

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.02.002

深层坑渗灌水器开孔率对土壤水分入渗特性的影响研究

李 涛, 张建丰, 牛鹏飞

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安, 710048)

摘要: 为了研究深层坑渗灌水器开孔率对土壤水分入渗特性的影响,在室内开展土箱机理实验,试验土壤为哈密砂土,选取了5个灌水器开孔率,分别为1.35%、2.2%、4.95%、7.5%和13.75%,设定灌水定额为12L,研究了不同灌水器开孔率的土壤水分入渗特性。结果表明:灌水器开孔率越大,相同时刻的累积入渗量、入渗速率、水平和垂直湿润锋越大,然而灌水器开孔率大于7.5%将对哈密砂土土壤水分入渗特性的影响很小;不同开孔率条件下累积入渗量和湿润锋随时间的变化规律均符合幂函数关系;在灌水定额相同的条件下,灌水器开孔率对土壤水分的分布影响不大。研究结果为深层坑渗灌技术的实际运用奠定了理论基础。

关键词: 深层坑渗灌; 土壤; 入渗; 土壤含水量; 开孔率

中图分类号: S275.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)02-0145-06

Study on the effect of opening pore rate of irrigator on the infiltration characteristics of soil water content under condition of deep pit irrigation

LI Tao, ZHANG Jianfeng, NIU Pengfei

(School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to explore the effects of different opening pore rates of irrigator of deep pit irrigation on infiltration characteristics of soil water content, the infiltration characteristics of soil water content for the sandy loam soil under the condition of five opening pore rates of irrigator (i. e., 1.35%, 2.2%, 4.95%, 7.5% and 13.75%) are studied with irrigating water quota of 12L. The results are as follows: The cumulative infiltration, infiltration rate, horizontal and vertical wetting front are large with increase in opening pore rate of irrigator, but the impact of opening pore rate of irrigator on the characteristics of soil water infiltration is little with opening pore rate of more than 7.5%. The power function is used to fit the relationship between the migration distance for wetting front of soil water content and time. The spatial distribution of soil water content for different opening pore rates of irrigator are similar under condition of same irrigating water quota. These research results are of theoretical basis on practical application of deep pit irrigation.

Key words: deep pit irrigation; soils; infiltration; soil water content; fractional hole areas

新疆地区光热资源丰富,昼夜温差大,极适合葡萄的种植,生产的葡萄品质优良,在国内外享有较高声誉,是该地区最重要的经济作物。该地区蒸发非常强烈,水资源严重短缺,葡萄的种植目前大部分采用传统的沟灌,水资源利用效率低,急需发展适宜的

节水灌溉技术,解决水资源对该地区发展的制约性。目前,葡萄节水灌溉技术是一个国内外研究的热点,一些地表节水灌溉技术,如滴灌,喷灌和小管出流等,虽然可以起到不错的节水效果,但棵间蒸发依然较大,未能达到最高效的节水。深层坑渗灌技术^[1-6]

收稿日期: 2018-12-25; 网络出版日期: 2020-05-14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200514.1053.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379172); 陕西省教育厅重点实验室科研计划资助项目(16Jz084)

第一作者: 李涛,男,博士,讲师,研究方向为节水灌溉理论与新技术。E-mail: litao@xaut.edu.cn

通信作者: 张建丰,男,博士,教授,博导,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: jfzhang@mail.xaut.edu.cn

