

Hydrus – 3D 模型模拟田间点源入渗与水分再分布准确性评价

周广林, 王全九, 李 云, 苏李君

(西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 滴灌条件下水分入渗与再分布是评价滴灌灌溉效率的重要内容, 通过 Hydrus3D 模型模拟单点源和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验证。结果表明: 采用 Hydrus3D 软件建立的模型可较好地模拟单点源水分入渗、水平湿润锋扩散过程及土壤剖面水分的分布情况, 水平湿润锋距离的模拟值和实测值的误差在灌水结束时达到最大, 且滴头流量越大, 误差亦越明显, 其中最大绝对误差为 4.6 cm, 最大相对误差达 0.167, R^2 在 0.95 以上, F 检验 P 值大于 0.05, 且 RMSE 在 2.1 以内; 模型模拟的土壤体积含水量分布和实测值基本一致, 模拟值和实测值的 R^2 在 0.90 以上, F 检验 P 值大于 0.05, RMSE 均小于 0.07; 湿润范围模拟结果和实测结果的吻合度较高。灌水结束后 20 h, 模拟土壤剖面含水量的分布情况与实测值基本一致, 模拟值和实测值 R^2 在 0.575 ~ 0.652 之间, F 检验 P 值大于 0.05, RMSE 在 0.013 左右, 双点源交汇区整个剖面模拟值和实测值 R^2 为 0.526 以上, F 检验 P 值大于 0.05, RMSE 均小于 0.01, 模拟结果较好, 说明 Hydrus3D 模型可模拟土壤水分再分布情况。

关键词: Hydrus3D; 模型评价; 水分再分布

中图分类号: S274.1 **文献标志码:** A

Accuracy evaluation of simulating point source infiltration in field and water redistribution based on Hydrus – 3D model

ZHOU Guang-lin, WANG Quan-jiu, LI Yun, SU Li-jun

(Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Under the drip irrigation condition, the water infiltration and redistribution process is an important content of evaluating irrigation efficiency. Through the Hydrus – 3D model, has simulated the single point source infiltration and redistribution, and verified by the measured information of the field experiments. The results showed that: Using the Hydrus – 3D software to set up the model, it can be good simulated the single point source infiltration, horizontal wetting front diffusion process and the distribution situation of soil water in soil profile. The error between simulated and measured values of the distance for the horizontal wetting front was reached the maximum when the end of irrigation, also the bigger of the trickle discharge, the more obvious of the error. Among them the maximal absolute error was 4.6 cm, the maximal relative error was 0.167 and the R^2 was more than 0.95. The P value in F-test was more than 0.05 and RMSE was less than 2.1. The simulated soil water content distribution was quiet consistent with the measured values, the R^2 of simulated and measured values was above 0.90, the P value in F-test was more than 0.05 and RMSE was less than 0.07. The simulated and measured soil wetting range was higher degree of agreement. After end of irrigation for 20 hours, the simulated water content distribution in soil profile was in agreement with the measured values, the R^2 between simulated and measured values was between 0.575 ~ 0.652, the P value in F-test was more than 0.05 and RMSE was about 0.013. Whole profile in double point sources interference area, the R^2 of simulated and measured values was

收稿日期: 2014-02-15

基金项目: 新疆“十二五”科技重大专项“新疆绿洲灌区节水关键技术和用水安全研究与示范”(2011BAD29B05)

作者简介: 周广林(1988—), 男, 黑龙江黑河人, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源与生态环境研究。E-mail: idzhongl@163.com。

通信作者: 王全九(1964—), 男, 教授, 内蒙古丰镇人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理与溶质迁移研究。E-mail: wquanjiu@163.com。

above 0.526, the P value in F-test was more than 0.05, RMSE was total less than 0.01. The simulated results were quite good, it explained that the situations of soil water redistribution can be simulated by the Hydrus3D model.

Keywords: Hydrus 3D; model evaluation; water redistribution

在干旱半干旱缺水地区,滴灌是一种最有效的节水灌溉方式之一,水的利用率可达 95% 以上。其中滴头间距、滴头流量以及滴灌带间距是滴灌系统设计的重要参数,直接影响滴灌系统的投资,同时亦影响作物根区土壤湿润状况,继而影响作物根系的吸水特征以及作物的生长发育。因此,研究滴灌条件下,土壤水分特征对于评价滴灌水分有效性具有重要意义。Hydrus - 3D 模型是可模拟非饱和(或饱和)土壤水运动的计算机模型^[1-4]。该软件可以由用户灵活地构造模拟环境、处理各类边界条件,如定流量边界、定水头边界、变流量边界、变水头边界、大气边界、自由排水边界以及渗水边界等^[5]。许多学者利用 Hydrus 模型对滴灌系统条件下的土壤水分运动进行了研究。

曹巧红^[6]等人利用 Hydrus1D 模型模拟冬小麦农田水分氮素运移过程,对肥料的优化利用提供了一定的技术指导。吴元芝^[7]等人利用 Hydrus1D 模型模拟了不同土质玉米生长状况或蒸发力条件下根系吸水速率随含水量的变化,确定了不同条件下根系吸水速率开始降低的临界含水量。Phillips^[8]通过土柱实验验证了 Hydrus - 2D 模型对活性化学物质(如钾元素)运移的模拟精度。Naseri^[9]等人对于室内试验利用 Hydrus3D 模型研究了磷离子运移,通过对比试验资料和模型资料,数值模拟结果可以很好的模拟磷离子的运移情况。Shan^[10]等人利用 Hydrus3d 模拟了双管布设条件下的不同滴头间距以及不同滴头流量情况下,双点源交汇区水盐运移规律。李耀刚^[11]等人利用 Hyrus3d 模拟分析了涌泉根区土壤入渗特征,并对模拟值和实测值进行对比,结果表明模拟值和实测值的相对误差小于 10%,数值模拟结果可以为涌泉根区系统的设计和运行提供理论依据。

以上研究结果大多为对于实验室的扰动土研究,而对于蒸发条件下田间水分的 Hydrus - 3D 模拟研究较少,而 Hydrus - 3D 是否可以准确模拟田间土壤水分入渗和再分布过程,需要进一步研究。因此,对于田间试验,本文利用 hydrus3D 模型对干旱区滴灌条件下水分入渗和再分布过程进行了模拟,并对实测值与模拟值进行误差分析,以验证模型的精确性和适用性,为 Hydrus3d 模型的合理利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

