

直插式地下滴灌土壤湿润体特征值变化 规律及灌溉效果分析

王炳尧^{1,2}, 韦伟³, 刘立超^{1*}, 王增如¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 宁夏农业综合开发办公室, 银川 750001)

摘要:【目的】了解2种典型干旱区土壤(砂土、砂黏土)中直插式地下滴灌的灌水效果。【方法】以实测的土壤湿润锋在垂直向上、向下和水平3个方向的运移距离为基础,建立了土壤湿润锋运移距离与直插式地下滴灌滴头流速和灌水时间之间的函数关系,依据此量化关系结合土壤含水率求得了直插式地下滴灌的微灌技术参数,并评价了直插式地下滴灌在干旱区砂土、砂黏土中的灌水效果。【结果】在2种土质条件下,湿润锋不同方向上的运移距离与滴头流速和灌水时间之间的量化关系式 $R^2 > 0.95$,验证方程 $R^2 > 0.95$,表明模型可行;在砂土中,灌溉水储存系数、灌水均匀系数及土壤湿润比均小于0.6,而在砂黏土中均高于0.8,表明直插式地下滴灌在砂土中灌水效果比砂黏土差。【结论】幂函数可准确描述砂土、砂黏土中直插式地下滴灌湿润峰运移距离、滴头出流速度和灌水时间之间的关系;垂直向上湿润距离与滴头流速负相关,与灌水时间正相关,水平与向下湿润距离与流速、灌水时间均正相关;在本试验条件下,流速为1.25 L/h灌水效果最好。

关键词: 干旱区; 直插式地下滴灌; 湿润体; 湿润锋; 运移距离; 微灌技术参数

中图分类号:S275.4

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180441

王炳尧, 韦伟, 刘立超, 等. 直插式地下滴灌土壤湿润体特征值变化规律及灌溉效果分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4):1-10.

0 引言

地下滴灌是一种高效节水灌溉技术^[1],与其他灌溉方法相比,地下灌溉具有节水增产、性能稳定、耐用、水分利用效率高等显著优点^[2-4],但存在检修困难、施工复杂、渗水管易堵塞、灌水均匀性差等诸多不足^[5-7]。因此,许多学者提出了新的地下灌溉技术,如陈新明等^[8]提出的无压滴灌,孙三民等^[9]针对稀植作物提出的间接地下滴灌等。直插式地下滴灌^[10],是地下滴灌的一种,与竖管地下灌溉^[11]类似,其原理是将直插式地下滴灌滴头垂直置入一定深度的土壤中,上端连接供水管,通过滴头边壁或底端出水^[12],以实现土壤的越层灌溉。该滴头对比其他地下滴灌滴头在达到优良灌水效果的同时结构简单、布设方便、防堵塞,更适合应用于灌溉果树等多年生深根疏植型作物^[13-15]。但新技术往往意味着新的灌溉系统设计参数,因此基于土壤湿润体特征值^[16-20]、土壤水分入渗特性^[11]以及土壤水分运动模型^[17,21-22]等方面的研究对新型地下滴灌技术的推广应用意义重大。湿润体特征值,即土壤湿润体体积、水平与垂直方向湿润锋运移的最大距离,是微灌系统设计的重要依据之一^[2]。近年来,对湿润体特征值的研究集中在数值模拟^[17,23-25]、试验验证^[12,26]等方面,并在研究中均将土壤湿润体近似为规则形状进行数值模拟,如球体^[3]、圆柱体^[17]、椭球体^[20]等,但实际应用中由于土壤质地等原因湿润体不规则并呈上小下大^[27],因此如何精确计算地下滴灌土壤湿润体特征值,并掌握其变化规律成了亟待解决的问题。

为了将地下滴灌技术进一步推广应用,研究人员以枣树^[9]、棉花^[26]、葡萄^[27]等作物为研究对象开展了大量

收稿日期:2018-08-16

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BBF02021)

作者简介:王炳尧(1994-),男。硕士研究生,主要从事干旱区节水灌溉研究。E-mail: dimzephyr@outlook.com

通信作者:刘立超(1969-),男。研究员,主要从事生态学专业环境生态学领域的研究工作。E-mail: lichao@lzb.ac.cn

的田间试验,但大部分集中在传统农田灌区,而在年均降水量少、变率大、水资源极为紧缺的干旱沙区研究则相对较少。同时,节水是沙区农业灌溉与植被恢复的必然选择^[28],因此掌握直插式地下滴灌在干旱沙区典型土质(砂土、砂黏土)中的土壤水分入渗特征及其变化规律极其重要。但是由于地下滴灌种类繁多,而且滴头规格不尽相同,进行田间试验投资大、成本高、耗时长,另外,各地区土壤质地差异导致的滴头性能差异,无法使用田间试验的方法去逐一评估新型地下滴灌技术的灌水效果,因此如何简单、有效地对新型地下滴灌技术的灌水效果预测,成了新技术推广应用需解决的关键问题之一。

为此,根据直插式地下滴灌水入渗过程中土壤湿润体特征值与各影响因素之间的关系,结合灌水后的土壤含水率,依托《微灌工程技术规范》(GB/T 50485—2009)选取关键灌水效果评价指标对直插式地下滴灌在干旱区的灌水效果进行预测和评估。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验用土取自典型干旱区宁夏中卫沙坡头(37°27'N, 104°57'E),供试土壤粒径组成和田间持水率如表 1 所示,其中,砂黏土初始体积含水率为 0.11,砂土的为 0.03;砂黏土土壤体积质量为 1.10 g/cm³,砂土土壤体积质量为 1.50 g/cm³。

表 1 供试土壤质地

土层深度/cm	粒级			土壤质地(国际制)	田间持水率/%
	0.02~2 mm	0.002~0.02 mm	<0.002 mm		
0~30	61.12	12.13	26.75	砂黏土	16.10
30~100	89.84	2.95	7.21	砂土	8.30

