

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.028

冬小麦不同深度灌水条件下土壤水分运动数值模拟

郭向红¹ 孙西欢^{1,2} 马娟娟¹ 雷涛¹ 郑利剑¹ 王璞¹

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 2. 晋中学院, 晋中 030619)

摘要: 冬小麦深度灌水可以促进根系深扎,提高水分利用率。为了定量计算深度灌水条件下土壤水分动态,根据冬小麦不同深度灌水试验,用土壤水分运动方程的源项模拟不同深度灌水,建立了冬小麦不同深度灌水条件下土壤水分运动模型,采用有限差分法求解。利用不同深度灌水冬小麦试验数据对模型进行验证,结果表明模型计算的土壤含水率与实测土壤含水率的动态变化趋势一致,二者显著相关,相关系数在0.90以上,模型平均绝对误差最大值为 $0.023\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,平均相对误差最大值为8.22%,均方根误差最大值为 $0.03\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。所建模型具有较高的模拟精度,可用于模拟不同深度灌水条件下冬小麦土壤水分分布与动态变化。

关键词: 冬小麦; 深度灌水; 土壤水分运动; 数值模拟

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0237-08

Numerical Simulation of Soil Moisture Movement under Different Depths Irrigation for Winter Wheat

GUO Xianghong¹ SUN Xihuan^{1,2} MA Juanjuan¹ LEI Tao¹ ZHENG Lijian¹ WANG Pu¹

(1. College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China
2. Jinzhong University, Jinzhong 030619, China)

Abstract: In northern China, drought and shortage of water resources are very serious and have seriously affected the production of winter wheat. Choosing a reasonable irrigation method to improve the deep soil water use efficiency is of great significance to water saving and efficiency increase of winter wheat. The deep irrigation of winter wheat can promote deep rooting and improve water use efficiency. In order to quantitatively calculate soil moisture dynamics under deep irrigation conditions, the soil water movement models under different depths irrigation of winter wheat was established based on different depths irrigation experiments of winter wheat and the source terms of soil moisture equations were used to simulate different depths of irrigation. The model was solved by the finite difference method. The model was validated by the experimental data of winter wheat at different depths of irrigation. The results showed that the soil water content calculated by the model was in accordance with the dynamic change trend of the measured soil moisture content. The simulated and measured soil moisture contents were significantly related, the correlation coefficient was greater than 0.90, the maximum absolute error of the model was $0.023\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, the maximum of the average relative error was 8.22%, and the maximum value of the root mean square error was $0.3\text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Therefore, the model had higher simulation accuracy and can be used to simulate the distribution and dynamic changes of soil moisture in winter wheat under different irrigation depths.

Key words: winter wheat; deep irrigation; soil water movement; numerical simulation

0 引言

冬小麦是中国主要粮食作物之一,主要种植在我国北方地区,其种植面积和产量占中国冬小麦种

植面积和产量的1/2以上^[1-2]。但该地区的降雨时期与冬小麦生育期(10月一次年5月)不吻合,冬小麦全生育期内2/3~4/5的耗水量需要通过灌溉得以满足。地面灌溉是我国冬小麦的主要灌水方法,

收稿日期: 2018-06-04 修回日期: 2018-07-02
基金项目: 国家自然科学基金项目(51579168)和山西省自然科学基金项目(201601D011053)
作者简介: 郭向红(1979—),男,副教授,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: xianghong7920@126.com

但该方法的水分利用效率低,而且破坏土壤结构^[3-5]。因此,如何选择合理的灌水方法,提高冬小麦水分利用率,对冬小麦节水增效有重要意义。

深度灌水是人工向不同深度的土壤直接灌水,调节土壤水分分布,增加根区中深层土壤含水量的一种灌水方法,该方法能诱导根系深扎,提高根系对深层土壤水分的吸水,进而影响作物对土壤水资源的吸收利用^[6]。目前,深度灌水对冬小麦生长影响的研究,主要集中在试验研究方面。WANG 等^[7]、狄楠^[8]和陈爽^[9]采用土柱法进行不同深度灌水下冬小麦生长水分调控试验,结果表明深度灌水可以降低表层土壤的含水率,提高深层土壤的含水率,促进冬小麦根系深扎,增加深层土壤冬小麦的总根长、根质量,加大冬小麦的根系吸水深度;适度的深层灌水可提高小麦产量和水分利用效率。随着计算机和数值计算理论的发展,采用数值计算成为定量研究作物生长条件下的土壤水分动态的重要手段^[10-15]。本文将进行不同深度灌水条件下冬小麦土壤水分运动数值模拟研究,建立不同深度灌水条件下冬小麦土壤水分运动模型,定量分析深度灌水对冬小麦土壤水分分布影响,对揭示冬小麦深度灌水的节水增产机理有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2016 年 9 月—2017 年 6 月在山西水利职业技术学院实训基地进行,该实训基地位于山西省西南部的运城市盐湖区(北纬 34°48'27",东经 110°41'23",海拔 360 m)。试验区属典型的暖温带季风影响下的大陆性半干旱气候类型,多年平均降雨量 559.3 mm,主要集中在 7—9 月,多年平均气温 13.6℃,无霜期 180~250 d,平均日照时数 2 247.4 h。试验区土壤属于粉砂质粘壤土,土壤机械组成见表 1。

表 1 土壤机械组成
Tab.1 Soil mechanical composition %

土壤 深度/cm	土壤颗粒组成			土壤质地
	0.02 ~ 2 mm	0.002 ~ 0.02 mm	0 ~ 0.002 mm	
0 ~ 20	34.4	49.0	16.6	粉砂质粘壤土
20 ~ 50	33.6	50.0	16.4	粉砂质粘壤土
50 ~ 90	33.3	45.8	20.9	粉砂质粘壤土
90 ~ 160	29.8	49.3	20.9	粉砂质粘壤土
160 ~ 210	22.3	53.0	24.7	粉砂质粘壤土
210 ~ 300	25.4	51.7	22.9	粉砂质粘壤土