实验地位于新疆乌鲁木齐头屯河农场 2 连一葡萄园间,该地区属于中温带大陆干旱气候区,温差大,寒暑变化剧烈,降水量少,冬季时间长,春秋多大风。年平均气温 7.2℃;年平均湿度为 58%,年平均降水量 200.9 mm,海拔为 800 m,坡度为 0.3%。葡萄园土壤质地为壤土,土层深度为 60 ~ 80 cm,下层为砂砾。

1.2 试验土壤基本物理特征

在试验地提取土样,利用马尔文粒度仪 2000 测定土壤颗粒级配,利用环刀法测定容重,结果如表 1 所示。根据颗粒组成和容重,利用 RETC 软件分析获得 *van Genuchten* 土壤水分特征曲线相关参数^[12-13],结果列于表 2 中,*van Genuchten* 土壤水分特征曲线模型表示如下^[14]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \tag{1}$$

式中: θ 为土壤体积含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_r 为滞留含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_s 为饱和含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为土壤吸力(cm); α 、 m 和 n 为拟合参数,其中 $m = 1 - 1/n$ ^[15]。

为了获得试验土壤饱和导水率,用 PVC 管(内径 15 cm,长 50 cm)提钻取原状土土柱,并进行定水头法测定土壤饱和导水率 K_s ,结果见表 2 中。

表 1 土壤颗粒级配及土壤容重				
Table 1 Gradation of soil particle size and bulk density				
土层深度 Soil depth /cm	砂粒/% Sand (> 0.25 mm)	粉粒/% Silt (0.02 ~ 0.25 mm)	黏粒/% Clay (< 0.02 mm)	容重 Bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
0	56.66	37.19	7.15	1.35
20	47.26	43.49	9.25	1.45
40	47.05	42.02	10.90	1.40
60	54.16	35.54	10.30	1.48
80	53.37	37.06	9.41	1.53

1.3 试验内容与过程

为了研究点源入渗条件下土壤水分运动情况。选择了 3 个滴头流量($1.8 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $2.5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $3.2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$)进行田间单点源入渗试验,为进一步验证模型准确性和适用性,又进行了田间双点源入渗实验,滴

头流量选择 $3.2\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,点源实验的滴头间距均为 30 cm 。同时,利用微型蒸渗仪测定了土面蒸发量,日蒸发强度为 $0.9\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

表 2 van Genuchten 模型参数

Table 2 The parameters of van Genuchten model

土层深度/cm Soil depth	θ_r	θ_s	a	n	K_s $/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	l
0	0.0364		0.0182	1.476		
20	0.0393		0.0131	1.4849		
40	0.0435	0.45	0.0116	1.5708	0.05	0.5
60	0.0401		0.0193	1.4414		
80	0.0404		0.0211	1.4211		

实验装置由供水系统(马氏瓶)和滴头(医用输液管)组成,如图 1(a)。实验前通过调整马氏瓶的高度来调节水箱水头,以此确定三种滴头流量。

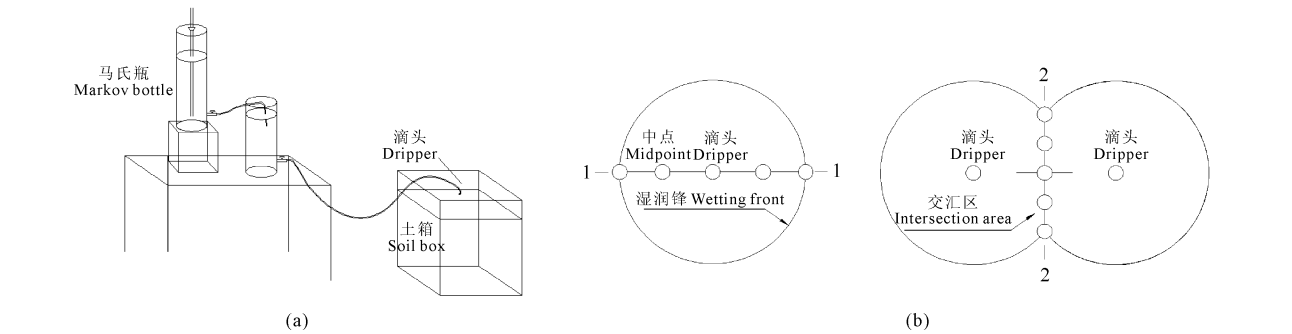


图 1 点源实验装置及取土剖面示意图

Fig.1 Point source experimental device and soil profile diagram

1.4 数值模拟

1.4.1 土壤水分运动方程 假定条件:① 实验土壤为均质且各项同性,② 忽略土壤温度以及土壤水分数量和能量关系的滞后效应对土壤水分运动的影响。土壤水分运动方程表示如下^[16]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - S(z, y, z, t) \quad (2)$$

其中: θ 为土壤体积含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); t 为时间(min); x 、 y 和 z 为空间坐标(cm); $K(\theta)$ 为非饱和土壤导水率($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); S 为土表蒸发项($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)。

1.4.2 模型初始条件 土壤水分运动方程的求解初始条件为:

$$\theta(x, y, z, t) = \theta_0(x, y, z), 0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, 0 \leq z \leq Z, t = 0 \quad (3)$$

其中: $\theta_0(x, y, z)$ 为初始含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),模型依据实际情况根据表 1 设定不同土层初始含水量,并

实验前在实验区域旁用土钻取土,烘干法测定实验初始土壤含水量,结果见表 3。在灌水结束后 0 h 用土钻取土;灌水结束后 20 h ,再次用土钻取土。取土剖面示意图见图 1(b),其中 1-1 和 2-2 为观测剖面。每次取土深度为 80 cm (0 、 10 、 20 、 40 、 60 cm 和 80 cm)。土壤剖面含水量的分布情况用软件 surfer8.0 进行绘制。

表 3 实验前土壤剖面含水量分布情况

Table 3 The distribution of soil water content in soil profile before test

深度/cm Soil depth	0	20	40	60	80
含水量 Water content $/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	0.097	0.16	0.224	0.28	0.252