1.2 试验系统

整个试验系统由供水系统、流速监控系统、直插式地下滴灌滴头和试验土箱组成(图 1)。供水系统主要包括 PE 水箱(容积 500 L)、水箱支架(高 2 m)、供水管;流速监控系统主要由液体 LBZ-3 型玻璃转子流量计(量程 6~60 mL/min,公称通径 $\varnothing=3$ mm,工作压力 ≤ 1 MPa,中国宁波东驰测控技术有限公司制)组成,流量计用于控制滴头流速恒定;直插式地下滴灌滴头为内径 4 mm、总长 40 cm 的硬质管材,两端开口、底端出水并有防堵设计^[13],其上端连接玻璃转子流量计,下端置于土层灌水;试验土箱规格为 100 cm $\times$ 100 cm $\times$ 110 cm(长 $\times$ 宽 $\times$ 高),上下开口设计。为了方便观察土壤湿润锋,土箱壁面为透明玻璃材料。

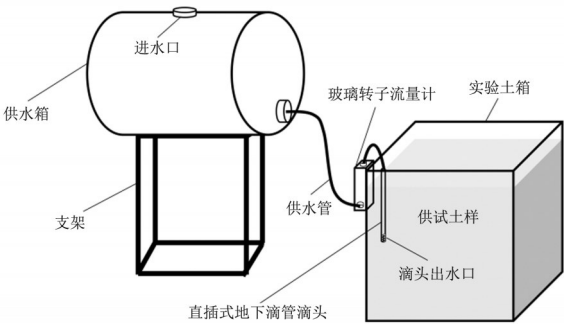


图 1 直插式地下滴灌试验系统示意图

1.3 试验方法与观测内容

将供试土样过筛、分层置入土箱,并将滴头埋设在土箱一角距 2 侧箱壁 5 cm 处,埋深 35 cm。试验设置 2 个土壤质地处理,分别为砂黏土(S1)、砂土(S2);3 个滴头流速处理,分别为 0.75 L/h(V1)、1.25 L/h(V2)和 1.75 L/h(V3),总计 6 个处理,处理简称分别为 S1V1、S1V2、S1V3、S2V1、S2V2、S2V3,每个处理 3 次重复。为了统一计算单位,在进行计算时将滴头流速单位换算为 mL/min,0.75、1.25、1.75 L/h 分别对应 12.50、20.83、29.17 mL/min。

于灌水开始后分 5 次(15、30、60、120、180 min)在箱壁上描绘出不同时刻对应的土壤湿润锋形态,由于每个土箱壁面上有一个土壤湿润锋,因此湿润锋运移距离每个处理有 6 组重复;灌水 3 h 时停灌,停灌后以滴头出水口位置在土箱侧壁面的投影点作为坐标原点,以水平方向为 0°方向,在土箱侧壁面上布设 7 条样线,样线方向分别为 90°、60°、30°、0°、270°、300°、330°(图 2(c)),记录的湿润锋与样线相交的位置作为湿润锋关键位置记录点,在每个灌水时刻取记录点坐标,停灌后立即采集土样,使用烘干法测得土壤质量含水率。取土壤含水率样本时以供试土壤表层一角处为原点,在水平方向间隔 22.5°布设 3 条样线(图 2(a)),在样线方向上间隔 10 cm 取样,取样长度 50 cm,每层共采集 13 个水分样本;垂直方向每间隔 10 cm 取样,取样深度 100 cm(图 2(b)),每个处理总计 130 个水分样本。

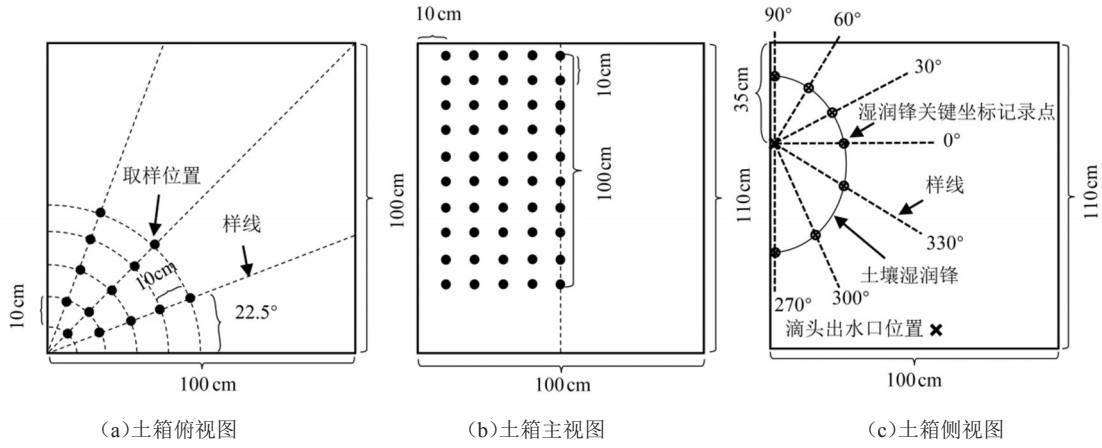


图2 土壤采样方法示意图

2 数学模型

2.1 湿润锋运移距离经验模型

幂函数能够非常精确地描述地表滴灌点源入渗湿润锋和入渗时间的关系^[29],因此假定在地下点源入渗过程中这一关系也成立,设湿润锋运移距离与直插式地下滴灌滴头出流速度和灌水时间的函数关系为:

$$D_1 = k_1 I^{a_1} \cdot t^{b_1}, \quad (1)$$

$$D_2 = k_2 I^{a_2} \cdot t^{b_2}, \quad (2)$$

$$D_3 = k_3 I^{a_3} \cdot t^{b_3}, \quad (3)$$

$$H = D_1 + D_2, \quad (4)$$

式中: D_1 为湿润锋垂直向上运移距离(cm); D_2 为湿润锋垂直向下运移距离(cm); D_3 为湿润锋水平方向运移距离(cm); I 为直插式地下滴灌滴头出流速度(mL/min); t 为灌水时间(min); H 为湿润体纵向湿润深度(cm), $k_1, k_2, k_3, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ 均为经验系数。