1.2 试验设计

试验采用地理 PVC 管土柱法(外径 20 cm,内径

18.6 cm,长 3 m)进行冬小麦生长试验,冬小麦品种为国审麦良星 99,属半冬性中晚熟品种,于 2016 年 10 月 12 日播种,次年 5 月 26 日收获。试验以灌溉土壤深度为控制因子,共设 3 个处理,即:灌溉土壤深度为根系分布的 0%(地表灌溉,T1)、灌溉土壤深度为根系分布的 40%(T2)、灌溉土壤深度为根系分布的 75%(T3),每个处理 4 个重复。为了避免降雨对试验的影响,在试验小区上设有遮雨棚。

试验期间共进行 5 次灌水,分别是越冬水(12 月 20 日)、返青水(3 月 8 日)、拔节水(4 月 4 日)、抽穗水(4 月 27 日)和灌浆水(5 月 10 日),其中越冬水没有做处理,均为地面灌溉,其他灌水按设计的深度灌水进行。本研究不对灌水量进行处理,均参照当地冬小麦田间灌水习惯进行,各处理灌水量均为 67.5 mm。每次灌水之前,先测得每个处理根系最大分布深度,然后根据灌水处理求得各处理的灌溉土壤深度。灌水时,在土柱壁的两侧每隔一定间距对称打孔,用点滴管连接供水瓶和管壁上的孔,向各深层土层供水。深层土壤各灌水孔的灌水量是根据每次灌前的土壤含水率和灌溉的上限(田间持水率的 85%)计算得到,且在灌溉时优先满足深层灌水孔的灌水需求,在满足深层土壤灌水孔需水后剩余的水量全部由地表灌入^[8]。各处理的灌水时间、灌水位置和灌水量见表 2。

1.3 测试项目

土壤含水率采用 TRIME-PICO IPH 测定,垂向间隔 20 cm,测定深度 300 cm。在每次灌水前,将土柱打开,分层取根,观测根系分布深度,并采用 WinRHIZO 测定根长密度。在冬小麦的各生育期,用毫米刻度尺测量冬小麦的叶片长度和叶片宽度,计算叶面积指数。气象资料取自运城市盐湖区气象局,主要包括冬小麦全生育期的温度、湿度、风速、气压、降水、日照等参数。

2 土壤水分运动模型

2.1 控制方程

由试验设计可知,冬小麦不同深度灌水下土壤水分运动可以采用一维土壤水分运动方程模拟,其关键是如何实现不同深度灌水的模拟。试验中不同深度灌水通过点滴管向土柱不同深度灌水孔定量供水实现,为模拟这一灌水情况,将通过在不同深度灌水处向方程增加源项实现。即在考虑土壤均质且各向同性、水流为连续介质且不可压缩、土壤骨架不变形的情况下,冬小麦不同深度灌水下土壤水分运动基本方程为

表 2 灌水时间、灌水孔布置及灌溉定额

Tab.2 Irrigation time, irrigation hole layout and irrigation quota

处理	灌水时间	灌水孔深度/cm	各灌水孔灌水量/mm
T1	12 月 20 日	0	67.5
	3 月 8 日	0	67.5
	4 月 4 日	0	67.5
	4 月 27 日	0	67.5
	5 月 10 日	0	67.5
T2	12 月 20 日	0	67.5
	3 月 8 日	0、30	66.5、1.0
	4 月 4 日	0、30、60、90	43.1、9.3、8.4、6.7
	4 月 27 日	0、30、60、90	20.0、15.0、16.0、16.5
	5 月 10 日	0、30、60、90	14.1、18.0、16.2、19.2
T3	12 月 20 日	0	67.5
	3 月 8 日	0、30、60、90、120	60.8、2.1、1.8、1.8、1.0
	4 月 4 日	0、30、60、90、150、180	34.0、12.5、7.1、7.9、1.6、4.4
	4 月 27 日	0、30、60、90、120、150、180	10.0、15.0、14.0、13.0、7.0、7.7、0.8
	5 月 10 日	0、30、60、90、120、150、180	3.7、11.6、13.8、13.8、11.3、10.9、2.4

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(h)}{\partial z} - S + Q \quad (1)$$

式中 h ——负压水头,cm
 θ ——土壤含水率,cm³/cm³
 $K(h)$ ——非饱和导水率,cm/min
 S ——根系吸水速率,min⁻¹
 Q ——不同深度供水强度,min⁻¹,仅在灌水时段的灌水孔的位置处有意义,其他时间和位置为 0
 z ——空间坐标,cm
 t ——时间,min

$$c_i = -\frac{K_i^{j+1,k} + K_{i+1}^{j+1,k}}{2\Delta z}$$
$$d_i = \frac{\Delta z}{\Delta t} C_i^{j+1,k} h_i^{j+1,k} - \frac{\Delta z}{\Delta t} (\theta_i^{j+1,k} - \theta_i^j) - \frac{K_{i+1}^{j+1,k} - K_{i-1}^{j+1,k}}{2} - S_i \Delta z + Q_i \Delta z$$

式中 C ——土壤比水容量,cm⁻¹

2.2 初始条件

初始条件为

$$h(z) \mid_{t=0} = h_{st}(z) \quad (2)$$

式中 h_{st} ——初始土壤负压水头,cm

2.3 边界条件

上边界条件为

$$-K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \Big|_{z=0} = E_s(t) \quad (3)$$

