

基于 Hydrus-3D 模型的再生水涌泉根灌模拟及布置参数预测

樊向阳<sup>1,2</sup>, 费良军<sup>1</sup>, 代智光<sup>1,3</sup>, 景若瑶<sup>2</sup>, 胡超<sup>2</sup>, 李松旌<sup>2</sup>, 刘源<sup>2</sup>

(1.西安理工大学水利水电学院,西安 710048;2.中国农业科学院农田灌溉研究所,  
河南 新乡 453002;3.南昌工程学院,南昌 330099)

**摘要:** 为了探寻再生水果树涌泉根灌条件下灌水器的最优布设埋深和间距,以饱和-非饱和土壤水分运动理论为依据,选取了典型研究区一年和多年生桃树,利用 Hydrus-3D 模型对再生水涌泉根灌土壤水分入渗过程进行数值模拟,并将模拟结果与田间试验实测结果进行对比验证,同时预测了双源涌泉根灌灌水器的最优布置参数。结果表明,Hydrus-3D 模型对再生水涌泉根灌湿润锋运移距离以及灌水结束后不同时刻含水量分布的模拟值和实测值之间决定系数  $R^2$  均大于临界决定系数,均方根误差 RMSE 分别小于 1.5 和 0.05,且  $F$  检验  $P$  值均在 0.05 以上。说明 Hydrus-3D 模型可以用于再生水双源涌泉根灌土壤水分运移的模拟;利用 Hydrus-3D 模型预测结果表明,1,5,10 年生桃树再生水双源涌泉根灌灌水器最优布设埋深分别为 35,35,45 cm,最优布设间距分别为 40,50,40 cm。

**关键词:** 涌泉根灌;Hydrus-3D;模拟;布置参数;再生水灌溉  
**中图分类号:** S275.9; S273.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2019)04-0133-07  
**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.019

Simulation of Surge-root Irrigation with Reclaimed Water and Prediction of Emitters Layout Parameters Based on Hydrus-3D

FAN Xiangyang<sup>1,2</sup>, FEI Liangjun<sup>1</sup>, DAI Zhiguang<sup>1,3</sup>,  
JING Ruoyao<sup>2</sup>, HU Chao<sup>2</sup>, LI Songjing<sup>2</sup>, LIU Yuan<sup>2</sup>

(1.Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2.Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002; 3.Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099)

**Abstract:** Soil water infiltration movement is an important part of the evaluation of surge-root irrigation efficiency. Based on the theory of saturated-unsaturated soil water movement, we simulated the soil water infiltration under surge-root irrigation with a double-point source by Hydrus-3D and compared the simulated results with the field measured data. At the same time, the typical peach trees were selected and the optimal arrangement parameters of the surge-root irrigation were predicated. The study results showed that all the correlation coefficients between the simulated and the measured values of the soil wetting front of the surge-root irrigation and soil water content after irrigation were always greater than the critical correlation coefficient, RMSE was less than 1.5 and 0.05, respectively, and the P values of T-test were greater than 0.05. It indicated that Hydrus-3D could be used for soil moisture migration simulation of surge-root irrigation with reclaimed water. Using the Hydrus-3D model, the results showed that the optimal depth was 35, 35, and 45 cm respectively for peach tree with 1-year, 5-year and 10-year old, and the corresponding spacing was 40, 50, and 40 cm respectively.

**Keywords:** surge-root irrigation; Hydrus-3D; simulation; the parameters of arrange; reclaimed water irrigation

我国是水资源严重短缺的国家之一,正常年份缺水量达 500 亿  $m^3$ <sup>[1]</sup>,其中,农业水资源供需矛盾尤为突出,缺水量达 300 亿  $m^3$ ,近 700 万  $hm^2$  灌溉面积因缺水得不到有效灌溉。随着全球气候变化影响下水

资源短缺在全国范围内的持续<sup>[2]</sup>及工业、城镇发展对农业用水的挤占,农业缺水已成为粮食安全的主要制约因素且将长期存在。解决我国农业水资源短缺的关键,一方面要大力发展节水农业,另一方面则应广辟水

收稿日期:2019-03-19  
资助项目:中央级科研院所基本科研业务费专项(中国农业科学院农田灌溉研究所)(FIRI2016-15);国家自然科学基金项目(51479201, 41701265)  
第一作者:樊向阳(1974—),男,博士研究生,研究员,主要从事农业水资源安全高效利用及水环境研究。E-mail: fxy0504@126.com  
通信作者:费良军(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉与农业水资源利用研究。E-mail: feiliangjun2008@163.com

源,加大再生水等非常规水源的开发利用。再生水是指污水经适当再生工艺处理后,达到一定水质要求,满足某种使用功能要求,可以进行有益使用的水<sup>[3]</sup>。再生水具有量大、面广特点,作为潜在的替代水源,与海水淡化、跨流域调水等相比,具有明显的优势,特别是用于干旱缺水地区农业灌溉,将大大缓解农业用水短缺矛盾。近年来,我国再生水利用量增长迅速,由 2005 年的 10.9 亿 m<sup>3</sup> 增长至 2016 年的 59.2 亿 m<sup>3</sup><sup>[4]</sup>。