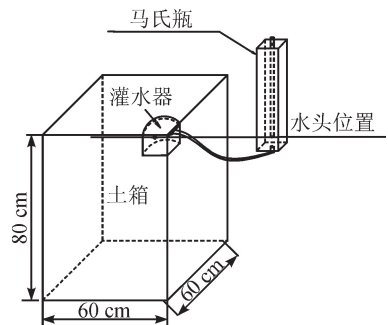
直接将水分输送到葡萄根系附近,地表很少有湿润面积,减少大部分棵间蒸发,是一种适应于新疆地区葡萄种植的高效节水灌溉技术。每种节水灌溉方法在实际中应用之前首先要进行大量的机理研究,主要是通过探究室内均质土的单点源入渗特性。白雪儿等^[7]在砂壤土条件下开展滴灌单滴头室内机理实验,研究发现不同初始含水率对土壤水分的最大垂直入渗深度均约 3.5 m,最大水平湿润半径约 3.2 m。王海宇等^[8]研究了滴灌点源入渗条件下土壤容重对入渗土壤水分再分布的影响,垂直最大入渗深度为 37 cm,水平最大距离为 128 cm,并且水平和垂直方向湿润体土壤剖面土壤含水率与距离间分别呈现二次函数关系和线性函数关系。张松等^[9]研究了地下滴灌点源入渗土壤水分运动规律,滴灌带埋深 15 cm 节水效果更好,更利于作物生长。陈琳等^[10]探究了土壤初始含水率对浑水膜孔灌肥液自由入渗水氮运移特性影响,累积入渗量随土壤初始含水率的增大而减小,而湿润锋运移距离却呈现出随时间增大的趋势。类似的研究还有许多^[11-16],这些研究对各种灌水方法在实际中的应用具有重要的理论指导作用。

深层坑渗灌技术的核心是灌水器,灌水器上的开孔率直接决定着入渗界面上水分进入土壤的通道大小及数量,对水分进入土壤后的运动也具有重大的影响,然而,深层坑渗灌条件下灌水器开孔率对土壤水分分布特性的影响机理的相关研究尚未见报道。合理的灌水器开孔率设计能够确保灌溉的水分全部用于湿润植物根系生长的区域,且是进行灌水器设计首要指标。因此,本文通过室内机理试验,研究了哈密砂土条件下,不同灌水器开孔率对累积入渗量、湿润锋及土壤含水量的影响,以为生产实践提供理论指导。

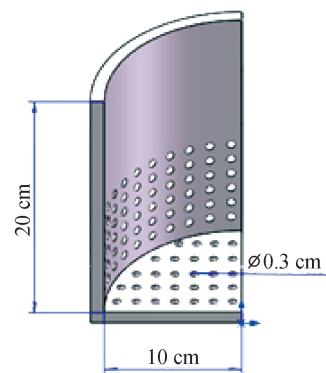
1 材料与方法

试验于 2015 年在西安理工大学农水大厅进行,试验装置采用西安理工大学自行研制的模拟深层坑渗灌实验系统,主要包括土箱、灌水器 and 马氏瓶三个部分,见图 1。土箱的长×宽×高为:60 cm×60 cm×80 cm,主框架为钢结构。为便于观测湿润锋运动过程,4 个侧面为 5 mm 厚钢化玻璃,底面为 3 mm 厚

的多孔钢板。为了避免土箱内土体中空气对入渗的影响,钢板上间隔 5 cm 均匀开孔,使得土体内的空气与自然界联通。水分入渗后,土壤中的空气可以由底孔自由排出,孔径 2 mm,上面敞开,便于装土。试验系统所用灌水器是深层坑渗灌灌水器的 1/4,即 1/4 带底的有机玻璃圆柱进行模拟,半径 10 cm,高 20 cm,底面和侧面同时开孔,孔径 3 mm,试验中灌水器埋深 20 cm,四周用玻璃胶与试验土箱密封,试验设置 5 个开孔率(开孔面积/灌水器总面积×100%),分别为 1.35%、2.2%、4.95%、7.5%、13.75%。试验采用马氏瓶提供 4 cm 的恒定水头,马氏瓶由 8 mm 厚的有机玻璃制成,瓶身带有精度为 1 mm 的刻度尺。马氏瓶的内径为 150 mm,高 900 mm。参考哈密地区夏季 6 月份一个灌水周期内葡萄实际需水量,实验设计灌水定额为 12 L。试验土壤为哈密砂土,土壤粒径组成见表 1,风干后,碾碎,过 2 mm 筛子,每 5 cm 分层填装,土壤初始质量含水量 2.1%,容重 1.65 g/cm³。