式中 E_s ——土壤蒸发强度,cm/min

下边界条件为

$$h(z) \mid_{z=300} = h_{300}(t) \quad (4)$$

式中 h_{300} ——下边界实测土壤负压水头,cm

2.4 模型求解

采用有限差分法,对方程(1)离散整理得

$$a_i h_{i-1}^{j+1,k+1} + b_i h_i^{j+1,k+1} + c_i h_{i+1}^{j+1,k+1} = d_i \quad (i=1,2,\cdots,n) \quad (5)$$

其中

$$a_i = -\frac{K_i^{j+1,k} + K_{i-1}^{j+1,k}}{2\Delta z}$$
$$b_i = \frac{K_i^{j+1,k} + K_{i+1}^{j+1,k}}{2\Delta z} + \frac{K_{i-1}^{j+1,k} + K_i^{j+1,k}}{2\Delta z} + \frac{\Delta z}{\Delta t} C_i^{j+1,k}$$

$$L(z,t) = ae^{-b|z-c|-d|t_d-f|} \quad (8)$$

2.5 模型参数确定

(1)根系吸水模型

根系吸水项采用 FEDDES 等^[16]提出的根系吸水模型

$$S(z,t) = \frac{\alpha(h)L(z,t)}{\int_0^{z_m} L(z,t) dz} T_p(t) \quad (6)$$

式中 $S(z,t)$ ——根系垂直方向的一维吸水强度,min⁻¹

z_m ——表根系分布深度,cm
 $T_p(t)$ ——植株潜在蒸腾强度,cm/min
 $L(z,t)$ ——根长密度分布函数
 $\alpha(h)$ ——水分胁迫系数

水分胁迫系数采用 VAN GENUCHTEN^[17]给出的宏观根系吸水胁迫函数,计算式为

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}} \right)^p} \quad (7)$$

式中 h_{50} ——作物最大根系吸水能力减小 50%对应的基质势,cm

p ——经验参数,一般取 3

对于根长密度分布函数 $L(z,t)$,根据实测根系根长密度资料数据,采用

式中 t_d ——时间,d
 $a、b、c、d、f$ ——拟合参数
进行拟合得到,拟合结果见表3。

表 3 根长密度分布函数参数拟合结果
Tab.3 Root length density distribution function
parameter fitting results

处理	a	b	c	d	f	R^2
T1	8.28	0.034 8	5.00	0.008 4	199	0.918 0
T2	6.50	0.026 6	7.00	0.009 8	192	0.873 5
T3	5.50	0.013 0	7.00	0.026 0	205	0.739 1

(2) 土壤蒸发模型
地表土壤蒸发计算式为^[18]

$$E_s = \begin{cases} E_p & (h > h_c) \\ \max \left(0, \frac{\ln \frac{h_{cc}}{h}}{\ln \frac{h_{cc}}{h_c}} E_p \right) & (h \leq h_c) \end{cases} \quad (9)$$

式中 E_p ——土壤潜在蒸发强度,cm/d
 $h_c、h_{cc}$ ——曲线分段点数值,cm
(3) 作物潜在蒸腾 T_p 和土壤潜在蒸发强度 E_p
作物潜在蒸腾 T_p 和土壤潜在蒸发强度 E_p 是根系吸水模型和土壤蒸发模型中的重要参数,其计算方法如下:
根据气象资料采用 Penman - Monteith 公式^[19]
计算参考作物蒸发蒸腾量

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (10)$$

式中 ET_0 ——参考作物腾发量,mm/d
 Δ ——饱和水汽压曲线斜率,kPa/K
 R_n ——净辐射,MJ/(m²·d)
 G ——土壤热通量,MJ/(m²·d)
 γ ——干湿比常数
 $e_a、e_d$ ——饱和水汽压和实际水汽压,kPa

T ——2 m 处平均气温,℃
 u_2 ——2 m 处风速,m/s
利用 FAO56 推荐的单作物系数方法,计算得到作物潜在腾发量

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (11)$$

式中 ET_c ——作物潜在腾发量,mm/d
 K_c ——作物系数,取值根据文献[19]确定
将 ET_c 分为作物潜在蒸腾 T_p 和土壤潜在蒸发 E_p ^[20-21],即

$$\begin{cases} T_p = ET_c (1 - e^{-0.6LAI}) \\ E_p = ET_c e^{-0.6LAI} \end{cases} \quad (12)$$

式中 LAI ——叶面积指数
(4) 土壤水分运动参数
土壤水动力学参数采用 VAN GENUCHTEN^[22]模型表示为

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & (h < 0) \\ \theta_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (13)$$
$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e^{1/2} (1 - S_e^{1/m})^2 & (h < 0) \\ K_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (14)$$

其中 $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$
式中 $\theta_r、\theta_s$ ——土壤残余含水率和饱和含水率,cm³/cm³
 K_s ——土壤饱和导水率,cm/min
 $\alpha、n、m$ ——经验参数
为了减少未知变量的个数,常采用简化关系 $m = 1 - 1/n (n > 1)$ 。

(5) 参数求解
以上参数中的未知参数包括:土壤水分运动参数 VG 模型的 5 个参数 $\theta_r、\theta_s、\alpha、n、K_s$,土壤蒸发模型中两个参数 $h_c、h_{cc}$,水分胁迫函数中的 h_{50} ,共 8 个未知参数。本文将根据 T1 处理实测土壤水分资料,采用郭向红等^[23]提出的混合遗传算法优化反求土壤水分运动方程得出以上参数,结果见表4。