假定各土层含水量成线性分布。 X 、 Y 、 Z 分别为模型计算区域的长度、宽度和高度,本次试验模型取 $X = 240\text{ cm}$ 、 $Y = 200\text{ cm}$ 、 $Z = 80\text{ cm}$,模型运行时间 t 为 $1\,620\text{ min}$ 。

1.4.3 边界条件 图 2 为滴灌条件下土壤水分运动模拟计算区域示意图(a 和 b 分别代表双点源和单点源模拟计算区域)。图中上边界条件 ABCD 设定为大气边界条件,考虑土表面蒸发,其中点源 O 在点源入渗过程设定为恒通量边界条件,再分布过程设定为变通量边界条件,用以模拟滴头处土面蒸发;下边界 A'B'C'D'设定为自由排水条件;因模拟区域较大,假设水分运动到达不到侧边界,故设定侧边界 ABB'A、BCC'B'、CC'D'D 以及 DD'A'A 为零通量边界条件。

2 结果与讨论

为了评价模型模拟的准确性,主要通过土壤含水量剖面分布、水平湿润锋随时间的推移,以及湿润

体范围三方面对模型的精确性进行验证。并利用决定系数 R^2 、标准误(又称均方根误差)RMSE 来评价模型模拟结果的准确性。

2.1 水平湿润锋距离模拟准确性评价

图 3 给出了滴头流量分别为 $1.8、2.5\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $3.2\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的单点源土壤水分入渗条件下湿润锋随时间的变化过程及其对应的模拟值和实测值的对比情况;图 4 显示了不同滴头流量水平湿润锋模拟值和实测值之间的标准残差;表 4 为不同滴头流量模

拟值和实测值之间的 R^2 和 RMSE。

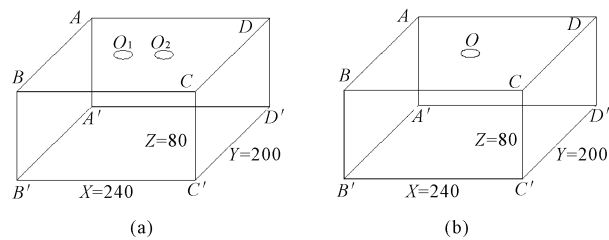


图 2 点源实验控制体示意图

Fig.2 Schematic diagram of control point source experiment

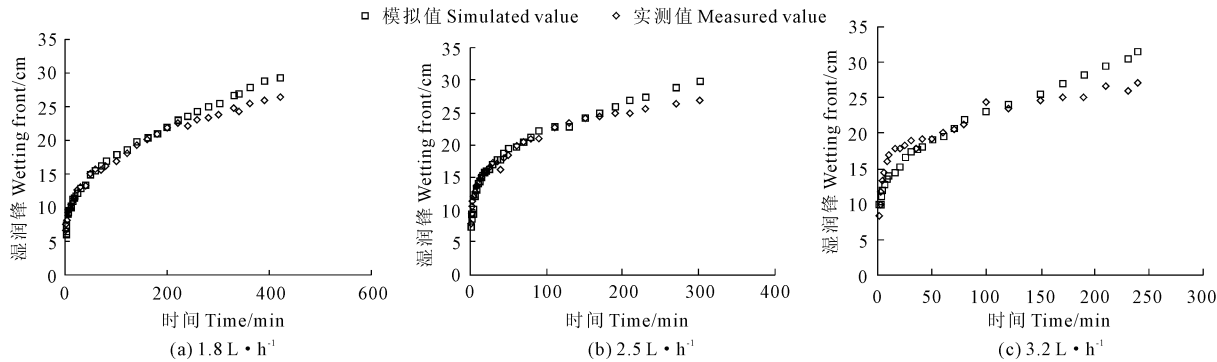


图 3 单点源入渗湿润锋实测值和模拟值随时间的变化(□模拟值 ◇实测值)

Fig.3 Change with time of measured and simulated wetting front by single point source infiltration

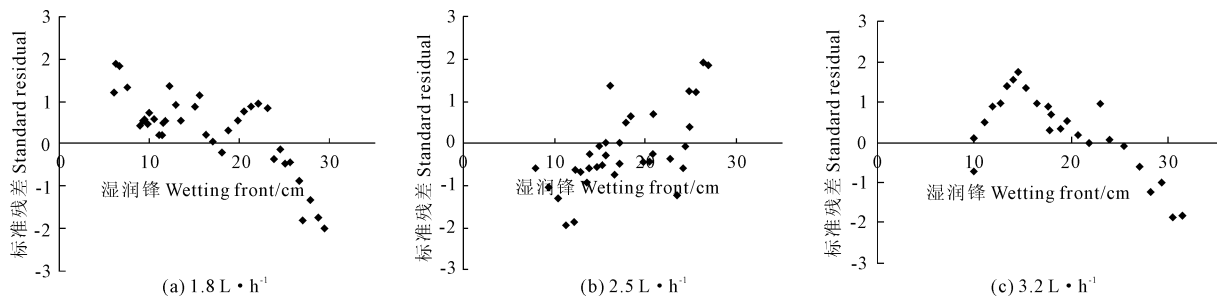


图 4 水平湿润锋距离模拟值和实测值之间的标准残差

Fig.4 Standard residual between simulated and measured value of horizontal wetting front distance

表 4 不同滴头流量模拟值和实测值之间的

F 检验 R^2 和 RMSE

Table 4 F – test, R^2 and RMSE of simulated and measured value under different trickle discharge

误差分析 Error analysis	滴头流量 Drinker discharge/($\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$)		
	1.8	2.5	3.2
R^2	0.9697	0.9666	0.9477
RMSE	0.8680	1.0545	2.1014
F 检验 $P(F\leq f)$	0.199	0.189	0.074

从图 3 中可以看出,模型可以很好地模拟湿润锋随时间的变化情况,模型模拟值和实测值基本一致。在模拟入渗初期,模型模拟值均小于实测值,但随着时间的推移,模型模拟值和实测值的差距逐渐减小,而在模拟入渗后期,模拟值均逐渐大于实测