(a) 实验土箱及马氏瓶



(b) 灌水器

图 1 试验设备

Fig. 1 Experimental equipment

表 1 土壤颗粒级配表

Tab. 1 Soil particle size distribution table

粒径/mm	<0.002	<0.005	<0.01	<0.02	<0.05	<0.1	<0.2	<0.25	<0.5	<2
质量分数/%	0.85	2.30	5.95	9.42	12.88	25.50	41.47	47.71	68.50	100

试验时,打开阀门,马氏瓶开始供水,用记号笔在土箱侧面有机玻璃上画出不同时刻的湿润锋,记录时间间隔先密后疏,分别为试验开始后的 1 min、5 min、10 min、15 min、20 min、30 min、40 min、50 min、60 min、70 min、80 min、90 min、100 min、110 min 和 120 min。试验中通过秒表记录灌水时间,通过马氏瓶读取灌水量,计算累积入渗量(灌水量/入渗表面积),在入渗结束后,立即选取 2 条夹角为 30°的半径作为取土剖面,互为重复,沿半径方向间隔 5 cm,垂直方向间隔 5 cm 取土,半径方向取土距离为 40 cm,垂直取土深度为 80 cm,采用烘干法测量土壤含水量。入渗率的计算公式为:

$$\lambda = \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: λ 为入渗率,mm/min; Δt 为计算时段,min; ΔI 为计算时段 Δt 内的入渗量,mm。

2 结果分析

2.1 灌水器开孔率对累积入渗量的影响

图 2 是不同灌水器开孔率条件下累积入渗量随时间的变化趋势。

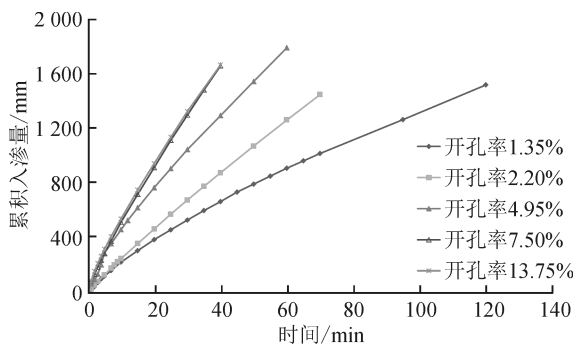


图 2 不同灌水器开孔率条件下累积入渗量随时间的变化

Fig. 2 Change of cumulative infiltration rate with time under the condition of different fractional hole areas of irrigator

由图 2 可知,随着入渗时间的增加,累积入渗量逐渐增大,在相同的入渗时间下,灌水器开孔率越大,累积入渗量越大,但是增大速率逐渐减小。但是当灌水器开孔率为 7.5% 和 13.75% 时,累积入渗量随时间的变化经方差分析,二者之间没有显著性差异,说明当灌水器开孔率小于 7.5% 时,开孔率将会限制土壤的入渗能力,累积入渗量将会减小。但当开孔率大于 7.5% 时,开孔率继续增大将对累积入渗量影响很小,这也表明灌水器开孔率为 7.5% 时,累积入渗量基本达到土壤的入渗能力,继续增大灌水器

开孔率将对累积入渗量的影响很小。由此可知,在哈密田间实际应用时,为了使灌水器不影响灌溉水分的人渗需求,选用开孔率 7.5% 的灌水器较好。

图 3 是不同灌水器开孔率条件下入渗率随时间的变化趋势。由图 3 可知,不同灌水器开孔率的入渗率随时间变化的规律与累积入渗量相似,相同入渗时刻开孔率越大,入渗率越大,当开孔率大于 7.5% 时,入渗率基本保持不变,开孔率对入渗率几乎不产生影响。

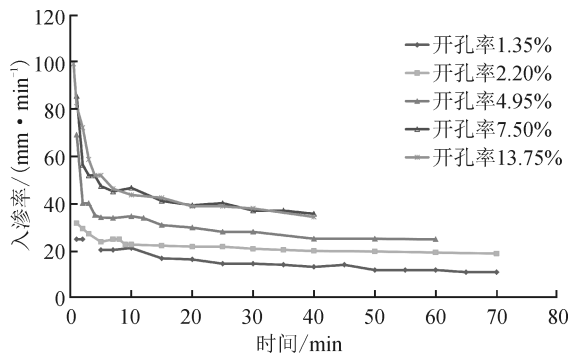


图 3 不同灌水器开孔率条件下入渗率随时间的变化
Fig. 3 Trend of infiltration rate with time under different fractional hole areas of irrigator