涌泉根灌是一种微灌新技术,通过毛管将水肥直接输送到作物根部,在根区创造适宜的水、肥、气、热等条件,进行地下局部灌溉,特别适用于经济林木的灌溉<sup>[5]</sup>。目前,国内学者<sup>[6-10]</sup>对涌泉根灌自由入渗湿润体特性进行了大量研究,结果表明湿润体受流量、初始含水率、孔径及孔深影响明显;吴恒卿等<sup>[11]</sup>对双点源涌泉根灌交汇入渗湿润体特性进行了试验研究,结果表明滴头间距对湿润体的运移、交汇时间、土壤含水量有明显影响;张陆军<sup>[5]</sup>通过大田试验研究表明,5 年生矮化密植梨枣树每株布置 2 个灌水器 和 80 L/次的组合方式效果最好。Hydrus-3D 软件可模拟非饱和或饱和土壤水运动<sup>[12]</sup>,已有研究<sup>[13-18]</sup>运用 Hydrus 模型模拟了地下滴灌条件下水分及溶质在土壤中的运移和分布情况,模型模拟效果较好;李耀刚等<sup>[19]</sup>采用 Hydrus 模型模拟了涌泉根灌自由入渗土壤水分分布,并采用实测数据进行了验证;李久生等<sup>[20]</sup>采用 Hydrus 软件对滴灌施肥条件下水分和硝态氮运移的数学模型进行了求解,与实测值吻合较好;余根坚等<sup>[21]</sup>利用 Hydrus 模型对不同灌水模式下土壤剖面水盐分布及时空变异规律进行了模拟,结果表明精度满足要求;周广林等<sup>[22]</sup>通过 Hydrus 模型模拟了滴灌单点源和双点源交汇情况下水分入渗及其再分布过程,并利用田间试验实测资料进行了验证。由于涌泉根灌土壤水分入渗为特殊的三维柱状面源入渗,与点源入渗明显不同,目前,有关双源涌泉根灌交汇入渗的模拟研究还不多见,针对再生水灌溉条件下环境介质改变对水分运动的影响也鲜有报道,而在生产实践中交汇入渗却更为常见且交汇入渗比自由入渗要复杂得多。此外,有关双源涌泉根灌灌水器布置参数也鲜有报道。

基于此,本文以再生水双源涌泉根灌土壤水分入渗为切入点,利用 Hydrus-3D 模型对双源涌泉根灌土壤水分入渗过程进行模拟,验证再生水灌溉条件下模型的精确性和适用性,并运用该模型预测典型研究区桃树涌泉根灌布置技术参数,以期对再生水涌泉根灌灌溉制度的设计提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

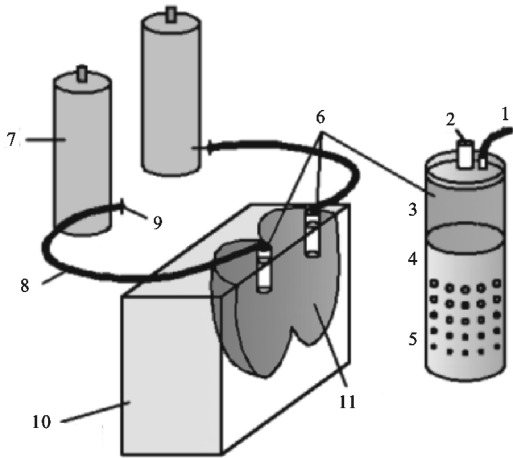
土箱模拟试验于 2018 年 3—7 月在中国农业科

学院农业水土环境野外科学观测试验站(35°19'N, 113°53'E)进行。试验站海拔 73.2 m,年均气温 14.1 ℃,多年平均年降水量 588 mm,年均蒸发量 2 000 mm,无霜期 210 d,年日照时间 2 398 h。供试土壤取自野外站周边桃园田间 0—50 cm 土层,土壤经自然风干后过 2 mm 筛。土壤颗粒组成采用激光粒度分析仪(MS 2000 型)测定,粒径为 0.000 mm< d ≤ 0.002 mm, 0.002 mm< d ≤ 0.020 mm, 0.020 mm< d ≤ 2.000 mm 的占比分别为 9.14%, 40.24%, 50.62%(体积分数),按《国际制土壤质地分级标准》判定为壤土。灌水器布置参数研究区位于野外站东北 20 km 某桃园,桃树树形为“Y”形,株行距分别为 2, 4 m,种植密度 1 260 株/hm<sup>2</sup>。

### 1.2 试验方法

模拟试验装置由马氏瓶、土箱、输水管和涌泉根灌灌水器组成(图 1)。马氏瓶用于提供稳定水头,其内径为 14 cm,高 100 cm,通过控制出口旋转开关控制出流流量。土箱由有机玻璃制作,规格为长 50 cm,宽 50 cm,高 100 cm。试验采用的涌泉根灌灌水器购买自西北农林科技大学旱区节水农业研究院,总高 25 cm,内径 3 cm,灌水器上部为涌泉根灌特有的迷宫流道,下部为套管,套管上 10 cm 高度范围内均匀分布大小相同的出水口,开孔率 25%。

土箱中涌泉根灌灌水器埋深为 45 cm(即灌水器底部距地表距离),水平间距为 50 cm。为防止蒸发,灌水结束后立即用塑料薄膜进行覆盖。设定灌水时间为 360 min,马氏瓶流量设 2 个梯度,分别为 1.5, 2.5 L/h,其中 1.5 L/h 用于模型参数率定,2.5 L/h 用于模型验证。试验用再生水为取自野外站附近河南省新乡市某污水处理厂的二级出水,污水来源主要为城市生活污水和部分工业废水,污水处理工艺为 A/O 反硝化生物滤池和臭氧氧化组合工艺。



注:1 为毛管;2 为通气孔;3 为灌水器内部迷宫流道;4 为灌水器套管;5 为出水口;6 为涌泉根灌灌水器;7 为马氏瓶;8 为橡胶管;9 为旋转开关;10 为土壤剖面;11 为湿润体。

