



## 滴灌土壤湿润体迁移计算的 人工神经网络模型

陈帅,毛晓敏\*

(中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)



陈帅

**摘要:** 基于非饱和土壤水分运动理论和单点源滴灌中土壤水分迁移特征,应用 HYDRUS-2D/3D 模型对 33 种土壤质地(分属 11 类土质类型,美国制土壤质地分类系统)、不同滴灌流量(1, 2, 3 L/h)下的湿润体运动过程进行了数值模拟,然后根据不同土壤质地和滴灌流量下湿润体动态变化的 HYDRUS 模拟结果,以滴灌量和土壤饱和导水率与滴灌流量的比值作为输入变量,构建了描述滴灌湿润体在不同土质和滴灌流量下迁移变化的人工神经网络模型。该模型输入变量少、易于操作,且将模型计算结果与实测情况对比表明,计算的入渗过程与实测的入渗过程基本一致,相关系数的平方( $R^2$ )均在 0.82 以上,因此该模型对不同土质中湿润体运移规律的预测效果较好。

**关键词:** 地表滴灌; 土质; 滴灌流量; 湿润体迁移; 人工神经网络

**中图分类号:** S275.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2020)02-0206-06

Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.18.0044

陈帅,毛晓敏.滴灌土壤湿润体迁移计算的人工神经网络模型[J].排灌机械工程学报,2020,38(2):206-211.

CHEN Shuai, MAO Xiaomin. Quantification of soil wetting volume development under surface drip irrigation using artificial neural networks[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2020,38(2):206-211. (in Chinese)

## Quantification of soil wetting volume development under surface drip irrigation using artificial neural networks

CHEN Shuai, MAO Xiaomin\*

(College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the Richard equation of water movement in unsaturated soil and the characteristics of soil water movement with drip irrigation from single point source, the HYDRUS-2D/3D model was used to numerically simulate the soil wetting pattern under different dripper discharges (1, 2, 3 L/h) in 33 kinds of soil textures (separately belonging to 11 kinds of soil types in USST). Based on the simulated results of the soil wetting volume development under different dripper discharges and soil textures, and using irrigation amount and the ratio of soil saturated water conductivity and dripper discharge as the input variables, the artificial neural network was built for predicting the soil wetting volume development under different soil textures and dripper discharges. The results show that the infiltration processes, which are simulated by this artificial neural network with less input variables and more maneuverable, are consistent with the actual infiltration processes, and the correlation coefficient ( $R^2$ ) is over 0.82. Therefore, the developed model can achieve good effect in predicting the migration of soil water for different kinds of soil textures compared with the experimental data.

收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-04-17; 网络出版时间: 2018-09-30

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180930.1037.004.html>

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2016YFC040106-3); 国家自然科学基金资助项目(51679234)

第一作者简介: 陈帅(1989—),男,山东菏泽人,博士研究生(slsdchen@163.com),主要从事节水灌溉与土壤溶质运移研究。

通信作者简介: 毛晓敏(1971—),女,山东菏泽人,教授,博士生导师(maoxiaomin@cau.edu.cn),主要从事水文水资源与农业水土工程研究。

**Key words:** surface drip irrigation; soil texture; dripper discharge; wetting volume development; artificial neural network

合理的滴灌系统设计能够有效提高农业用水效率,而地表滴灌条件下土壤水分的地表湿润半径和垂向入渗深度,是滴灌系统设计<sup>[1]</sup>中确定滴头间距和灌溉制度的基础依据。试验研究<sup>[2]</sup>表明,地表滴灌条件下土壤湿润体的径向和垂向迁移距离均是关于灌水时间或灌水量的幂函数,其关系式中的参数与土壤质地及初始含水率、滴灌流量等因素有关,但参数取值需要通过针对性试验来确定,限制了研究结果在不同土壤质地、滴灌流量等条件下的推广应用。

