

负水头环境土壤水分湿润锋运移三维模拟

朱君, 李婷, 谢添, 张艾明*

(中国辐射防护研究院 核环境模拟与评价技术重点实验室, 太原 030006)

摘要:【目的】更加有效地控制土壤含水率, 指导节水灌溉。【方法】采用负水头土壤水分湿润锋运移试验和 Hydrus-3D 三维土壤水分运移数值模型, 研究了山西榆次砂土、壤土在负水头高度 (0、-0.5、-1.0 m) 时的土壤水分湿润锋运移规律和模型的有效性。【结果】水分累积入渗量随着时间的增加逐渐增大, 与时间呈良好的幂函数关系; 湿润锋随着时间的增加逐渐向水平、垂直方向扩大, 曲线呈 1/4 椭圆状, 最大湿润距离与时间的平方根呈良好的线性关系; 湿润锋入渗速度随着负水头高度的增加逐渐减小, 与时间呈良好的幂函数关系。实测湿润锋包络面积与模型计算值的偏差, 砂土为 0.51%~7.21%, 壤土为 0.22%~16.03%。【结论】所建三维模型可以用于描述负水头环境下土壤水分湿润锋的运移特征, 并用于预测各种条件改变下的湿润锋运移和含水率分布。

关键词: 负水头; 累积入渗量; 湿润锋; 入渗速度; Hydrus-3D

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2019132

朱君, 李婷, 谢添, 等. 负水头环境土壤水分湿润锋运移三维模拟[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 42-51, 58.

ZHU Jun, LI Ting, XIE Tian, et al. Three-dimensional Model and Verification of Soil Wetting Front Migration in Negative Head Environment [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 42-51, 58.

0 引言

负水头供水可以精准控制土壤含水率, 维持土壤的非饱和状态, 避免因干湿交替使植物遭受旱涝胁迫和土壤养分淋溶损失, 是开发新型节水灌溉技术的有效措施^[1-2]。因此, 对负水头条件下土壤水分运动特征的研究, 具有十分重要的理论和实践意义。目前, 大量的实验结果表明负水头条件下, 累积入渗量与时间、最大水平和垂直湿润距离与时间都符合幂函数关系, 且湿润体的宽深比随入渗时间和水头的增加而增加^[3-6]。Rodriguez-Sinobas 等^[7]也认为湿润体体积和宽深比随着供水压力的增加而增加, 且入渗速度与供水压力呈幂函数关系。以上研究不是建立在土壤水动力学的基础上, 是直接拟合试验数据得到的经验公式。如何结合试验现象, 确定负水头环境下土壤水分运移模型, 并预测不同供水水头、不同土壤质地等条件下灌水器的间距, 实现土壤含水率的持续精确控制则更加重要。但是现有模型都只适用于描述负水头条件下土壤湿润锋一维垂直、水平运动规律^[8-10]。邹朝望等^[11-12]基于 Gardner 和 Russo 公式表征了土壤水分特征曲线与非饱和土壤的导水率, 推导了负水头下湿润峰、

入渗率、累积入渗量与入渗时间的关系, 并用试验数据验证了其合理性。范军亮等^[13-14]发现 Philip 模型和 Kostiakov 公式均可以较好描述负水头条件下, 4 种典型黄土高原土壤的累积入渗量、湿润锋运移距离、入渗率和入渗时间之间的关系。上官玉铎等^[15-16]对比了负水头条件下的土壤水分入渗规律, 发现累积入渗量与时间呈幂函数关系, 湿润锋与时间的平方根呈线性关系, Kostiakov 公式比 Philip 模型、Green-Ampt 模型能更准确描述入渗率和时间关系。辛琛等^[17-18]通过实验获得了不同负水头下累积入渗量、湿润锋和入渗时间的关系, 发现 Philip 模型、Green-Ampt 模型和 Kostiakov 公式都可以描述负水头条件下的土壤湿润锋运移规律。王佳佳等^[1]将对土壤湿润锋运移规律的研究拓展到二维模型, 利用室内实验观测了不同负压水头条件下土壤水盐的运移特征, 通过实验数据验证了 Hydrus-2D 模型的适用性, 对不同质地土壤中水分分布、累积入渗量、水分入渗速率、盐分分布和蒸发量进行了模拟。冀荣华等^[19]结合土壤水动力学建立了负压灌溉条件下的 Hydrus-2D 水分入渗模型, 模拟结果与实测结果的相对误差为 2%~4%。Yao 等^[20]通过二维湿润锋实验发现, 湿润体近似同心椭球面, 且椭球中心含水率最高。现阶段负水头条件下的土壤湿润锋运移模型以一、二维为主^[21-26], 三维模型鲜有报道。本文通过室内实验数据验证负水头环境下 Hydrus-3D 土壤水分模型的准确性和有效性, 对完善

收稿日期: 2019-07-19

作者简介: 朱君 (1985-), 男, 助理研究员, 主要从事放射性核素在土壤及地下水中的迁移、转化规律研究。E-mail: 405400881@qq.com

通信作者: 张艾明 (1971-), 男, 研究员, 主要从事放射性核素在水环境中的迁移、转化规律研究。E-mail: 13834508698@163.com

负水头条件下的土壤水分运动理论十分必要。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

实验装置由马氏瓶、有机玻璃土箱、多孔板灌水器、橡皮输水管组成。有机玻璃箱为扇形柱体，高 40.0 cm，径向长度 35.0 cm，夹角 30° ；多孔板灌水器的出水孔为 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ ($15\ \text{cm}\times 10\ \text{cm}\times 2.5\ \text{cm}$)；马氏瓶高 75.0 cm，内径 9.0 cm；橡皮输水管内径 6.0 mm。试验采用超纯水（Milli-Q Element 超纯水制备机，日本 Millipore 公司）。

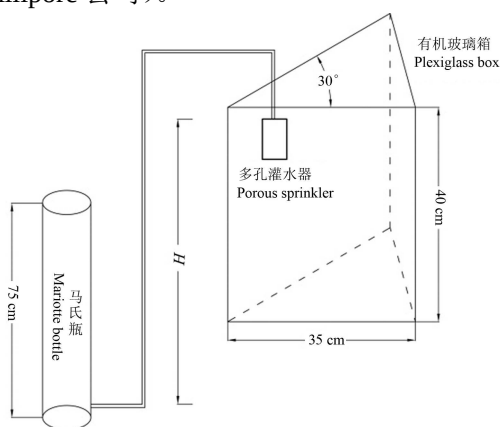


图 1 水分运移实验装置图

Fig.1 Diagram of experimental device for water transport

1.2 试验样品

选择山西省榆次地区的砂土、壤土介质为试验对象，用摇摆式筛析机（AS200 型，德国 Retsch 公司）以及激光粒度分析仪（Mastersizer 3000E，英国 Malvern 公司）测定粒径分布。其中，砂土的砂粒量 85.50%、粉粒量 5.47%、黏粒量 9.03%，有机质量 1.7 g/kg，土壤 pH 值 8.34。壤土的砂粒量 54.21%、粉粒量 29.65%、黏粒量 16.14%，有机质量 9.3 g/kg，土壤 pH 值 8.08。