图 1 试验装置示意

2 数学模型

2.1 土壤水分运动方程

土壤水分入渗为三维入渗问题,假设土壤为均质、各向同性、骨架不变形的多孔介质,无植被覆盖,不考虑气相和温度在水分运动中的作用,以及土壤水分滞后效应带来的影响,并假设涌泉根灌条件下土壤水分运动为轴对称,则该条件下土壤水分运动方程可用 Richards 方程描述为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z}$$
(1)

式中: $\psi_m$  为基质势 (cm);  $K(\theta)$  为非饱和土壤导水率 (cm/min);  $\theta$  为土壤体积含水率 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $t$  为时间 (min);  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为坐标轴方向。

2.2 定解条件

涌泉根灌水分入渗的定解条件包括初始条件和边界条件。图 2 中区域为 50 cm×50 cm×100 cm 的长方体,ABCD 为上边界,与大气连通,A'B'C'D' 为下边界,EFGH、E'F'G'H' 为出流边界,取 CC'D'D 面为求解区域。

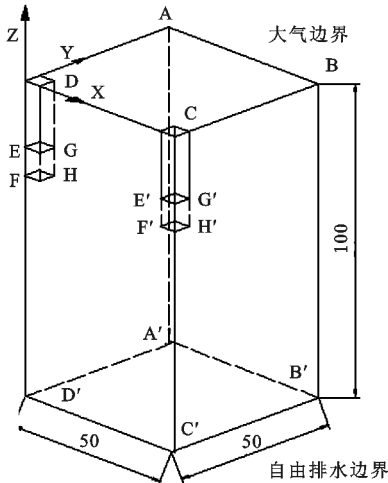


图 2 定解条件示意

初始条件: $\theta(x,y,z)=\theta_0(x,y,z)$  ( $0\leq x\leq X, 0\leq y\leq Y, Z\leq z\leq 0, t=0$ )。式中: $\theta_0(x,y,z)$  为土壤初始含水率 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)。本模拟中  $X=50$  cm,  $Y=$

50 cm,  $Z=-100$  cm。  
边界条件:上边界 ABCD 设定为大气边界条件,不考虑蒸散及降雨,即  $\frac{\partial h}{\partial z}=0$  ( $0<x<50, 0<y<50, z=0, t>0$ );  $h$  为土壤负压水头 (cm); 侧面均为零通量面,即  $\frac{\partial h}{\partial x}=0, \frac{\partial h}{\partial y}=0$  ( $x=0$  或  $50, y=0$  或  $50, t>0$ ); 由于地下水位较深,下边界按第 1 类边界设置,故 A'B'C'D' 对应  $\theta(x,y,z)=\theta_0(x,y,z)$  ( $0<x<50, 0<y<50, z=-100, t>0$ ); FH 和 F'H' 为灌水器出水口底端,此处向上 10 cm 范围边界面为出流界面,入渗过程中,套筒内积水深度随时间变化,因此出流界面按动水头设置,即  $h(x,y,z,t)=H$ , 其中  $0<x<50, 0<y<50, -45<z<-35, H>h_0, t>0$ ;  $H$  为积水深度 (cm)。

2.3 模型参数确定

土壤水分特征曲线及土壤非饱和导水率采用 Van Genuchten(VG)模型描述,其表达式为:

$$\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r} = \left( \frac{1}{1+(ah)^n} \right)^m$$
(2)

$$K_h = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2$$
(3)

$$S_e = \frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}$$
(4)

式中: $\theta_s$  为土壤饱和含水率 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $\theta_r$  为土壤滞留含水率 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $K_h$  为非饱和导水率 (cm/min);  $K_s$  为饱和导水率 (cm/min);  $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$  为拟合参数,与土壤物理性质有关,其中  $m=1-1/n, n>1$ ;  $h$  为土壤负压水头 (cm);  $l$  为孔隙连通性参数,一般取 0.5;  $S_e$  为相对饱和度,无量纲。

$\theta_s$ 、 $\theta_r$ 、 $K_s$  通过室内试验测定。利用 RETC 软件获取土壤水分特征曲线初始参数  $\alpha$ 、 $n$ ,采用马氏瓶流量为 1.5 L/h 时的实测数据进行率定。运行模型并在一定控制范围内调整参数,使模拟值尽可能地接近实测值(表 1)。利用 SPSS 21.0 软件对湿润锋运移距离及不同时刻含水率的实测值和模拟值分别进行分析,决定系数  $R^2$  均大于临界决定系数、均方根误差 RMSE 小于 1.5 和 0.05、 $F$  检验  $P>0.05$  时即确定模型参数。

表 1 供试土壤 Van Genuchten 模型参数

| 参数   | $\theta_r /$<br>(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> ) | $\theta_s /$<br>(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> ) | $\alpha$ | $n$    | $l$ | $K_s /$<br>(cm·min <sup>-1</sup> ) |
|------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------|--------|-----|------------------------------------|
| 初始参数 | 0.0364                                               | 0.4034                                               | 0.0426   | 1.6020 | 0.5 | 0.09697                            |
| 最终参数 | 0.0364                                               | 0.4034                                               | 0.0421   | 1.5842 | 0.5 | 0.09697                            |