数值模拟模型能够研究不同滴灌条件(土壤质地、初始含水率、滴灌流量等)下土壤湿润体的迁移规律,但数值模拟模型往往所需参数较多<sup>[3]</sup>。人工神经网络是由大量简单元件相互连接而成的复杂网络,具有高度的非线性,能够进行复杂的逻辑操作,实现非线性关系<sup>[4]</sup>,已被广泛应用于气象、水文、农田水利等领域。尚松浩等<sup>[5]</sup>根据冬小麦的土壤水分试验资料建立了土壤墒情预报的BP网络模型,可用于作物生育期内土壤贮水量的预测。人工神经网络在滴灌研究中也得到了较多应用。SCHMITZ等<sup>[6]</sup>在HYDRUS-2D模型模拟的基础上,建立了预测滴灌湿润体径向和垂向迁移的人工神经网络模型,但没有综合考虑不同土质的质地差异对湿润体迁移带来的影响。

文中首先根据非饱和土壤水分运动理论,采用HYDRUS-2D/3D对不同质地土壤和滴灌流量条件下的湿润体运移特征进行数值模拟;然后根据数值模拟结果,利用人工神经网络构建描述不同质地土壤和滴灌流量下湿润体形状特征的简易算法;最后采用针对性滴灌试验结果对人工神经网络模型的可靠性进行验证。

## 1 材料与方法

### 1.1 人工神经网络的训练数据库

文中将HYDRUS-2D/3D模型在不同土质和滴灌流量下模拟的滴灌湿润体迁移变化结果,作为训练人工神经网络的数据库。HYDRUS-2D/3D模型是由美国农业部盐土实验室(U.S. Salinity Laboratory)开发的用于模拟饱和-非饱和土壤介质中二维/三维水、热和溶质运移的数值模型<sup>[7]</sup>,其轴对称垂向二维模块能够模拟点源入渗条件下土壤湿润锋的

迁移和分布,即

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

式中: $\theta$ 为土壤体积含水率, $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ; $h$ 为土壤基质势或压力水头, $\text{cm}$ ; $K(h)$ 为土壤导水率, $\text{cm}/\text{h}$ ; $t$ 为时间, $\text{h}$ ; $r$ 为径向坐标, $\text{cm}$ ; $z$ 为垂向坐标, $\text{cm}$ ,规定 $z$ 向上为正。

模拟中采用VAN GENUCHTEN模型描述土壤水分特征曲线和土壤导水率曲线<sup>[8]</sup>,即

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0, \\ \theta_s & h \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

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

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

式中: $\theta_r$ 为土壤残余含水率, $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ; $\theta_s$ 为土壤饱和含水率, $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ; $K_s$ 为土壤饱和导水率, $\text{cm}/\text{h}$ ; $S_e$ 为土壤有效含水率; $\alpha$ , $n$ 和 $m$ 为土壤形状参数,其中 $m=1-1/n$ ; $l$ 为孔隙关联度参数,一般取0.5。

滴灌模拟中滴灌流量采用常用的1,2,3 L/h这3种。初始条件采用均匀分布的体积含水率,取值 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,边界条件如图1所示,其中点C为滴头位置。不同质地土壤中滴灌进水区域半径 $R_s$ 随土质参数和滴灌流量变化<sup>[9]</sup>,计算公式为

$$R_s = \left( \frac{4}{\alpha^2 \pi^2} + \frac{q}{\pi K_s} \right)^{1/2} - \frac{2}{\alpha \pi}, \quad (5)$$