1.3 土壤水力参数测定

测定砂土、壤土的水分特征曲线与饱和导水率。水分特征曲线采用离心机法测定，由低到高依次设置 12 个不同的转速对饱和试样进行脱水，得到不同体积分含水率下的土壤吸力值。饱和导水率采用定水头法测定，首先从土柱底端通水，使整个土柱体饱和，上部安装定水头装置，调整入水口供水量，使试验期间水头差 H 保持不变，记录时间 Δt 和底部出口流量 Q 。

1.4 试验方法

砂土、壤土均按比例 $1.25\ \text{g}/\text{cm}^3$ 分层装入有机玻璃箱。将马氏瓶、灌水器用橡皮管连接起来，埋入有机玻璃箱的土壤介质中，并保证整套装置的密封性。以多孔板灌水器顶部为参考平面，设计 3 种不同的作用水头 H ，如下：

- 1) $H=0\ \text{m}$ ，作用水头为 0，马氏瓶进气口与灌水器平。
- 2) $H=-0.5\ \text{m}$ ，作用水头为负压，马氏瓶进气口比灌水器低 0.5 m。
- 3) $H=-1.0\ \text{m}$ ，作用水头为负压，马氏瓶进气口比灌水器低 1.0 m。

记录累积入渗量和湿润锋运移曲线。在有机玻璃箱的表面粘贴透明胶片记录水分入渗过程，累积入渗量通过马氏瓶上的刻度读取。

2 结果与分析

2.1 土壤水分湿润锋运移结果

在有机玻璃箱表面粘贴的透明胶片上记录相应时刻砂土、壤土的湿润锋运移过程，并在试验结束后将胶片上的水分运移曲线转化为 Excel 数据，见图 2、图 3。

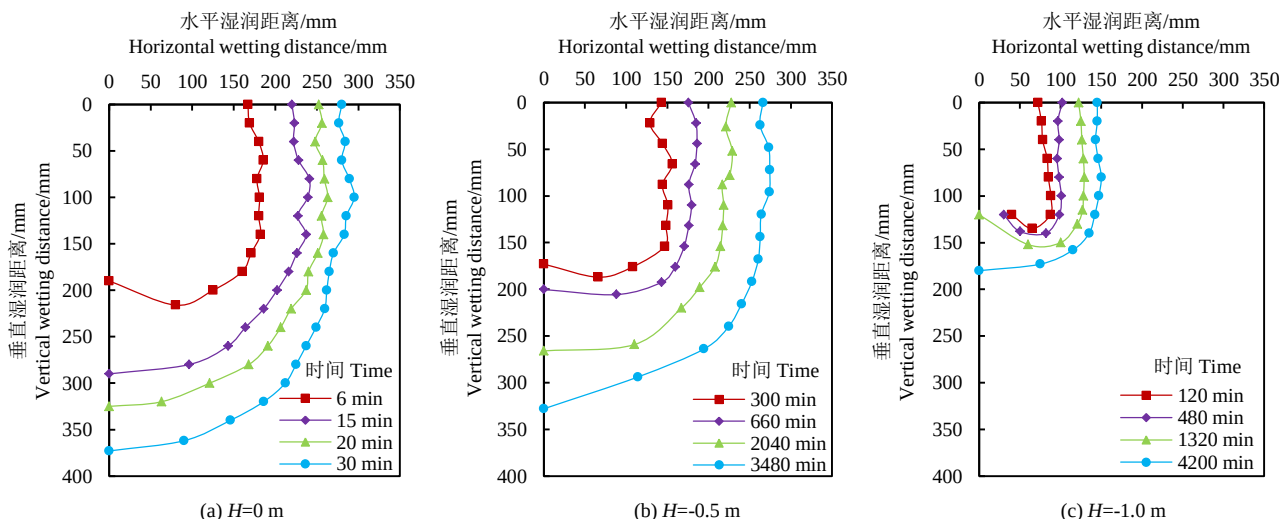


图 2 砂土水分湿润锋运移曲线

Fig.2 Wetting front moving curve of sand

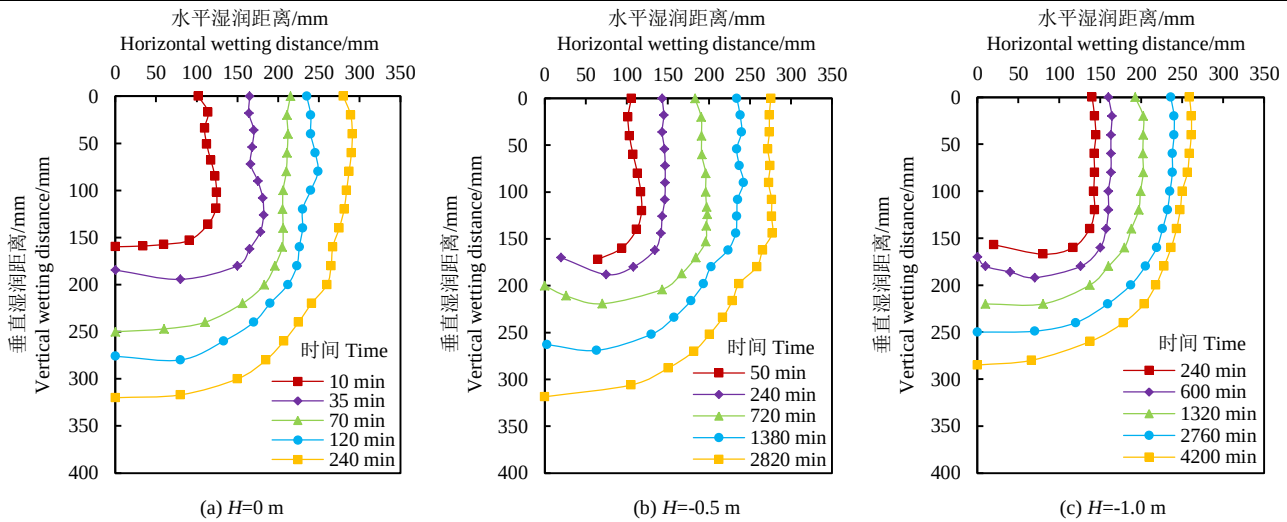


图3 壤土水分湿润锋运移曲线

Fig.3 Wetting front moving curve of loam

在重力势和基质势作用下,湿润锋向垂直和水平方向运动,湿润体近似为1/4椭圆状,湿润锋包络面积随时间逐渐增加。

1) $H=0$ m时,砂土的湿润锋包络面积在30 min到达904.1 cm^2 ,壤土的湿润锋包络面积在240 min到达791.7 cm^2 。

2) $H=-0.5$ m时,3 480 min砂土的湿润锋包络面积到达742.3 cm^2 ,2 820 min壤土的湿润锋包络面积到达745.7 cm^2 。