3 模型准确性评价

3.1 湿润锋运移距离模拟准确性评价

涌泉根灌土壤水分交汇入渗分 2 个阶段:(1)当水平湿润锋交汇未发生时,即为 2 个单源自由入渗阶

段,水分运动为三维运动;(2)水平湿润锋发生交汇后,即为交汇入渗阶段,此时,水分运动由三维运动变为二维运动,交汇面为零通量面。

3.1.1 自由入渗阶段 由图 3 和表 2 可知,在自由入

渗阶段,实测值和模拟值基本一致,模型很好地模拟了湿润锋随时间的变化情况;湿润锋运移距离模拟值和实测值在水平、竖直向上和竖直向下 3 个方向最大绝对误差分别为 0.90,1.10,1.00 cm,最大相对误差分别为 3.8%,4.1%和 4.9%,决定系数  $R^2$  均在 0.91 以上( $R_{0.05} = 0.706\ 7$ ),RMSE 在 0.9 之内; $F$  检验  $P$  值也均在 0.05 以上,模拟值和实测值之间的差异不显著,说明湿润锋运移距离模拟值和实测值的吻合度较好。

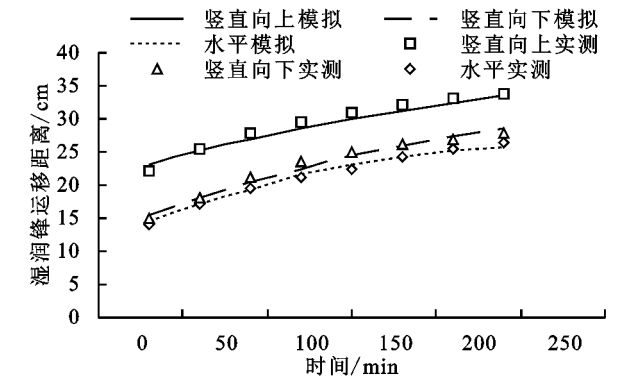


图 3 自由入渗湿润锋运移距离随时间变化

表 2 自由入渗阶段湿润锋运移距离模拟误差分析

| 参数                   | 水平    | 竖直向上  | 竖直向下  |
|----------------------|-------|-------|-------|
| $R^2$                | 0.932 | 0.927 | 0.911 |
| RMSE                 | 0.659 | 0.773 | 0.825 |
| $F$ 检验 $P(F \leq f)$ | 0.147 | 0.266 | 0.107 |

3.1.2 交汇入渗阶段 湿润锋实测交汇发生时间为 242 min,模拟交汇发生时间为 253 min,误差在 5% 以内。由图 4 和表 3 可知,在交汇入渗阶段,模型对湿润锋运移的模拟效果较好,交汇界面及灌水器位置处湿润锋运移距离在向上和向下 2 个方向最大绝对误差分别为 1.50,2.00,1.88,2.00 cm,最大相对误差分别为 4.9%,7.4%,5.1%和 5.4%;模拟值和实测值之间  $R^2$  均在 0.89 以上,大于其临界决定系数( $r_{0.05} = 0.605\ 5$ ),RMSE 也均小于 1.5, $F$  检验  $P$  值均大于 0.05,说明模型能够模拟交汇入渗阶段湿润锋随时间的变化情况。

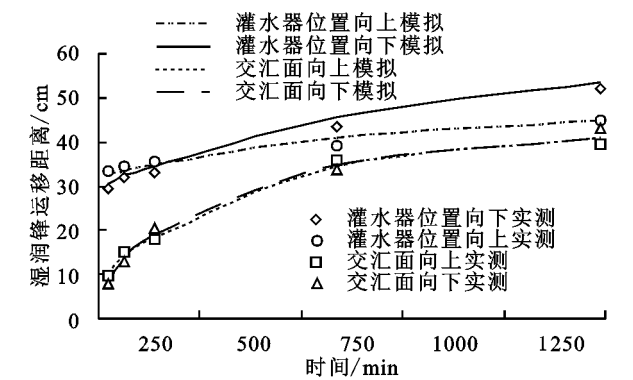


图 4 交汇入渗湿润锋运移距离随时间变化

3.2 土壤剖面含水率模拟准确性评价

试验中认为土壤是水平同性的,因此只需测定交

汇界面单侧土壤剖面含水率即可。土壤剖面含水率的分布情况采用 Surfer 11.0 软件进行绘制。

表 3 交汇入渗阶段湿润锋运移距离模拟误差分析

| 参数                   | 交汇界面  |       | 灌水器位置 |       |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
|                      | 向上    | 向下    | 向上    | 向下    |
| $R^2$                | 0.904 | 0.891 | 0.915 | 0.907 |
| RMSE                 | 1.120 | 1.406 | 1.266 | 1.319 |
| $F$ 检验 $P(F \leq f)$ | 0.203 | 0.087 | 0.764 | 0.416 |

由图 5 和图 6 对比可以看出,灌水结束及灌水结束 1 天时,土壤剖面水分分布模拟结果和实测结果比较吻合,模型模拟精度较高。由表 4 可以看出,在这 2 个时刻,模拟值和实测值之间  $R^2$  达 0.90 以上, RMSE 小于 0.02, $F$  检验  $P$  值也均在 0.05 以上,说明 2 个时刻模型模拟效果较好,能够反映土壤水分分布的实际情况。灌水结束 2 天和灌水结束 3 天时,模拟和实测差异相对变大,其中灌水结束 3 天时深层土壤水分分布模拟的差异最大,模拟值和实测值之间  $R^2$  相对较低,处于 0.75~0.85,说明随着时间的延长,模型模拟土壤水分分布的精度开始逐渐降低; $F$  检验  $P$  值均在 0.05 以上, RMSE 在 0.05 之内,且决定系数大于临界决定系数( $R_{0.05} = 0.631\ 9$ ),说明差异并不显著。总体而言,模型对涌泉根灌土壤水分分布的模拟效果较好,能够作为再生水灌溉条件下田间土壤水分分布的预测工具。