表 4 模型参数求解结果
Tab.4 Results of model parameter solution

土壤深度/cm	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	α	n	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	h_{50} / cm	h_{cc} / cm	h_c / cm
0 ~ 20	0.032	0.418	0.060	1.526	0.030			
20 ~ 50	0.045	0.406	0.045	1.435	0.030			
50 ~ 90	0.060	0.402	0.078	1.387	0.013			
90 ~ 130	0.040	0.415	0.063	1.446	0.010	-378.35	-5272.42	-47.76
130 ~ 210	0.025	0.442	0.044	1.598	0.007			
210 ~ 300	0.033	0.450	0.050	1.645	0.002			

2.6 模型评价指标
模型的预测性能评价,采用评价误差 MAE、平均相对误差 MRE 和均方根误差 RMSE 3 个评价指

标对模型进行评价,其计算公式分别为

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\theta_{S,i} - \theta_{R,i}| \quad (15)$$

$$M_{RE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\theta_{S,i} - \theta_{R,i}}{\theta_{R,i}} \right| \times 100\% \quad (16)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\theta_{S,i} - \theta_{R,i})^2}{N}} \quad (17)$$

式中 $\theta_{S,i}$ ——模型计算土壤含水率, cm^3/cm^3
 $\theta_{R,i}$ ——实测土壤含水率, cm^3/cm^3
 N ——实测点总数

3 结果与分析

3.1 不同深度灌水条件下冬小麦土壤水分动态模拟与实测对比

图 1~3 为不同深度灌水下冬小麦土壤水分动态计算与实测对比图,模拟时段为 3 月 8 日(播种后 148 d)—5 月 26 日(播种后 226 d)。图 1 为 T1 处理,即地表灌水,由图可知,在 50 cm 以上,土壤含水率随时间推移逐渐减少,遇到灌水土壤含水率增大,然后再随时间推移逐渐减少的波动趋势,可以明显

看出有 4 次灌水,而在 50 cm 以下,土壤含水率随时间推移逐渐减小,灌水对其没有明显影响;图 2 为 T2 处理,即灌溉土壤深度为冬小麦根系的 40%,灌水对 110 cm 以上的土壤含水率有明显影响,土壤含水率呈波动趋势,而在 110 cm 以下,灌水对其影响较小。图 3 为 T3 处理,即灌溉土壤深度为冬小麦根系的 75%,灌水对 190 cm 以上的土壤含水率有明显影响,土壤水分呈波动趋势,而在 190 cm 以下,灌水对其影响较小。进一步由图 1~3 可知,计算值与实测值趋势一致,吻合较好,这说明本文建立的不同深度灌水条件下冬小麦土壤水分运动数学模型能够模拟冬小麦土壤水分动态变化。