3) $H=-1.0$ m时,4 200 min砂土的湿润锋包络面积到达241.2 cm^2 ,4 200 min壤土的湿润锋包络面积到达629.5 cm^2 。

2.2 入渗量与时间的关系

3种不同负水头条件下,砂土、壤土的累积入渗量随着时间的增加逐渐增大,结果见图4。可以用幂函数 $I=m \times t^n$ 描述累积入渗量与时间的关系,随着负水头高度的增加, m 、 n 值均减小。砂土的 m 值由66.51减少至1.08, n 值由0.96减少至0.42;壤土的 m 值由38.49减少至6.59, n 值由0.69减少至0.56,拟合值见表1。与文献[3-7]的试验结果一致。

表1 累积入渗量与时间拟合值

水头 Water head/cm	砂土 Sand			壤土 Loam		
	m	n	R^2	m	n	R^2
0	66.51	0.96	0.99	38.49	0.69	0.99
-0.5	1.24	0.64	0.99	9.17	0.59	0.99
-1.0	1.08	0.42	0.95	6.59	0.56	0.99

$H=0$ m,砂土 m 值是壤土的172.80%,原因是压力势占主导作用,且砂土的渗透系数大于壤土。 $H=-0.5$ m,砂土 m 值是壤土的13.52%; $H=-1.0$ m, m 值砂土是壤土的16.34%,壤土的累积入渗量曲线高于砂土,基质势逐渐占主导作用。

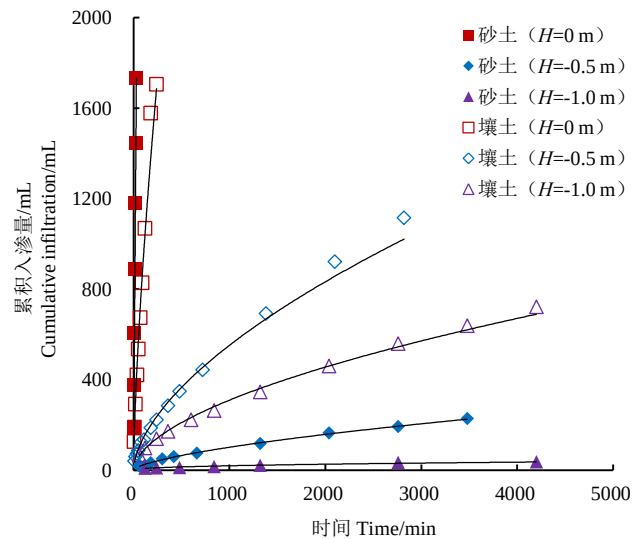


图4 累积入渗量随时间变化曲线

Fig.4 Curve of cumulative infiltration versus time

2.3 湿润峰与时间的关系

3种不同负水头条件下,砂土、壤土湿润锋随着时间的增加逐渐向水平、垂直方向扩大,结果见图5。水平和垂直最大湿润距离与时间的关系,用下式描述:

$$Z_f = pt^{0.5} + q, \quad (1)$$

式中: Z_f 为最大湿润距离 (mm); t 为时间 (min); p 与 q 为常数,拟合关系见表2和表3。砂土和壤土的水平、垂直最大湿润距离与时间的平方根呈良好的线性关系^[15-16],相关系数 R^2 都大于0.96, p 随着负压水头的增加而减小,砂土 p 值由36.20减少至1.17,壤土 p 值由13.24减少至2.43。

$H=0$ m,砂土 p 值是壤土的273.41%,单位时间砂土湿润锋迁移距离大于壤土,原因是压力势占主导作用。 $H=-0.5$ m,砂土 p 值是壤土的78.90%; $H=-1.0$ m,砂土 p 值是壤土的48.15%,单位时间壤土湿润锋迁移距离大于砂土,基质势逐渐占主导作用。

表2 水平最大湿润距离与时间拟合值

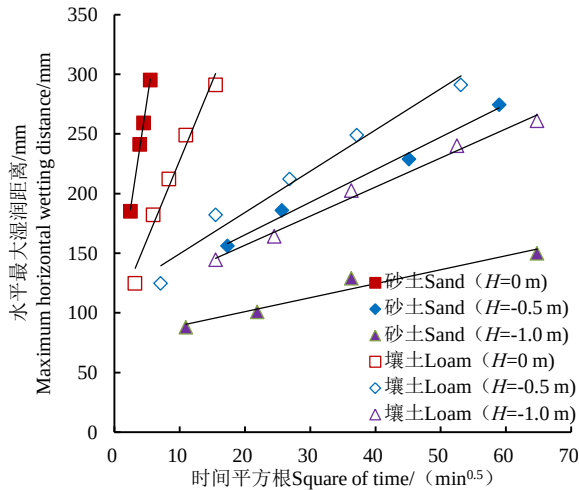
Table 2 Fitting parameters of maximum horizontal wetting distance and time

水头 Water head/cm	砂土 Sand			壤土 Loam		
	p	q	R^2	p	q	R^2
0	36.20	97.74	0.99	13.24	95.46	0.97
-0.5	2.73	110.96	0.99	3.46	115.15	0.97
-1.0	1.17	77.74	0.96	2.43	108.12	0.99

表3 垂直最大湿润距离与时间拟合值

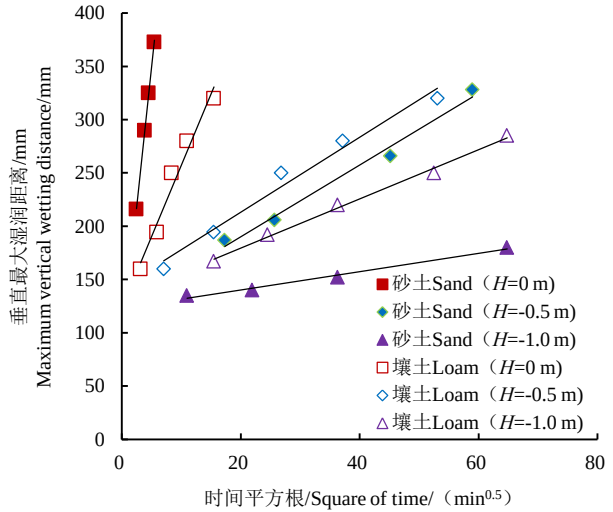
Table 3 Fitting parameters of maximum vertical wetting distance and time

