

# 双垄沟播喷灌垄沟膜孔界面水分分布特征

王文娟, 丁林

(甘肃省水利科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 分析河西内陆干旱区甘肃省民勤县双垄沟播喷灌条件下水量在垄—沟—膜孔界面汇流入渗特征, 探索农业节水与耕作技术耦合的水量传输与利用关系研究的关键科学问题, 为发展高效农业节水技术提供理论依据。[方法] 通过田间试验设置 24 mm( $G_1$ ), 30 mm( $G_2$ ), 36 mm( $G_3$ ), 42 mm( $G_4$ ) 4 个喷灌灌水定额处理, 并通过 HYDRUS-2D 模型模拟了双垄沟播喷灌垄沟膜孔不同位置土壤水分的差异性和土壤水分二维分布特征。[结果] 基于 HYDRUS-2D 构建的双垄沟播喷灌垄沟膜孔土壤水分模型精度较高, 平均相对误差为 6.46%~9.08%, 决定系数为 0.85~0.95。土壤水分分布特征表现为灌水后 1 d 土壤饱和湿润区主要集中在 0—30 cm 土层, 并且 24 mm( $G_1$ ) 处理的饱和区面积最小, 存在水分亏缺现象。在 0—20 cm 土层, 30 mm( $G_2$ ), 36 mm( $G_3$ ), 42 mm( $G_4$ ) 处理的饱和区面积呈现随灌水量的增加而增加的规律。而在 50 cm 土层以下, 不同处理含水率并无显著差异。[结论] 在河西内陆干旱地区喷灌农田, 灌水主要对土壤上层产生影响; HYDRUS 模型模拟效果较令人满意, 参数较为可靠, 在双垄沟播喷灌技术灌溉制度制定时可以参考。

**关键词:** 双垄沟播喷灌; 土壤水分; 数值模拟; 河西走廊

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)05-0181-07

中图分类号: S275.5

**文献参数:** 王文娟, 丁林. 双垄沟播喷灌垄沟膜孔界面水分分布特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 181-186. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220824.001; Wang Wenjuan, Ding Lin. Characteristics of soil water distribution at interface of a double-ridge and furrow-sowing film hole under sprinkler irrigation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 181-186.

## Characteristics of Soil Water Distribution at Interface of a Double-Ridge and Furrow-Sowing Film Hole Under Sprinkler Irrigation

Wang Wenjuan, Ding Lin

(Gansu Institute of Water Conservancy Science, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** [Objective] Water infiltration characteristics at the ridge, furrow, and film hole interface under furrow seeding and sprinkling irrigation on double ridges of inland area of Hexi Corridor at Minqin County, Gansu Province were determined, and the relationship between water transfer and the utilization of agricultural water-saving and farm technology coupling were discussed in order to provide a theoretical basis for the development of efficient agricultural water-saving technologies. [Methods] Four sprinkler irrigation treatments of 24 mm ( $G_1$ ), 30 mm ( $G_2$ ), 36 mm ( $G_3$ ), and 42 mm ( $G_4$ ) were established in a field experiment, and the HYDRUS-2D model was used to simulate the soil moisture at different positions of the double-ridge and furrow-sowing sprinkler irrigation ridge film hole. Differences and two-dimensional distribution characteristics of soil moisture were determined. [Results] The accuracy of the HYDRUS-2D model to simulate soil moisture for the sprinkler irrigated double-ridge and furrow-sowing system at the film hole was high (average relative error was 6.46%—9.08%, and the coefficient of determination was 0.85—0.95. One

收稿日期: 2021-10-13

修回日期: 2022-03-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“双垄沟播喷灌垄—沟—膜孔界面水分汇流入渗特征与作物生理响应机制”(51769002); 甘肃省科技计划项目“引大灌区主要经济作物节水灌溉制度研究与示范”(20YF3NA011)

第一作者: 王文娟(1985—), 女(汉族), 甘肃省白银市会宁县人, 硕士, 工程师, 主要从事节水灌溉研究。Email: 709970807@qq.com。

