

滴灌施肥条件下土壤水氮运移数值模拟

黎会仙,王文娥,胡笑涛

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了研究滴灌施肥条件下土壤水、氮的运移分布规律,本文通过室内土柱滴灌水氮入渗试验,研究了滴灌结束时及再分布过程中土壤水、氮的运移变化规律;同时用 HYDRUS 软件建立了土柱滴灌水氮入渗的几何模型,用来模拟滴灌土壤水氮运移过程。对试验及模拟中 12 个观测点测得的土壤含水率、土壤铵态氮、硝态氮质量浓度进行对比分析,结果表明:土壤含水率模拟值与实测值的相对误差变化在 10% 以内;土壤铵态氮、硝态氮质量浓度的模拟值与实测值变化范围在 20% 以内。滴灌结束时土体剖面内土壤含水率随距滴头距离的增大而减小,再分布 72 h 土层 25~30 cm 土壤含水率增大到 $0.2\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,120 h 后土体剖面内土壤含水率较滴灌结束时下降了 18%。土壤铵态氮质量浓度主要分布于距滴头 20 cm 的范围;24 h 土壤铵态氮质量浓度最大,且随着时间的推移逐渐减小,到 120 h 时减少了 40%;各观测点 24 h 至 120 h 土壤硝态氮质量浓度随着时间的推移逐渐增大,且硝态氮质量浓度在滴头 20 cm 的范围内由 $0.442\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ 增加到 $1.2\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。各观测点 24 h 土壤硝态氮质量浓度在空间分布上差异不大,其中观测点 1,3,6,8,5 的土壤硝态氮质量浓度分别为 $0.437,0.467,0.451,0.482\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $0.447\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$,差值均小于 $0.05\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$;48 h 后土体剖面内土壤硝态氮质量浓度空间分布随离滴头距离的增加而减小,垂直方向上从距滴头 5 cm 的观测点 1 到距滴头 25 cm 的观测点 8 减少了 53%。依据研究结果,可用数值模型模拟滴灌施肥条件下土壤水氮运移的变化规律。

关键词:滴灌施肥;水氮运移;数值模拟
中图分类号:S275.6;S143.1 **文献标志码:**A

Numerical simulation of soil water and nitrogen distribution under the integration of drip irrigation and fertilization

LI Hui-xian,WANG Wen-e,HU Xiao-tao

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,Ministry of Education,
Northwest A&F University,Yangling,Shaanxi 712100,China)

Abstract: In order to study soil water and nitrogen (N) transport and distribution under drip irrigation and fertilization, the soil water and N transport in the process of drip irrigation and redistribution was studied with a water and N infiltration experiment with soil column under drip irrigation. At the same time, the geometric model of water and N infiltration in soil column under drip irrigation was established by using HYDRUS software to simulate the soil water and nitrogen transport. The soil water content, ammonium nitrogen (NH_4^+-N), and nitrate nitrogen (NO_3^--N) concentration collected at 12 observation points in the experiment and simulation were analyzed. The result showed that: the relative error between simulated and measured values of soil moisture content was less than 10%, and the simulated and measured values of NH_4^+-N and NO_3^--N were less than 20%. At the end of drip irrigation, soil water content in soil profile decreased with the increase in distance from the emitter, and increased to $0.2\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ in soil layer of 25~30 cm after 72 hours of redistribution. After 120 hours, soil water content in soil profile decreased by 18% compared with that at the end of drip irrigation. The content of NH_4^+-N was mainly distributed in the zone within 20 cm from emitter. The concentration of NH_4^+-N in soil reached the maximum value at

24 h and gradually decreased with time, and decreased by 40% at 120 h. The concentration of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in soil increased gradually with time from 24 h to 120 h, and the concentration of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ increased from $0.442 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ to $1.2 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ in the zone of 20 cm from the emitter. At 24 h, the spatial distribution of soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentrations was not significant, with the concentration of soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentrations at observation points 1, 3, 6, 8, and 5 being 0.437, 0.467, 0.451, 0.482 and $0.447 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$, respectively, the difference was less than $0.05 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$. After 48 h, the spatial distribution of soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentration in soil profile decreased with the increase in distance from the emitter, as the vertical distribution decreased 53% from observation point 1 that was 5 cm away from emitter to observation point 8 that was 25 cm away from the emitter. Based on the results, the numerical model can be used to simulate the soil water and N transport under drip irrigation and fertilization.