2.2 直插式地下滴灌湿润体体积计算模型

由湿润体1/4截面作为旋转面,以滴头位置为原点,垂直方向作为旋转轴,旋转360°得到完整湿润体。设湿润体体积为 $V(\text{cm}^3)$,以 $\overline{D_3}$ 所在水平面将湿润体切分为上下2部分,上部体积为 V_1 ,下部体积为 V_2 ,将湿润体看作圆柱体微元在垂直方向的积分,则湿润体体积为:

$$V = V_1 + V_2, \quad (5)$$

$$V_1 = \int_0^{D_1} \pi D_3^2 dD_1, \quad (6)$$

$$V_2 = \int_0^{D_2} \pi D_3^2 dD_2. \quad (7)$$

对于单一湿润体,滴头出流速度 I 为常数,设终止灌水时间为 T ,联立方程式(1)一式(7)得湿润体体积 V :

$$V = \pi \cdot k_3^2 \left(\frac{k_1 \cdot I^{2a_1+a_3} \cdot T^{2b_1+b_3}}{2b_3+b_1} + \frac{k_2 \cdot I^{2a_2+a_3} \cdot T^{2b_2+b_3}}{2b_3+b_2} \right). \quad (8)$$

2.3 基于土壤湿润体特征值的灌水定额模型

设灌水定额为 $W(\text{cm}^3)$,已知湿润体体积 $V(\text{cm}^3)$ 、湿润体容积含水率 $\bar{\theta}(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ 、湿润体初始容积含水率 $\bar{\theta}_i(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ 和土壤体积质量 $\rho_b(\text{g}/\text{cm}^3)$,依据土壤水分平衡原理可得:

$$W = (\bar{\theta} - \bar{\theta}_i) \cdot V = I \cdot t. \quad (9)$$

2.4 直插式地下滴灌灌溉效果评价

将计算所得的湿润体体积与测得的灌水后土壤含水率相结合,依照现有常用来评估灌水质量的指标对直插式地下滴灌的灌溉效果进行评估,分别为灌溉水有效利用系数 W_a 、灌溉水储存系数 W_s 、灌水均匀系数 C_u 、微灌设计土壤湿润比 p ,以上指标共同分析直插式地下滴灌的灌水效果。

2.4.1 灌溉水利用系数

由于无作物,故忽略作物植株间的土壤蒸发量和水分漂移损失水量,将湿润体体积大小作为计划湿润作物根系土壤区范围,作物有效利用水量为湿润体水分增量,地下滴灌无地表径流,可忽略田间灌水径流损失水量,忽略深层渗漏损失,灌溉水利用系数为灌溉后储存于计划湿润作物根系土壤区内的水量与灌水总量的比值,计算式为:

$$W_a = \frac{Q_s}{Q}, \quad (10)$$

式中: W_a 为灌溉水利用系数; Q_s 为计划湿润作物根系土壤区新增水量(cm^3); Q 为灌水总额(cm^3)。

2.4.2 灌水均匀系数

常用灌水均匀系数对微灌系统灌水均匀性进行评价,计算式为:

$$C_u = \left(1 - \frac{\Delta Q}{Q_d}\right), \quad (11)$$

式中: C_u 为灌水均匀系数; ΔQ 为灌水后各测点的实际入渗量与平均入渗水量离差绝对值的平均值(cm^3); Q_d 为灌水后土壤内的平均入渗水量(cm^3)。

2.4.3 微灌设计土壤湿润比

在直插式地下滴灌条件下,土壤湿润比影响田间滴头的合理布设,依据计算所得的湿润体体积与计划湿润深度土体总体积计算试验条件下的竖管地下灌土壤湿润比,计算式为:

$$P = \frac{V}{V'} = \frac{V}{(2D_3)^2 \cdot Z_d}, \quad (12)$$

式中: V' 为计划湿润深度土体体积(cm^3); Z_d 为计划湿润作物根系层深度(cm)。

3 结果与分析

3.1 湿润锋形态特征

土壤湿润锋随时间变化如图3所示,图3中湿润锋等高线由内向外分别表示15、30、60、120、180的湿润锋。在2种土壤中直插式地下滴灌的土壤湿润锋形态均呈“上小下大”的纺锤型,垂直向上方向湿润峰的湿润深度约9.0~17.1 cm;垂直向下湿润深度约30.3~61.2 cm;水平湿润半径约18.4~24.3 cm;湿润锋水平方向最大运移距离位于出水口位置330°方向;在砂黏土中,湿润峰垂直向下运移的深度较砂土小,而水平方向运移的距离较砂土大。由于在水分运动初期,滴头出水口附近土壤水分尚未达到饱和,水分主要受土壤基质势作用运移,湿润锋形态近似半圆形,水分在各个方向湿润距离接近^[23],因此水分垂直方向最大湿润距离位于出水口位置正上、正下方;而随着灌水时间的增长,出水口附近土壤含水率接近田间持水率,重力势与压力势对水分的作用逐渐增强,表现为垂直向下方向入渗速度较快,水平方向次之,垂直向上相对较慢。在水平方向上,水分运动受重力势,压力势与基质势的共同作用,其最大运移距离常出现于出水口水平位置下侧。在直插式地下滴灌条件下,滴头底端出水的方式将会对水分在垂直向下方向施加一个正压力,在这个正压力与重力的共同作用下导致水分在垂直向下入渗的深度远大于在水平方向入渗的距离,其表现为湿润锋在垂直向下方向的运移距离要显著($P < 0.05$)大于水平方向,这一特点在滴头流速较大的S1V3、S2V3处理更突出。

当滴头流速与灌水时间相同时,对不同土壤质地的土壤湿润锋运移距离数据做独立样本 t -test(表2中D1、D2和D3分别为湿润峰垂直向上运移距离、垂直向下运移距离和水平方向运移距离;V1、V2、V3分别为流速0.75、1.25和1.75 L/h;30、60、120、180为灌水时间),由于数据量较多,表2中所列为经检验后差异显著的处理组($P < 0.05$)。30V1D1表示0~30 min时间段内,2种土壤在0.75 L/h流速下湿润峰垂直向上运移距离差异显著,其他处理号同理。将湿润峰运移过程分为4个时间段:0~30、30~60、60~120、120~180 min,比较2种土壤在这几个时间段中,在同条件下水分入渗的差异性。当灌水时间小于30 min时,各处理的湿润锋运移距离在2种