通信作者: 丁林(1978—), 男(汉族), 硕士, 正高级工程师, 主要从事节水灌溉研究。Email: 415770260@qq.com。

day after irrigation, the saturated and humid soil area was mainly concentrated in the 0—30 cm soil layer, and the saturated area of the  $G_1$  treatment was the smallest of all of the treatments due to water deficit. In the 0—20 cm soil layer, the saturated area increased with increasing irrigation amount (i.e.,  $G_2 < G_3 < G_4$ ). However, there was no significant difference in water content between different treatments below the 50 cm soil depth. [Conclusion] Sprinkler irrigation of farmland at the inland arid area of Hexi Corridor mainly affected the upper soil layer. Simulations of soil water distribution by the HYDRUS-2D model were acceptable and the parameters were reliable. The model can be used to formulate sprinkler irrigation system technology for the double-ridge production system.

**Keywords:** double-ridge and furrow-sowing sprinkler irrigation; soil moisture; numerical simulation; Hexi Corridor

对于干旱缺水的内陆河地区来说“有灌溉才有农业”<sup>[1]</sup>。灌溉对本地区的社会经济发展和生态环境改善起着举足轻重的作用。水资源的日益短缺使得本地区对节水灌溉技术显得尤为重视。许多学者在喷灌技术、双垄沟播技术方面研究颇多,并取得了一定的成就<sup>[2-5]</sup>。如洪晓强等<sup>[6-7]</sup>研究了垄沟集水覆膜栽培法,能有效接纳降水入渗,减少水分损失,改善农田水分状况,提高作物产量水平。但是,这些研究均局限在单一技术或措施下的技术参数及对作物影响方面,对节水技术与耕作技术耦合后技术参数、水分运动过程等方面的研究还相对欠缺。

目前,双垄沟播喷灌垄沟膜孔灌溉技术研究甚少,存在的问题也在不断发现。本文以内陆干旱区的甘肃省河西走廊为研究区,将旱区创新研究成果双垄沟播栽培技术与喷灌节水技术相耦合,探求双垄沟播喷灌条件下水量在垄—沟—膜孔界面汇流入渗特征,以期解决农业节水与耕作技术耦合的水量传输与利用关系研究的关键科学问题,对发展高效农业节水技术理论具有重要意义<sup>[8-9]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验处理

试验于 2018—2020 年在甘肃省水利科学研究院民勤灌溉试验站(东经  $130^{\circ}05'$ , 北纬  $38^{\circ}37'$ )进行。该地区处于绿洲和腾格里沙漠交界地带,属典型的大陆性荒漠气候,多年平均降水 110 mm,多年平均蒸发量 2 644 mm,年日照时数 3 028 h,土质质地 0—60 cm 为黏壤土,60 cm 以下逐渐由黏壤土变为沙壤土,2019 年试验地土壤容重为  $1.32 \text{ g/cm}^3$ 。本试验研究对象为油菜(“矮大头”),播种时间为当年的 4 月 28 日至 5 月 1 日,生育期全长平均 145 d。试验设置 4 种灌水定额,分别为 24 mm( $G_1$ ), 30 mm( $G_2$ ), 36 mm( $G_3$ ), 42 mm( $G_4$ ),其具体设计参数见表 1 及

图 1。每个处理 3 个重复,全生育期灌水 7 次。实际喷灌系统压力为 1.8 MPa,流量为  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,膜孔间距为 30 cm,膜孔直径为 2 cm,灌水时间为 8~12 h,喷灌半径为 7.5 m。

### 1.2 观测指标

(1) 气象资料。由本试验基地的气象生态环境监测系统提供。该系统自动采集的数据有总辐射、直辐射、环境温度、环境湿度、地面温度、日照时数、蒸发量、风向、风速、气压、降雨量。

表 1 试验处理设计

灌水定额/mm (处理号)	小区 面积/ $\text{m}^2$	灌水 定额/mm	灌溉 定额/mm	系统 压力/MP
24( $G_1$ )	225	24	168	2.5
30( $G_2$ )	225	30	210	2.5
36( $G_3$ )	225	36	252	2.5
42( $G_4$ )	225	42	294	2.5