Keywords: drip fertilization; water and nitrogen transport; numerical simulation

水、肥是影响作物生长的 2 个重要因子,在实际生产中如果灌溉和施肥方式不合理,将造成水、肥浪费及地下水污染。滴灌施肥是一种节水节肥的先进技术^[1],目前滴灌随水施肥过程中土壤水分、养分的运移分布规律大部分是基于试验获取,而试验方法费时费力。计算机数值模拟具有简便、灵活等特点,能实现对各种灌溉情况的预测^[2],建立适当的数学模型可以更高效准确地研究滴灌施肥条件下水分、养分的运移转化过程。近年来,相关学者建立了不同滴灌条件下土壤水分的运移模型^[3-4],并且滴灌条件下土壤水和溶质运移模型都已取得发展^[5-6]。脱云飞等^[7]建立了膜孔肥液自由入渗的土壤水氮运移模型,较好地反映了土壤水氮运移转化规律。有学者利用 HYDRUS-1D 软件对不同情景下土壤水氮的迁移变化进行动态模拟,均获得了拟合度较高的水氮模拟模型^[8-9]。EU-Rotate_N 和 HYDRUS-2D 模型均能模拟氮的淋溶损失,较精确地预测氮含量,在模拟氮的吸收及运移方面各自具有优势^[10]。Tournebize 等^[11]应用 SWMS 模型模拟了植被覆盖条件下氮的运移。Gärdenäs 等^[12]模拟了不同微灌系统、灌溉施肥措施和土壤类型对硝酸盐淋失的影响。热合木等^[13]模拟了膜下滴灌土壤水、盐分运移,获得较好的效果。

以上研究者应用不同的模型对土壤水、溶质在不同灌溉施肥条件下的运移进行研究,均获得较好的效果,但现有的土壤水、溶质运移研究大多仅考虑单一溶质的运移。滴灌施肥条件下土壤氮的动力学过程非常复杂,与土壤温度、pH、含水率、微生物、土壤类型等多种因素有关。

尿素是广泛使用的肥料,且在土壤中易分解转化,由于尿素态氮在土壤中运移转化的复杂性,目前对滴灌施肥条件下土壤尿素态氮的运移转化模拟较少,因此,有必要对尿素态氮在土壤中的运移变化进行模拟计算,以便对滴灌系统水肥的运移进行预测。本研究基于试验基础,利用 HYDRUS 软件对滴灌施肥条件下土壤水氮(尿素)运移及再分布过程进行模拟分析,并利用滴灌水肥入渗试验对模型进行验证,以确定模型对滴灌施肥条件下土壤水氮运移分布模拟的精度,为滴灌施肥系统的优化设计提供参考依据,提高水肥利用效率,促进增产增收。

1 试验设计与方法

1.1 土壤物理性质

供试土壤取自西北农林科技大学试验田 0~40 cm 土层,土壤基本物理参数见表 1。

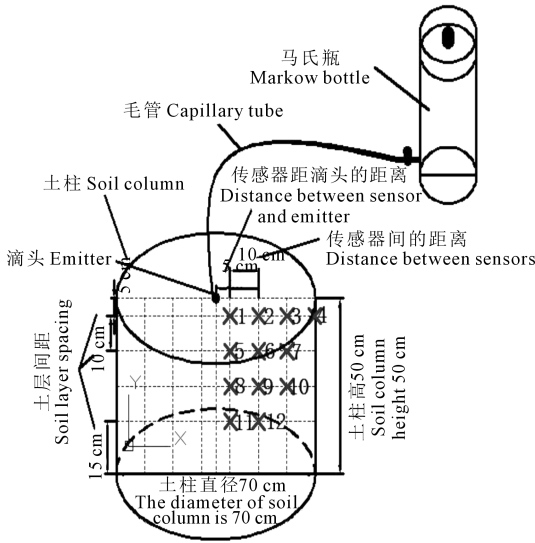
1.2 试验装置与方法

试验装置包括马氏瓶、圆土柱(高 50 cm,半径 35 cm)、滴头、EM50 传感器及数据采集器,如图 1 所示。试验所用肥料为普通尿素(CON_2H_4)。

试验设置滴头流量分别为 2、3、4 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$,灌水量为 21 L,施肥浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。试验前将风干土过 2 mm 筛,土壤初始体积含水率为 $0.057 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,初始土壤铵态氮、硝态氮含量分别为 6.5、 $25.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验土柱分层装土,装土时进行搅拌,各层之间进行打毛、平整,以保证土柱内土壤分布均匀,各向同性均质。装土过程中埋设传感器,每个土柱埋设 12 个 EM50 传感器,分层布置在土体

表 1 土壤基本物理特性
Table 1 Physical properties of soils

土壤类型 Soil type	粒径百分数 The particle percentage/%				土壤体积质量 Soil bulk density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水率 Field capacity/%
	≤0.001 mm	0.001~0.005 mm	0.005~0.05 mm	0.05~1 mm		
黏壤土 Clay loam soil	2.20	30.10	60	7.70	1.35	23



注:图中数字所示为传感器分布位置。

Note: The numbers in the figure show the distributed

location of sensor.