为了能够通过灌水器开孔率的大小预测累积入渗量随时间的变化,建立累积入渗量模型的预测模型,现采用 Kostiakov 入渗模型(式(2))对哈密砂土不同灌水器开孔率累积入渗量变化过程进行拟合,拟合结果见表 2。

$$I = k t^{\alpha} \quad (2)$$

式中: I 为累积入渗量,mm; t 为入渗时间,min; k , α 为模型参数,其中 k 的物理意义为第 1 单位时间末的入渗量。

表 2 不同开孔率条件下累积入渗量与时间拟合参数表

Tab. 2 Fitting parameters for the cumulative infiltration and the time under different irrigator porosity conditions

灌水器开孔率 ϵ / %	k	α	R^2
1.35	30.38	0.837	0.996 0
2.20	32.12	0.799	0.999 9
4.95	66.92	0.816	0.992 3
7.50	80.61	0.816	0.999 4
13.75	89.68	0.793	0.999 6

决定系数 R^2 均大于 0.99,经显著性检验,在 $p=0.01$ 水平下,拟合效果均达到极显著水平,这说明 Kostiakov 入渗模型能很好地描述不同开孔率条件下累积入渗量与入渗时间的关系。参数 k 随着灌水器开孔率 ϵ 增大而增大,从 30.38 增大至 89.68,表

明第1分钟末的入渗量随开孔率的增大而增加,二者表现为对数函数关系,关系式见式(3),经方差检验,在 $p=0.01$ 水平下,达到极显著的关系。参数 α 在不同灌水器开孔率条件下差异不大,相当于一个常数,即 α 的平均值 0.812 2。

$$k = 28.81\ln t + 17.77, R^2 = 0.96 \quad (3)$$

2.2 灌水器开孔率对最大水平湿润锋影响

图4为不同灌水器开孔率条件下最大水平湿润锋随时间的变化规律。由图4可知,各处理最大水平湿润锋均随时间增加而增大,前期增加速率较快,后期增加速率相对较慢。

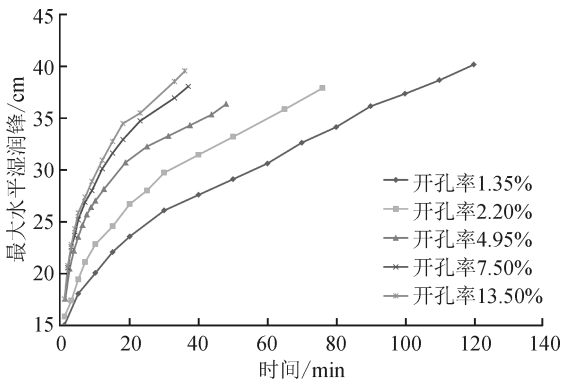


图4 不同灌水器开孔率条件下最大水平湿润锋随时间的变化规律

Fig. 4 Change trend of the maximum horizontal wetting front with time under different fractional hole areas of irrigator

在不同入渗时刻,灌水器开孔率越大最大水平湿润锋越大,开孔率 7.5% 和开孔率 13.75% 的最大水平湿润锋随时间的变化过程非常相似。这表明当开孔率小于 7.5% 时,灌水器开孔率限制了土壤水分的水平运动,主要原因是开孔率过小导致灌水器的供水能力小于土壤的入渗能力,水分供给不足,湿润锋运动减慢。当开孔率大于 7.5% 时,灌水器开孔率对土壤水分的水平运动影响很小,主要原因是灌水器开孔率的供水能力与土壤的入渗能力相近,土壤水分运动不受水分供给不足的影响,这时最大水平湿润锋的运动主要受土壤条件的影响,而不受灌水器开孔率影响。采用幂函数形式对最大水平湿润距离与时间的关系进行拟合,建立经验模型,关系式见式(4)。