4 灌水器布置参数预测

双源涌泉根灌布置参数包括灌水器埋深和灌水器间距。灌水器埋深及间距对土壤湿润体特征值均有显著影响<sup>[8,10]</sup>。根系分布范围不同,双源涌泉根灌布置方式也存在较大差别。以 1,5,10 年生桃树为例,通过田间调查及相关研究<sup>[23-25]</sup>表明,1 年生桃树根系主要分布在水平 80 cm 和垂直 20 cm 的范围,5 年生桃树主要分布在水平 180 cm 和垂直 60 cm 的范围,而 10 年生桃树则主要分布在水平 240 cm 和垂直 80 cm 的范围。土壤水分经过 2 天的再分布,运动相对变缓,即土壤水分分布已相对稳定,此时土壤水分分布状况才具有一定的可比性,因此以灌水结束后 2 天的土壤水分分布状况作为预测基础。

不同深度处湿润面积不同,需分层取样进行评价。模型假定土壤在水平同性,因此只需根系 1/4 圆作为取样区域即可,以树干位置为中心,每隔 30° 设置 1 个剖面,取样点间距为 10 cm。1 年生桃树每个点位测定地表以下 10 cm 处的土壤水分含量,5 年生桃树每个点位测定地表以下 10,30,50 cm 处的土壤水分含量,10 年生桃树每个点位测定地表以下 10,30,50,70 cm 处的土壤水分含量。图 7 为 5 年生桃树模型取样点平面布置图。

采用 Hydrus-3D 模型模拟土壤水分运动过程, 并对根系范围内土壤湿润体平均含水量状况以及水分分布均匀性进行评价。土壤湿润体平均含水量及水分分布均匀性近似采用地表以下各处含水量均值及克里斯琴森(Christiansen)均匀系数  $C_u$  [26] 均值表示。

$$C_u = 1 - \frac{\overline{\Delta\theta}}{\theta}$$

(5)