图 1 试验装置及传感器布置

Fig.1 Experimental equipment and sensor placement

中,根据滴灌土壤水分入渗特点^[14-15]及传感器测试精度和范围,传感器的布置方式见图 1。装土完毕后静置 24 h,使土体初始含水率均匀稳定。灌水前在土柱表面覆盖一层薄膜。试验前对所有仪器进行标定。

试验开始后通过数据采集器监测土壤含水率随时间的变化情况,滴灌过程中每 5 min 监测一次,滴灌结束后每 10 min 监测一次。在滴灌结束 24、48、72、96、120 h 分别在 5 个纵向半剖面上用土钻按传感器布置的位置点取土,取回的土样用紫外分光仪测定土壤硝态氮、铵态氮含量。

2 滴灌施肥土壤水氮运移基本方程及模型

2.1 土壤水分运动基本方程

根据达西定律和质量守恒定律^[16]及土壤水动力学原理,假定土壤均质和各向同性,忽略空气、温度和滞后效应对水分运动的影响,滴灌三维土壤水分入渗过程可用 Richard 方程来描述:

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

式中, φ_m 为基质势 (cm); $k(\theta)$ 为非饱和土壤导水率 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); θ 为土壤体积含水率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); t 为时间 (h)。

2.2 土壤氮素运移基本方程

土壤氮素运移转化涉及到复杂的物理、化学和微生物等过程。尿素态氮之间的转化过程包括尿素水解、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 挥发、硝化作用和反硝化作用,本文忽略铵态氮的挥发,考虑吸附、硝化、反硝化和矿化作用等动力学过程。假定尿素全部水解为铵态氮,用对流-弥散型方程描述氮素的运移过程,建立各向同性均质的三维土壤氮素运移转化方程为:

尿素态氮运移方程

$$\frac{\partial (\theta C_1)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C_1}{\partial x_j} \right) - \left(\frac{\partial q_i C_1}{\partial x_i} \right) - k_1 \theta C_1 \quad (2)$$

铵态氮运移方程

$$\frac{\partial (\theta C_2)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C_2}{\partial x_j} \right) - \left(\frac{\partial q_i C_2}{\partial x_i} \right) + k_0 \rho + k_1 \theta C_1 - k_2 \theta C_2 - k_2 \rho s \quad (3)$$

硝态氮运移方程

$$\frac{\partial (\theta C_3)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C_3}{\partial x_j} \right) - \left(\frac{\partial q_i C_3}{\partial x_i} \right) + k_2 \theta C_2 + k_2 \rho s - k_3 \theta C_3 \quad (4)$$

式中, x 为空间坐标 (角标 $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$, 表示空间 3 个方向); C_1 、 C_2 、 C_3 分别为尿素态氮、铵态氮、硝态氮的质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$); s 为固相态氮吸附量, $s = k_d C_2$, k_d 为铵态氮吸附速率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$); q_i 为土壤水通量 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); k_0 为有机质矿化速率 (h^{-1}); k_1 为尿素水解速率 (h^{-1}); k_2 为铵态氮硝化速率 (h^{-1}); k_3 为硝态氮反硝化速率 (h^{-1}); ρ 为土壤干容重 ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$); D_{ij} 为水力弥散系数张量的分量 ($\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$), 包含纵向、横向弥散系数 D_L 和 D_r (cm), 以及自由水中的分子扩散系数 D_w ($\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)。运移及转化参数取值见表 2。基于以上土壤水、溶质动力学原理,利用 HYDRUS 软件建立几何模型并进行数值计算。

2.3 土壤水力参数

本文土壤水分特征曲线 $\theta(h)$ 利用高速离心机测定,土壤饱和导水率 $K(h)$ 用定水头法进行测定,土壤水分特征曲线采用 Van Genuchten 模型拟合^[17-18]。

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / (1 + |\alpha h|^n)^m & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})]^2 \quad (6)$$

其中

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \tag{7}$$

$$m = 1 - 1/n, \quad n > 1 \tag{8}$$

式中, θ_s 为土壤饱和导水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_r 为土壤残余含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); α, n, m 为土壤水分特征曲线实测值(土壤含水率、土壤水吸力)拟合得到的参数(cm^{-1}); h 为土壤负压水头(cm); K_s 为渗透系数($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); S_e 为土壤有效含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); l 为空隙连通性参数, 一般情况取为 0.5。拟合得到土壤水分特性的参数值为 $\theta_r = 0.03 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; $\theta_s = 0.48 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; $\alpha = 0.036 \text{ cm}^{-1}$; $n = 1.56$; $K_s = 0.125 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2.4 土壤溶质运移参数

模型中氮素运移转化参数的确定根据国内外文献^[19-23], 并根据实测试验数据以流量分别为 $2, 3 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 对各参数进行率定确定, 模型中氮素转化参数的取值见表 2。

2.5 定解条件

2.5.1 初始条件 假定土壤初始含水率和氮浓度在研究区域内均匀分布, 初始条件可表示为:

$$\theta(x, y, z, t) = \theta_0$$

$$(0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, 0 \leq z \leq Z, t = 0) \tag{9}$$

$$C(x, y, z, t) = C_0$$

$$(0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, 0 \leq z \leq Z, t = 0) \tag{10}$$

式中, θ 和 C 分别为土壤含水率, 土壤铵态氮或硝态氮质量浓度($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_0 和 C_0 分别为初始土壤含水率, 初始土壤铵态氮或硝态氮质量浓度($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$); t 为时间(h), 初始时刻时间为 0 h 。 X, Y 和 Z 为模拟区域边界(装置物理边界)的坐标。