$$s_x = at^b \quad (4)$$

式中: s_x 为水平最大湿润锋运动距离, cm; t 为入渗时间, min; a, b 为拟合参数。

拟合结果见表3。不同灌水器开孔率条件下,最大水平湿润锋与时间拟合关系的决定系数 R^2 均大于 0.9, 经检验,在 $p=0.01$ 水平下,各拟合关系

均达到极显著水平,表明幂函数能很好地拟合水平湿润锋随入渗时间的变化关系。

表3 不同灌水器开孔率条件下水平最大湿润距离与时间拟合参数表

Tab. 3 Horizontal maximum wetting front and time fitting parameters under different fractional hole areas of irrigator

灌水器开孔率 $\epsilon / \%$	a	b	R^2
1.35	15.391	0.204 4	0.956 9
2.20	15.934	0.211 9	0.978 3
4.95	16.903	0.212 5	0.998 0
7.50	17.665	0.223 6	0.999 2
13.50	17.712	0.234 2	0.998 8

此外,拟合的参数 a 和 b 均随着灌水器开孔率的增大而增大,参数 a 从 15.391 增大到 17.712, 参数 b 从 0.204 4 增大到 0.234 2, 表明最大水平湿润锋运动的速度随开孔率的增大而增大。

2.3 灌水器开孔率对最大垂直湿润锋运动过程的影响

图5为在不同灌水器开孔率条件下最大垂直湿润锋随时间变化的规律。由图5可知,垂直最大湿润锋随时间增加而增大,前期增大较快,后期增大相对变慢。在相同时段,开孔率越大,垂直最大湿润距离也就越大。但是,开孔率 7.5% 和 13.75% 的垂直最大湿润锋随时间的变化过程非常相似,这与最大水平湿润锋的表现相同。

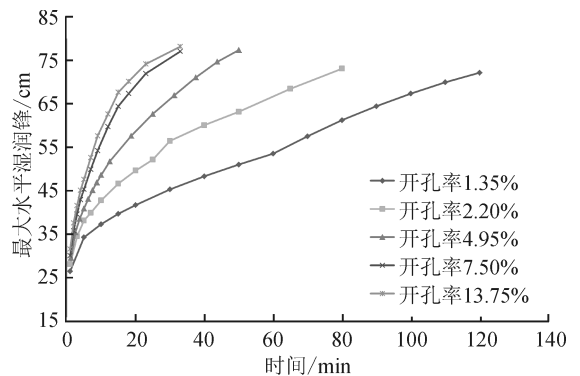


图5 不同灌水器开孔率条件下最大垂直湿润锋随时间的变化

Fig. 5 Change trend of the maximum vertical wetting front with time under different fractional hole areas of irrigator

另外,在相同时刻垂直与水平湿润锋运动过程(图4)相比,最大垂直湿润锋运动速率均大于水平方向,这是因为水分垂直向下运动时受土壤基质势、压力势和重力势共同作用,而水平方向水分运动只受土壤基质作用。在不同灌水器开孔率条件下,垂

直向下最大湿润锋与入渗时间之间符合幂函数关系,关系式见式(5),拟合结果见表4。

$$s_y = ct^d \quad (5)$$

式中: s_y 为水平最大湿润锋运动距离, cm; t 为入渗时间, min; c, d 为拟合参数。

表4 不同开孔率条件下最大垂直湿润锋与时间拟合参数表

灌水器开孔率 $\epsilon/\%$	c	d	R^2
1.35	24.752	0.191 4	0.960 6
2.20	26.736	0.217 5	0.988 3
4.95	27.050	0.252 0	0.955 9
7.50	29.475	0.268 0	0.968 6
13.50	31.062	0.276 7	0.944 0