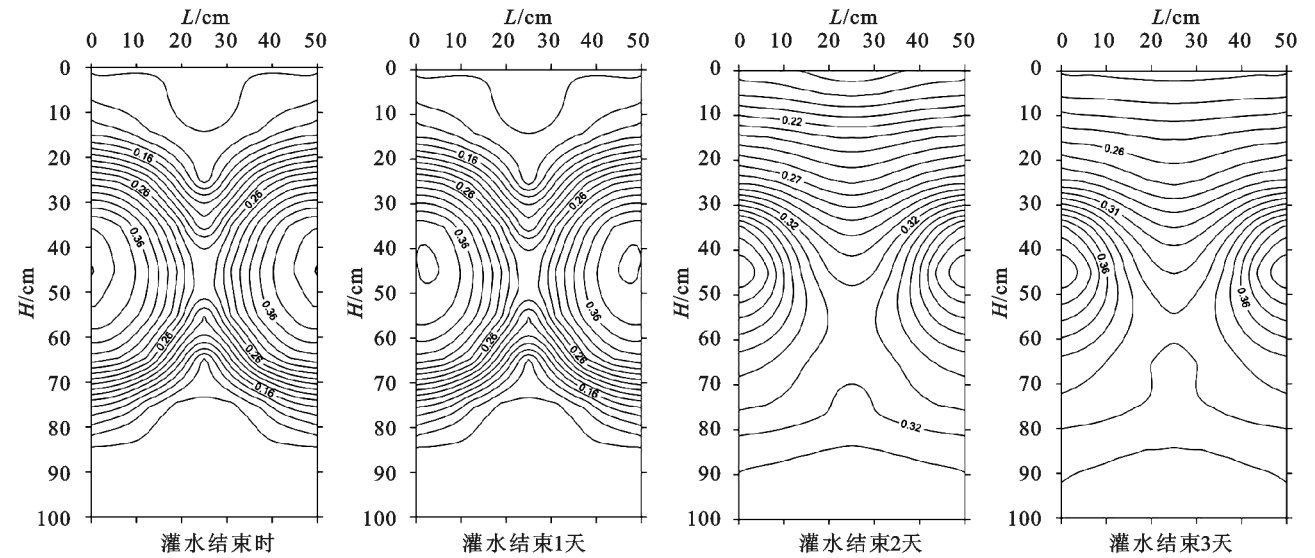


图 5 灌水结束后各时段土壤剖面含水率分布模拟

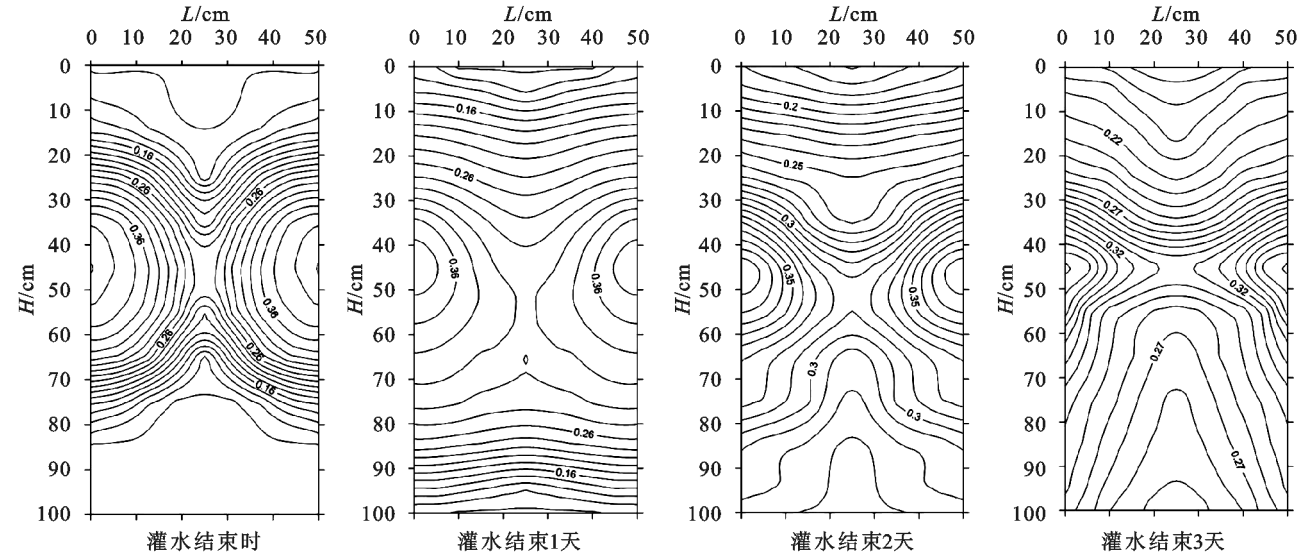


图 6 灌水结束后各时段土壤剖面含水率分布实测

表 4 灌水结束后各时段土壤剖面含水率模拟误差分析

| 参数                 | 灌水<br>结束时 | 灌水<br>结束 1 d | 灌水<br>结束 2 d | 灌水<br>结束 3 d |
|--------------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| $R^2$              | 0.924     | 0.901        | 0.847        | 0.769        |
| RMSE               | 0.011     | 0.016        | 0.027        | 0.046        |
| F 检验 $P(F \leq f)$ | 0.213     | 0.327        | 0.106        | 0.074        |

由表 5 和表 6 可知, 当 1 年生桃树灌水器埋深和间距分别为 35, 40 cm 时, 土壤含水量最高且  $C_u$  值也较大; 当灌水器埋深和间距分别为 45, 50 cm 时,  $C_u$  值最高, 但此时根系范围内含水率仅为  $0.105 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 灌水效率

$$\overline{\Delta\theta} = \frac{\sum_i^n |\theta_i - \bar{\theta}|}{N}$$

(6)

式中:  $C_u$  为均匀系数;  $\bar{\theta}$  为平均土壤含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\Delta\theta$  为每个取样点的实际土壤含水率与平均值之差的绝对值的平均值, 即平均差;  $\theta_i$  为每个取样点的实际土壤含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $N$  为取样点个数。

较低。因此, 灌水器埋深及间距分别为 35, 40 cm 为 1 年生桃树再生水双源涌泉根灌的最优布置参数。

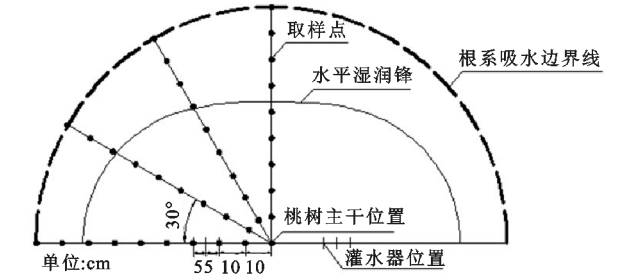


图 7 5 年生桃树模型取样点平面布置

表 5 1 年生桃树根系吸水范围内含水率均值

单位:cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

| 灌水器间距/cm | 灌水器埋深 |       |        |
|----------|-------|-------|--------|
|          | 35 cm | 45 cm | 55 cm  |
| 40       | 0.186 | 0.119 | 0.0763 |
| 50       | 0.175 | 0.105 | 0.0761 |
| 60       | 0.136 | 0.090 | 0.0761 |

由表 7 和表 8 可以看出,5 年生桃树土壤湿润体平均含水量均值均出现在灌水器埋深为 35 cm 时,这是由于灌水器埋深较浅,根系吸水范围内湿润体的体积就越大,说明埋深 35 cm 为 5 年生桃树再生水涌泉根管灌水器的最佳埋设深度;灌水器埋深为 35 cm,

虽然灌水器间距 40,50 cm 土壤湿润体平均含水量差别不大,但当灌水器间距为 50 cm 时,湿润体含水量均匀系数更大。因此,灌水器埋深及间距分别为 35,50 cm 为 5 年生桃树再生水双源涌泉根灌的最优布置参数。

表 6 1 年生桃树根系吸水范围内含水率均匀系数 C<sub>u</sub>

| 灌水器<br>间距/cm | 灌水器埋深 |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|
|              | 35 cm | 45 cm | 55 cm |
| 40           | 0.78  | 0.78  | 1.00  |
| 50           | 0.77  | 0.82  | 1.00  |
| 60           | 0.68  | 0.79  | 1.00  |

