水率影响畦田水流运动,进一步会影响灌后土壤水分分布情况;灌水效率、灌水均匀度、储水效率等畦灌评价指标均与灌后土壤含水率有关^[44]。在畦灌技术要素相同的情况下,畦田含水率沿程越不均匀,灌水质量越低(图 4b),说明在初始含水率不均匀的条件下,若依然按照畦田初始含水率均匀条件制定的畦灌技术要素进行灌溉会降低灌水质量。

本研究发现,在畦田初始含水率沿程增加条件下,当畦田长度大于 80 m 时灌水质量较优,这与

聂卫波等^[45]的结论一致;这是由于畦田过短,畦田末端易出现壅水现象,进而增大田间渗漏,同时畦田初始含水率沿程增加又会加重这一现象,进一步降低灌水质量。有研究^[46]认为,畦田长度 30 m 内单宽流量对灌水质量无显著影响,而本研究结果显示,在改水成数为 6 的情况下,高单宽流量可以取得较高灌水质量,这可能是因为选择较大的单宽流量可以克服田面糙率对灌水质量造成的不利影响,加强水流对地面的冲刷作用,促进土壤颗粒运移从而提高田面平整度,进而改善灌水质量^[47],但实际灌溉中盲目加大入畦流量不仅会增加渗漏风险还易破坏作物,因此,仍需依据实际情况制定畦灌技术要素。本研究认为畦田灌水质量随着改水成数 G 的增大而逐渐减小,该结论与王洋等^[48]的试验结果存在差异,这是由于在土壤含水率沿程增加的条件下,过晚的改水易使畦田末端产生壅水,发生深层渗漏,降低灌水效率以及灌水均匀度,进而影响灌水质量评价^[49]。综上,本研究认为在畦田土壤初始含水率沿程增加的模拟条件下,畦田长度 L 为 85 m、单宽流量 q 为 7.0 L/(m·s)、改水成数 G 为 6 时可获得最优灌水质量。

4 结束语

本文结合一维土柱入渗试验及二维土槽灌溉试验数据,利用 WinSRFR 模型模拟降雨产流后畦灌过程,获取灌水质量评价指标,从而对畦灌技术要素进行调控优化。结果表明,在相同土壤容重、灌水深度以及土壤质地条件下,入渗系数随土壤初始含水率的增大而减小,入渗指数随土壤初始含水率的增大而增大;土壤初始含水率沿程增加的条件下,畦田田面水流推进速度加快,消退速度减缓,畦田首尾入渗不均匀,若以正常灌水技术要素组合进行灌溉会引起灌水质量下降;通过灌溉技术要素优化可得,当畦田长度 L 为 85 m、单宽流量 q 为 7.0 L/(m·s)、改水成数 G 为 6 时,土壤初始含水率沿程增加的畦田灌水质量最高,其灌水效率 E_a 为 75.0%,土壤水分均匀度 E_u 为 78.3%,储水效率 E_s 为 100%,综合灌水质量为 84.5%。

参 考 文 献

[1] 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.
NIE Weibo, REN Changjiang, FEI Liangjun, et al. Irrigation performance evaluation model for border irrigation based on dimensional analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 46-53. (in Chinese)
[2] XU J, CAI H, SADDIQUE Q, et al. Evaluation and optimization of border irrigation in different irrigation seasons based on temporal variation of infiltration and roughness[J]. Agricultural Water Management, 2019, 214: 64-77.
[3] LIU X, QIU J, ZHANG D. Characteristics of slope runoff and soil water content in benggang colluvium under simulated rainfall[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18: 39-48.
[4] 白美健,许迪,李益农. 不同微地形条件下入渗空间变异对畦灌性能影响分析[J]. 水利学报,2010, 41(6): 732-738.