式中: $q$ 为滴灌流量, $\text{cm}^3/\text{h}$ 。

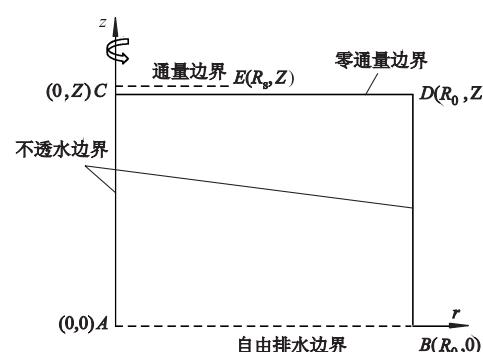


图1 滴灌模拟边界条件设置图

Fig.1 Sketch of simulated boundary conditions for drip irrigation

文中采用不同的土壤质地作为滴灌模拟介质,

通过随机选择砂粒、粉粒和黏粒的百分含量  $\sigma$  组合来确定代表不同土质的样本点,共确定 33 种土壤质地,分属于美国制土壤质地分类系统中的粉黏土、粉土、壤土、砂土等 11 类土质(不包括黏土),利用 HYDRUS 软件中的 Rosetta Lite (v.1.1),根据 33 种

土壤质地的土壤机械组成(见表 1),并假设土壤容重控制在  $1.5 \text{ g/cm}^3$ ,反演得到不同土质的水力特性参数(见表 1)。SKAGGS 等<sup>[10]</sup>研究表明,Rosetta 能够方便、可靠地预测滴灌模拟中土壤的水力特性参数。

表 1 土壤机械组成及其水力特性参数  
Tab.1 Soil particle composition and parameters of soil hydraulic property

编号	$\sigma/\%$			土质	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$n$	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$
	砂粒	黏粒	粉粒						
1	10	33	57	粉质黏壤土	0.084 2	0.428 2	0.008 3	1.493 2	5.43
2	33	33	34	黏壤土	0.078 7	0.413 1	0.012 6	1.399 0	5.90
3	60	27	13	砂质黏壤土	0.069 7	0.411 0	0.022 4	1.337 6	20.21
4	2	11	87	粉土	0.061 9	0.428 2	0.006 6	1.617 2	16.43
5	16	19	65	粉壤土	0.065 6	0.394 9	0.005 7	1.628 8	11.36
6	43	15	42	壤土	0.049 3	0.366 2	0.011 3	1.491 8	13.58
7	64	10	26	砂壤土	0.041 3	0.376 7	0.029 6	1.440 0	39.72
8	82	6	12	壤砂土	0.044 8	0.387 9	0.038 4	1.878 6	140.52
9	88	2	10	砂土	0.044 3	0.383 5	0.039 0	2.495 4	323.87
10	51	42	7	砂黏土	0.085 2	0.428 0	0.025 3	1.229 4	15.54
11	6	47	47	粉质黏土	0.094 0	0.449 5	0.012 6	1.352 2	4.39
12	75	11	14	砂壤土	0.048 5	0.392 3	0.033 3	1.568 2	65.48
13	67	8	25	砂壤土	0.038 7	0.375 2	0.034 2	1.461 4	49.45
14	81	15	4	砂壤土	0.061 6	0.401 8	0.027 2	1.676 3	83.37
15	81	10	9	壤砂土	0.051 4	0.394 9	0.033 1	1.762 3	106.26
16	84	5	11	壤砂土	0.045 0	0.387 3	0.038 5	2.026 5	179.02
17	86	4	10	壤砂土	0.045 4	0.386 6	0.038 3	2.215 2	233.05
18	87	4	9	壤砂土	0.046 4	0.387 2	0.037 4	2.308 9	261.79
19	56	38	6	砂黏土	0.081 2	0.424 1	0.025 3	1.244 2	19.21
20	6	43	51	粉质黏壤土	0.092 4	0.446 4	0.011 3	1.389 1	4.43
21	27	30	43	砂质黏壤土	0.076 7	0.407 6	0.009 7	1.469 6	5.75
22	4	31	65	壤土	0.084 0	0.435 0	0.007 6	1.517 4	5.41
23	56	24	20	粉壤土	0.065 1	0.403 7	0.020 1	1.373 3	16.76
24	32	23	45	壤土	0.065 6	0.387 8	0.008 6	1.520 1	7.46
25	22	22	56	粉壤土	0.067 1	0.390 7	0.006 5	1.588 3	8.41
26	43	23	34	壤土	0.063 9	0.391 9	0.012 8	1.443 8	8.82
27	7	21	72	粉壤土	0.072 6	0.418 4	0.006 0	1.609 6	9.88
28	36	7	57	粉壤土	0.037 6	0.343 6	0.009 3	1.534 2	26.91
29	27	8	65	粉壤土	0.043 1	0.356 4	0.007 0	1.599 6	26.63
30	18	7	75	粉壤土	0.046 7	0.375 8	0.006 5	1.627 5	30.33
31	7	6	87	粉土	0.051 9	0.409 2	0.007 0	1.622 7	28.69
32	56	9	35	砂壤土	0.037 7	0.361 3	0.022 5	1.427 8	31.56
33	59	15	26	砂壤土	0.049 7	0.384 5	0.022 5	1.422 6	25.57