2.5.2 边界条件 根据试验设计模拟研究区域为圆柱体(高 50 cm , 半径 35 cm), 滴头在圆柱轴心的正上方, 取圆柱体的一半为模拟研究区域。根据试验监测, 滴灌开始时, 土壤饱和区发展很快, 随着时间的推移, 饱和区扩展的速度逐渐减小, 一定时间后饱和区半径(R_s)趋于定值为 7.3 cm , 所以模拟时忽略饱和区半径随时间的变化。饱和区在滴灌过程中为不随时间变化的定流量边界, 不灌水时为零通量边界。上边界其余覆膜区域为零通量边界。

故模拟区域内将上边界分为两种情况:

(1) 饱和区流量和溶质浓度边界条件为:

$$-K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) = \sigma(t) \tag{11}$$

$(0 \leq x, y \leq R_s, z = 0, 0 \leq t \leq T)$

$$-\left(\theta D_{ii} \frac{\partial C_1}{\partial x_i} + \theta D_{ij} \frac{\partial C_1}{\partial x_j}\right) + q_i C_1 = q_i C_a \tag{12}$$

$(0 \leq x_i \leq R_s, z = 0, 0 \leq t \leq T)$

(2) 非饱和区流量和溶质浓度边界条件为:

$$-K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) = 0 \tag{13}$$

$(R_s \leq x, y, z = 0, 0 \leq t)$

$$-\left(\theta D_{ii} \frac{\partial C_1}{\partial x_i} + \theta D_{ij} \frac{\partial C_1}{\partial x_j}\right) = 0 \tag{14}$$

$(R_s \leq x_i, z = 0, 0 \leq t)$

式中, C_a 为肥料溶液尿素态氮的质量浓度($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$); T 为灌水历时(h); C_1, x_i, D_{ij}, q_i 与上式(4)中的含义相同; $K(\theta)$ 为非饱和土壤导水率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); $\sigma(t)$ 为灌水期间滴头处定流量边界通量($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); $t > T$ 时, $\sigma(t) = 0$, z 为竖轴方向的坐标。

模拟计算区域边壁为零通量边界; 下边界为自由排水边界。

2.6 数值求解

利用 HYDRUS 软件对上述模型进行求解, 用 Galerkin 有限单元法对数学模型进行数值计算^[24]; 时间采用隐式差分法离散^[25], 空间离散采用伽辽金有限单元法。计算区内网格划分采用三棱柱单元, 滴头饱和区半径内适当加密网格, 以提高计算精度。根据试验设置, 在模拟区设置与试验布置相对应的 12 个观测点, 以便于对模拟结果进行验证, 以滴头正下方土表为坐标原点, 观测点坐标分别为(水平, 纵向, 垂向): 点 1($5, 0, -5$), 点 2($15, 0, -5$), 点 3($25, 0, -5$), 点 4($35, 0, -5$), 点 5($5, 0, -15$), 点 6($15, 0, -15$), 点 7($25, 0, -15$), 点 8($5, 0, -25$), 点 9($15, 0, -25$), 点 10($25, 0, -25$), 点 11($5, 0, -35$), 点 12($15, 0, -35$)。模拟的网格划分及观测点设置如图 2 所示半圆柱体。

表 2 土壤尿素态氮运移转化参数

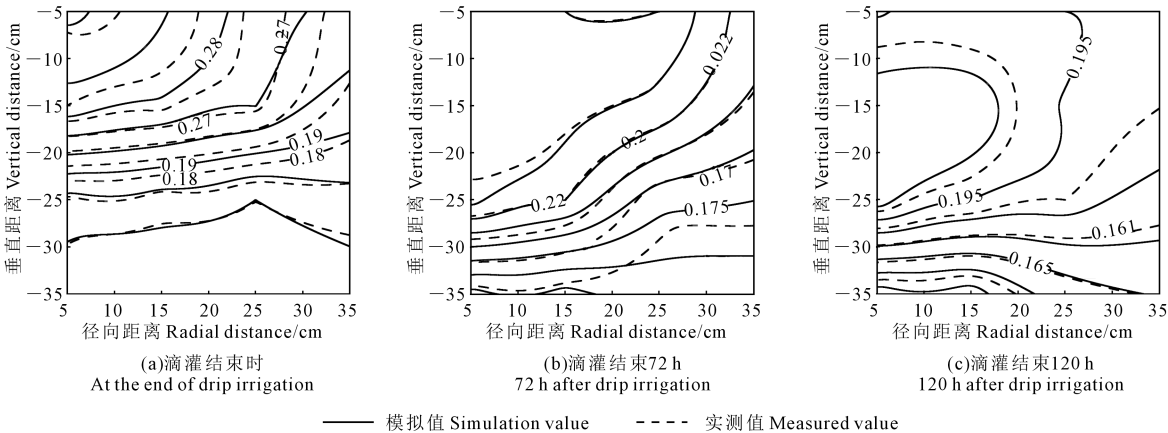
Table 2 Parameters of Urea-N transformation in soil