值,在模拟结束时刻,模拟值和实测值之间的相对误差较大,最大绝对误差为 4.6 cm,最大相对误差为 0.167,但对于整个点源入渗过程的模拟,模型模拟效果较好,模拟的 3 个滴头流量的模拟值和实测值之间的 R^2 较高,均在 0.94 以上, RMSE 亦控制在 2.1 以内,从 F 检验的结果也可以看出模拟结果和实测结果之间的差异并不显著,各滴头流量的不同观测点处的 P 值均在 0.05 之上。

从图 4 中可以看出,模型对 3 个滴头流量水平湿润锋的模拟值和实测值的标准残差均无规则的散落在 ± 2 之间,且无异常数值存在,说明模型模拟值和实测值的吻合度较好。

2.2 土壤含水量剖面模拟准确性评价

图 5 以及图 7 分别为不同滴头流量单点源入渗

结束时刻和灌水结束后 20 h 时刻,模型模拟结果和实测结果的土壤剖面体积含水量分布情况,其中坐标原点为滴头处。表 5 给出了不同滴头流量距滴头

不同位置处及整个剖面模型模拟值和实测值间的 F 检验、RMSE 和 R^2 。

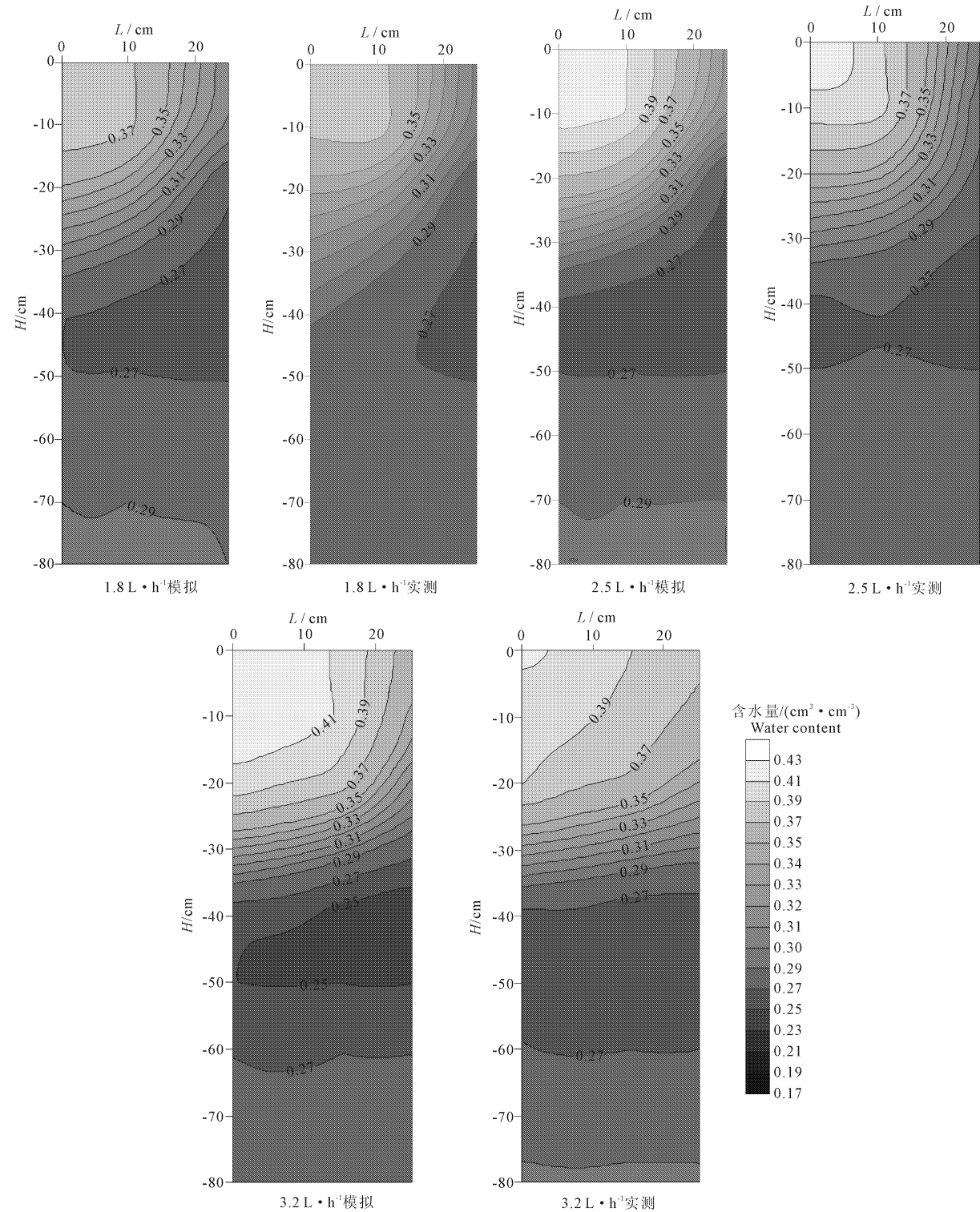


图 5 灌水结束时土壤剖面含水量的模拟值和实测值对比

Fig.5 Comparison between simulated and measured values of soil water content in profile at the end of the irrigation

从图 5 中,通过对比模型模拟和实测的土壤剖面体积含水量的分布结果可以看出,在土层深度为

0~50 cm 的土壤剖面,利用模型模拟的结果精度较高,可以很好地反映实际水分入渗引起的土壤剖面

水分运移及其分布的情况,对于 50 ~ 80 cm 深度的土层剖面的水分分布情况,模拟值和实测值略有差异,但差异并不显著。从表 5 中可以看出,在灌水结束后,除滴头流量为 $2.5\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 在距滴头 25 cm 处的 R^2 为 0.728,其他 3 种滴头流量下模拟值和实测值之间的 R^2 均在 0.95 以上;3 种滴头流量处理的 RMSE 均控制在 0.07 之内,从 F 检验的结果也可以看出模拟结果和实测结果之间的差异并不显著,各滴头流量的不同观测点处的 P 值均在 0.05 之上;此外,3 种滴头流量的湿润体范围模拟值和实测值