## 1.2 人工神经网络模型

文中利用人工神经网络中的 BP 神经网络对滴灌湿润体的径向和垂向迁移距离进行预测。BP 神经网络模型是一种多层前馈型网络,由 1 个输入层、多个隐含层和 1 个输出层构成。由于滴灌湿润体迁移的主要影响因素包括滴灌流量  $q$ 、灌水量  $Q$ 、土壤质地、土壤初始含水率等,文中采用饱和导水率  $K_s$  代表土壤质地,土壤初始含水率与 HYDRUS-2D/3D 数值模拟中保持一致,因此 BP 神经网络的输入变量采用灌水量  $Q$  和  $K_s/q$ (见表 2),其中灌水量  $Q$  可以反映灌水时间,  $K_s/q$  主要反映土壤质地和滴灌流量的影响。输出变量为滴灌湿润体径向和垂向的迁移变化。

BP 神经网络模型对湿润体进行预测的训练和测试过程分别采用 HYDRUS-2D/3D 模型的模拟值和试验值。首先将 BP 神经网络预测的滴灌湿润体迁移距离与相同条件下 HYDRUS-2D/3D 的模拟值进行对比,通过调整神经网络中隐含层数  $l_h$ 、节点数  $n_h$  和传递函数  $f_h$ ,不断训练 BP 神经网络,直至输出结果逼近 HYDRUS-2D/3D 模型的模拟值。训练后 BP 神经网络的结构参数如表 3 所示,表中  $n_i, n_o$  为输入层、输出层节点数,  $f_o$  为输出层传递函数。然后应用训练好的 BP 神经网络模型对滴灌试验进行预测,并将输出结果与试验值进行比较,验证 BP 神经网络模型对不同土质和流量条件下滴灌湿润体预测结果的可靠性。

表2 滴灌BP神经网络模型的输入变量及其取值范围

Tab.2 Input variables and value ranges used for drip irrigation BP neural network model training

输入变量	最小值	最大值
$Q/(L \cdot h^{-1})$	2	75
$K_s/q/(cm \cdot L^{-1})$	0.06	13.5

表3 滴灌BP神经网络模型的结构参数

Tab.3 Input parameters and values used in BP neural network model

参数	径向湿润锋	垂向湿润锋
$l_h$	2	1
$n_i$	2	2
$n_h$	10,20	8
$n_o$	1	1
$f_n$	$logsig-logsig$	$logsig$
$f_o$	$purelin$	$purelin$

### 1.3 模拟结果评价指标

为评价BP神经网络模型对地表滴灌中湿润体迁移变化的预测效果,采用相关系数的平方( $R^2$ )和平均相对误差( $MRE$ )对模拟值与真实值进行定量化分析,可得

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2, \quad (6)$$

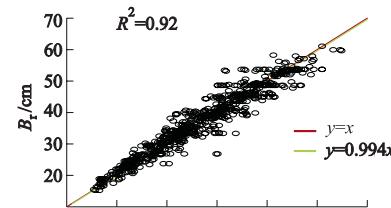
$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - y_i|}{x_i} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: $x_i$ 和 $y_i$ ( $i = 1, 2, \dots, N$ )分别为真实值和预测值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为真实值和预测值的平均值; $N$ 为真实值个数.