运移参数	纵向弥散系数/cm	横向弥散系数/cm	自由水中的分子扩散系数 $D_w / (\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1})$		
Transport parameter	Vertical dispersion coefficient D_L	Lateral dispersion coefficient D_T	尿素 Urea	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$
参数值 Parameter	0.3	0.3	0.03	0.06	0.06
转化参数	有机质矿化速率 k_0	尿素水解速率 k_1	硝化速率 k_2	反硝化速率 k_3	铵态氮吸附速率 k_d
Transformation parameter	Mineralization rate of organic matter/ h^{-1}	Urea hydrolysis rate/ h^{-1}	Nitrification rate/ h^{-1}	Denitrification rate/ h^{-1}	Adsorption rate of $\text{NH}_4^+\text{-N} / (\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$
参数值 Parameter	0.00003	0.023	0.01	0.009	0.001

3 模型验证及结果分析

3.1 土壤含水率分布规律

土壤含水率的分布对作物的生长有直接影响,并影响土壤溶质等因素的变化,基于试验研究,用数值模拟的方法对滴灌及其再分布过程土壤含水率分布进行分析,以流量 $4\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 土体剖面内各观测点土壤含水率对模型进行验证,对比了滴头流量为 $4\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 时各观测点的模拟值与实测值。模拟与实测的土壤含水率分布用 Kriging 插值法进行插值计算,在 Surfer 软件中绘制。由图 3 可知不同时刻模拟与实测值的土壤含水率剖面分布基本一致。滴灌结束时,土壤含水率实测均值与模拟值在土层 5 cm 相对误差为 4%,土层 15 cm 相对误差为 10%,土层 25 cm 相对误差为 7%。再分布过程,120 h 部分观测点的相对误差较大。



注:图中土壤含水率单位为 $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

Note: The unit of soil moisture in the figure is $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$.

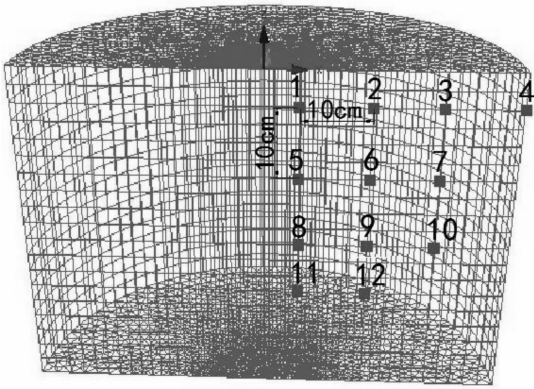
图 3 土壤含水率分布剖面模拟与实测对比

Fig.3 Comparison of simulation and measured values of soil water content

在湿润土体内,滴灌结束时土壤含水率的分布随着离滴头距离的增加而减小;经再分布 72 h,土体内水分向下层运移,土层 25~30 cm 的土壤含水率增大到 $0.2\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。120 h 土体剖面内的土壤含水率均有所下降,较滴灌结束时下降了 18%,且土壤剖面内的土壤含水率分布趋于均匀稳定。对滴灌后土壤含水率的再分布过程模拟与实测值均能较好地吻合,各观测点相对误差的绝对值均在 10% 以内,模拟能较好地反映土壤含水率的分布规律,可用数值模拟的方法对不同滴灌系统条件下的土壤含水率分布情况进行预测。

3.2 土壤氮分布特征

氮肥是植物生长所必需的营养元素,有机态氮不能被植物直接吸收利用,铵态氮、硝态氮是植物能



注:图中数字所示为观测点的分布位置。

Note: The numbers in the figure show the distribution of observation points.

图 2 模拟研究区域网格划分及观测点布置

Fig.2 Flow domain gridding and layout of observation points in simulation region

直接吸收利用的营养离子^[27-28];尿素是目前广泛使用的氮肥,在土壤中能直接水解转化为铵态氮、硝态氮,研究滴灌施肥后土壤硝态氮、铵态氮量的时空分布有助于确定不同作物氮肥的次施用量及浓度。

3.2.1 土壤铵态氮时空分布特征 土壤铵态氮在土体中易被吸附,在土壤剖面中的分布决定于作物生长、灌溉方式、土壤性质等因素^[29]。基于试验与模拟,以滴头流量 $4\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 的土壤铵态氮动态分布进行模拟值与实测值的对比分析,模型在与试验布置相同位置坐标点处分别设置 12 个观测点,根据观测点的布置选取了有代表性的 3 个观测点(点 1、6、8)进行分析(观测点位置见图 2)。

由图 4 可知不同观测点由于硝化作用土壤铵态氮质量浓度均随时间的推移逐渐减小,且模拟值与

实测值较接近。对滴灌结束后 24~120 h 的土壤铵态氮质量浓度模拟值与实测值进行对比分析,距滴头较近的观测点 1(5,-5)土壤铵态氮质量浓度在土体中较大,72 h 之前随时间的变化幅度较大,随后变化较小,其 24、48、72、96、120 h 各模拟值与实测值的相对误差分别为 17%、20%、20%、17%、14%;观测点 6(15,-15)、点 8(5,-25)的铵态氮质量浓度在土体中随时间的变化幅度较小,24~120 h 内模拟值与实测值的相对误差变化范围分别为 14%~20%,12%~20%。观测点 5(5,-15)的相对误差变化范围为 1%~14%,对其它各观测点进行统计分析其相对误差最小值为 2%,均在 20% 以内。由于实际土壤中微生物的作用不同,且土壤环境复杂,同一观测点处不同时间土壤铵态氮质量浓度模拟值与实测值相对误差存在差异。