十分接近。而从图 6 中给出的不同滴头流量处理的模拟值和实测值之间的标准残差分布来看,标准残差除极个别点外,均无规则的散落在 ± 2 之间,这些结果均表明模拟模型模拟水分入渗过程的结果十分理想。对于模型水量平衡,滴头流量分别为 1.8 、 $2.5\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $3.2\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的实际入渗水量分别为 $12\ 500\text{ cm}^3$ 、 $12\ 700\text{ cm}^3$ 和 $12\ 800\text{ cm}^3$,而模型模拟入渗水量分别为 $12\ 600\text{ cm}^3$ 、 $12\ 800\text{ cm}^3$ 和 $13\ 333\text{ cm}^3$,相对误差分别为 0.79%、0.781% 和 3.99%,入渗水量存在较小偏差。

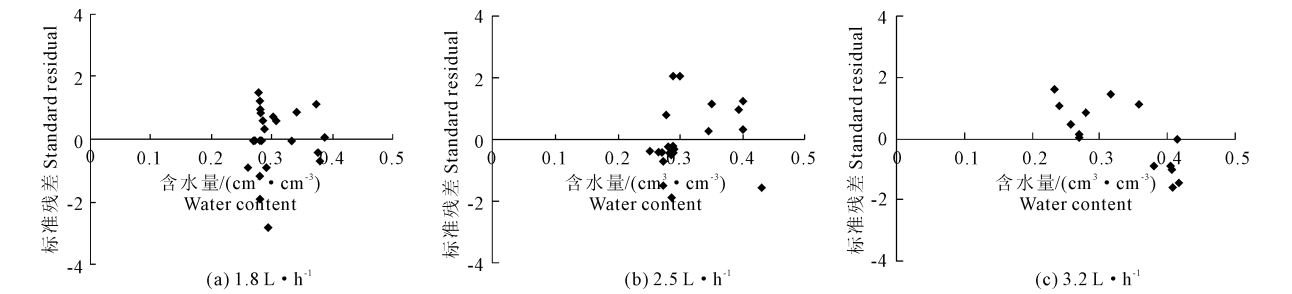


图 6 灌水结束后土壤剖面含水量实测值和模拟值的标准残差

Fig.6 Standard residual of measured and simulated values of water content in soil at the end of irrigation

表 5 不同位置处土壤含水量模拟值和实测值之间的 F 检验、RMSE 和 R^2

Table 5 F -test, R^2 and RMSE between simulated and measured values of soil water content in different position

距滴头距离 Distance from emitter	误差分析 Error analysis	1.8 L·h ⁻¹		2.5 L·h ⁻¹		3.2 L·h ⁻¹	
		0 h	20 h	0 h	20 h	0 h	20 h
0 cm	R^2	0.956	0.502	0.97	0.762	0.968	0.773
	RMSE	0.045	0.013	0.063	0.012	0.072	0.01
	F 检验 $P(F\leq f)$	0.341	0.233	0.363	0.075	0.361	0.372
10 cm	R^2	0.966	0.631	0.959	0.660	0.99	0.771
	RMSE	0.063	0.009	0.056	0.011	0.065	0.013
	F 检验 $P(F\leq f)$	0.477	0.053	0.166	0.499	0.317	0.458
25 cm	R^2	0.949	0.712	0.728	0.68	0.953	0.706
	RMSE	0.092	0.015	0.020	0.014	0.042	0.015
	F 检验 $P(F\leq f)$	0.494	0.249	0.172	0.427	0.480	0.233

注：“0 h”指的是马氏瓶停止供水的那一时刻，“20 h”则指的是马氏瓶停止供水后 20 h 时刻。

从图 7 中可以看,灌水结束后经过 20 h 的水分再分布以及土面蒸发,模型模拟的 3 种滴头流量的土壤剖面含水量分布情况和实测值之间大体一致,但两者在土壤表层表现出一定的差异。从表 5 可以看出,土壤剖面含水量的实测值和模拟值之间的差异并不显著,模拟精度较高,距滴头不同距离的各个观测点处,模拟值和实测值之间 R^2 大体介于 0.6 ~ 0.7 之间, RMSE 则在 0.016 之内;从图 8 中可以看出模型模拟结果无异常点,均无规律地散落在 ± 2 之间。总体而言:对于整个土壤剖面,模型模拟水分再分布的模拟值和实测值的 R^2 控制在 0.575 ~

0.652 之间, RMSE 控制在 0.013 之内, F 检验结果也表明两者之间的差异不具有统计学意义,这表明模型模拟结果较好,可以反映出土壤剖面水分运移的实际情况。

2.3 点源交汇情况下模型模拟准确性评估

田间实际灌溉过程中,土体湿润过程存在点源入渗交汇作用,因此分析点源交汇情况下土壤水分分布特征,更加符合实际滴灌水分运动过程。而点源交汇和单点源入渗情况下水分运动最大区别在于交汇区,因此有必要对采用 Hydrus3d 软件建立的模型对田间滴灌过程中点源交汇区水分分布模拟过程

的准确性进行评价。

由以上单点源实验结果可知,随着滴头流量的增加,采用 Hydrus3d 软件建立的模型模拟的结果和实测结果之间的差异有增大的趋势(如水平湿润锋

的扩散过程),且该地区葡萄园滴灌系统所采用滴头流量约为 $3.2\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,因此本文仅以滴头流量 $3.2\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 为例,对田间点源交汇入渗与水分再分布过程进行精确性分析。