水头 Water head/cm	砂土 Sand			壤土 Loam		
	p	q	R^2	p	q	R^2
0	52.19	88.68	0.99	13.39	123.33	0.97
-0.5	3.36	122.90	0.98	3.52	142.49	0.98
-1.0	0.86	123.01	0.98	2.31	133.34	0.99



(a) 水平最大湿润距离与时间变化曲线

(a) Curve of maximum horizontal wetting distance versus time

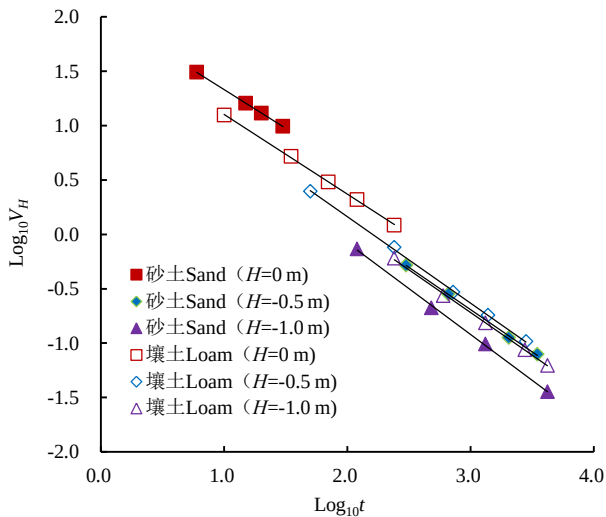


(b) 垂直最大湿润距离与时间变化曲线

(b) Curve of maximum vertical wetting distance versus time

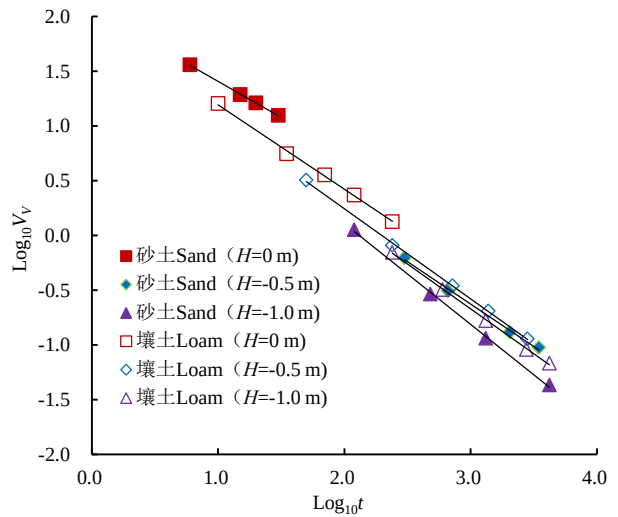
图5 湿润锋距离与时间变化曲线

Fig.5 Curve of wetting distance versus time



(a) 水平湿润锋入渗速度与时间变化曲线

(a) Curve of infiltration velocity of horizontal wetting front versus time



(b) 垂直湿润锋入渗速度与时间变化曲线

(b) Curve of infiltration velocity of vertical wetting front versus time

图6 湿润锋入渗速度与时间变化曲线

Fig.6 Curve of infiltration velocity of wetting front versus time

2.4 入渗速度与时间的关系

负水头高度从0 m增加至-1.0 m时,湿润锋入渗速度逐渐减小,见图6。砂土、壤土的水平湿润锋入渗速度(V_H)和垂直湿润锋入渗速度(V_V)与时间的关系用下式描述:

$$\text{Log}_{10} V = b \times \text{Log}_{10} t + \text{Log}_{10} a, \quad (2)$$

式中: V 为湿润锋入渗速度(mm/min); t 为时间(min); a 、 b 为常数,拟合关系见表4和表5。砂土和壤土的水平、垂直湿润锋入渗速度与时间均呈良好的幂函数关系^[3-7],相关系数 R^2 都大于0.99。

$H=0$ m, 曲线上同一时间点对应的湿润锋入渗速度砂土>壤土; $H=-0.5$ m和-1.0 m, 曲线上同一时间点对应的湿润锋入渗速度壤土>砂土。

表4 水平湿润锋入渗速度与时间拟合值

Table 4 Fitting parameters of infiltration velocity of Horizontal wetting front and time

水头 Water head/cm	砂土 Sand			壤土 Loam		
	a	b	R^2	a	b	R^2
0	110.39	-0.71	0.99	68.52	-0.73	0.99
-0.5	44.02	-0.78	0.99	56.64	-0.80	0.99
-1.0	40.58	-0.84	0.99	43.36	-0.80	0.99

表5 垂直湿润锋入渗速度与时间拟合值

Table 5 Fitting parameters of infiltration velocity of vertical wetting front and time

水头 Water head/cm	砂土 Sand			壤土 Loam		
	a	b	R^2	a	b	R^2
0	117.04	-0.66	0.99	92.21	-0.77	0.99
-0.5	49.56	-0.77	0.99	77.90	-0.82	0.99
-1.0	88.97	-0.92	0.99	60.80	-0.82	0.99

3 模型与验证

应用 Hydrus-3D 建立三维土壤水分运移数值模型^[27-29], 通过试验数据验证模型的准确性和有效性。

试验扇形柱体高40.0 cm, 径向长度35.0 cm, 夹角 30° 。模型在 z 方向离散为5 mm, 剖分为20层, 共生成节点数111 383个, 三角网格298 711个。计算时间步长为1 s。

3.1 参数选取

根据试验结果, 采用Van Genuchten模型对砂土、壤土的饱和含水率 θ_s 、残余含水率 θ_r 、进气值倒数 α 和拟合参数 n 进行求解, 同时计算饱和渗透系数。参数结果见表6。

表6 土壤水力参数

Table 6 Soil hydraulic parameters

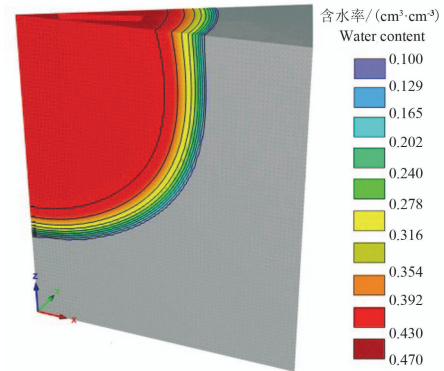
类型 Soil	$\theta_s/(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\theta_r/(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	α/cm	n	$K_s/(\text{cm s}^{-1})$
砂土 Sand	0.055	0.47	0.036	1.83	0.003 7
壤土 Loam	0.061	0.50	0.012	1.47	0.000 1