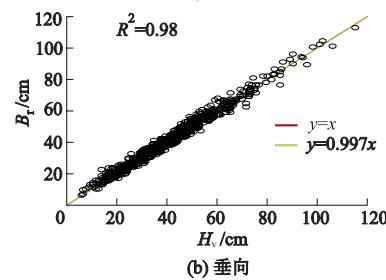
## 2 结果与讨论

### 2.1 BP神经网络模型的训练结果

用BP神经网络模型对11种不同的土质(33个样本点),在不同滴头流量(1, 2, 3 L/h)和不同灌水时刻(120, 300, 540, 780, 1 020, 1 260, 1 500 min)的湿润体进行预测,共得到693组湿润体.将BP神经网络模型在不同条件下预测的湿润体径向 $B_r$ 和垂向 $B_v$ 迁移距离与相同条件下HYDRUS-2D/3D模拟值( $H_r$ 和 $H_v$ )进行对比,结果如图2所示.从图中可以看出,滴灌湿润体径向和垂向迁移距离的BP神经网络模型预测值与HYDRUS模拟值基本分布在 $y=x$ 线附近,且相关系数的平方 $R^2$ 分别为0.92和0.98,表明BP神经网络模型的预测结果具有一定的可靠性.



(a) 径向



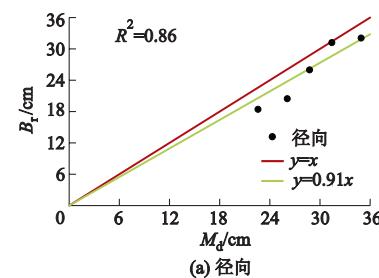
(b) 垂向

图2 滴灌BP神经网络模型对湿润体迁移预测的训练值与HYDRUS-2D/3D模拟值的对比

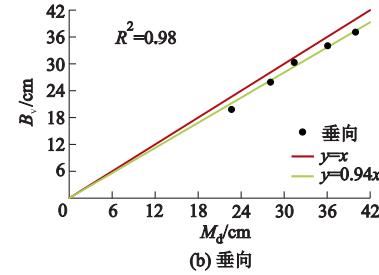
Fig.2 Estimates of soil wetting volume development by BP neural network model using training data versus HYDRUS-2D/3D simulation results

### 2.2 BP神经网络模型的验证结果

根据文献[3]、[11-12]中的滴灌试验条件(滴灌流量 $q$ 、土壤饱和导水率 $K_s$ ),利用BP神经网络模型对相应条件下的滴灌湿润体迁移进行预测,并将预测结果与试验实测结果 $M_d$ 进行对比,对比结果如图3—5所示.



(a) 径向



(b) 垂向

图3 砂壤土中湿润体迁移距离的通用算法解(文献[3])与滴灌BP网络模型计算结果对比(流量 $q = 1.0 L/h$ , 饱和导水率 $K_s = 80.64 cm/d$ )

Fig.3 Estimates of soil wetting volume development by BP network model using test data versus empirical algorithm solution (Ref. 3,  $q = 1.0 L/h$ ,  $K_s = 80.64 cm/d$ )

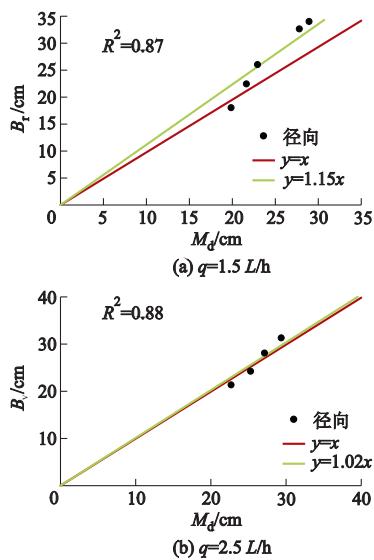


图4 壤土中湿润体迁移距离的实测结果(文献[11])与滴灌BP网络模型计算结果对比(流量 $q=1.5 \text{ L}/\text{h}$ 和 $2.5 \text{ L}/\text{h}$ ,饱和导水率 $K_s=47.52 \text{ cm/d}$ )