- BAI Meijian, XU Di, LI Yinong. Effects of spatial variability of infiltration on basin irrigation performance under different microtopography conditions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(6): 732–738. (in Chinese)
- [5] 朱艳, 缴锡云, 王维汉, 等. 畦灌土壤入渗参数的空间变异性及其对灌水质量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(3): 46–49.
- ZHU Yan, JIAO Xiyun, WANG Weiha, et al. Spatial variability of infiltration parameters and its influences on border irrigation performance[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(3): 46–49. (in Chinese)
- [6] 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): 349–354.
- JIAO Xiyun, WANG Weiha, WANG Zhitao, et al. Robust design of border irrigation based on the Taguchi method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(3): 349–354. (in Chinese)
- [7] ANWAR A A, AHMAD W, BHATTI M T, et al. The potential of precision surface irrigation in the Indus Basin Irrigation System[J]. *Irrigation Science*, 2016, 34(5): 379–396.
- [8] SMITH R J, UDDIN M J, GILLIES M H. Estimating irrigation duration for high performance furrow irrigation on cracking clay soils[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 206: 78–85.
- [9] SEYEDZADEH A, PANAHI A, MAROUFPOOR E, et al. Development of an analytical method for estimating Manning's coefficient of roughness for border irrigation[J]. *Irrigation Science*, 2019, 37(4): 523–531.
- [10] 史源, 白美健, 李益农, 等. 基于 SISM 模型和畦灌技术的冬小麦最小灌水定额研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(8): 278–286.
- SHI Yuan, BAI Meijian, LI Yinong, et al. Minimum irrigation quota of winter wheat based on SISM model and border irrigation technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(8): 278–286. (in Chinese)
- [11] EBRAHIMIAN H, DIALAMEH B, MOGHARI S M H, et al. Optimal conjunctive use of aqua-agriculture reservoir and irrigation canal for paddy fields[J]. *Paddy and Water Environment*, 2020, 18(5): 499–514.
- [12] 白美健, 李益农, 涂书芳, 等. 畦灌关口时间优化改善灌水质量分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 105–110.
- BAI Meijian, LI Yinong, TU Shufang, et al. Analysis on cutoff time optimization of border irrigation to improve irrigated water quality[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(2): 105–110. (in Chinese)
- [13] AKBARI M, GHEYSAARI M, MOSTAFAZADEH-FARD B, et al. Surface irrigation simulation-optimization model based on Meta-Heuristic algorithms[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 46–57.
- [14] 范雷雷, 史海滨, 李瑞平, 等. 河套灌区畦灌灌水质量评价与优化[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(6): 315–321, 337.
- FAN Leilei, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Evaluation and optimization of border irrigation performance in Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(6): 315–321, 337. (in Chinese)
- [15] MAZAREI R, MOHAMMADI A S, NASERI A A, et al. Optimization of furrow irrigation performance of sugarcane fields based on inflow and geometric parameters using WinSRFR in Southwest of Iran[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: 105899.
- [16] 白寅祯, 魏占民, 张健, 等. 基于 WinSRFR 软件的河套灌区水平畦田规格的优化[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(9): 823–828.
- BAI Yinzhen, WEI Zhanmin, ZHANG Jian, et al. WinSRFR software-based optimization of horizontal border patch size in Hetao Irrigation District[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(9): 823–828. (in Chinese)
- [17] 蔡焕杰, 徐家屯, 王健, 等. 基于 WinSRFR 模拟灌溉农田土壤入渗参数年变化规律[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 92–98.
- CAI Huanjie, XU Jiataun, WANG Jian, et al. Yearly variation of soil infiltration parameters in irrigated field based on WinSRFR[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(2): 92–98. (in Chinese)
- [18] WU D, XUE J, BO X, et al. Simulation of irrigation uniformity and optimization of irrigation technical parameters based on the SIRMOD model under alternate furrow irrigation[J]. *Irrigation and Drainage*, 2017, 66: 478–491.
- [19] SALAHOU M K, JIAO X, LV H. Border irrigation performance with distance-based cut-off[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 27–37.
- [20] 聂卫波, 张凡, 马孝义, 等. 基于土壤入渗变异性的畦灌单宽流量优化[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(16): 119–126.
- NIE Weibo, ZHANG Fan, MA Xiaoyi, et al. Optimization of discharge per unit width of border irrigation based on soil infiltration variability[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(16): 119–126. (in Chinese)
- [21] NIE W, HUANG H, MA X, et al. Evaluation of closed-end border irrigation accounting for soil infiltration variability[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2017, 143(6): 4017008.
- [22] NIE W, LI Y, ZHANG F, et al. Optimal discharge for closed-end border irrigation under soil infiltration variability[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 58–65.
- [23] 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.
- [24] 刘小璐, 鲁克新, 李鹏, 等. 不同降雨条件下坡面土壤水分入渗过程研究与模拟[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(11): 114–118.
- LIU Xiaolu, LU Kexin, LI Peng, et al. Research and simulation of soil water infiltration on slope under different rain-fall conditions[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(11): 114–118. (in Chinese)

[25] 郑太辉, 汤崇军, 徐铭泽, 等. 不同水保措施下红壤坡耕地浅层土壤水分含量对降雨的响应[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 113 – 119.
ZHENG Taihui, TANG Chongjun, XU Mingze, et al. Response of surface soil water contents to rainfall on red soil sloping farmland under different soil conservation measures[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 113 – 119. (in Chinese)

[26] 周洲. 不同降雨条件下土壤水分的响应规律与模拟研究——以粘土为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
ZHOU Zhou. Research of response laws and simulation of soil water under different rainfall conditions—taking clay as an example[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016. (in Chinese)