表2 独立样本 t -test 部分结果

处理	F	t	df	$P(95\%)$	标准误差
30V1D1	0.11	5.93	10.00	0.000 1	0.79
30V1D2	1.87	8.65	10.00	0.000 5	0.87
30V2D1	3.87	4.88	10.00	0.000 6	0.88
60V1D1	0.70	6.17	10.00	0.000 1	0.94
60V1D2	0.51	4.25	10.00	0.001 7	1.12
60V2D1	3.20	4.58	10.00	0.001 0	0.69
120V1D1	1.30	4.96	10.00	0.000 6	1.33
120V2D1	0.16	3.61	10.00	0.004 8	0.91
180V1D1	1.84	4.75	10.00	0.000 8	1.52
180V2D1	2.24	3.64	10.00	0.004 5	0.58
180V2D2	0.35	-5.07	10.00	0.000 5	2.72
180V3D2	0.12	-2.50	10.00	0.007 1	2.74

土壤之间的差异均不显著($P>0.05$);灌水时间为30~60 min时,流速为0.75 L/h的处理湿润锋在砂黏土中垂直向下方向的运移距离显著($P<0.05$)大于砂土,而当灌水时间为60~120 min时则差异不显著($P>0.05$);灌水时间为120~180 min时流速为1.25 L/h和1.75 L/h的处理湿润锋垂直向下方向的运移距离在砂土中显著大于砂黏土($P<0.05$);当灌水为30~180 min时,流速为0.75 L/h和1.25 L/h的处理湿润锋在砂黏土中垂直向上方向的运移距离显著($P<0.05$)大于砂土。