3.2 不同深度灌水条件下冬小麦土壤水分运动模拟精度评价

采用 SPSS 20 对土壤含水率模拟值与实测值进行相关性分析,含水率模拟值与实测值相关性如图 4 所示,相关系数在 0.90 以上,在 0.01 水平

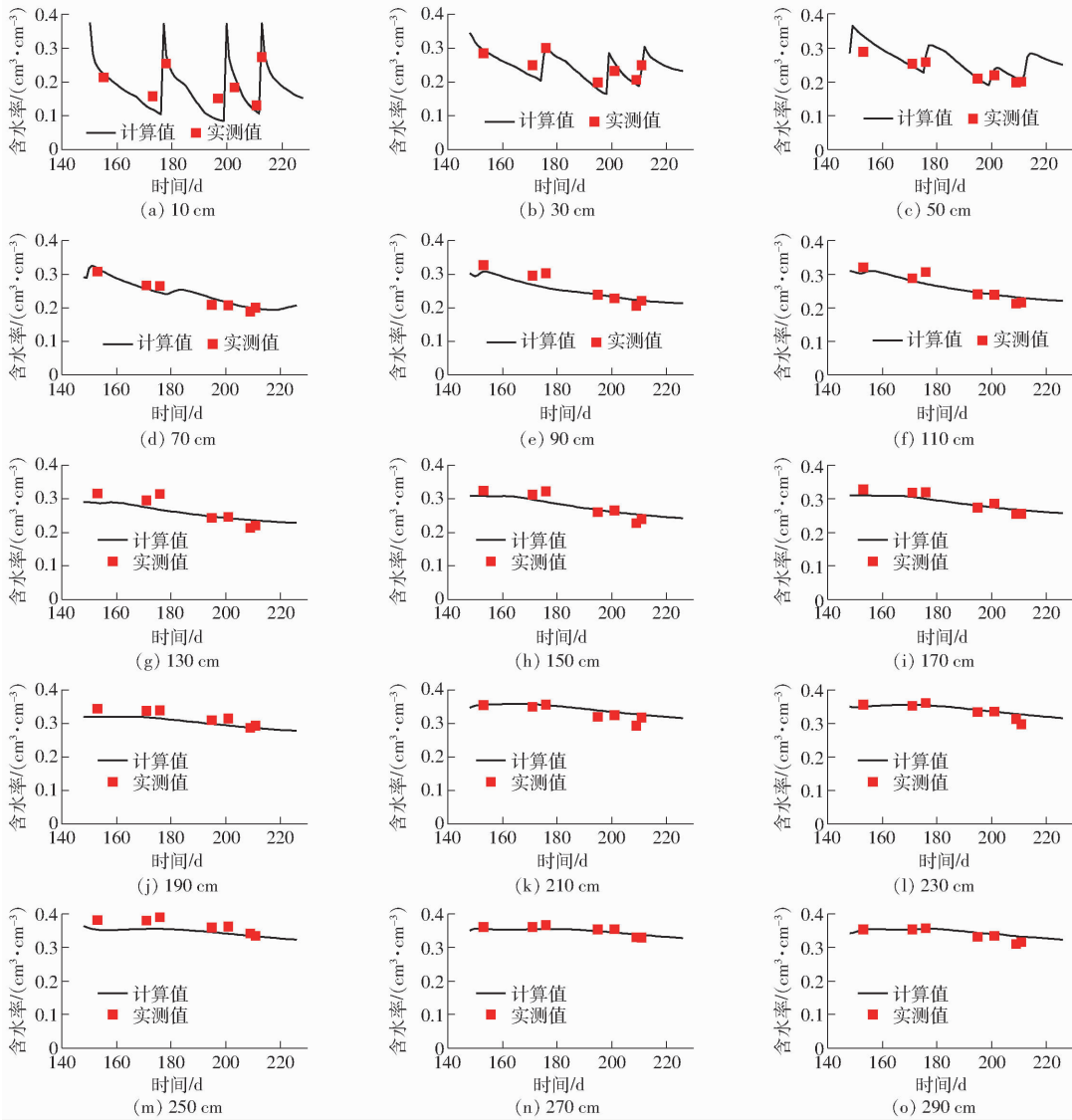


图 1 T1 处理下冬小麦土壤水分动态计算与实测对比
Fig. 1 Comparison of calculated and measured soil water dynamics under T1 in winter wheat

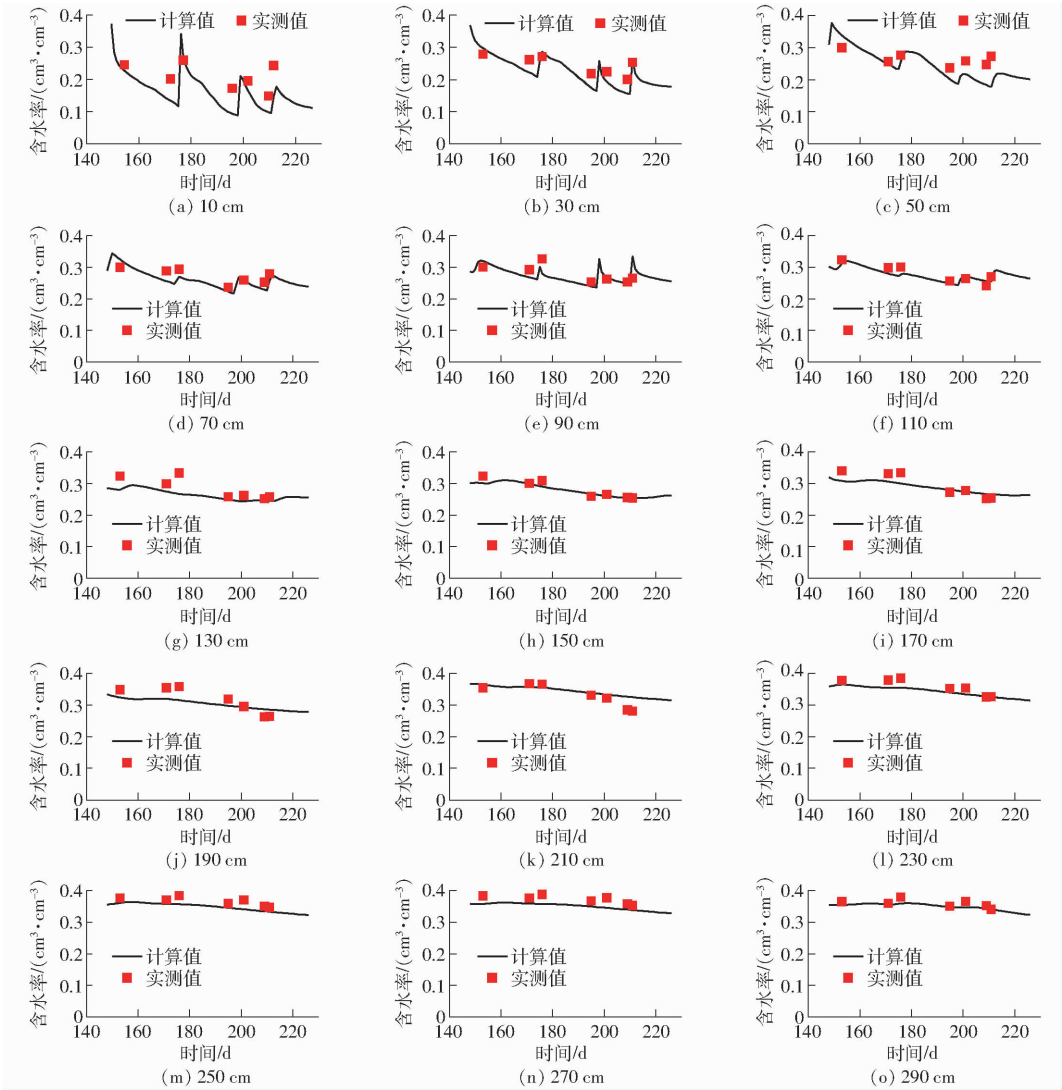


图 2 T2 处理下冬小麦土壤水分动态计算与实测对比

Fig. 2 Comparison of calculated and measured soil water dynamics under T2 in winter wheat

下显著相关,相关性方程斜率为 0.993 8、0.954 4 和 0.972 6,充分说明了模拟值与实测值之间具有较好的一致性。

表 5 为模型计算精度评价表,由表可知,模型计算的平均绝对误差 MAE 最大值为 0.023 cm³/cm³,平均相对误差 MRE 的最大值为 8.22%,均方根误差 RMSE 的最大值为 0.03 cm³/cm³。由此可见,本研究建立的不同深度灌水条件下冬小麦土壤水分运动模型模拟土壤含水率具有较高的精度,可以用于深度灌水条件下冬小麦土壤水分运动模拟。