表 7 5 年生桃树根系吸水范围内地表以下各处含水率分布及均值

单位:cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

| 灌水器<br>间距/cm | 灌水器埋深 35 cm |       |       |       | 灌水器埋深 45 cm |       |       |       | 灌水器埋深 55 cm |       |       |       |
|--------------|-------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|
|              | 地下          | 地下    | 地下    | 均值    | 地下          | 地下    | 地下    | 均值    | 地下          | 地下    | 地下    | 均值    |
|              | 10 cm       | 30 cm | 50 cm |       | 10 cm       | 30 cm | 50 cm |       | 10 cm       | 30 cm | 50 cm |       |
| 40           | 0.134       | 0.182 | 0.183 | 0.166 | 0.097       | 0.163 | 0.188 | 0.149 | 0.076       | 0.131 | 0.185 | 0.131 |
| 50           | 0.128       | 0.179 | 0.181 | 0.163 | 0.091       | 0.157 | 0.182 | 0.143 | 0.076       | 0.128 | 0.166 | 0.123 |
| 60           | 0.110       | 0.167 | 0.166 | 0.147 | 0.083       | 0.144 | 0.176 | 0.134 | 0.076       | 0.108 | 0.169 | 0.117 |

表 8 5 年生桃树根系吸水范围内地表以下各处含水率均匀系数(C<sub>u</sub>)

| 灌水器<br>间距/cm | 灌水器埋深 35 cm |       |       |      | 灌水器埋深 45 cm |       |       |      | 灌水器埋深 55 cm |       |       |      |
|--------------|-------------|-------|-------|------|-------------|-------|-------|------|-------------|-------|-------|------|
|              | 地下          | 地下    | 地下    | 均值   | 地下          | 地下    | 地下    | 均值   | 地下          | 地下    | 地下    | 均值   |
|              | 10 cm       | 30 cm | 50 cm |      | 10 cm       | 30 cm | 50 cm |      | 10 cm       | 30 cm | 50 cm |      |
| 40           | 0.54        | 0.42  | 0.44  | 0.47 | 0.73        | 0.48  | 0.42  | 0.54 | 1.00        | 0.54  | 0.44  | 0.66 |
| 50           | 0.57        | 0.46  | 0.47  | 0.50 | 0.80        | 0.48  | 0.46  | 0.58 | 0.65        | 0.49  | 0.48  | 0.54 |
| 60           | 0.59        | 0.49  | 0.48  | 0.52 | 0.86        | 0.54  | 0.49  | 0.63 | 1.00        | 0.64  | 0.50  | 0.71 |

从表 9 可以看出,10 年生桃树涌泉根灌灌水器埋深分别为 35,45 cm,灌水器间距分别为 40,50 cm 时,含水率均值均大于 0.13 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,且差别不大。从表 10 可以看出,当灌水器埋深为 45 cm

和灌水器间距为 40 cm 时,C<sub>u</sub> 值最大且含水率均值也较大,因此灌水器埋深 45 cm 和灌水器间距 40 cm 为 10 年生桃树再生水双源涌泉根灌的最优布置参数。

表 9 10 年生桃树根系吸水范围内地表以下各处含水率分布及均值

单位:cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

| 灌水器<br>间距/cm | 灌水器埋深 35 cm |       |       |       |       | 灌水器埋深 45 cm |       |       |       |       | 灌水器埋深 55 cm |       |       |       |       |
|--------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|
|              | 地下          | 地下    | 地下    | 地下    | 均值    | 地下          | 地下    | 地下    | 地下    | 均值    | 地下          | 地下    | 地下    | 地下    | 均值    |
|              | 10 cm       | 30 cm | 50 cm | 70 cm |       | 10 cm       | 30 cm | 50 cm | 70 cm |       | 10 cm       | 30 cm | 50 cm | 70 cm |       |
| 40           | 0.120       | 0.158 | 0.158 | 0.124 | 0.140 | 0.092       | 0.143 | 0.162 | 0.138 | 0.134 | 0.076       | 0.118 | 0.159 | 0.154 | 0.127 |
| 50           | 0.116       | 0.155 | 0.157 | 0.122 | 0.138 | 0.087       | 0.138 | 0.160 | 0.135 | 0.130 | 0.076       | 0.116 | 0.155 | 0.149 | 0.124 |
| 60           | 0.103       | 0.146 | 0.145 | 0.114 | 0.127 | 0.080       | 0.129 | 0.153 | 0.129 | 0.123 | 0.076       | 0.100 | 0.148 | 0.140 | 0.116 |

表 10 10 年生桃树根系吸水范围内地表以下各处含水率均匀系数(C<sub>u</sub>)

| 灌水器<br>间距/cm | 灌水器埋深 35 cm |       |       |       |      | 灌水器埋深 45 cm |       |       |       |      | 灌水器埋深 55 cm |       |       |       |      |
|--------------|-------------|-------|-------|-------|------|-------------|-------|-------|-------|------|-------------|-------|-------|-------|------|
|              | 地下          | 地下    | 地下    | 地下    | 均值   | 地下          | 地下    | 地下    | 地下    | 均值   | 地下          | 地下    | 地下    | 地下    | 均值   |
|              | 10 cm       | 30 cm | 50 cm | 70 cm |      | 10 cm       | 30 cm | 50 cm | 70 cm |      | 10 cm       | 30 cm | 50 cm | 70 cm |      |
| 40           | 0.53        | 0.38  | 0.39  | 0.53  | 0.46 | 0.75        | 0.44  | 0.36  | 0.44  | 0.50 | 1.00        | 0.54  | 0.39  | 0.41  | 0.59 |
| 50           | 0.57        | 0.39  | 0.40  | 0.54  | 0.48 | 0.41        | 0.45  | 0.39  | 0.48  | 0.43 | 1.00        | 0.56  | 0.39  | 0.41  | 0.59 |
| 60           | 0.66        | 0.44  | 0.44  | 0.59  | 0.53 | 0.30        | 0.49  | 0.42  | 0.49  | 0.43 | 1.00        | 0.59  | 0.43  | 0.42  | 0.61 |