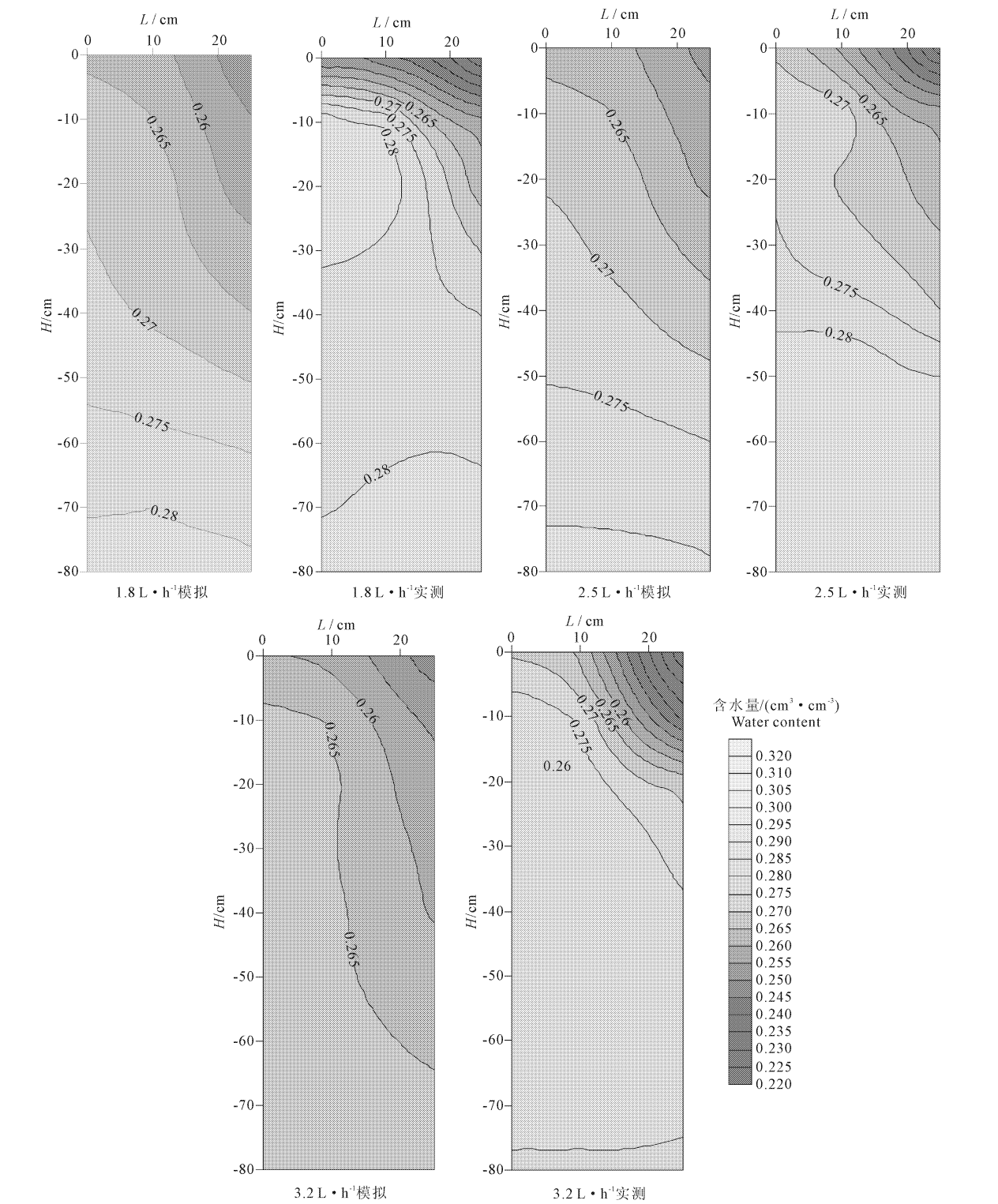


图 7 单点源入渗结束后 20 h 土壤剖面含水量实测值和模拟值的对比

Fig.7 Comparison between simulated and measured values of water content in profile after end of irrigation for 20 hours

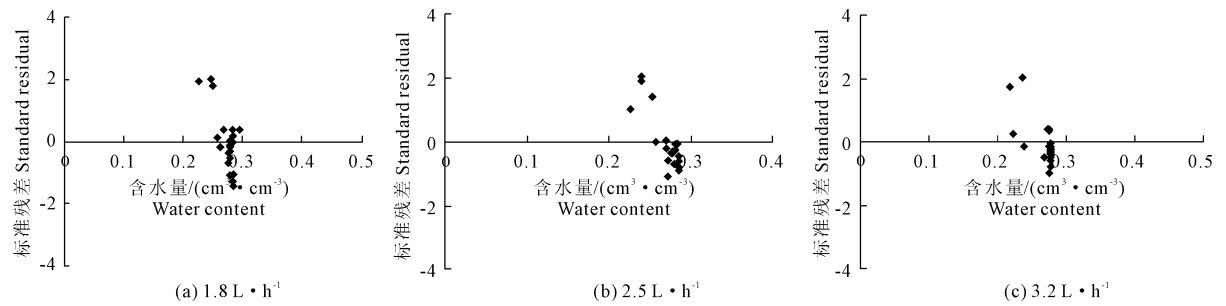


图 8 单点源入渗结束后 20 h 土壤剖面含水量实测值和模拟值的标准残差

Fig.8 Standard residual of measured and simulated values of water content in soil profile after end of single source infiltration for 20 hours

首先根据水量平衡,检验模型模拟准确性,点源交汇实际灌水量为 23 500 ml,模型模拟灌水量为 25 600 ml,灌水量的相对误差为 8.20%。最后对交汇区湿润深度和含水量分布进行分析。

图 9 和图 10 显示了滴头流量为 3.2 L · h⁻¹ 的双点源交汇实验灌水结束后 0 h 时刻和灌水结束后 20 h 时刻,交汇区土壤剖面含水量的模拟值和实测值的对比情况,图 11 显示出了灌水结束后 0 h 时刻和灌水结束后 20 h 时刻,交汇区土壤剖面含水量的模拟值和实测值的标准残差。表 6 给出了距滴头不同位置处模型模拟值和实测值之间的 *R*² 和 RMSE。

果,而湿润体的最大湿润深度亦较实测值大 10 cm; 经过 20 小时的水分再分布,模拟湿润体在水平方向略小于实测值结果,而垂直方向明显大于实测结果,但模拟的湿润体和实测湿润体的变化规律相同,对于整个交汇区土壤剖面,无论是灌水结束时刻还是灌水后 20 h 的水分再分布,模型模拟湿润体范围和实测值之间差异均较小。