(2) 土壤含水率。采用 HDR 土壤水分速测仪结合烘干法(土钻取土)测定。在作物播种前至收获后每 10 d 左右测定田间 0—100 cm 土层的土壤含水率,每隔 20 cm 测一次,灌水前加测一次,灌水后 1 d, 2 d 各加测一次。

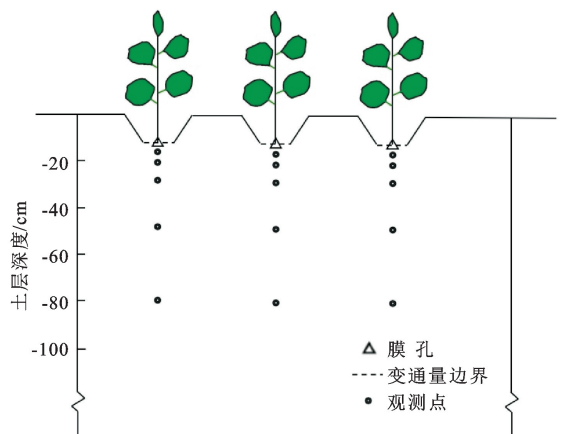


图 1 双垄沟播喷灌油菜田间试验取样点布置

## 2 双垄沟播喷灌垄沟膜孔界面水分迁移模型介绍

### 2.1 模型基本原理

基于 HYDRUS-2D 模型对双垄沟播喷灌农田土壤水分运动进行模拟,在轴对称的条件下,可将土壤入渗简化成径向和垂直 2 个方向,若不考虑根系吸水情况,并假设土壤均质且各向同性,则该模型采用 Galerkin 有限元求解 Richards 方程,公式如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left[ xK(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (1)$$

式中: $\theta$  为土壤体积含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $h$  为压力水头( $\text{cm}$ );  $K(h)$  为非饱和导水率( $\text{cm}/\text{d}$ );  $t$  为模拟时间( $\text{d}$ );  $x$  和  $z$  是水平和垂直坐标( $\text{cm}$ )。

土壤水力函数采用 van Genuchten 模型,如下所示:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |h|)^n]^m} \quad (2)$$

$$(h < 0, m = 1 - \frac{1}{n}, n > 1)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})]^2 \quad (3)$$

$$\left( S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)$$

式中: $\theta_s$  为饱和土壤含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_r$  为残余土壤含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $n, m, \alpha$  为经验拟合参数;  $S_e$  为相对饱和度;  $K_s$  为饱和导水率( $\text{cm}/\text{d}$ );  $l$  为孔隙关联度参数,  $l = 0.5$ 。

### 2.2 初始条件和边界条件

HYDRUS-2D 软件运用 Galerkin 有限元方法来求解控制水流方程,对于双垄沟播喷灌种植膜孔来说,水流入渗模拟区域为矩形区域,其入渗的初始和边界条件见图 1,数值模拟的初始条件也是恒定水头。在灌溉过程中,假定膜孔上方的水头条件为恒定状态,上边界无膜孔的部分是“无通量”边界,用塑料膜覆盖并且没有水分渗漏和蒸发,而下边界是自由排水边界。入渗区域的两个垂直边界是部分对称边界,并且在  $x$  方向上没有水流交换,因此也是“无通量”边界。因此,其初始和边界条件分别为:

初始条件:

$$h(x, z, t) = h_0(x, z) (0 \leq x \leq X, t = 0, Z \leq z \leq 0)$$

式中: $h_0(x, z)$  为灌溉前土壤初始基质势( $\text{cm}$ );  $X$  为模拟计算区域的横向最大距离;  $Z$  为模拟计算区域的垂向最大距离。