图 5(见 16 页)中土壤铵态氮质量浓度空间分布表明:滴灌后土壤铵态氮质量浓度主要分布于距滴头 20 cm 的范围内,随着离滴头距离的增加而逐渐减小,24 h 土壤铵态氮质量浓度最大,到 120 h 时减少了 40%。滴灌后不同观测点的铵态氮浓度不同,且硝化作用存在差异,120 h 部分观测点的土壤铵态氮质量浓度低于本底值。模拟值与试验值的相对误差在合理范围内,土壤铵态氮分布结果与 Breve^[23]模拟的结果相近,可用该模型模拟土壤铵态氮的动态分布。

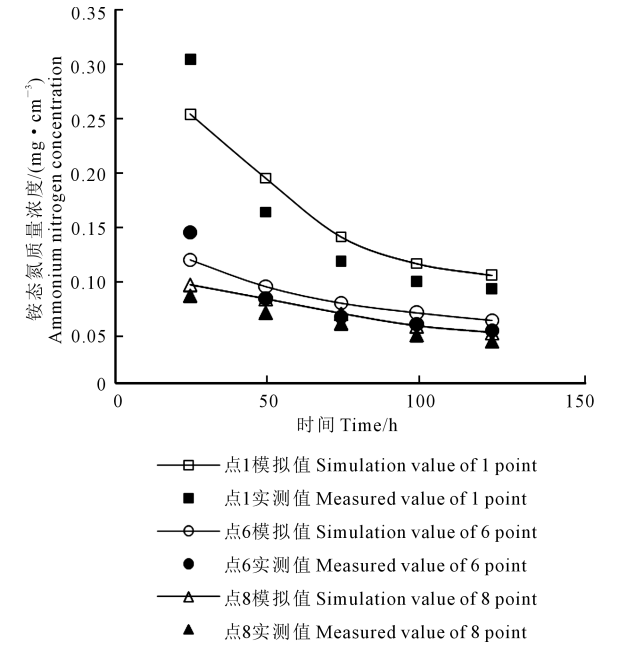


图 4 不同观测点滴灌后 24~120 h 土壤铵态氮质量浓度变化

Fig.4 The change process of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration at different observation points 24~120 h after drip irrigation

3.2.2 土壤硝态氮时空分布特征 滴灌施肥后土壤硝态氮分布因灌溉方式、施肥种类等多种因素而存在差异。结合试验,利用数值模型对滴灌施尿素后土壤硝态氮的时空分布进行模拟,并对比分析实测值与模拟值。由图 6 可知,不同观测点土壤硝态氮质量浓度均随着时间的推移而逐渐增大,且模拟值与实测值较吻合。观测点 1(5,-5)土壤硝态氮质量浓度随时间的增长较快,72 h 之后变化较小,24、48、72、96 h 和 120 h 内土壤硝态氮质量浓度模拟值与实测值的最大相对误差分别为 18%、19%、16%、19%、20%;观测点 6(15,-15)、点 8(5,-25)随时间的变化幅度较小,24~120 h 土壤硝态氮模拟值与实测值的相对误差变化范围分别为 1%~20%,19%~20%。观测点 5(5,-15)模拟值与实测值的相对误差变化范围为 14%~20%,对其它各观测点进行统计分析其相对误差最小值为 13%,均在 20% 以内。

24 h 时观测点 1,3,6,8,5 的土壤硝态氮质量浓度分别为:0.437,0.467,0.451,0.482 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 0.447 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$,相互间的差值小于 0.05 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$,各观测点在空间分布上差异不大,48 h 之后土体中观测点 1(5,-5)的土壤硝态氮质量浓度较大,120 h 时为 1.2 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。土壤铵态氮在硝化作用下逐渐转化为土壤硝态氮,由于滴头附近的土壤铵态氮质量浓度较大,土壤硝态氮质量浓度在滴头附近增加较多。由图 6 和图 7 可知:滴灌施肥后土壤硝态氮

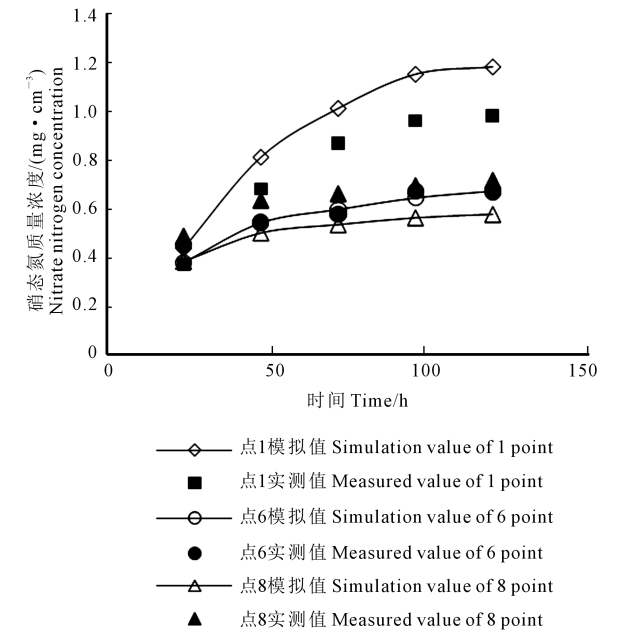


图 6 不同观测点滴灌后 24~120 h 土壤硝态氮质量浓度变化

Fig.6 The change process of soil nitrate nitrogen concentration at different observation points 24~120 h after drip irrigation