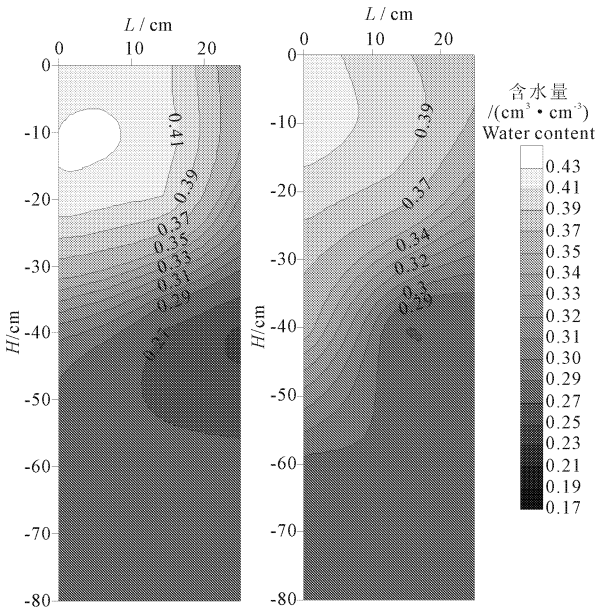


图 9 入渗结束时刻交汇区土壤剖面含水量
实测值和模拟值的对比

Fig.9 Comparison of simulated and measured value of water content in soil profile of interference area when the end of infiltration

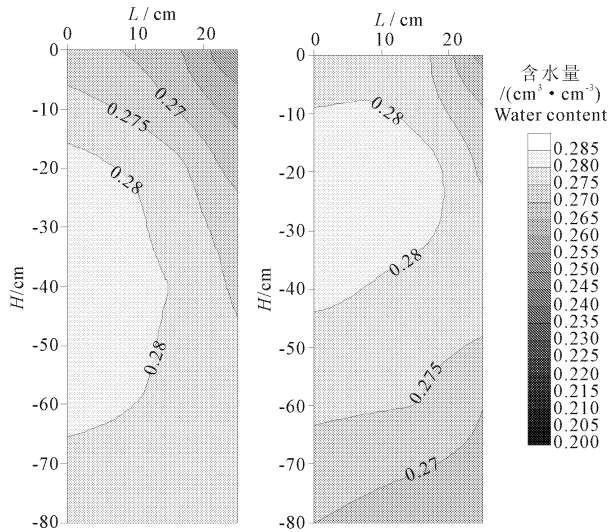


图 10 交汇区灌水结束后 20 h 的水分分布

Fig.10 Comparison of water distribution after end irrigation for 20 hours in the interference area

从图 9 和图 10 中可以看出经过 240 分钟的水分入渗,模型模拟结果的表层湿润范围大于实测结

从图 9 和图 10 和表 6 中可以看出经过 240 分钟的水分入渗,模拟值在点源交汇处的坐标原点处模拟效果相对较差,坐标原点附近的土壤体积含水量大于实测结果;在 20 ~ 50 cm 范围内的土壤剖面,模拟含水量分布情况和实测值之间的吻合度较高。对于整个交汇区土壤剖面含水量分布情况,模型模拟结果较好,整个剖面的实测值和模拟值之间的 *R*² 为 0.916, RMSE 为 0.624,从 *F* 检验的结果也可以看出模拟结果和实测结果直接的差异并不显著,不同观测点处的 *P* 值均在 0.05 之上,且两者的标准残

差均无任何规律的散落在 ± 2 之间,这表明模型模拟结果较为理想,说明可以很好地模拟双点源入渗过程的交汇区水分运移情况;经过 20 h 的土壤水分再分布,模型模拟结果和实测结果吻合度较好,不同位置处实测值和模拟值之间的 RMSE 均在 0.0125 之内,而整个交汇区剖面的 RMSE 则在 0.01 之内,图 11 也说明模拟结果和实测结果之间的差异并不明显;但模型模拟值和实测值之间的 R^2 在不同位置处的值均相对较低(0.532 ~ 0.577),说明模型模拟水分再分布的水分运移变化规律的精度相对较差。总体而言,模型模拟交汇区的水分运移分布规律的模拟结果良好,可以作为预测田间土壤水分运移规律的工具。

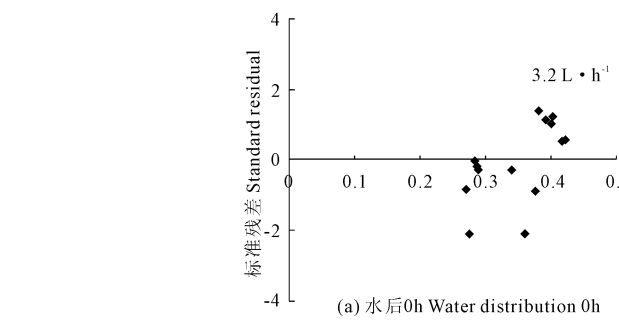


表 6 交汇区模型模拟值和实测值的 F 检验、RMSE 和 R^2

Table 6 F - test, R^2 and RMSE of simulated and measured values in interference area

距滴头距离 Distance from mitter	误差分析 Error analysis	水后 0 h Water distribution 0 h	水后 20 h Water distribution 20 h
0 cm	R^2	0.866	0.577
	RMSE	0.067	0.010
	F 检验 $P(F \leq f)$	0.347	0.113
10 cm	R^2	0.920	0.532
	RMSE	0.066	0.0125
	F 检验 $P(F \leq f)$	0.424	0.108
25 cm	R^2	0.918	0.547
	RMSE	0.0407	0.007
	F 检验 $P(F \leq f)$	0.483	0.373

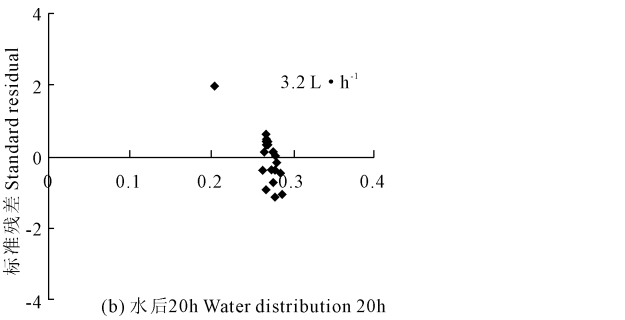


图 11 交汇区土壤剖面含水量实测值和模拟值的标准残差

Fig.11 Standard residual of measured and simulated values of water content in soil profile at the interference area

3 结 论

本文利用 Hydrus3D 模型对单点源和双点源交汇区水分入渗及再分布进行了模拟,利用田间试验实测资料对模拟结果进行了精确性验证,得到以下结论:

1) 模型对单点源水平湿润锋随时间的变化规律和水分运移规律均可以很好的模拟,模拟水平湿润锋随时间的变化规律和实测值之间的 R^2 均在 0.95 之上, RMSE 控制在 2.1 之内;灌水结束时刻的土壤剖面含水量模拟值和实测值之间的 R^2 均在 0.95 之上, RMSE 均小于 0.07;双点源交汇区土壤剖面含水量分布模型模拟值和实测值在不同位置处的 R^2 在 0.866 以上, RMSE 在 0.07 以下,而整个交汇区剖面含水量的分布,模拟值和实测值之间的 R^2 为 0.916、RMSE 为 0.0624, F 检验 P 值均在 0.05 之上。此外,模型模拟湿润体范围模拟结果和实测结果之间的吻合度较高。

2) 灌水结束后,经过 20 h 的水分再分布,单点源模型模拟土壤剖面含水量的分布情况与实测值大体一致,在不同位置处模拟结果和实测结果之间的

R^2 在 0.575 ~ 0.652 之间, RMSE 为 0.013 左右;双点源交汇区,在不同位置处模拟结果和实测结果之间的 R^2 在 0.532 ~ 0.577 之间, RMSE 在 0.0071 和 0.0125 之间,从 F 检验的结果也可以看出模拟结果和实测结果之间的差异并不显著, P 值均在 0.05 之上,这说明模型模拟结果良好,模型可以模拟水分再分布的土壤剖面水分分布情况。

因此, Hydrus – 3Dd 软件可很好模拟滴灌情况下水分入渗及其再分布过程,可用于滴灌系统设计和评价中。

参 考 文 献:

[1] Goutaland D, Angulo-jaramillo R, Winiarski T, et al. HYDRUS – 3D flow model to investigate urban vadose zone hydrology [C]//Proceedings of the Geophys Res Abstr, F, 2008.

[2] W HLING T, SCH TZE N, HEINRICH B, et al. Three-dimensional modeling of multiple Automated Equilibrium Tension Lysimeters to measure vadose zone fluxes [J]. Vadose Zone Journal, 2009, 8(4): 1051-1063.

[3] Kampf S K. Variability and persistence of hillslope initial conditions: A continuous perspective on subsurface flow response to rain events [J]. Journal of Hydrology, 2011, 404(3): 176-185.

(下转第 129 页)

[23]

肖俊夫,刘战东,段爱旺,等.不同土壤水分条件下冬小麦根系分布规律及其耗水特性研究[J].中国农村水利水电,2007,(8):18-21.

[24]

董肖杰,李淑文,柴彦亮,等.不同供水条件对小南瓜产量及根系发育的影响[J].农业工程学报,2009,25(1):17-20.

[25]

薛丽华,段俊杰,王志敏,等.不同水分条件对冬小麦根系时空分布、土壤水利用和产量的影响[J].生态学报,2010,30(19):5296-5305.

[26]

王淑芬,张喜英,裴冬.不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2006,22(2):27-32.

[27]

李波,任树梅,杨培岭,等.供水条件对温室番茄根系分布及产量影响[J].农业工程学报,2007,23(9):39-44.

[28]

范凤翠,张立峰,李志宏,等.日光温室番茄控制土壤深层渗漏的灌水量指标[J].农业工程学报,2010,26(10):83-88.

[29]

陈新明,蔡焕杰,单志杰,等.无压地下灌溉对番茄根系分布特征的调控效应[J].农业工程学报,2009,25(3):10-15.

[30]

张俊,牛文全,张琳琳,等.初始含水率对微润灌溉线源入渗特征的影响[J].灌排机械工程学报,2014,32(1):77-81.

[31]

于秀琴,窦超银,于景春.温室微润灌溉对黄瓜生长和产量的影响[J].中国农学通报,2013,29(7):159-163.

[32]

牛文全,张俊,张琳琳,等.埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的影响[J].农业机械学报,2013,44(12):129-133.

[33]

陈鹏,苏德荣.地下滴灌对草坪土壤水分及根系分布的影响[J].灌溉排水学报,2008,27(6):48-50.

[34]

薛万来,牛文全,张俊,等.压力水头对微润灌土壤水分运动特性影响的试验研究[J].灌溉排水学报,2013,32(6):7-10.

(上接第 121 页)

[4]

Mohanty B, Jana R. A Topography – Based Scaling Algorithm for Soil Hydraulic Parameters at Hill – slope Scales[C]//Proceedings of the AGU Fall Meeting Abstracts, F, 2010.

[5]

Simfinek J, Van Genuchten M, Sejna M. The HYDRUS – 1D software package for simulating one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media[R]. California USA: University of California Riverside Research Reports, 2005.

[6]

曹巧红,龚元石.应用 Hydrus – 1D 模型模拟分析冬小麦农田水分氮素运移特征[J].植物营养与肥料学报,2003,(2):139-145.

[7]

吴元芝,黄明斌.基于 Hydrus – 1D 模型的玉米根系吸水影响因素分析[J].农业工程学报,2011,(2):66-73.

[8]

Phillips I. Modelling water and chemical transport in large undisturbed soil cores using HYDRUS – 2D[J]. Soil Research, 2006,44(1):27-34.

[9]

Naseri A, Hoseini Y, Moazed H, et al. Phosphorus transport through a saturated soil column: comparison between physical modeling and HYDRUS – 3D Outputs[J]. Journal of Applied Sciences, 2011,11(5):815-823.

[10]

Shan Y, Wwang Q. Simulation of salinity distribution in the overlap zone with double-point-source drip irrigation using HYDRUS – 3D [J]. Australian Journal of Crop Science, 2012,6(2):238.

[11]

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.

[12]

苏李君,王全九,白云岗,等.极端干旱地区葡萄根系吸水数值模拟[J].农业工程学报,2013,28:88-92.

[13]

刘建立,徐绍辉,刘慧.估计土壤水分特征曲线的间接方法研究进展[J].水利学报,2004,(2):68-76.

[14]

王全九,邵明安,郑纪勇.土壤中水分运动与溶质迁移[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

[15]

Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976,12(3):513-522.

[16]

邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.