从表4中看出,幂函数关系拟合的决定系数均大于0.9,经显著性检验,在 $p=0.01$ 水平条件下,

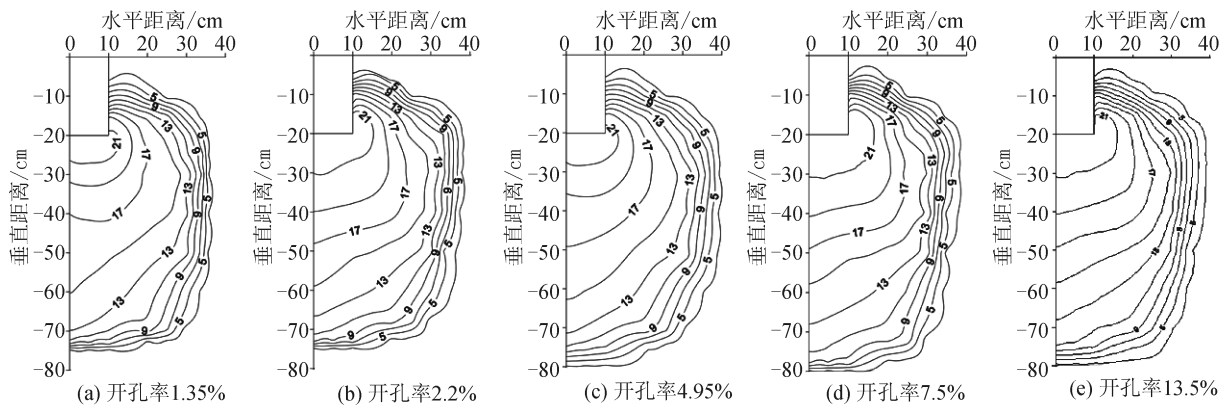


图6 不同灌水器开孔率条件下灌后剖面土壤水分分布图

Fig. 6 Distribution of soil moisture with different fractional hole areas of irrigator after irrigation

3 结论

1) 灌水器开孔率越大,累积入渗量和入渗率越大,在灌水器开孔率为7.5%时,累积入渗量和入渗率达到一个极限,继续增大灌水器开孔率将对累积入渗量和入渗率的影响很小。不同灌水器开孔率条件下累积入渗量随时间的变化符合Kostiakov入渗模型。

2) 不同灌水器开孔率条件下最大水平和垂直湿润锋均随时间增加而增大,并且最大水平和垂直湿润锋随时间的变化规律符合幂函数关系。当灌水器开孔率大于7.5%时,灌水器开孔率将不会影响土壤水分的水平和垂直运动。

3) 在灌水定额相同的条件下,不同灌水器开孔率对土壤含水量的空间分布没有影响。

均表现为极显著关系,表明幂函数能很好地拟合不同灌水器开孔率条件下的垂直最大湿润距离随时间的变化关系。拟合的参数 c 和 d 随着灌水器开孔率的增大而增大,参数 c 从24.752增大到31.062,参数 b 从0.191 4增大到0.276 7,表明最大垂直湿润锋的运动速度随开孔率的增大而增大。

2.4 灌水器开孔率对土壤含水量分布的影响

图6为在不同开孔率条件下灌后土壤含水量等值线分布图。见图6,在不同灌水器开孔率条件下,灌后最大土壤含水量差异较小,灌水器开孔率1.35%、2.2%、4.95%、7.5%和13.5%的土壤含水量的最大值分别为23.01%、23.80%、24.63%、25.72%和25.93%,并且灌后剖面土壤含水量的空间分布差异不大,这主要原因在于虽然灌水时间不一样,但各处理灌水定额相同,均为12 L。这说明在相同灌水定额条件下,灌水器开孔率影响灌水时间,但对土壤含水量的空间分布的影响较小。

参考文献:

- [1] 张建丰,李涛,张江辉,等. 极端干旱区成龄葡萄深层坑渗灌技术研究[J]. 灌溉排水学报,2011,30(1):69-71. ZHANG Jianfeng, LI Tao, ZHANG Jianghui, et al. Technique factors of the deep pit infiltration irrigation for mature grapes in extremely arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(1): 69-71.
- [2] LI Tao, ZHANG Jianfeng. Effect of pit irrigation on soil water content, vigor, and water use efficiency with-in vineyards in extremely arid regions[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 218: 30-37.
- [3] 李涛,张建丰,杨艳芬,等. 土壤容重对深层坑渗灌入渗特性影响的试验研究[J]. 中国农业大学学报,2010,15(6):89-94. LI Tao, ZHANG Jianfeng, YANG Yanfen, et al. Experimental study on impact of soil bulk density on infiltration properties of deep pit infiltration irrigation[J].