3.2 模型计算结果

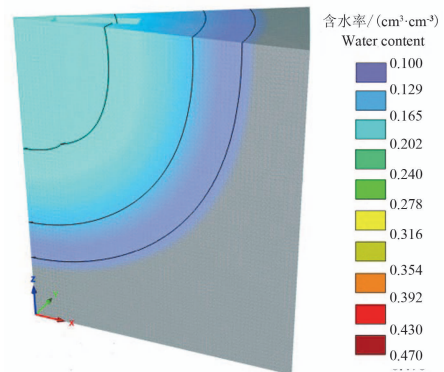
将累积入渗量与时间的幂函数关系作为流量边界输入模型, 其他边界处理为0流量边界。按照物理模型试验数据对应的时间点输出计算结果, 限于篇幅, 3种负水头条件下只给出了砂土、壤土最后一个时间点的湿润锋分布。

1) 对于砂土, $H=0$ m时, 30 min 灌水器周围达到饱和含水率 $0.47 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 最大的水平、垂直湿润

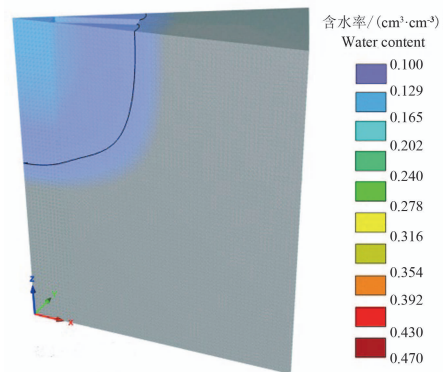
锋距离为 290、366 cm; $H=-0.5$ m时, 3 480 min 含水率降低至 $0.202 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 最大的水平、垂直湿润锋距离为 278、314 cm; $H=-1.0$ m时, 4 200 min 含水率降低至 $0.129 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 最大的水平、垂直湿润锋距离为 154、182 cm。见图 7。



(a) $H=0$ m, $t=30$ min



(b) $H=-0.5$ m, $t=3\ 480$ min



(c) $H=-1.0$ m, $t=4\ 200$ min

图7 砂土水分湿润锋运移计算结果

Fig.7 Calculation results of wetting front moving in sand

2) 对于壤土, $H=0$ m时, 240 min 灌水器周围达到饱和含水率 $0.503 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 最大的水平、垂直湿润锋距离为 289、330 cm; $H=-0.5$ m时, 2 820 min 含水率降低至 $0.487 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 最大的水平、垂直湿润锋距离为 289、323 cm; $H=-1.0$ m时, 4 200 min 含水率降低至 $0.443 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 最大的水平、垂直湿润锋距离为 261、292 cm。对基质势较大的壤土, 随着负水头高度的增加, 灌水器周围含水率只降低了 11.9%。结果见图 8。

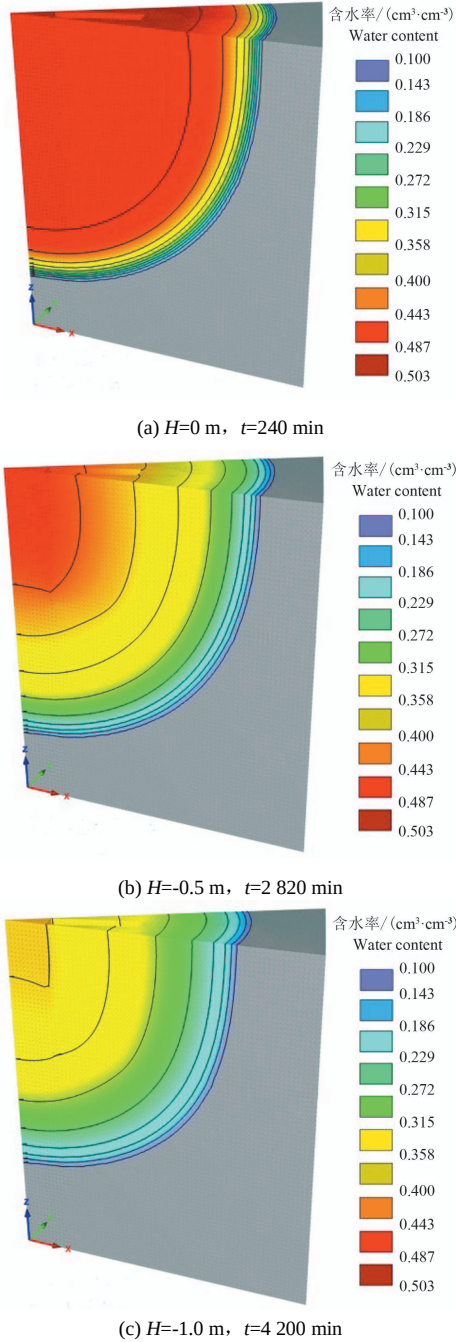


图8 壤土水分湿润锋运移计算结果

Fig.8 Calculation results of wetting front moving in loam

3.3 模型验证

3种负水头条件,以负水头高度0 m的实测湿润锋包络面积作为模型率定数据,确定水分运移模式和参数等;然后,只改变流量边界,即累积入渗量与时间的幂函数关系,以负水头高度-0.5 m和-1.0 m的实测湿润锋包络面积作为模型验证数据。见图9、图10。

由表 7 可知 3 种负水头模型,砂土计算湿润锋包络面积与实测湿润锋包络面积的偏差 0.51%~7.21%。

由表 8 可知壤土计算湿润锋包络面积与实测湿润锋包络面积的偏差 0.22%~16.03%。所建三维模型可以用于描述负水头环境下土壤水分湿润锋的运移特征和规律。

表7 砂土模型验证结果

Table 7 Results of sand model validation				
水头 Water head/cm	时间 Time min	实测湿润锋面积 Measured wetting front area/cm ²	计算湿润锋面积 Calculate wetting front area/cm ²	偏差 Deviation /%
0	6	354.33	337.81	4.66
	15	586.42	572.16	2.43
	20	717.80	682.48	4.92
	30	904.12	885.10	2.10
-0.5	300	257.76	251.05	2.60
	660	352.45	332.87	5.56
	2 040	530.71	556.41	4.84
	3 480	742.25	711.42	4.15
-1.0	120	53.80	49.92	7.21
	480	91.62	86.10	6.02
	1 320	179.23	170.18	5.05
	4 200	241.16	239.92	0.51

表8 壤土模型验证结果

Table 8 Results of loam model validation				
水头 Water head/cm	时间 Time /min	实测湿润锋面积 Measured wetting front area/cm ²	计算湿润锋面积 Calculate wetting front area/cm ²	偏差 Deviation /%
0	10	179.86	169.12	5.97
	35	321.31	318.69	0.82
	70	478.17	449.27	6.04
	120	594.32	581.46	2.16
	240	791.72	778.34	1.69
	50	73.62	85.42	16.03
-0.5	240	253.11	252.11	0.40
	720	395.91	400.79	1.23
	1 380	559.07	540.89	3.25
	2 820	745.73	753.07	0.98
	240	225.66	229.38	1.65
	600	291.03	291.67	0.22
-1.0	1 320	400.87	389.61	2.81
	2 760	527.37	529.89	0.48
	4 200	629.49	624.60	0.78