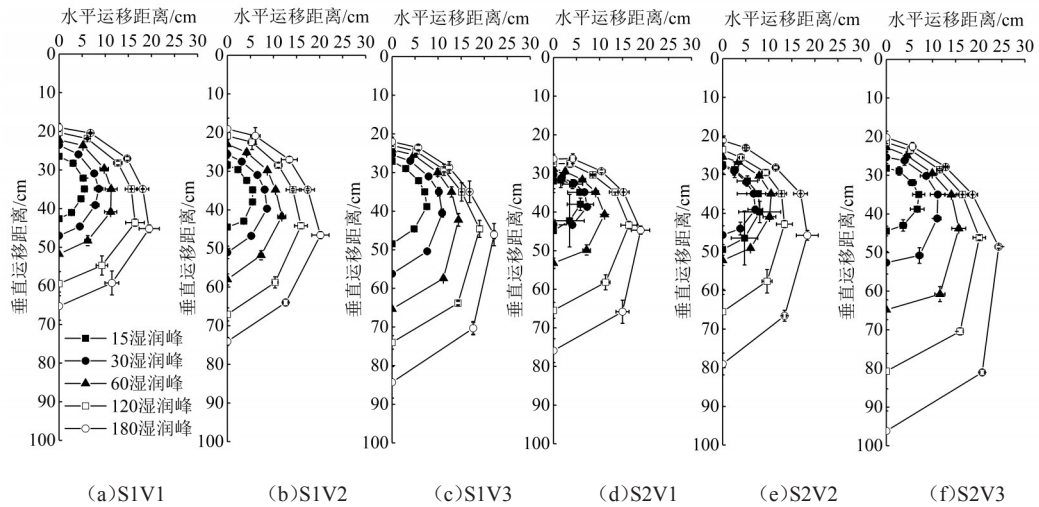


图3 土壤湿润锋随时间变化过程

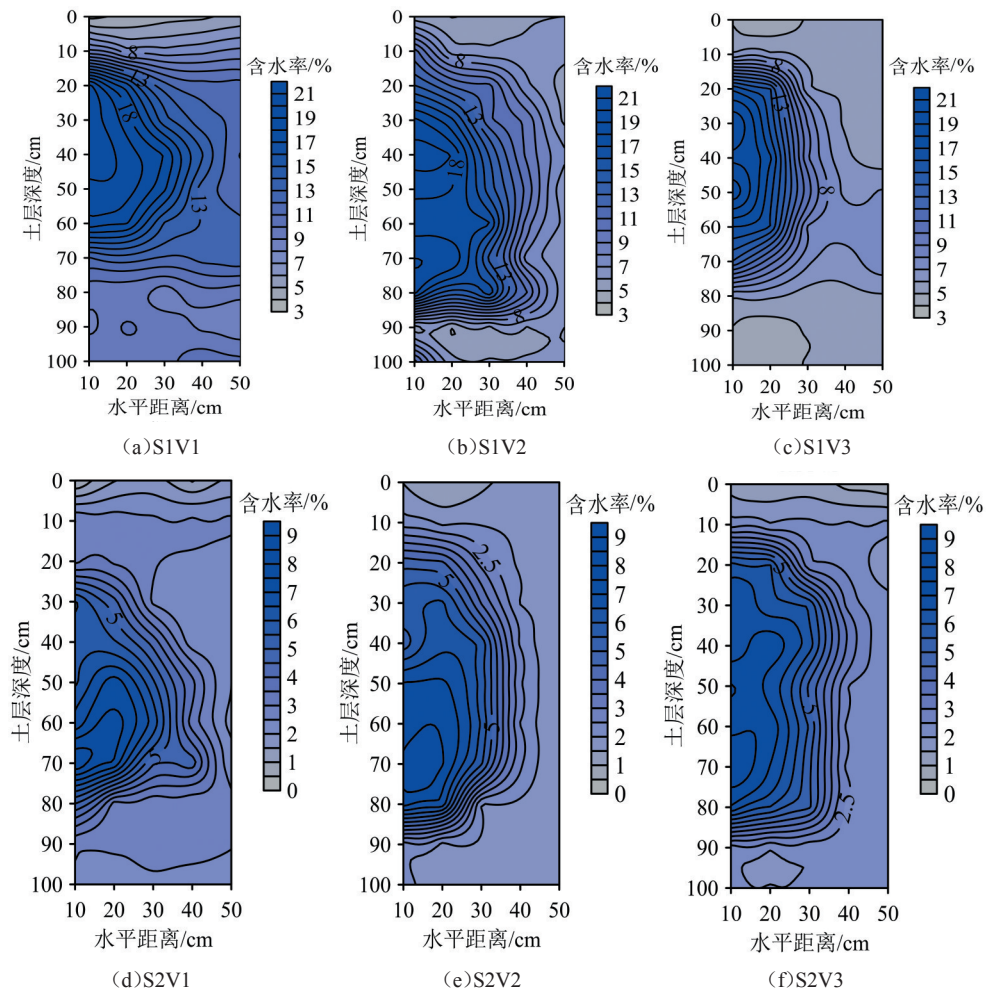


图4 土壤含水率空间分布示意图

3.2 湿润体含水率空间分布特征

灌水结束后,在砂黏土中,垂向含水率峰值出现在30~50 cm土层(图4),而在砂土中则出现在50~70 cm土层,说明水分在砂土中向下入渗速度较快;在水平方向上含水率峰值均出现在20 cm范围内;对灌水定额相同时,同流速条件下的2种土壤灌水后的土壤含水率进行独立样本 t -test(表3)得,在2种土壤中含水率差异显著($P<0.05$);砂黏土中整体含水率、均值的标准偏差值较砂土高,土壤含水率数据的离散程度比在砂土中更大。

表3 土壤含水率独立样本 t -test

处理	均值/%	标准偏差/%	平均数标准误差	F	t	df	$P(95\%)$	平均差异	标准误差
S1V1	12.034 5	5.269 2	0.710 5	52.132 9	10.042 0	108	0	7.566 8	0.753 5
S2V1	5.060 5	1.860 9	0.250 9						
S1V2	12.461 6	4.665 9	0.629 1						
S2V2	5.084 3	2.173 4	0.293 1	19.036 5	7.116 4	108	0	4.939 2	0.694 1
S1V3	13.656 6	3.218 0	0.433 9						
S2V3	5.494 7	2.216 8	0.298 9						

3.3 土壤湿润体特征值与试验因素的关系

3.3.1 直插式地下滴灌湿润锋运移距离经验解

将湿润锋在3个方向上的6组运移距离(其中每个土箱壁面上有1组距离数据,试验设计3组重复,因此每个处理6组重复数据)、滴头出流速度和灌水时间数据带入式(1)、式(2)、式(3)做非线性拟合,结果见表4, R^2 均大于0.95,且在 $P<0.05$ 水平差异显著。除了湿润锋垂直向上运移距离 D_1 与滴头流速负相关,与灌水时间正相关,其他湿润体特征参数均与试验因素正相关。将湿润体运移距离实测值与模拟值检验(表5)可知,3个方向湿润锋运移距离实测值与模拟值线性趋势拟合 R^2 均大于0.98,在0.980 8~0.998 8之间,均方根误差值在0.142 4~1.940 1 cm之间,幂函数可用于描述直插式地下滴灌湿润锋运移距离与滴头出流速度和灌水时间之间的关系。

表4 经验参数拟合结果

方程参数	砂黏土	R^2	砂土	R^2
k_1	7.636 9 $\pm$ 1.127 8	0.985 0	0.354 1 $\pm$ 0.082 7	0.978 0
a_1	-0.200 6 $\pm$ 0.042 1		0.678 3 $\pm$ 0.065 2	
b_1	0.246 5 $\pm$ 0.018 2		0.290 8 $\pm$ 0.025 2	
k_2	0.462 3 $\pm$ 0.053 5	0.996 0	0.258 0 $\pm$ 0.105 1	0.964 0
a_2	0.605 8 $\pm$ 0.030 2		0.530 3 $\pm$ 0.096 7	
b_2	0.504 8 $\pm$ 0.014 3		0.699 0 $\pm$ 0.056 7	
k_3	1.052 1 $\pm$ 0.162 8	0.990 0	0.728 6 $\pm$ 0.256 0	0.952 0
a_3	0.195 9 $\pm$ 0.040 5		0.321 0 $\pm$ 0.092 3	
b_3	0.460 4 $\pm$ 0.020 1		0.455 6 $\pm$ 0.044 7	

表5 直插式地下滴灌湿润锋运移距离验证结果

处理	R^2			均方根误差		
	D_1	D_2	D_3	D_1	D_2	D_3
S1V1	0.993 2	0.998 8	0.997 5	0.295 0	0.175 9	0.142 4
S1V2	0.981 8	0.997 2	0.997 0	0.639 6	0.738 0	0.212 5
S1V3	0.987 0	0.995 6	0.996 1	0.398 5	1.755 8	0.314 5
S2V1	0.985 9	0.984 4	0.994 3	0.175 4	0.752 7	0.284 8
S2V2	0.980 8	0.983 2	0.990 1	0.480 2	1.940 1	0.753 8
S2V3	0.985 4	0.998 5	0.995 9	0.575 2	0.885 4	0.354 8

3.3.2 土壤湿润锋运移距离与灌水时间和滴头流速的关系

砂黏土中垂直向上方向湿润锋运移距离 D_1 随滴头流速的增大而减小,当滴头流速为1.75 L/h时 D_1 最小,为12.99 cm;当滴头流速为0.75 L/h时 D_1 最大,为17.11 cm;垂直向下方向湿润锋运移距离 D_2 随滴头流

速的增大先减小后增大,当滴头流速为1.75 L/h时 D_2 最大,为49.31cm;水平方向运移距离 D_3 随滴头流速的增大变化较小,但总体变化趋势为增大;当滴头流速为1.75 L/h时 D_3 最大,值为22.14 cm。在砂土条件下,3个方向的湿润锋运移距离均随滴头流速的增大而增大, D_1 、 D_2 和 D_3 最大值分别为14.81、61.18和24.33 cm,垂直向下方向湿润锋运移最大距离均比砂黏土大,因此,在砂土条件下若滴头流速过大,更易出现水分深层渗漏。