边界条件:

$$\varphi = h, 0 \leq x \leq \frac{d}{2}, z = 0, t \geq 0$$

$$-K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = 0 \quad (4)$$

$$(0 \leq x \leq 60 \text{ cm}, z = 0, t \geq 0)$$

$$-K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

$$(x = 0, x = 60 \text{ cm}, 0 \leq z \leq 100 \text{ cm}, t \geq 0)$$

$$-K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = 0 \quad (6)$$

$$(0 \leq x \leq 60 \text{ cm}, z = 100, t \geq 0)$$

式中: $K(h)$  为导水率( $\text{cm}/\text{min}$ );  $t$  为灌水时间( $\text{min}$ );  $x$  为水平坐标( $\text{cm}$ )。

### 2.3 模型求解

双垄沟播喷灌种植膜孔的初始和边界条件分别如上所述,数值求解采用 HYDRUS-2D 软件。模型模拟地下 0—100 cm 深度范围土壤,分为 5 层,模拟时段从 2020 年 4 月 28 日至 8 月 18 日,共计 110 d,采用变时间步长剖分方式,根据收敛迭代次数调整时间步长。

设定初始时间步长为 0.1 d,最小步长为 0.01 d,最大步长为 5 d;土壤含水量容许偏差为 0.000 5,土壤水流模型采用单孔隙模型中 Van Genuchten-Mualem 模型,不考虑水分滞后效应,利用逆向求解方法确定水分运动参数。水流模拟上边界均为开放大气边界,接受降水、灌溉补给、土面蒸发, HYDRUS 水流模拟赋实测的降水量、灌溉量。土壤初始含水率采用初始条件确定,灌溉水头和直径通过边界条件来设定,所有模拟的初始条件均根据恒定含水率给出。

### 2.4 模型参数

土壤水力参数基于 HYDRUS-2D 模型内置的 Rosetta 模型进行预测,应用土壤颗粒组成(黏粒、粉粒、砂粒体积百分比)和初始容重预测土壤水力参数,并通过 2020 年实测土壤含水量进行参数拟合,确定主要特征参数数值。表 2 给出了调整后的 Van Genuchten-Mualem 公式中各个土壤水力参数值。

表 2 水分迁移模型土壤特性参数

土壤质地	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$N(1/\text{cm})$	$K_s(\text{cm}/\text{d})$	$l$
砂质黏壤土	0.02	0.42	0.06	1.57	31.56	0.5

### 2.5 模型验证与效果评价

在上述土壤水分参数和溶质参数的条件下,采用试验区 2020 年生育期土壤含水率实测数据对模型进行验证,分别对 24, 30, 36, 42 mm 共 4 个灌水量的水分运移进行模拟,并与实测值进行对比,验证所建的数值模型的合理性。土壤水含率模拟值与实测值的相关关系见图 2。土壤初始含水率为体积含水率

(cm/cm), 模拟值取自模拟数据与实测取土点的深度相对应。

对土壤含水率模拟值和实测值利用 SPSS 17.0 进行配对样本  $T$  检验, 检验结果见表 3。结果表明:

土壤含水率配对  $T$  检验的显著性水平  $p$  值均不在置信区间 ( $\alpha=0.05$ ), 说明土壤含水率的模拟值与实测值均无显著差异。模拟效果可以接受, 参数较为可靠, 可用于实际模拟应用。