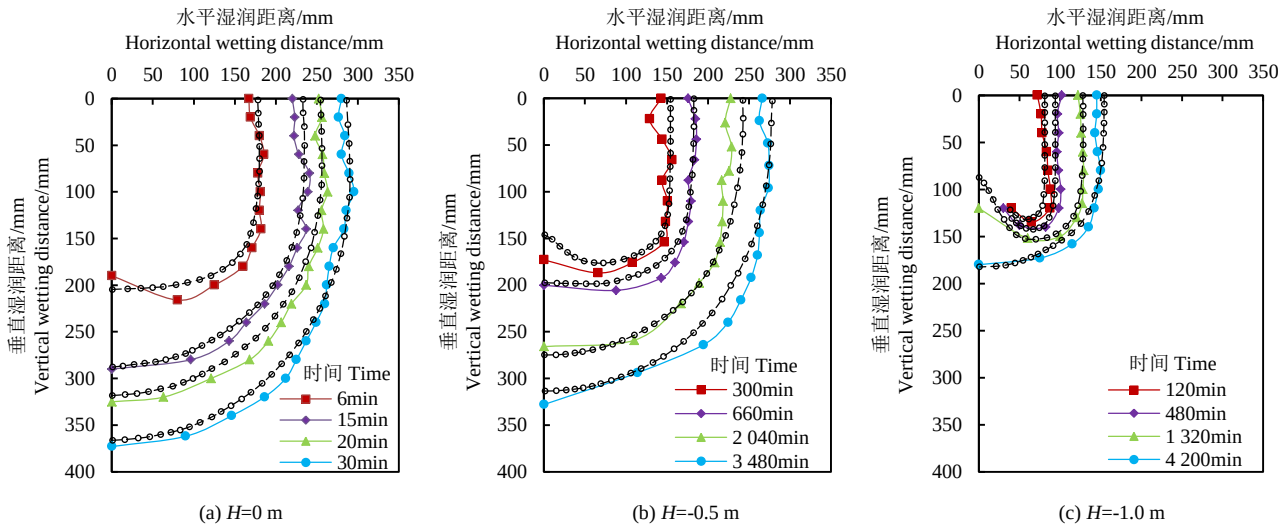


图9 砂土水分湿润锋运移模型验证

Fig.9 Model verification of wetting front moving in sand

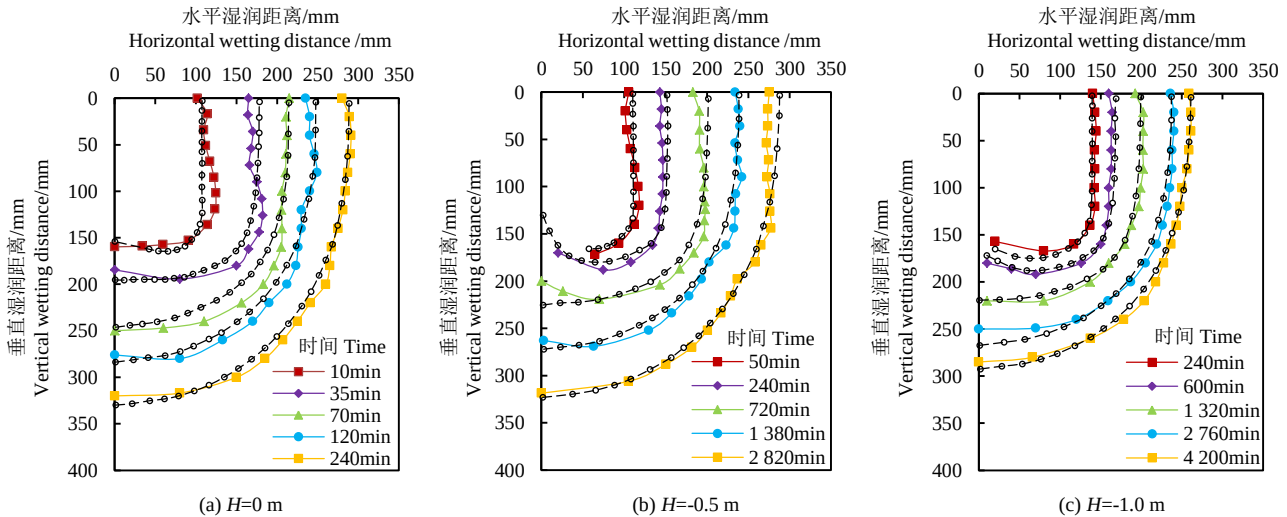


图10 壤土水分湿润锋运移模型验证

Fig.10 Model verification of wetting front moving in loam

3.4 湿润深度和湿润体体积

负水头灌溉的优势是可以控制土壤含水率,维持非饱和状态,通过率定和验证后的模型,可以得到不同负水头、不同灌水时长条件下,各含水率的湿润深度及湿润体体积的动态变化(表9、表10)。

1) 砂土负水头高度 $H=0$ m时,6~30 min灌水器周围的湿润深度由20.5 cm增加至36.7 cm,湿润体体积由 $1\,227.95\text{ cm}^3$ 增加至 $5\,909.18\text{ cm}^3$ 。含水率0.376~0.344的湿润深度由18.0 cm增加至30.6 cm,湿润体体积由 763.02 cm^3 增加至 $2\,829.91\text{ cm}^3$,占总体积的62%减少至48%。

负水头高度 $H=-0.5$ m时,3 480 min后湿润深度为31.5 cm,湿润体体积为 $4\,478.77\text{ cm}^3$,最大含水率为0.162。负水头高度 $H=-1.0$ m时,4 200 min后湿润深度为31.5 cm,湿润体体积为 820.68 cm^3 ,最大含水率为0.103。

2) 壤土负水头高度 $H=0$ m时,10~240 min灌水

器周围的湿润深度由16.5 cm增加至33.0 cm,湿润体体积由 345.51 cm^3 增加至 5114.94 cm^3 。含水率0.402~0.390的湿润深度由15.05 cm增加至30.6 cm,湿润体体积由 189.07 cm^3 增加至 $2\,262.82\text{ cm}^3$,由占总体积的55%减少至44%。

负水头高度 $H=-0.5$ m时,50~2 820 min灌水器周围的湿润深度由21.0 cm增加至32.8 cm,湿润体体积由 484.66 cm^3 增加至 $5\,015.60\text{ cm}^3$ 。含水率0.354~0.218的湿润深度由15.45 cm增加至29.95 cm,湿润体体积由 256.09 cm^3 增加至 $3\,521.29\text{ cm}^3$,由占总体积的53%增加至70%。