Fig.4 Estimates of soil wetting volume development by BP network model using test data versus laboratory measurements (Ref. 11,  $q=1.5$  and  $2.5 \text{ L}/\text{h}$ ,  $K_s=47.52 \text{ cm/d}$ )

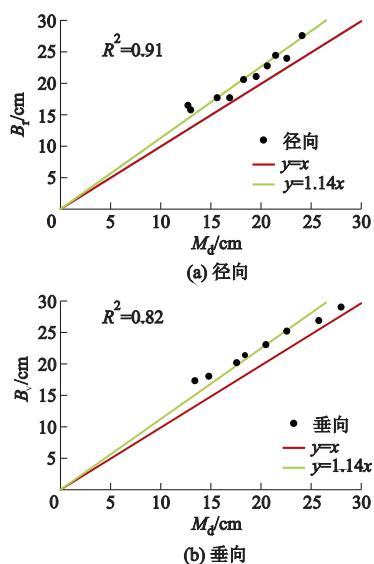


图5 砂土中湿润体迁移距离的实测结果(文献[12])与滴灌BP网络模型计算结果对比(流量 $q=1.0 \text{ L}/\text{h}$ 和 $2.0 \text{ L}/\text{h}$ ,饱和导水率 $K_s=57.6 \text{ cm/d}$ )

Fig.5 Estimates of soil wetting volume development by BP network model using test data versus laboratory measurements (Ref. 12,  $q=1.0$  and  $2.0 \text{ L}/\text{h}$ ,  $K_s=57.6 \text{ cm/d}$ )

从图中可以看出,在砂壤土、壤土、黏壤土和砂土条件下,滴灌湿润体迁移距离的计算值与实测值较为接近,BP神经网络模型较好地预测了不同流量下滴灌湿润体的迁移过程.另外,根据BP神经网络

模型计算值与试验实测值的统计分析,不同土质和流量条件下,滴灌湿润体径向和垂向迁移距离的计算值与实测值具有较好的相关性,其相关系数的平方 $R^2$ 均在0.82以上.通过将BP神经网络模型计算值与试验实测值进行对比和统计分析,发现BP神经网络模型对不同土质和流量条件下滴灌湿润体的预测效果较好.

### 2.3 BP神经网络模型的适用性分析

为分析土壤初始含水率对BP神经网络模型的影响,将BP神经网络在不同滴灌流量和不同土质条件下对湿润体垂向迁移距离的计算值与HYDRUS-2D/3D在相应条件下的模拟值进行比较,其中HYDRUS-2D/3D模拟中采用2种初始含水率:凋萎含水率(对应土壤基质势为-1 500 kPa)和 $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ .从图6中可以看出,BP神经网络模型计算的湿润体垂向迁移距离与HYDRUS在2种初始含水率下的模拟值有一定偏差,但总体平均相对误差均小于10%,表明BP神经网络模型在含水率比较低的土壤中对滴灌湿润体的预测效果较好.

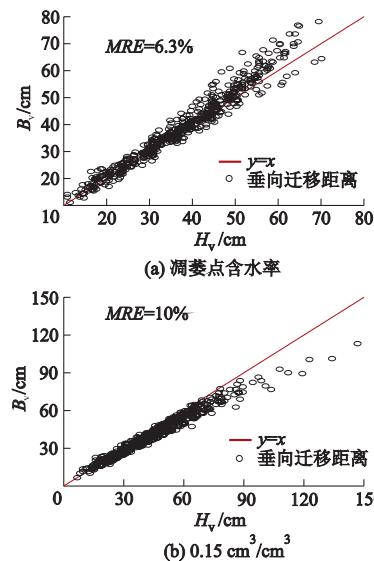


图6 滴灌BP神经网络模型计算值与不同初始含水率(凋萎点含水率和 $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )下HYDRUS-2D/3D模拟值对比