[27] 徐旭, 席越, 姚文娟. 基于降雨入渗全过程的非饱和湿润峰模型[J]. 水利学报, 2019, 50(9): 1095 – 1102.
XU Xu, XI Yue, YAO Wenjuan. Unsaturated wetting front model based on the whole process of rainfall infiltration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(9): 1095 – 1102. (in Chinese)

[28] 唐扬, 殷坤龙, 汪洋, 等. 斜坡降雨入渗的改进 Mein – Larson 模型[J]. 地球科学, 2017, 42(4): 634 – 640.
TANG Yang, YIN Kunlong, WANG Yang, et al. The landslide rain infiltration based on the improved Mein – Larson model[J]. Earth Science, 2017, 42(4): 634 – 640. (in Chinese)

[29] 张强伟, 亢勇. 初始含水率对微润灌土壤水盐运移的影响[J]. 现代农业科技, 2018(13): 183 – 186.
ZHANG Qiangwei, KANG Yong. Effect of soil initial water content on soil water and salt movement of moistube-irrigation[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(13): 183 – 186. (in Chinese)

[30] 张豫川, 刘智璠, 高旭龙, 等. 非饱和黄土场地水分入渗规律及影响因素的现场试验与数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 965 – 972.
ZHANG Yuchuan, LIU Zhipan, GAO Xulong, et al. Field test and numerical simulation of water infiltration law and influencing factors of unsaturated loess site[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(3): 965 – 972. (in Chinese)

[31] 武敏, 冯绍元. 不同地下水埋深土壤水分入渗规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(增刊): 79 – 81.
WU Min, FENG Shaoyuan. Study on soil water infiltration law under different water tables[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(Supp.): 79 – 81. (in Chinese)

[32] LIU H, LEI T W, ZHAO J, et al. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(1 – 2): 24 – 32.

[33] 岳海晶, 樊贵盛. 土壤入渗模型参数的多元线性预测模型精度的对比分析[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 73 – 77.
YUE Haijing, FAN Guisheng. Comparison of multivariate linear prediction model precision of soil infiltration model parameters[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(10): 73 – 77. (in Chinese)

[34] 吴沿友, 胡林生, 谷睿智, 等. 两种土壤含水量与水势关系[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(4): 351 – 356.
WU Yanyou, HU Linsheng, GU Ruizhi, et al. Relationship between soil water potential and water content of two soils[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(4): 351 – 356. (in Chinese)

[35] 马蒙蒙, 林青, 徐绍辉. 不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 347 – 358.
MA Mengmeng, LIN Qing, XU Shaohui. Water infiltration characteristics of layered soil under influences of different factors and estimation of hydraulic parameters[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 347 – 358. (in Chinese)

[36] 刘炜杰, 马建刚. 土内气阻对土壤入渗的影响研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2023, 35(1): 27 – 34.
LIU Weijie, MA Jian'gang. Study progress on the impact of air resistance in soil to the soil infiltration[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2023, 35(1): 27 – 34. (in Chinese)

[37] BASSET C, ABOUNAJM M, GHEZZEHEI T, et al. How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review[J]. Soil & Tillage Research, 2023, 226: 105577.

[38] 康金林, 杨洁, 刘窑军, 等. 初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 122 – 126.
KANG Jinlin, YANG Jie, LIU Yaojun, et al. Impacts of soil initial water content and bulk density on infiltration law of red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 122 – 126. (in Chinese)

[39] 聂卫波, 董书鑫, 马孝义. 基于灌区尺度的畦田规格优化研究——以泾惠渠灌区为例[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(4): 113 – 120.
NIE Weibo, DONG Shuxin, MA Xiaoyi. Methods to optimize irrigation furrows at district scale: taking Jinghui Irrigation District as an example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(4): 113 – 120. (in Chinese)

[40] 刘洋, 孙秀路, 孙浩, 等. 利用 WinSRFR 模拟畦灌入渗参数和灌水质量变化规律[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 88 – 93.
LIU Yang, SUN Xiulu, SUN Hao, et al. Using WinSRFR to simulate water flow and infiltration under border irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(6): 88 – 93. (in Chinese)

[41] GONCALVES J M, MUGA A P, HORST M G, et al. Furrow irrigation design with multicriteria analysis[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4): 266 – 275.

[42] 胡昊, 刘东鑫, 汪顺生, 等. 宽垄沟灌条件下水流特性的试验研究与数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2015(11): 27 – 31.
HU Hao, LIU Dongxin, WANG Shunsheng, et al. An experiment study and numerical simulation of wide furrow irrigation flow characteristics[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(11): 27 – 31. (in Chinese)

YU Haiying, LI Tingxuan. Evolution of salt accumulation in greenhouse soil in Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4):80-83. (in Chinese)

[32] 郭全忠, 龚晓松, 刘化隆. 长期施用沼肥对设施菜田土壤养分和盐分累积量的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 30(1):127-134.