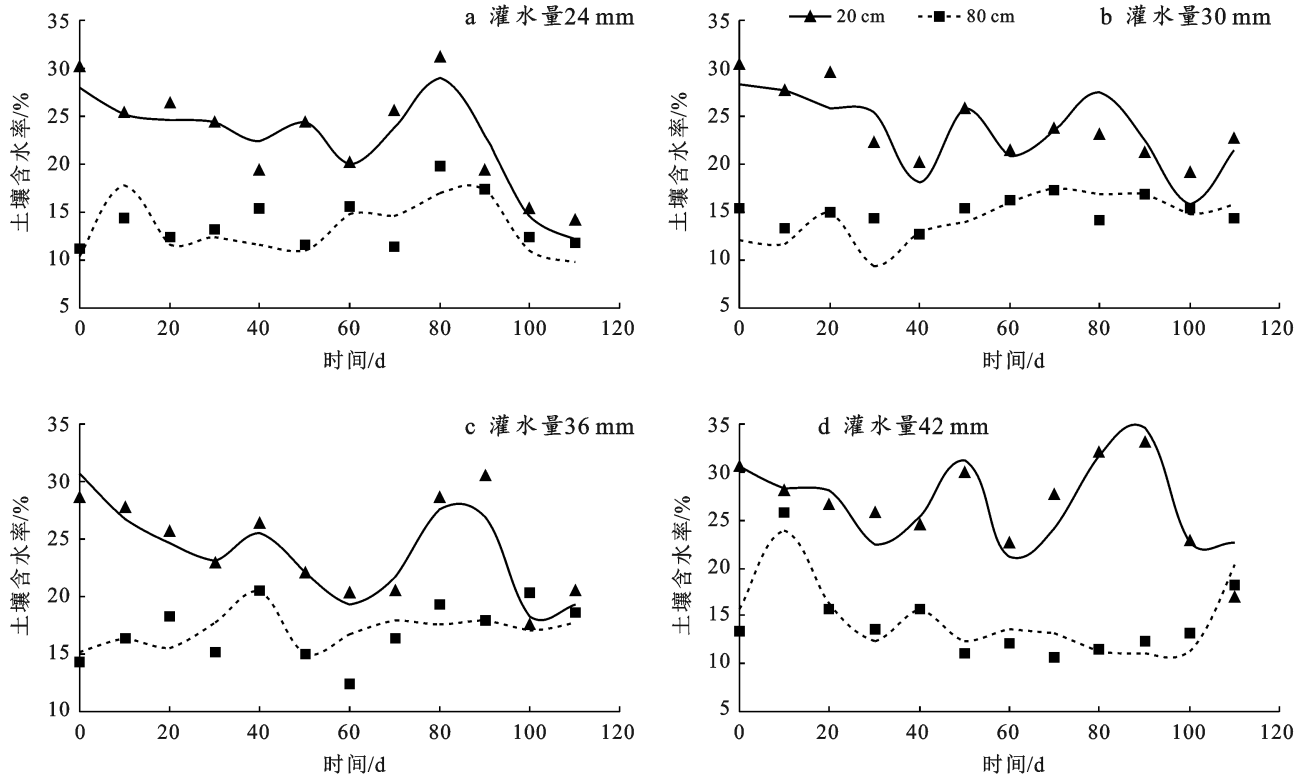


图 2 土壤含水率模拟值与实测值对比

表 3 土壤含水率实测值与模拟值  $T$  检验结果

灌水量/mm	样本数	平均差	差值样本标准差	自由度	$T$ 检验的概率 $P$	相关系数
24	24	2.00	0.41	23	0.23	0.95
30	24	2.18	0.44	23	0.27	0.92
36	24	1.81	0.37	23	0.61	0.93
42	24	1.55	2.05	23	0.60	0.85