3.3 不同深度灌水条件下冬小麦土壤水分分布模拟分析

图 5 为第 5 次灌水,灌后 1 d(5 月 11 日)不同深度灌水条件下冬小麦土壤含水率分布模拟图。由图 5 可知,灌溉土壤深度不同,土壤含水率分布不同,T1 处理土壤含水率增大区域主要在 0 ~ 60 cm, T2 处理土壤含水率增大区域主要在 0 ~ 110 cm, T3 处理土壤含水率增大区域主要在 0 ~ 180 cm,灌溉

土壤深度越大,土壤含水率增大区域越大。图 6 为不同深度灌水条件下冬小麦根长密度分布图,由图 6 可知在 0 ~ 30 cm,不同处理的根长密度关系由大到小为 T1、T2、T3,而在 50 cm 以下土层中,根长密度关系由大到小为 T3、T2、T1。这说明采用深度灌水,可以诱导根系深扎,促进深层土壤根系生长,提高冬小麦的抗旱性和水分利用率。而本研究所建立的冬小麦土壤水分运动模型可以较好地模拟不同深度灌水条件下的土壤水分分布与动态变化。

4 结论

- (1)根据冬小麦不同深度灌水试验,提出用土壤水分运动方程的源项模拟不同深度灌水,在此基础上建立不同深度灌水条件下冬小麦土壤水分运动模型,该模型能模拟任意深度灌水。
- (2)进行了 3 个深度灌水处理的冬小麦田间试验,对模型进行验证,结果表明模型计算的不同处理

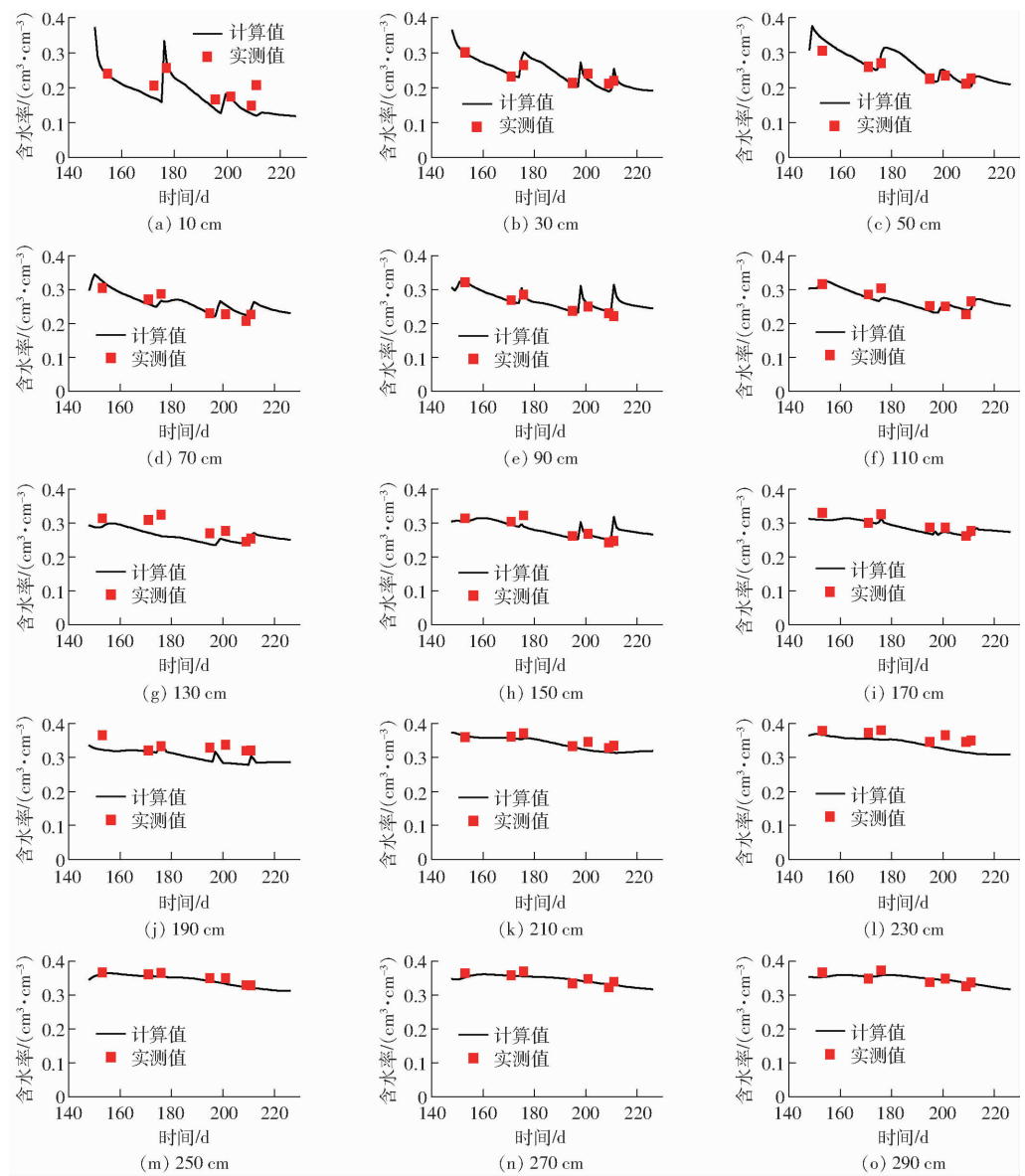


图 3 T3 处理下冬小麦土壤水分动态计算与实测对比

Fig. 3 Comparison of calculated and measured soil water dynamics under T3 in winter wheat