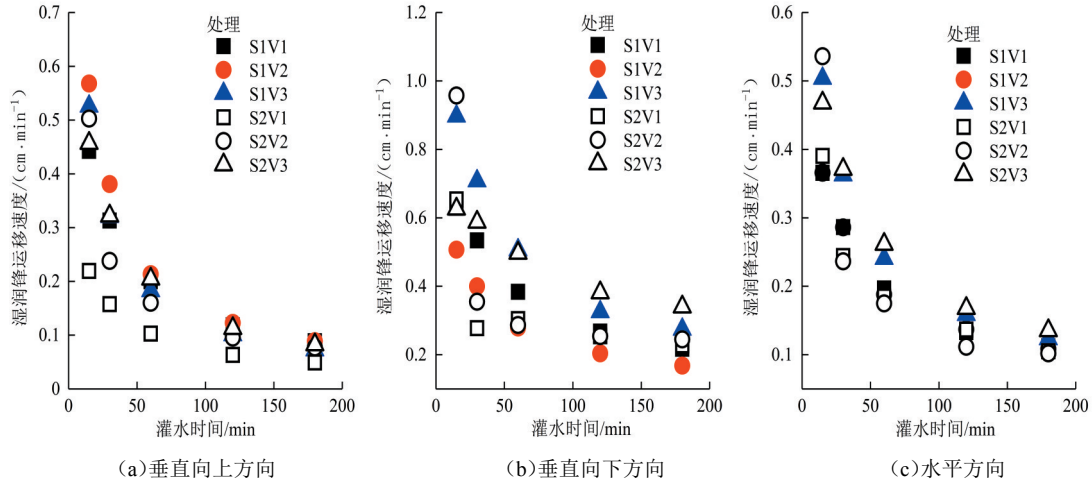


图5 湿润峰运移速度与灌水时间的关系

由湿润峰运移距离与灌水时间计算湿润锋运移速度,对比湿润峰运移速度(图5)与湿润锋形态(图3)可知,湿润锋在3个方向的运移速度随灌水时间的增大而减小,可能是因为在灌水过程中,土壤水分接近饱和的范围随灌水时间的增长而逐渐扩大,水分与夹杂的气泡在直径变化的土壤颗粒间运动时穿过大小不一的土壤孔隙,在运动时由于变形而产生的毛管阻力减缓了土壤水分的运动^[31]。当灌水速度处理为V1和V2时,湿润锋在砂黏土(S1)中垂直向下方向的运移速度显著($P<0.05$)大于在砂土(S2)中的运移速度;当灌水速度处理为V3时,砂土(S2)中的运移速度则显著大于($P<0.05$)砂黏土(S1)。说明直插式地下滴灌条件下的土壤水分运动整体符合地下点源土壤水分入渗的特征,但是由于插入式灌水器底端出水的特性,导致其在大流速条件下的灌溉过程中水分向下湿润的速度相对其他地下滴灌方式要快,而在水平方向的湿润速度则差异不显著($P>0.05$)。

3.3.3 土壤湿润体体积与灌水时间的关系

将经验参数拟合结果(表4)带入式(8)解得湿润体体积(图6)。当灌水定额相同且滴头流速较小时(处理S1V1、S2V1),砂黏土湿润体体积较大;滴头流速较大时(S1V3、S2V3),砂土湿润体体积更大。灌水时间小于120 min时,3种滴头流速下,砂黏土中土壤湿润体体积均大于砂土;当灌水时间超过120 min、滴头流速为1.75 L/h时,砂土土壤湿润体体积大于砂黏土。说明在灌水总量、灌水时间均相同且滴头流速较小时,土壤湿润体体积在砂黏土中较大,滴头流速较大时则相反。

3.4 直插式地下滴灌灌溉效果分析

利用湿润体体积与土壤含水率计算各微灌技术参数(表6)得:砂黏土中灌溉水利用系数随灌水量的增大而减小,砂土条件下则随灌水量的增大而增加。计划湿润土壤区含水率越高,灌溉水储存系数越小;滴头流速相同时,砂黏土比砂土储存系数高约1倍;当滴头流速为1.25 L/h时灌水均匀系数比其他处理高,平均值为0.5,流速为1.75 L/h时灌水均匀系数比其他处理低,平均值为0.23,说明滴头流速过大或过小均会影响直插式地下滴灌的灌水均匀度。当滴头流速过小时,土壤湿润范围小导致灌水均匀系数小,而当滴头流速过大时,水分垂直方向的入渗量增多,湿润范围在垂向变大而水平方向则相对较少,水分发生深层渗漏的可能性增高,也可能导致灌水均匀度变差;在砂黏土条件下,土壤湿润比随滴头流速的增大而增大;在砂土条件

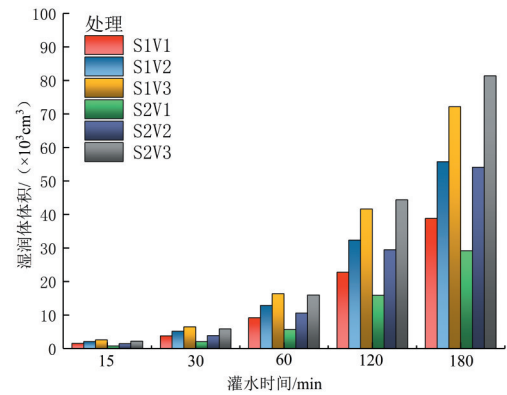


图6 湿润体体积随灌水时间变化关系

下,土壤湿润比随滴头流速的增大先增大后减小;但土壤湿润比均小于0.6。说明目标湿润区土壤湿润范围较其他灌溉方式小。

表6 微灌技术参数计算结果

处理	Q/cm^3	Q_s/cm^3	Q_d/cm^3	$\Delta c/\text{cm}^3$	D'/cm	Z_d/cm	V/cm^3	V'/cm^3	W_s	C_u	p
S1V1	2 094.47	6 503.76	2.43	1.69	40.37	70	38 816.35	114 093.64	0.93	0.31	0.34
S1V2	3 398.19	9 790.71	4.23	2.05	39.01	70	5 514.62	106 521.33	0.91	0.52	0.52
S1V3	4 363.83	12 974.74	2.67	2.11	44.26	70	7 253.45	137 149.47	0.83	0.25	0.53
S2V1	1 809.96	2 698.41	1.19	0.95	37.84	70	2 976.91	100 220.35	0.80	0.20	0.29
S2V2	3 445.51	5 080.64	2.97	1.51	36.72	70	5 404.60	94 363.67	0.92	0.49	0.57
S2V3	4 939.49	7 545.82	1.58	1.25	48.66	70	8 148.06	165 740.92	0.94	0.21	0.50