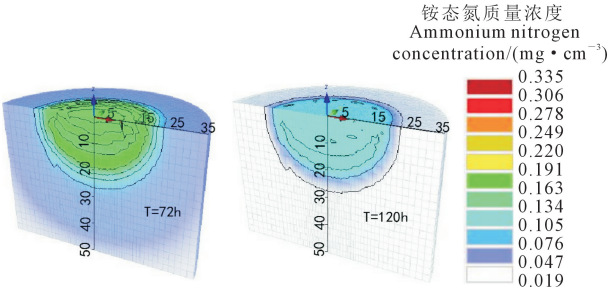


图 5 滴灌结束后 72 h、120 h 土壤铵态氮质量浓度分布
Fig.5 The concentration distribution of NH_4^+-N in soil 72 h and 120 h after drip irrigation

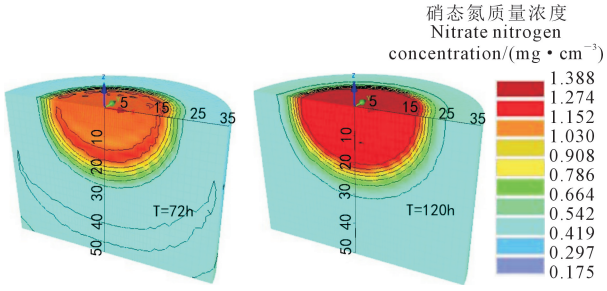


图 7 滴灌结束后 72 h、120 h 土壤硝态氮质量浓度分布
Fig.7 The concentration distribution of nitrate nitrogen in soil 72 h and 120 h after drip irrigation

在整个土体内均有分布,48 h 后土壤硝态氮质量浓度在离滴头 20 cm 的范围值较大,且空间分布上随距滴头距离的增加而减小,垂直方向上从距滴头 5 cm 的观测点 1(5,-5)到距滴头 25 cm 的观测点 8(5,-25)减少了 53%。该空间分布特征与 Breve^[23]模拟的结果相近。土壤硝态氮的模拟值与实测值不同观测点、不同时间其相对误差存在差异,但其平均相对误差在 18% 以内,基本反映出土壤硝态氮分布的动态变化过程,可用该模型模拟滴灌施肥土壤硝态氮的动态分布。

4 结论与讨论

尿素施入土壤后,会以分子形态被土壤胶体吸附,但在合适的水热条件和丰富的有机物料供应情况下,会很快水解^[30]。李世清^[31]研究表明温度、土壤含水率、尿素起始浓度、土壤质地、外加脲酶对尿素水解速率均有影响;汪建飞^[32]研究了培养时间、尿素浓度、土壤温度、土壤含水量对土壤外源尿素(施入土壤中的尿素)水解速率的影响,其影响大小顺序为:培养时间>尿素浓度>土壤温度>土壤含水量。樊庆鲁^[33]指出在 pH>5.6 的土壤中,温度为 25℃ 时,尿素 3 d 可完全分解。王旭洋^[34]研究了滴灌施肥(尿素)条件下速效氮在土壤中的运移,表明滴灌结束 1 d,尿素水解,铵态氮含量达到最大值,随后随时间的推移逐渐减小;候红雨^[35]研究表明尿素施入土壤 6~24 h 内,剖面中尿素的含量普遍降低了约 66.7%。以上研究表明施入土壤中的尿素在不同的条件下,水解转化为铵态氮和硝态氮的速率不同。

本文采用试验与数值模拟的方法对滴灌施肥后土壤水肥的运移变化进行研究,得出滴灌结束 24

h,尿素水解,铵态氮含量达到最大值。数值模拟中根据试验设计设置参数,并对参数值率定,对比分析了模拟与试验结果,模型能够反映土壤水氮运移转化过程,模拟所得土壤含水率剖面分布与实测值基本一致,各观测点的土壤硝态氮、铵态氮质量浓度的模拟值与实测值相对误差均在 20% 以内,不同观测点、不同时间的相对误差均不同。滴灌结束时,土壤含水率随离滴头距离的增加而减小。滴灌施肥后土壤铵态氮质量浓度主要分布于离滴头 20 cm 的范围,且随着时间的推移逐渐减小;24~120 h 土壤硝态氮质量浓度各观测点随着时间的推移逐渐增大,且硝态氮质量浓度在滴头 20 cm 的范围内由 0.442 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 增加到 1.2 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$,48 h 后土体内土壤硝态氮质量浓度空间分布上随着离滴头距离的增加呈减小的趋势。由于实际土壤中尿素态氮的转化受多种因素的影响,且文中数值模型进行了简化假设,忽略了铵态氮的挥发,土壤氮素的模拟值与实测值存在一定误差,该模型还有待进一步研究完善。