5 结 论

(1)双源涌泉根灌土壤水分入渗过程分自由入渗阶段和交汇入渗阶段。再生水灌溉条件下,模型对此

2 个阶段湿润锋运移距离的模拟效果均较好,自由入渗阶段模拟值和实测值之间 R<sup>2</sup> 均在 0.91 以上, RMSE 小于 0.9,F 检验 P 值均在 0.05 以上;交汇入

渗阶段,模拟值和实测值之间  $R^2$  均在 0.89 以上,大于其临界决定系数, RMSE 在 1.5 之内,  $F$  检验  $P$  值均大于 0.05;模型模拟交汇发生时间误差小于 5%。

(2)模型对再生水灌水结束后不同时刻土壤剖面水分分布的模拟效果较好,但随着时间的增长,模拟精度逐渐下降。灌水结束时以及灌水结束 2 天时,模拟值和实测值之间  $R^2$  均大于 0.90, RMSE 小于 0.02,  $F$  检验  $P$  值也均在 0.05 以上;灌水结束 2 天和灌水结束 3 天时,模拟值和实测值之间  $R^2$  均相对较低,处于 0.75~0.85,但大于临界决定系数,  $F$  检验  $P$  值均在 0.05 以上, RMSE 也控制在 0.05 之内。

(3)运用 Hydrus-3D 软件预测 1,5,10 年生桃树再生水双源涌泉根灌灌水器最优布置参数,表明 1,5,10 年生桃树灌水器最优布设埋深和间距分别为 35,40 cm、35,50 cm 和 45,40 cm。

# 参考文献:

- [1] 刘智超.从河湖管理与保护角度看新时代兴水治水“系统治理”的必然:关于“系统治理”的学习心得[J].水利发展研究,2018,18(7):22-23.
- [2] 夏军,石卫,雒新萍,等.气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J].水科学进展,2015,26(2):279-286.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 25499-2010 城市污水再生利用 绿地灌溉水质[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [4] 刘静,陈莹,赵辉,等.关于促进我国再生水利用的思考[J].中国水利,2017(15):6-8.
- [5] 张陆军.山地枣树涌泉根灌适宜灌水器布置方式与灌水量研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [6] 费良军,曹俊,聂卫波.涌泉根灌土壤湿润体特性试验[J].排灌机械工程学报,2011,29(3):260-265.
- [7] 樊晓康.涌泉根灌土壤湿润体影响因素的试验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [8] 黎朋红,汪有科,马理辉,等.涌泉根灌湿润体特征值变化规律研究[J].水土保持学报,2009,23(6):190-194.
- [9] 车银伟.枣树涌泉根灌的灌水效果及其灌水技术研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [10] 汪有科,黎朋红,马理辉,等.涌泉根灌在黄土地的水分运移规律试验[J].排灌机械工程学报,2010,28(5):549-554.
- [11] 吴恒卿,黄强,魏群.涌泉根灌双点源交汇入渗湿润体试验研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(5):201-207.
- [12] Crevoisier D, Popoca Z, Mailhol J C, et al. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer un-

- der furrow irrigation[J]. Agricultural Water Management,2010,95(4):354-366.
- [13] Cote C M, Bristow K L, Charlesworth P B, et al. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation[J]. Irrigation Science,2003,22(3/4):143-156.
- [14] Bristow K L, Cote C M, Thorburn P J, et al. Soil wetting and solute transport in trickle irrigation systems [R].Cape Town, South Africa: 6th International Micro-irrigation Conference,22-27 October 2000.
- [15] Bhatnagar P R, Chauhan H S. Soil water movement under a single surface trickle source[J]. Agricultural Water Management,2008,95(7):799-808.
- [16] Beggs R A, Tchobanoglous G, Hills D, et al. Modeling subsurface drip application of onsite wastewater treatment system effluent [C] // On-Site Wastewater Treatment X, Proceedings of the Tenth National Symposium on Individual and Small Community Sewage Systems,2004:92-103.
- [17] Patel N, Rajput T B S. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion[J].Agricultural Water Management,2008,95(12):1335-1349.
- [18] Skaggs T H, Trout T J, Rothfuss Y. Drip irrigation water distribution pattern: Effects of emitter rate, pulsing and antecedent water[J].Soil Science Society of America Journal,2012,74(6):1886-1896.
- [19] 李耀刚,王文娥,胡笑涛.基于 HYDRUS-3D 的涌泉根灌土壤入渗数值模拟[J].排灌机械工程学报,2013,31(6):546-552.
- [20] 李久生,张建君,饶敏杰.滴灌施肥灌溉的水氮运移数学模拟及试验验证[J].水利学报,2005,36(8):931-936.
- [21] 余根坚,黄介生,高占义.基于 Hydrus 模型不同灌水模式下的土壤水盐运移模型[J].水利学报,2013,44(7):826-834.
- [22] 周广林,王全九,李云,等.Hydrus-3D 模型模拟田间点源入渗与水分再分布准确性价[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):113-121.
- [23] 张亚飞,罗静静,彭福田,等.肥料袋控缓释对桃树根系生长、氮素吸收利用及产量品质的影响[J].中国农业科学,2017,50(24):4769-4778.
- [24] 王晨冰,赵秀梅,常毅,等.垄膜保墒集雨栽培对旱地桃树根系分布的影响[J].甘肃农业科技,2013(6):9-11.
- [25] 徐艳如.桃根系分布特点及其对不同施肥处理的反应[D].山东 泰安:山东农业大学,2011.
- [26] 白岗栓,邹超煜,于健,等.激光平地对灌水均匀度及春小麦生长的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):85-90.