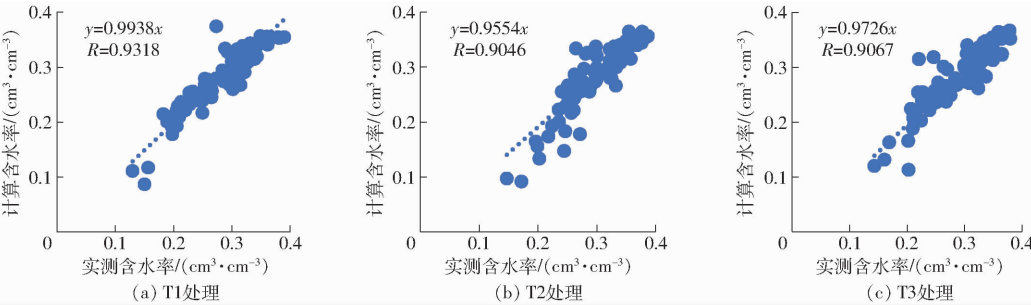


图 4 土壤含水率计算值与实测值相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of calculated and measured soil water contents

表 5 模型计算精度评价指标			
Tab.5 Model accuracy evaluation indicators			
处理	MAE/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	MRE/%	RMSE/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
T1	0.016	6.03	0.021
T2	0.023	8.22	0.030
T3	0.018	6.51	0.025

下冬小麦土壤含水率动态变化与实测土壤含水率的动态变化趋势一致,模型平均绝对误差最大值为 $0.023 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,平均相对误差最大值为 8.22% ,均方根误差最大值为 $0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,模型具有较高的模拟精度。

(3)通过模型模拟的不同深度灌水土壤含水率

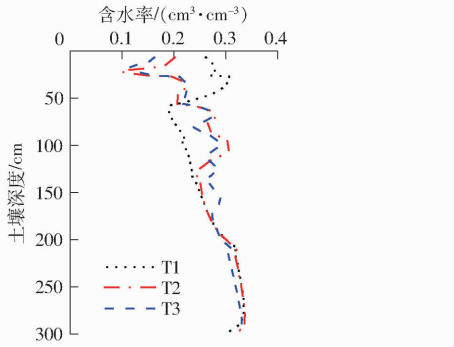


图 5 不同深度灌水条件下冬小麦土壤含水率分布

Fig.5 Soil moisture distribution of winter wheat under different irrigation depths

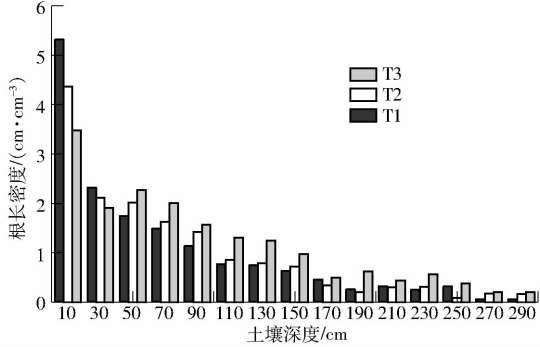


图 6 不同深度灌水条件下冬小麦根长密度分布

Fig.6 Root length density distribution of winter wheat under different irrigation depths

分布和冬小麦不同深度灌水下根系分布对比表明，土壤冬小麦根长密度越大，深度灌水可促进深层土壤根系生长，提高土壤水分利用率。

参 考 文 献

1 LIU Haitao, LI Baoguo, REN Tusheng. Soil profile characteristics of high-productivity alluvial cambisols in the North China Plain [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(4):765-773.

2 YANG Jianying, MEI Xurong, HUO Zhiguo, et al. Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(10):2065-2076.

3 陈玉民, 郭国双. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1995.

4 周殿玺. 小麦节水高产栽培技术[J]. 北京水务, 1995(3):27-29.

5 王旭清, 王法宏, 董玉红, 等. 不同种植方式麦田生态效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3):119-122.

WANG Xuqing, WANG Fahong, DONG Yuhong, et al. Study on the ecological effect in wheat field of different planting patterns [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3):119-122. (in Chinese)

6 黄洁. 不同灌水深度对冬小麦生长和水分利用效率的影响研究[D]. 太原:太原理工大学, 2016.

HUANG Jie. Research on growth and water use efficiency of winter wheat under different irrigation depths [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016. (in Chinese)

7 WANG Bing, ZHENG Lijian, MA Juanjuan, et al. Effective root depth and water uptake ability of winter wheat by using water stable isotopes in the Loess Plateau of China [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(6):27-35.

8 狄楠. 灌水深度对冬小麦根系形态分布及根系活力的影响[D]. 太原:太原理工大学, 2016.

DI Nan. Effects of irrigation depth control on root morphology and root vigor of winter wheat [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016. (in Chinese)

9 陈爽. 不同灌水深度对冬小麦生长及根区水热动态影响研究[D]. 太原:太原理工大学, 2017.

CHEN Shuang. Research on growth and soil hydrothermal change of winter wheat under different irrigation depths [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese)

10 冀荣华, 王婷婷, 祁力钧, 等. 基于 HYDRUS-2D 的负压灌溉土壤水分入渗数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4):113-119. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150417&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.017.

JI Ronghua, WANG Tingting, QI Lijun, et al. Numerical simulation of soil moisture infiltration under negative pressure irrigation based on HYDRUS-2D[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):113-119. (in Chinese)

11 郭向红, 孙西欢, 马娟娟. 降雨灌溉蒸发条件下苹果园土壤水分运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11):68-73.

GUO Xianghong, SUN Xihuan, MA Juanjuan. Numerical simulation for root zone soil moisture movement of apple orchard under rainfall-irrigation-evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11):68-73. (in Chinese)

12 冀荣华, 刘秋霞, 陈振海, 等. 基于 HYDRUS-3D 模型的微润灌溉土壤水分入渗模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊):290-295. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s044&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.044.