- Journal of China Agricultural University, 2010, 15(6): 89-94.
- [4] 李涛, 张建丰, 张江辉. 不同容重条件下深层坑渗灌土壤水分运动的数值模拟[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 227-234.
LI Tao, ZHANG Jianfeng, ZHANG Jianghui. Study on numerical simulation of soil water movement under the condition of deep pit infiltration irrigation with different soil bulk densities[J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2011, 39(4): 227-234.
- [5] 张建丰, 杨潇, 帖西宁, 等. 深层坑渗灌不同开孔方式单点土壤入渗特性研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 80-88.
ZHANG Jianfeng, YANG Xiao, TIE Xining, et al. Single point infiltration characteristics for different opening ways of irrigator of deep pit irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 80-88.
- [6] 张建丰, 帖西宁, 杨潇, 等. 土壤初始含水率对深层坑渗灌入渗特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(5): 44-50.
ZHANG Jianfeng, TIE Xining, YANG Xiao, et al. The impact of initial soil water content on infiltration properties of deep pit infiltration irrigation[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(5): 44-50.
- [7] 白雪儿, 艾一丹, 杨昊晟, 等. 不同初始土壤含水率和滴头流量下滴灌土壤湿润体特征及其有效性评价[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 73-78.
BAI Xueer, AI Yidan, YANG Haosheng, et al. Effects of different initial water content and dripper discharge on wetted body characteristic of drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 73-78.
- [8] 王海宇, 张月珍, 董平国. 土壤密实度对单点源入渗土壤水分再分布影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 146-151.
WANG Haiyu, ZHANG Yuezheng, DONG Pingguo. Investigation on effects of soil compactness on soil water redistribution under point source infiltration condition[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(2): 146-151.
- [9] 张松, 李和平, 郑和祥, 等. 地理滴灌点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J]. 节水灌溉, 2017, (1): 25-27, 32.
ZHANG Song, LI Heping, ZHENG Hexiang, et al. A study on soil water movement law of point source infiltration under buried drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2017, (1): 25-27, 32.
- [10] 陈琳, 费良军, 刘利华, 等. 土壤初始含水率对浑水膜孔灌肥液自由入渗水氮运移特性影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 58-66.
CHEN Lin, FEI Liangjun, LIU Lihua, et al. Effects of soil initial water content on transport characteristics of free infiltration water and nitrogen under film hole irrigation with muddy water[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 58-66.
- [11] KHATTAK M S, ALI W, AJMAL M, et al. Assessment of wetted irrigation patterns for inline and online emitters in different soil textures[J]. Journal of Himalayan Earth Sciences, 2017, 50(2): 149-163.
- [12] BRESLER E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems[J]. Irrigation Science, 1978, 1: 3-17.
- [13] AL-OGAIDI A A M, WAYAYOK A, ROWSHON M, et al. Wetted patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model[J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 203-213.
- [14] ABID H N, ABID M B. Predicting wetting patterns in soil from a single subsurface drip irrigation system[J]. Journal of Engineering, 2019, 25(9): 41-53.
- [15] 何振嘉, 傅渝亮, 王博, 等. 涌泉根灌不同浓度肥液入渗特性及土壤湿润体模型研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 90-99.
HE Zhenjia, FU Yuliang, WANG Bo, et al. Infiltration characteristics and wetting body model of bubbled-root irrigation under different fertilizer concentration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 90-99.
- [16] 何靖, 白丹, 郭霖, 等. 竖管灌水器入渗特性影响因素分析[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(3): 354-358.
HE Jing, BAI Dan, GUO Lin, et al. Study on influence of vertical tube emitter's infiltration characteristics[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(3): 354-358.

(责任编辑 王绪迪)