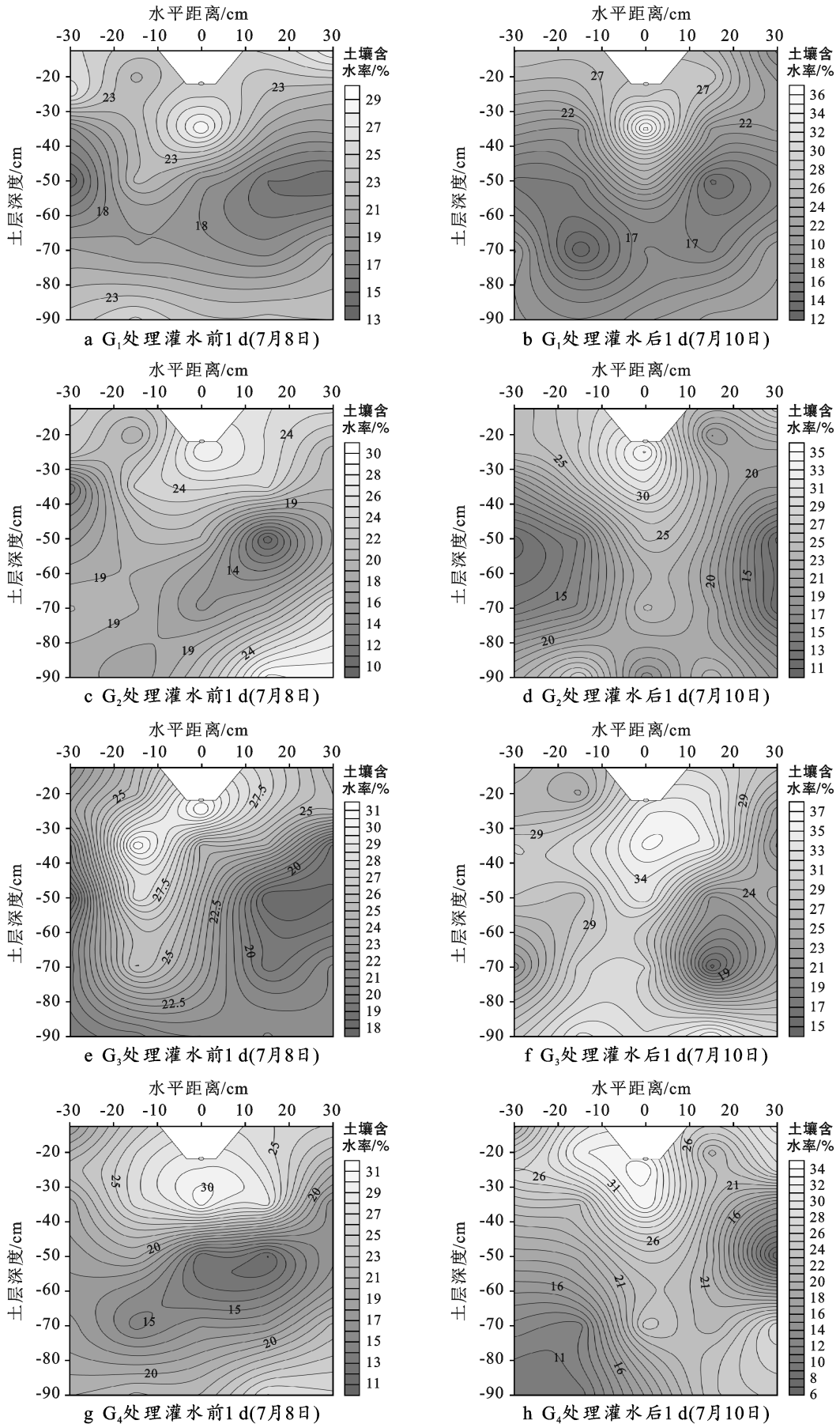
## 2.6 双垄沟播喷灌垄沟膜孔界面水分分布特征

本论文以 2020 年 7 月 8 日至 7 月 10 日期间 (第 3 次灌水) 剖面土壤水分对象进行分析油葵喷灌农田土壤水分等值线分布规律。

不同灌溉处理第 3 次灌水前后的实测土壤水分等值线分布见图 3。由于在灌水前一段时间无降雨, 从而导致土壤表层 (0—20 cm) 出现缺水现象 (图 3a), 灌水后 1 d 后形成了明显的灌溉湿润区 (图 3b), 双垄沟播喷灌湿润体主要分布在 0—50 cm 范围内, 但是仅在 0—30 cm 土层形成湿润饱和区, 土壤水分分布与作物主要根系分布较匹配。随着灌水定额的增加, 湿润饱和区和湿润区面积有所增加, 灌水 1 d

后,  $G_1$  处理的饱和区面积最小, 这一面积有可能存在缺水现象, 会导致此处根系处于水分胁迫状态。故摸清土壤水分分布规律对于确定合理的灌水定额具有重要意义<sup>[10-11]</sup>。