Fig.6 Comparison between vertical wetting front estimated by BP network model and HYDRUS-2D/3D simulation results under different initial soil water content conditions (Wilting point moisture and  $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )

## 3 结论

在大量搜集土质水力特性参数的基础上,利用

HYDRUS-2D/3D 软件对不同土质(土壤初始含水率为 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )和滴灌流量下的湿润体迁移变化进行模拟。根据 HYDRUS-2D/3D 模拟得到的滴灌湿润体径向和垂向迁移状况的结果,分析得到以下结论:

- 1) 将滴灌量和土壤饱和导水率与滴灌流量的比值作为输入变量,通过训练并合理选取参数,构建了描述滴灌湿润体在不同土质和滴灌流量下迁移变化的滴灌 BP 神经网络模型。
- 2) 滴灌 BP 神经网络模型计算结果与试验实测数据的对比表明,不同土质和滴灌流量下模拟的入渗过程与实测的入渗过程基本一致,且相关系数的平方均在 0.82 以上。
- 3) 滴灌 BP 神经网络模型对滴灌湿润体迁移规律预测效果较好,且在初始含水率偏小的情况下模拟精度更高,可为农业生产中滴灌系统设计和应用提供指导。

### 参考文献(References)

- [ 1 ] 赵正军,王福平,李瑞,等.基于 STM32 和 ZigBee 的农业大田精准滴灌系统设计 [J].江苏农业科学,2019,47(9):243-247.  
ZHAO Zhengjun, WANG Fuping, LI Rui, et al. Design of agricultural field precision drip irrigation system based on STM32 and ZigBee [ J ]. Jiangsu agricultural sciences, 2019, 47(9):243-247. (in Chinese)
- [ 2 ] 陈帅,毛晓敏.地表滴灌条件下湿润体迁移量化表征 [J].农业机械学报,2018,49(8):285-292.  
CHEN Shuai, MAO Xiaomin. Quantification of soil wetted volume development under surface drip irrigation [J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(8): 285-292. (in Chinese)
- [ 3 ] 李光永,曾德超.滴灌土壤湿润体特征值的数值算法 [J].水利学报,1997,28(7):1-6.  
LI Guangyong, ZENG Dechao. The mathematical method for calculating the characteristic value of wetted volume under surface drip irrigation [ J ]. Journal of hydraulic engineering, 1997, 28(7):1-6. (in Chinese)
- [ 4 ] LI J, YODER R E, ODHIAMBO L O, et al. Simulation of nitrate distribution under drip irrigation using artificial neural networks [ J ]. Irrigation science, 2004, 23(1): 29-37.
- [ 5 ] 尚松浩,毛晓敏,雷志栋,等.冬小麦田间墒情预报的 BP 神经网络模型 [J].水利学报,2002,33(4):60-63.  
SHANG Songhao, MAO Xiaomin, LEI Zhidong, et al. Back-propagation neural network model for soil moisture forecast of winter wheat field [ J ]. Journal of hydraulic engineering, 2002, 33(4):60-63.
- [ 6 ] SCHMITZ G H, SCHUTZE N, PETERSON U. New strategy for optimizing water application under trickle irrigation [J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 2002, 128(5): 287-297.
- [ 7 ] SIMUNEK J, SEJNA M, VAN GENUCHTEN M T. 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. salinity laboratory, Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture, Riverside, 1999.
- [ 8 ] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America journal, 1980, 44(5):892-898.
- [ 9 ] BRESLER E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems [J]. Irrigation science, 1978, 1(1): 3-17.
- [ 10 ] SKAGGS T H, TROUT T J, SIMUNEK J, et al. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations [J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 2004, 130(4):304-310.
- [ 11 ] KHAN A A, YITAYEW M, WARRICK A W. Field evaluation of water and solute distribution from a point source [J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 1996, 122(4): 221-227.
- [ 12 ] LI J, ZHANG J, RAO M. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source [J]. Agricultural water management, 2004, 67(2):89-104.

(责任编辑 徐云峰)