参 考 文 献:

[1] 王宏江,吕新,陈剑.膜下滴灌施肥技术研究发展动态及问题探讨[J].新疆农业科学,2009,46(1):13-17.
[2] Chandrasekar M, Nambi I M. Experimental and simulation studies on nitrogen dynamics in unsaturated and saturated soil using HYDRUS-2D [C]//Global Colloquium in Recent Advancement and Effectual Researches in Engineering, Science and Technology (RAEREST 2016), Amsterdam;Procedia Technology, 2016;122-129.
[3] 魏群,费良军.地表滴灌点源入渗土壤水分运动的模拟研究[J].广东水利水电,2012,(S1):7-10.
[4] Elmaloglou S, Diamantopoulos E. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources[J].Water Resources Management, 2013,27(12):4131-4148.

- [5] 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): 143-156.
- [6] Bresler E. Two-dimensional transport of solutions during nonsteady infiltration from a trickle source[J]. Soil Science Society of America Journal, 1975, 39(4): 604-613.
- [7] 脱云飞, 王克勤, 宋维峰, 等. 膜孔肥液自由入渗土壤水氮运移转化的数值模拟[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 57-63.
- [8] 刘榛倩. 典型潮土土体构型中的水氮运移及县域尺度环境风险评估[D]. 青岛: 青岛大学, 2016.
- [9] 郝芳华, 孙雯, 曾阿妍, 等. HYDRUS-1D 模型对河套灌区不同灌施情景下氮素迁移的模拟[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 853-858.
- [10] Doltra J, Muñoz P. Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a mediterranean climate using the EU-Rotate N and Hydrus-2D models[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(2): 277-285.
- [11] Tournèze J, Gregoire C, Coupe RH, et al. Modeling nitrate transport under row intercropping system: Vines and grass cover[J]. Journal of Hydrology, 2012, 440(11): 14-25.
- [12] Gärdenäs A I, Hopmans J W, Hanson B R, et al. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(3): 219-242.
- [13] 热合木·虎胆·吐马尔白, 马合木江·艾合买提, 等. 膜下滴灌土壤水、盐分运移数值模拟研究[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(11): 2136-2141.
- [14] 李晓斌, 孙海燕. 不同土壤质地的滴灌点源入渗规律研究[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(15): 4292-4295.
- [15] 岳海英, 李援农. 滴灌土壤湿润体含水率分布规律的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 137-139.
- [16] 李光永, 郑耀泉, 曾德超, 等. 地理点源非饱和土壤水运动的数值模拟[J]. 水利学报, 1996, 27(11): 47-56.
- [17] 池宝亮, 黄学芳, 张冬梅, 等. 点源地下滴灌土壤水分运动数值模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 56-59.
- [18] 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.
- [19] 关红杰, 李久生, 栗岩峰. 干旱区滴灌均匀系数对土壤水氮分布影响模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 107-117.
- [20] Hanson B R, Šimunek J, Hopmans J W. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1-2): 102-113.
- [21] Ling G, El-Kadi A I. A lumped parameter model for nitrogen transformation in the unsaturated zone[J]. Water Resources Research, 1998, 34(2): 203-212.
- [22] 刘培斌, 丁跃元, 张瑜芳. 田间一维饱和一非饱和土壤中氮素运移与转化的动力学模式研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 490-498.
- [23] Breve M A, Skaggs R W, Parsons J E, et al. Drainmod-N, a nitrogen model for artificially drained soils[J]. Transactions of the Asae, 1997, 40(4): 1067-1075.
- [24] Šimunek J, Sejna M, Genuchten M Th van. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media[M]. California: U.S. Department of Agriculture, Riverside, 1999: 188-190.
- [25] Warrick A W. Soil water dynamics [M]. London: Oxford University Press, Inc., 2003: 76-78.
- [26] 宿梅双. 喷灌均匀系数对土壤水氮淋失及作物生长影响的田间试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [27] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉, 等. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1187-1195.
- [28] 王艳杰, 邹国元, 付桦, 等. 土壤氮素矿化研究进展[J]. 中国农学通报, 2005, 21(10): 203-208.
- [29] 陈效民, 吴华山, 孙静红. 太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1217-1222.
- [30] Broadbent F E, Hill G N and Tyler K B. Transformation and movement of urea in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1958, 22(4): 303-307.
- [31] 李世清, 李生秀. 影响土壤尿素水解速率的一些因子[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, (2): 61-67.
- [32] 汪建飞, 盛蒂, 段立珍. 土壤外源尿素水解速率影响因子研究[J]. 安徽技术师范学院学报, 2004, (5): 15-20.
- [33] 樊庆鲁, 陈云, 关新元, 等. 滴灌施肥条件下尿素在土壤中运移转化分布规律[J]. 石河子科技, 2006, (3): 3-5.
- [34] 王旭洋. 滴灌条件下施肥时段对土壤中速效氮时空分布的影响研究[D]. 咸阳: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [35] 侯红雨. 温室滴灌条件下氮素转化运移规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2002.