由图 3 可以看出, 随着灌水定额增大, 土壤含水率也随之增加, 不同灌水定额对含水率的影响主要在 0—50 cm 土层, 且在 0—20 cm 差异更大。在 0—20 cm 土层,  $G_1$ ,  $G_2$  和  $G_3$  处理 3 个位置的平均土壤含水率分别比  $G_4$  处理低 6.96%, 1.81% 和 2.63%, 而在 50 cm 土层以下, 不同处理含水率并无显著差异, 可见对于河西内陆干旱地区喷灌农田, 灌水主要对土壤上层产生影响。



注:  $G_1, G_2, G_3, G_4$  为灌水定额, 分别为 24, 30, 36, 42 mm。

图 3 不同灌溉处理第 3 次灌水前后的实测土壤水分等值线分布

### 3 结 论

(1) 基于 HYDRUS 模型对 4 种灌水定额下的双垄沟播喷灌垄沟膜孔界面土壤剖面水分分布特征及土壤水分运移时空变异规律进行模拟,通过田间试验实测数据验证,结果表明,模拟效果可以接受,参数较为可靠,平均相对误差为 6.46%~9.08%,决定系数为 0.85~0.95,可用于实际模拟应用。

(2) 河西内陆干旱地区喷灌农田,灌水主要对土壤上层产生影响。双垄沟播喷灌垄沟膜孔界面土壤剖面水分分布主要集中在 0—50 cm。灌水后 1 d 土壤饱和湿润区主要集中在 0—30 cm 土层,并且随着灌溉定额减小,饱和湿润区面积也逐渐减小。

(3) 从节水和农艺耕作的综合标准衡量,本文还需要进一步研究双垄沟播喷灌强度及历时情况下的灌水均匀度以及灌水质量的影响机制。对模拟溶质运移、热量传输以及根系吸水方面的研究还需做进一步研究。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李仙岳,陈宁,史海滨,等.膜下滴灌玉米番茄间作农田土壤水分分布特征模拟[J].农业工程学报,2019,35(10):50-59.
- [2] 丁林,王以兵,王文娟.垄作沟播喷灌条件下作物耗水及适宜灌溉制度研究[J].水利规划与设计,2020(4):68-73.
- [3] 马海燕,王昕,张展羽,等.基于 HYDRUS-3D 的微咸水膜孔沟灌水盐分布数值模拟[J].农业机械学报,2015,46(2):137-145.
- [4] 徐丽萍,张朝晖.基于 Hydrus-1D 的滴灌土壤水分运移数值模拟[J].节水灌溉,2019(2):64-67.
- [5] 杨昊晟,艾一丹,格宇轩,等.基于 HYDRUS 模型筛选滴灌模式下适宜灌水上下限的研究[J].节水灌溉,2019(1):1-5.
- [6] 徐存东,程慧,王燕,等.基于 HYDRUS-3D 不同沟灌方式下水盐运移模拟[J].节水灌溉,2017(10):9-14.
- [7] 王亚竹,丁林,王文娟,等.喷灌定额对垄作沟播油葵生长特征与产量的影响[J].水土保持研究,2021,28(4):411-416.
- [8] Wang Hongli, Zhang Xucheng, Yu Xianfeng, et al. Effects of optimal nitrogen fertilizer management on water and fertilizer utilization efficiency and yield under double-ridge-furrow sowing with the whole plastic film mulching in maize in a semi-arid area [J]. Journal of Applied Ecology, 2020,31(2):449-458.
- [9] Cui Zhengjun, Guo Lizhuo, Gao Yuhong, et al. Responses of water consumption characteristics and grain yield of maize to different nitrogen form ratios with full film mulching on double ridges and planting in furrows [J]. Journal of Applied Ecology, 2019,30(10):3426-3434.
- [10] 余根坚,黄介生,高占义.基于 HYDRUS 模型不同灌水模式下土壤水盐运移模拟[J].水利学报,2013,44(7):826-834.
- [11] 潘红霞,付恒阳,贺屹.基于 HYDRUS-2D 的地下滴灌下水分运移数值模拟研究[J].灌溉排水学报,2015,34(3):52-55.