JI Ronghua, LIU Qiuxia, CHEN Zhenhai, et al. Numerical simulation of soil water infiltration based on HYDRUS-3D finite element model under moistube-irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (Supp.):290-295. (in Chinese)

13 范严伟, 赵彤, 白贵林, 等. 水平微润灌湿润体 HYDRUS-2D 模拟及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4):115-124.

FAN Yanwei, ZHAO Tong, BAI Guilin, et al. HYDRUS-2D simulation of soil wetting pattern with horizontal moistube-irrigation and analysis of its influencing factors[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4):115-124. (in Chinese)

using higher plants[C] // Proceedings of the Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems, 1997, 400:851.

10 杨小锋,别之龙. 氮磷钾施用量对水培生菜生长和品质的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(增刊2):265-269.
YANG Xiaofeng, BIE Zhilong. Effects of the amount of application of N, P, K on the growth and quality of lettuce[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(Supp.2):265-269. (in Chinese)

11 王新,马富裕,刁明,等. 滴灌番茄临界氮浓度、氮素吸收和氮营养指数模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(18):99-108.
WANG Xin, MA Fuyu, DIAO Ming, et al. Simulation of critical nitrogen concentration, nitrogen uptake and nitrogen nutrition index of processing tomato with drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(18):99-108. (in Chinese)

12 GUTIERREZ M, ALEGRET S, CACERES R, et al. Application of a potentiometric electronic tongue to fertigation strategy in greenhouse cultivation[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2007, 57(1):12-22.

13 徐雅洁. 营养液多组分检测的关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2011.
XU Yajie. Research on the key technology of multi-component detection of nutrient solution[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)

14 邱雪峰,薛美盛,孙德敏,等. 设施栽培中营养液成分的在线检测[J]. 农业工程学报,2000,16(1):83-86.
QIU Xuefeng, XUE Meisheng, SUN Demin, et al. The on-line measurement of the nutritive medium ingredient in greenhouse culture[J]. Transactions of the CSAE, 2000,16(1):83-86. (in Chinese)

15 孙德敏,张利,王永,等. 无土栽培营养液检测仪的研制[J]. 仪器仪表学报,2004,25(3):281-283.
SUN Demin, ZHANG Li, WANG Yong, et al. Development of soilless culture nutrient solution measuring instrument[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(3):281-283. (in Chinese)

16 KIM H J, HUMMEL J W, BIRRELL S J. Evaluation of ion-selective membranes for real-time soil nutrient sensing[C]. ASAE Annual International Meeting, 2004(101):339-359.

17 BAMSEY M T, BERINSTAIN A, DIXON M A. Calcium-selective optodes for the management of plant nutrient solutions[J]. Sensors & Actuators B—Chemical, 2014(19):61-69.

18 王永,司炜,孙德敏,等. 温室营养液循环检测系统中离子选择电极的数学建模与测量[J]. 农业工程学报,2003,19(4):230-233.
WANG Yong, SI Wei, SUN Demin, et al. Modeling and measurement of ion-selective electrode of nutrient solution measuring system in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(4):230-233. (in Chinese)

19 KIM H J, KIM W K, ROH M Y, et al. Automated sensing of hydroponic macronutrients using a computer-controlled system with an array of ion-selective electrodes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93(4):46-54.

20 陈薇,秦琳琳,吴刚,等. 硝酸根离子选择电极建模[J]. 传感技术学报,2007,20(1):14-17.
CHEN Wei, QIN Linlin, WU Gang, et al. Modeling of ion selective electrode[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007,20(1):14-17. (in Chinese)

21 张利,孙德敏,王永. 一种新的离子计温度补偿方法[J]. 电子测量与仪器学报,2003,17(4):4-8.
ZHANG Li, SUN Demin, WANG Yong. A new method to compensate the temperature excursion of ion instrument[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2003,17(4):4-8. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 244 页)

14 张林,吴普特,范兴科. 多点源滴灌条件下土壤水分运动的数值模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(9):40-45.  
ZHANG Lin, WU Pute, FAN Xingke. Numerical simulation of soil water movement with drip irrigation of multiple point source [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(9):40-45. (in Chinese)

15 ZHOU Q Y, KONG S Z, ZHANG L, et al. Comparison of APRI and Hydrus-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation[J]. Plant and Soil,2007,291(1-2):211-223.

16 FEDDES R A, BRESLER A E, NEUMAN S P. Field test of a modified numerical model for water uptake by root system[J]. Water Resources Research, 1974, 10(6):1199-1206.

17 VAN GENUCHTEN M T. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone[D]. Research Report, U. S. Salinity Laboratory. 1987.

18 刘昌明,窦清晨. 土壤-植物-大气连续体模型中的蒸散发计算[J]. 水科学进展, 1992, 3(4):255-263.  
LIU Changming, DOU Qingchen. Evapotranspiration calculation in soil-plant-atmosphere continuum models [J]. Advances Water Science, 1992, 3(4):255-263. (in Chinese)

19 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop requirements[M]. Rome: United Nations FAO,1998.

20 BELMANS C, WESSELING J G, FEDDES R A. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE[J]. Journal of Hydrology, 1983, 63(3):271-286.

21 HAY R K M, PORTER J R. The physiology of crop yield[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2006.

22 VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44:892-898.

23 郭向红,孙西欢,马娟娟,等. 基于混合遗传算法和积水入渗实验反求土壤水力参数[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(6):1017-1026.  
GUO Xianghong, SUN Xihuan, MA Juanjuan, et al. Inverse model estimating soil hydraulic parameters based on hybrid genetic algorithms and ponding infiltration experiment[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(6):1017-1026. (in Chinese)