负水头高度 $H=-1.0$ m时,240~4 200 min灌水器周围的湿润深度由17.5 cm增加至28.75 cm,湿润体体积由 654.44 cm^3 增加至 $3\,572.29\text{ cm}^3$ 。含水率0.320~0.183的湿润深度由16.25 cm增加至26.35 cm,湿润体体积由 510.16 cm^3 增加至 $2\,681.76\text{ cm}^3$,由占总体积的75%~78%。

表9 砂土湿润体体积随时间的动态变化情况

Table 9 Dynamic change of wetting volume of sand with time

cm³

水头 Water head/cm	时间 Time/ min	含水率区间 Water content interval									
		0.376~	0.344~	0.314~	0.283~	0.253~	0.222~	0.192~	0.162~	0.132~	0.103~
		0.344	0.314	0.283	0.253	0.222	0.192	0.162	0.132	0.103	0.080
0	6	763.02	133.9	70.39	38.24	39.19	40.15	30.78	47.21	32.24	32.83
	15	1 623.01	352.99	281.13	198.26	145.83	95.13	79.17	88.55	58.34	87.54
	20	2 079.86	523.74	371.88	245.88	182.4	141.76	132.67	107.28	91.1	84.47
	30	2 829.91	890.73	594.84	421.08	310.39	220.37	190.32	177.32	136.05	138.17
-0.5	300	—	—	—	—	—	—	—	—	567.15	213.67
	660	—	—	—	—	—	—	—	394.28	481.54	314.95
	2 040	—	—	—	—	—	—	—	614.37	1 296.26	1 074.14
	3 480	—	—	—	—	—	—	—	454.88	1 991.76	2 032.13
-1.0	120	—	—	—	—	—	—	—	—	—	188.71
	480	—	—	—	—	—	—	—	—	—	261.74
	1 320	—	—	—	—	—	—	—	—	—	488.18
	4 200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	820.68

表10 壤土湿润体体积随时间的动态变化情况

Table 10 Dynamic change of wetting volume of loam with time

cm³

水头 Water head/cm	时间 Time/ min	含水率区间 Water content interval									
		0.402~	0.390~	0.354~	0.320~	0.286~	0.252~	0.218~	0.183~	0.149~	0.114~
		0.390	0.354	0.320	0.286	0.252	0.218	0.183	0.149	0.114	0.080
0	10	189.07	32.2	21.24	11.63	11.99	15.02	15.44	15.87	16.3	16.75
	35	825.39	85.96	35.57	32.8	33.54	29.5	26.14	26.58	27.01	27.46
	70	1 464.88	197.78	91.29	69.23	50.76	51.69	52.62	45.85	46.55	47.24
	120	2 076.62	398.63	173.61	124.15	91.21	85.82	79.99	81.36	72.35	73.46
	240	2 262.82	1 122.02	547.64	317.9	215.32	138.52	131.18	119.77	121.76	138.01
-0.5	50	—	—	94.2	80.02	46.56	35.31	65.81	53.82	56.16	52.78
	240	—	78.77	233.22	129.57	100.89	63.08	51.12	41.76	39.39	46.42
	720	—	407.34	342.96	258.13	203.02	140.47	100.87	78.28	73.08	71.58
	1 380	—	465.1	537.96	520.33	437.65	305.05	194.24	147.58	122.66	126.37
	2 820	—	214.6	680.89	948.44	998.03	893.93	486.44	325.55	235.19	232.53
-1.0	240	—	—	—	214.6	131.72	89.55	74.29	52.68	45.45	46.15
	600	—	—	153.03	232.2	170.08	121.46	109.89	69.62	62.1	55.78
	1 320	—	—	299.17	331.01	303.21	216.2	161.07	109.22	91.57	80.08
	2 760	—	—	238.44	482.19	569.27	540.5	384.12	223.44	162.54	162.34
	4 200	—	—	37.4	425.92	752.17	843.07	660.6	414.03	229.34	209.76

由试验和模拟结果可知,砂土负水头高度 $H=0$ m时,湿润体48%~62%接近饱和含水率; $H=-0.5$ m时,湿润体的最大含水率为16.2%。砂土的负水头灌溉高度应介于-0.5~0 m之间较为合理。

壤土负水头高度 $H=-0.5$ m时,2 820 min后含水率0.286~0.218的湿润深度为29.95 cm,湿润体的体积为1 891.96 cm³,占总体积的38%; $H=-1.0$ m时,2 760 min后含水率0.286~0.218的湿润深度为23.5 cm,湿润体体积为1 434.91 cm³,占总体积的40%。壤土的负水头灌溉高度可以介于-1.0~-0.5 m之间。

4 结 论

1) 砂土、壤土的累积入渗量随着时间的增加而逐渐增大,呈良好的幂函数关系。 $H=0$ m,砂土的累积入渗量曲线高于壤土; $H=-0.5$ m或者-1.0 m,壤土的累积入渗量曲线高于砂土。

2) 砂土、壤土的湿润锋随着时间的增加逐渐向水平、垂直方向扩大。水平、垂直最大湿润距离与时间的平方根呈良好的线性关系。 $H=0$ m,单位时间内

砂土湿润锋迁移距离大于壤土; $H=-0.5\text{ m}$ 或者 -1.0 m , 单位时间内壤土湿润锋迁移距离大于砂土。

3) 砂土、壤土的湿润锋入渗速度随着负水头高度的增加逐渐减小, 与时间呈良好的幂函数关系。 $H=0\text{ m}$, 曲线上同一时间点对应的湿润锋入渗速度砂土>壤土。 $H=-0.5\text{ m}$ 或者 -1.0 m , 曲线上同一时间点对应的湿润锋入渗速度壤土>砂土。

4) 应用 Hydrus-3D 软件, 建立三维土壤水分运移数值模型。率定和验证后的模型计算湿润锋包络面积与实测的偏差, 砂土为 $0.51\%\sim 7.21\%$, 壤土为 $0.22\%\sim 16.03\%$, 所建三维模型可以计算不同负水头、不同灌水时长条件下, 各含水率的湿润深度及湿润体体积的动态变化。

参考文献:

- [1] 王佳佳. 负压灌溉下不同质地土壤水盐运移规律研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
WANG Jiajia. Soil water and salt movement under different soil textures with negative-pressure irrigation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.
- [2] 黄楚瑜, 黄运湘, 肖海强, 等. 不同负压给水对小白菜生长及土壤水分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 33-37.
HUANG Chuyu, HUANG Yunxiang, XIAO Haiqiang, et al. Effects of water supply under different negative pressure on cabbage growth and soil moisture content[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(7): 33-37.
- [3] 肖娟, 郭秀峰, 高晓丽, 等. 负压灌溉对湿润体特征参数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(2): 30-32, 36.
XIAO Juan, GUO Xiufeng, GAO Xiaoli, et al. Effect of negative pressure irrigation on characteristic parameters of wetted soil volume[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(2): 30-32, 36.
- [4] 肖娟, 江培福, 郭秀峰, 等. 负水头条件下水质对湿润体运移及水盐分布的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 101-107.
XIAO Juan, JIANG Peifu, GUO Xiufeng, et al. Effect of water quality on wetting front moving and salt-water distribution under negative hydraulic head[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 101-107.
- [5] 赵亚楠. 供水水头、灌水器及水质对负压灌溉土壤水运移的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
ZHAO Yanan. Effect of Water Head, Emitter and Water Quality on Soil Water Movements under Negative Pressure Irrigation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [6] 郭秀峰. 水质对负压灌溉土壤水盐分布的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
GUO Xiufeng. Effect of water quality on soil water-salt distribution under negative pressure irrigation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.
- [7] RODRIGUEZ-SINOBAS L, GIL M, JUANA L, et al. Water distribution in laterals and units of subsurface drip irrigation. I: Simulation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009, 135(6): 721-728.
- [8] 解迎春, 薛绪掌, 王国栋, 等. 负水头供水条件下土壤水分一维入渗规律的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5): 119-124.
XIE Yingge, XUE Xuzhang, WANG Guodong, et al. One-dimensional soil water infiltration under water supply of negative hydraulic heads[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(5): 119-124.
- [9] 伍超, 邹鑫, 王辉, 等. 负压灌溉下土壤水分运移特性及氮素分布规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 44-49.
WU Chao, ZOU Xin, WANG Hui, et al. Water flow and nitrogen distribution in soil under negative-pressure irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 44-49.
- [10] 孙浩, 吕谋超, 黄修桥, 等. 基于土壤吸力的主动式土壤水分平稳供应装置[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 84-89.
SUN Hao, LYU Mouchao, HUANG Xiuhao, et al. Active soil moisture supply device based on soil suction and its performance[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3): 84-89.
- [11] 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎. 基于负水头下土壤水分一维水平运动理论与实验研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 841-846.
ZOU Chaowang, XUE Xuzhang, ZHANG Renduo. Hydraulic characteristics of one-dimensional horizontal soil water flow[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(5): 841-846.
- [12] 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎. 基于两组负水头入渗数据推求 Brooks-Corey 模型中的参数[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 1-6.
ZOU Chaowang, XUE Xuzhang, ZHANG Renduo. Estimating Brooks-Corey model parameters based on soil water infiltration data under two kinds of negative water pressures[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 1-6.
- [13] 范军亮, 张富仓. 负水头条件下的土壤水分垂直一维入渗特性研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 415-421.
FAN Junliang, ZHANG Fucang. Characteristics of vertical one-dimensional infiltration of soil water under negative hydraulic head[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 415-421.
- [14] 范军亮. 基于负水头的土壤水分运动特征研究及其参数推求[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
FAN Junliang. Study on soil water movement characteristics and determination of hydraulic parameters based on negative hydraulic heads[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.
- [15] 上官玉铎, 吕谋超, 宗洁, 等. 负水头条件下入渗模型对于水分入渗规律适用性研究[J]. 节水灌溉, 2015(3): 8-11.
SHANGGUANG Yuduo, LYU Mouchao, ZONG Jie, et al. Applicability of different infiltration models to infiltration characteristics of soil water under negative head[J]. Water Saving Irrigation, 2015(3): 8-11.
- [16] 上官玉铎. 负水头条件下土壤水分入渗和氮素分布规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院, 2015.
SHANGGUANG Yuduo. Studies on Soil Water and Nitrogen

- Move-ment under Negative Hydraulic Head Irrigation[D]. Beijing: Graduate school of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [17] 辛琛, 王全九, 樊军. 负水头条件下的水平一维土壤吸渗特征[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 20-26.
- XIN Chen, WANG Quanjiu, FAN Jun. Characteristics of horizontal one-dimensional soil water infiltration under negative hydraulic head[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 20-26.
- [18] 辛琛. 负水头条件下的土壤水分运动特征及水力参数确定[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- XIN Chen. Studies on the characteristics of soil water movement and determination of hydraulic parameters under negative hydraulic head[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [19] 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]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 113-119.
- JI Ronghua, WANG Tingting, QI Lijun, et al. Numerical simulation of soil moisture infiltration under negative pressure irrigation based on HYDRUS-2D[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 113-119.
- [20] YAO W W, MA X Y, LI J, et al. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation[J]. Irrigation Science, 2011, 29(4): 331-339.
- [21] MONIRUZZAMAN S M, FUKUHARA T, TERASAKI H. Experimental study on water balance in a negative pressure difference irrigation system[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser B1 (Hydraulic Engineering), 2011, 67(4): I_103-I_108.
- [22] MONIRUZZAMAN S M, FUKUHARA T, ITO M, et al. Seepage flow dynamics in a negative pressure difference irrigation system[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser B1 (Hydraulic Engineering), 2011, 67(4): I_97-I_102.
- [23] LI J S, LIU Y C. Water and nitrate distributions as affected by layered-textural soil and buried dripline depth under subsurface drip fertigation[J]. Irrigation Science, 2011, 29(6): 469-478.
- [24] PHOGAT V, MAHADEVAN M, SKEWES M, et al. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design[J]. Irrigation Science, 2012, 30(4): 315-333.
- [25] RAMOS T B, SIMŮNEK J, GONCALVES M C, et al. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters[J]. Agricultural Water Management, 2012, 111: 87-104.
- [26] SIYAL A A, SKAGGS T H. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6): 893-904.
- [27] 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]. 农业机械学报, 2017, 48(S1): 290-295.
- 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(S1): 290-295.
- [28] 迟卉, 白云, 汪海涛, 等. HYDRUS-3D 在土壤水分入渗过程模拟中的应用[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(5): 531-535.
- CHI Hui, BAI Yun, WANG Haitao, et al. HYDRUS-3D in the soil water infiltration process simulation[J]. Computers and Applied Chemistry, 2014, 31(5): 531-535.
- [29] 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评价[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 113-121, 129.
- ZHOU Guanglin, WANG Quanjiu, LI Yun, et al. Accuracy evaluation of simulating point source infiltration in field and water redistribution based on Hydrus- 3D model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(2): 113-121, 129.
- [30] 赵伟霞, 蔡焕杰, 陈新明, 等. 基于土壤湿润体特征值的无压灌溉灌水定额模型研究[J]. 节水灌溉, 2008(12): 5-8.
- ZHAO Weixia, CAI Huanjie, CHEN Xinming, et al. Study on irrigation quota model of non-pressure irrigation based on characteristics value of wetted soil volume[J]. Water Saving Irrigation, 2008(12): 5-8.