GUO Quanzhong, GONG Xiaosong, LIU Hualong. Study on effect of long-term application of biogas manure on soil nutrients and salt in protected-land vegetable field[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020, 30(1):127-134. (in Chinese)

[33] 蒋国军, 王建科, 邵伟强, 等. 降低保护地土壤盐分研究[J]. 节水灌溉, 2016(3):49-51.

[34] 韩峰, 高雪, 陈海燕. 不同种类蔬菜对土壤重金属的富集差异[J]. 贵州农业科学, 2014(6):129-132.

HAN Feng, GAO Xue, CHEN Haiyan. Enrichment difference of different types of vegetables to heavy metals[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2014(6):129-132. (in Chinese)

[35] BROWN S L, CHANEY R L, ANGLE J S, et al. The phytoavailability of cadmium to lettuce in long-term biosolids-amended soils[J]. Journal of Environment Quality, 1998, 27:1071-1078.

[36] 夏伟霞, 谭长银, 王大娟, 等. 土壤溶解性有机质对重金属环境行为影响的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2014, 32(1):50-54.

XIA Weixia, TAN Changyin, WAN Dajuan, et al. Progress in the effect of dissolved organic matter on the environmental behavior of heavy metals in soil[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2014, 32(1):50-54. (in Chinese)

[37] 陈子扬, 孙孝龙. 土壤有机质与重金属关系的研究进展[J]. 环境与发展, 2017, 29(8):141-142.

[38] SHARMA R K, AGRAWAL M. Biological effects of heavy metals: an overview[J]. Journal of Environmental Biology, 2005, 26: 301-313.

[39] 史锐, 岳荣, 张红. 有色金属采选冶基地周边土壤中重金属纵向分层研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(1):186-191.

SHI Rui, YUE Rong, ZHANG Hong. Research on vertical distribution of heavy metal in soil around non-ferrous metal industry area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1):186-191. (in Chinese)

[40] 朱建春, 李荣华, 张增强, 等. 陕西规模化猪场猪粪与饲料重金属含量研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11):98-104.

ZHU Jianchun, LI Ronghua, ZHANG Zengqiang, et al. Heavy metal contents in pig manure and feeds under intensive farming and potential hazard on farmlands in Shaanxi Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):98-104. (in Chinese)

(上接第 329 页)

[43] 李宗毅, 张安琪, 荣旭, 等. 土壤初始含水率对管渠灌溉水分入渗特性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(2): 270-276.

LI Zongyi, ZHANG Anqi, RONG Xu, et al. Effect of initial soil water content on water infiltration characteristics of canal irrigation[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(2): 270-276. (in Chinese)

[44] 汪顺生, 王兴, 史尚, 等. 不同沟灌方式下灌水质量的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 68-71.

WANG Shunsheng, WANG Xing, SHI Shang, et al. Experiment study on irrigation quality under different furrow irrigation modes[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6): 68-71. (in Chinese)

[45] 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, 107.

NIE Weibo, FEI Liangjun, MA Xiaoyi. Optimization for combination of irrigation technique element for border irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 83-88, 107. (in Chinese)

[46] 高卓卓, 郑志伟. 基于 WinSRFR 5.1 的地面灌水技术不确定性研究[J]. 节水灌溉, 2021(2): 24-27.

GAO Zhuozhuo, ZHENG Zhiwei. Research on uncertainty of ground irrigation technology based on WinSRFR 5.1[J]. Water Saving Irrigation, 2021(2): 24-27. (in Chinese)

[47] 徐家屯, 朱大炯, 蔡焕杰, 等. 基于主成分分析和参数设计的畦灌技术参数优化[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6): 89-96.

XU Jiatusun, ZHU Dajiong, CAI Huanjie, et al. Optimization of technical parameters for border irrigation based on principal component analysis and parameter design[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(6): 89-96. (in Chinese)

[48] 王洋, 伍娟, 黄兴法, 等. 民勤地区畦灌春玉米改水成数田间试验研究[J]. 节水灌溉, 2020(2): 22-26.

WANG Yang, WU Juan, HUANG Xingfa, et al. The field experiments of cut-off ratio of spring corn under border irrigation in Minqin area[J]. Water Saving Irrigation, 2020(2): 22-26. (in Chinese)

[49] MOHAN S, VIJAYALAKSHMI D P. Prediction of irrigation return flows through a hierarchical modeling approach[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(2): 233-246.