4 讨论

研究直插式地下滴灌的土壤湿润体形态特征及其水分运动规律,对直插式地下滴灌的实际应用有着重要的指导意义。在本试验条件下,土壤湿润锋在3个方向上的运移距离均随灌水时间的增加而增大,而湿润锋运移速度随灌水时间的增大而减小,这与白丹等^[11,33]的研究结果相同。在其他地下滴灌方式下,如微润线源灌^[18]、间接地下滴灌^[17]、竖管地下灌^[12]等的土壤湿润体特性研究中,土壤湿润锋在水平与垂直方向的运移距离接近,湿润体形态则近似为球体或椭球体,而本研究中直插式地下滴灌的土壤湿润体近似为“上小下大”的纺锤型,这是由于直插式地下滴灌条件下水分在垂直向下方向运移的距离比垂直向上和水平方向运移的距离大所致;土壤湿润锋在试验条件下垂直向上运移的距离未超过20 cm、水平方向最大湿润半径约为25 cm,而垂直向下方向的最大运移距离约为60 cm,表明直插式地下滴灌比其他地下滴灌方式下湿润锋向下运移深度更大,而水平方向湿润半径则相对较小;由直插式地下滴灌的土壤含水率空间分布可知,在土壤表层0~20 cm范围内砂土与砂黏土中的土壤含水率均比较低,在砂黏土中土壤含水率峰值出现在滴头出水口附近,深度约为20~50 cm的土层,而砂土中则出现在滴头埋深下方深度约50~80 cm的土层,水平方向土壤含水率较高区域半径约为30 cm,这一方面可能是由于水分在砂土中入渗速度较快所致,另一方面由于采集土壤含水率样本的过程需要时间,水分在采样过程中继续向下扩散,属于试验系统误差的一部分。

同灌水定额、同流速条件下,灌水时间小于120 min时,砂黏土中土壤湿润体体积均大于砂土;当灌水时间超过120 min、滴头流速为1.75 L/h时砂土土壤湿润体体积大于砂黏土,即当灌水超过一定时间后,滴头流速较小时砂黏土的土壤湿润体体积较大,滴头流速较大时则砂土中湿润体体积较大。基于水量平衡原理,本试验条件下土壤中水分增量来源于灌水,因此灌水量相同时土壤湿润体体积应相同,但试验结果表明,在2种土壤中湿润体体积存在差异,这一情况可能与土壤持水性和初始含水率有关。2种土壤间(砂土和砂黏土)的持水性差距较大,砂黏土的初始土壤含水率要远大于砂土,依据白丹等^[11]的研究,在同种土壤类型中,土壤初始含水率与土壤湿润锋的运移显著呈正相关,因此,砂黏土湿润体体积较大,但不能解释为什么灌水后期(灌水时间>120 min)在大流速条件下砂土湿润体体积较大。显而易见的在不同土壤质地条件下,灌水过程中压力势的变化导致水分在2种土壤中入渗的速度发生变化,直插式地下滴灌的土壤水分运动主要由土壤基质势、重力势和压力势共同主导,当滴头流速较小时,压力势的影响相对较小,而基质势与重力势则占主导,在砂黏土中的基质势在同条件下要大于砂土,同时砂黏土中土壤初始含水率也较高,因此在小流速条件下砂黏土中的湿润体体积较砂土更大;当滴头流速较大时,此时压力势的作用增大,砂土中土壤大颗粒较砂黏土中多,同时其基质势相对砂黏土弱,在灌水过程中,滴头持续出水压力的作用下水流在砂土中的运动速度更快(图5),从而导致其在流速较大时砂土中的湿润体体积较大^[30]。此外,由于土壤水分运动不仅受土壤质地、压力、初始含水率的影响,埋深、土壤体积质量等因素也会对地下滴灌土壤水分运动产生显著影响^[1,3,11,34],因此这一现象还有可能是由其他原因所致,还需后续试验继续探究。

基于土壤湿润体体积、土壤含水率,选取深度70 cm的土层作为计划湿润深度计算直插式地下滴灌微灌技术参数^[32],结果表明,灌溉水利用系数值均大于0.8,而灌水均匀系数与土壤湿润比均小于0.6,其中滴头流速为1.25 L/h时,在2种土壤中的微灌技术参数值结果相对其他流速处理较高,表明在本试验条件下,1.25 L/h流速的灌水效果最好。灌水均匀系数与土壤湿润比的值较小可能是因为直插式地下滴灌的水分运动为地下单点源水分入渗,灌水后使地下一定范围内的土壤局部湿润,因此其灌水均匀系数与土壤湿润比均比较小。

5 结 论

1)幂函数可准确描述砂土、砂黏土中直插式地下滴灌湿润峰运移距离、滴头出流速度和灌水时间之间的关系,湿润峰运移经验模型决定系数均大于0.95,实测值与拟合值验证模型决定系数均大于0.98,均方根误差在0.142 4~1.940 1 cm之间,表明模型能够较好地反映湿润峰运移距离与影响因素之间的关系。

2)直插式地下滴灌在砂土与砂黏土中的土壤湿润特征为:土壤湿润锋形态均呈“上小下大”的纺锤型;垂直向下湿润深度大而向上湿润距离较短、水平湿润半径较小;垂直向上湿润距离与滴头流速负相关,与灌水时间正相关,水平与向下湿润距离与流速、灌水时间均正相关。

3)直插式地下滴灌在砂土与砂黏土中应用时,灌水均匀度与湿润范围均比较小,表土层(深度约20 cm)处于低含水率状态,含水率峰值区出现在滴头埋深土层附近(深度约30~50 cm);直插式地下滴灌在深根、疏植型作物中的应用中更具有优势。

4)本试验条件下,1.25 L/h流速的灌水效果最好。在实际应用中可根据作物的需水要求,考虑适当的增加直插式地下滴灌滴头的布置密度,使土壤湿润体发生交汇以提高灌水效果,本试验也仅研究了单个土壤湿润体的情形,未来针对直插式地下滴灌的多点源或线源入渗水分运动规律可继续开展研究。

参考文献:

- [1] 陈新明,蔡焕杰,王占兵,等.无压根区地下灌溉技术试验研究[J].农业工程学报,2004,20(1):76-79.
- [2] ZHU-GE Yuping, ZHANG Xudong, ZHANG Yulong, et al. Tomato root response to subsurface drip irrigation[J]. Pedosphere, 2004, 14(2):205-212.
- [3] 赵伟霞.无压地下灌溉和间接滴灌水分运移规律与节水增产机制研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [4] ADAMSEN F J. Irrigation method and water quality effects on corn yield in the Mid-atlantic coastal plain[J]. Agronomy Journal, 1992, 84(5):837-843.
- [5] 张增志,王晓健,薛梅.渗灌材料制备及导水性能分析[J].农业工程学报,2014,30(24):74-81.
- [6] 袁巧霞,朱端卫,艾平,等.设施栽培中渗灌技术研究现状与发展趋势[J].农业机械学报,2006,37(9):199-203.
- [7] 王淑红,张玉龙,虞娜,等.渗灌技术的发展概况及其在保护地中应用[J].农业工程学报,2005,21(s1):92-95.
- [8] 陈新明,蔡焕杰,单志杰,等.根区局部控水无压地下灌溉技术对黄瓜和番茄产量及其品质影响的研究[J].土壤学报,2006,43(3):486-492.
- [9] 孙三民,安巧霞,蔡焕杰,等.枣树间接地下滴灌根区土壤盐分运移规律研究[J].农业机械学报,2015,46(1):160-169.
- [10] 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所.一种悬挂直插式地下滴灌灌溉系统:CN 207604313 U[P].2018-07-13.
- [11] 白丹,何靖,郭霖,等.多因素影响下竖管地下灌溉入渗特性分析[J].农业工程学报,2016,32(23):101-105.
- [12] 白丹,何靖,郭霖,等.地下灌竖管灌水器直径压力对土壤入渗特性的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):97-102.
- [13] 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所.一种野外模拟地下滴灌的便携式装置:CN206489034U[P].2017-09-12.
- [14] 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所.一种基于土壤水分入渗动态的地下滴灌模拟试验装置:CN206575982U[P].2017-10-24.
- [15] 杜虎林,刘荣国,马振勇,等.直插式根灌技术的研究与应用[J].节水灌溉,2017(4):73-78.
- [16] 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):128-134.
- [17] 赵伟霞,张振华,蔡焕杰,等.间接地下滴灌土壤湿润体特征参数[J].农业工程学报,2010,26(4):87-92.
- [18] 张俊.微润线源入渗湿润体特性试验研究[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [19] 安巧霞,孙三民,徐镭,等.不同流量对间接地下滴灌湿润体特征的影响[J].人民黄河,2016,38(6):154-156.
- [20] 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.
- [21] 赵彤,范严伟,赵廷红.水平微润灌土壤水分运动数值模拟与验证[J].灌溉排水学报,2018,37(3):28-34.
- [22] 胡笑涛,康绍忠,马孝义,等.地下滴灌条件下沙质土壤入渗特性试验研究[J].灌溉排水学报,2004,23(5):75-77.
- [23] 李光水,曾德超.滴灌土壤湿润体特征值的数值算法[J].水利学报,1997(7):1-6.
- [24] 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.
- [25] 白丹,孙淑贞,任培琦,等.地下灌竖管灌水器湿润体时空变化规律[J].农业工程学报,2018,34(7):107-113.
- [26] 范永申,仵峰,张银炎,等.地下滴灌条件下棉花土壤水分运移田间试验研究[J].灌溉排水学报,2007,26(4):1-3.
- [27] 王文静.根区交替滴灌方式对葡萄根系分布规律及生理特性的影响[D].石河子:石河子大学,2014.
- [28] 宋云民,周泽福,党宏忠.北方半干旱沙地植被建设中节水技术的应用研究进展[J].世界林业研究,2006,19(3):22-26.
- [29] 张振华,蔡焕杰,杨润亚.地表滴灌土壤湿润体特征值的经验解[J].土壤学报,2004,41(6):870-875.
- [30] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].高等教育出版社,2006.
- [31] 葛家理.现代油藏渗流力学原理(上册)[M].北京:石油工业出版社,2003.
- [32] 微灌工程技术规范:GB/T50485—2009[S].北京:中国计划出版社,2009.
- [33] 赵彤,范严伟,赵廷红.水平微润灌土壤水分运动数值模拟与验证[J].灌溉排水学报,2018,37(3):28-34.
- [34] 国攀,张毅杰,宋时雨,等.地下滴灌灌水器负压吸泥影响因素试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(1):63-68.

Water Movement and Its Potential for Uptake by Roots under Plug-in Subsurface Drip Irrigation

WANG Bingyao^{1,2}, WEI Wei³, LIU Lichao^{1*}, WANG Zengru¹

(1. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Ningxia Agricultural Comprehensive Development Office, Yinchuan 750001, China)

Abstract: **【Objective】**Plug-in subsurface drip irrigation is a technique able to deliver water and nutrients to desirable root zones. The objective of this paper is to investigate its efficacy in modulating water movement and its subsequent uptake by plant roots. **【Method】**The experiment was conducted in a sandy soil and a sandy clay soil, typical in northwest China. During the experiment, we measured advances of the wetting fronts in both vertical and horizontal directions and established their relationship with flow rate and irrigation duration, from which we calculated the parameters in irrigation design. **【Result】**For both soils, there was a good relationship between wetting-front advance in all directions with flow rate and irrigation duration, with a determinant coefficient of $R^2 = 0.95$. The storage coefficient of the irrigation water, the irrigation uniformity coefficient and soil wetting ratio in the sandy soil were all less than 0.6, while their associated values in the sand clay soil were larger than 0.8, indicating that the plug-in subsurface drip irrigation was less efficient in the sandy soil than in the sandy clay soil. **【Conclusion】**The advance of the wetting-front increased with flow rate and irrigation duration in a power-law, with the determinant coefficients being 0.95. The upward advance of the wetting-front was negatively related to the flow rate but positively to the irrigation duration. In contrast, the moving distances of the wetting font in both horizontal and downward vertical direction increased with both flow rate and irrigation duration. In our experiment the flow rate of 1.25 L/h was most effective.

Key words: arid area; plug-in subsurface drip irrigation; wetting zone; wetting front; moving distance; micro irrigation parameters

责任编辑:白芳芳