

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2013.09.014

不同配套产品对涌泉根灌土壤湿润体特性影响

陈俊英^{1,2}, 吴普特^{1,2}, 朱德兰¹, 张智韬^{1,3}, 樊晓康¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 美国农业部农业研究与服务局南方平原农业研究中心, 美国 得克萨斯州 大学城 77843)



陈俊英

摘要: 为了研究不同配套产品对涌泉根灌土壤入渗湿润体特性的影响,以黏壤土为例,采用 PVC 和 PP 棉 2 种材料,分别制作长度为 10, 15, 20, 25 和 30 cm 的 5 个涌泉根灌配套套筒进行试验,分析涌泉根灌不同配套产品土壤入渗湿润锋随时间的运移关系. 结果表明: 2 种材料的土壤表面水平湿润半径与时间的自然对数呈线性关系,表层土壤开始出现湿润的时间与套筒长度无关; 2 种材料的土壤最大水平湿润半径和湿润深度随套筒长度的增大而增大,并与时间呈幂函数关系,其中, PVC 材料的水平和垂直向的幂指数分别为 0.38 和 0.17; PP 棉材料的水平向幂指数为 0.40,垂直向幂指数随管长的增大而减小,并与管长呈线性关系. 研究还建立了由表面水平湿润半径反演最大水平湿润半径和湿润深度的预测模型. 经验证,模型预测精度较高. 研究结果可为涌泉根灌不同配套产品的系统设计、田间布设间距和宽度等参数的确定提供参考.

关键词: 涌泉根灌; 湿润体; 配套产品; 模型; 幂指数**中图分类号:** S275.4; S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2013)09-0805-06

陈俊英, 吴普特, 朱德兰, 等. 不同配套产品对涌泉根灌土壤湿润体特性影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(9): 805-810.

Effect of sleeve length on characteristics of wetted front during bubble-root irrigation

Chen Junying^{1,2}, Wu Pute^{1,2}, Zhu Delan¹, Zhang Zhitao^{1,3}, Fan Xiaokang¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Department of Biological and Agricultural Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA)

Abstract: In order to study the effect of sleeve length on the characteristics of wetted front in bubble-root irrigation, a series of experiments were done to measure the wetted front of a clay loam soil formed during bubble-root irrigation in which five sleeve lengths (10, 15, 20, 25 and 30 cm) and two kind of sleeve materials, namely PVC and Polypropylene (PP) were used, respectively. The result showed that there is a linear relationship between the radius of wetted front on soil surface and logarithm of time for the two kinds of sleeves. The time when soil surface starts to be wetted is unrelated to the sleeve length. The radius and depth of wetted front in soils are increased with increasing sleeve length for both kinds of sleeves and a power function with time is exhibited. For the radius and depth of wetted front, their power indexes are 0.38 and 0.17 in the case of PVC sleeves. For PP sleeves, the power index of wetted front radius is 0.40, the index of wetted front depth, however, is decreased with increasing depth and a linear relationship remains between the index and sleeve length. Further, prediction models were built for determining the maximum radius of wetted front on soil surface and the deepest

收稿日期: 2012-06-19; 网络出版时间: 2013-09-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20130916.1057.011.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD29B02); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(QN2011129)

作者简介: 陈俊英(1975—),女,陕西咸阳人,副教授,博士(cjyrose@126.com),主要从事节水农业和水土资源高效利用研究.

吴普特(1963—),男,陕西武功人,研究员,博士生导师(通信作者),gjzwp@vip.sina.com,主要从事水资源高效利用研究.

depth of wetted front in soil from a known radius of wetted front on soil surface at a time instance. It was confirmed the accuracy of the models is satisfactory. The results can be useful for designing sleeves and determining space and width of ridge in a farm field.

Key words: bubbled-root irrigation; wetted body; pervious sleeves; model; power exponent

涌泉根灌是一种属于地下垂直线源灌溉方式的新型节水灌溉技术. 它通过微管把水肥直接输送到树木根区, 进行地下局部灌溉, 在作物根区创造出适宜的水、肥、气、热条件, 从而获得节水、高产、省工、高效和优质的效果^[1]. 它还可以通过出水口处的螺口直接安装不同配套产品, 通过配套产品的管长和出水方式, 调节土壤入渗湿润体特性.

近年来, 国内外学者对地下点源和线源灌溉湿润体特性进行了大量研究^[2]. 如: Cote 等^[3]运用了 Hydrus 2D 软件, 对地下滴灌条件下的土壤水分及溶质运移进行了分析. Patel 等^[4]建立了地下点源滴灌动态土壤水分运移模型. 梁海军等^[5]对地下渗灌土壤水分运动进行数值模拟, 并研究了水头压力对橡塑渗灌管渗水性能的影响. 曾辰等^[6]研究了当入渗时间一定时, 初始含水率对不同土壤垂直线源入渗特征的影响. 王振华等^[7]研究了不同灌水频率对地下滴灌线源入渗土壤水分运动规律影响. 程慧娟等^[8]研究了垂直线源灌线源长度对湿润体特性的影响.

对于涌泉根灌土壤湿润体的研究, 黎鹏红等^[9]以原状土为例, 研究了不同流量、不同灌水历时条件下, 涌泉根灌湿润体特征值的变化规律. 牛文全等^[10]研究了初始土壤含水率对涌泉根灌过程中湿润锋运移和土壤水分分布的影响, 但不同配套产品对涌泉根灌土壤湿润体特性的影响研究未见报道. 由于涌泉根灌属于地下垂直线源灌, 在土壤质地和土壤初始含水率确定的情况下, 影响土壤湿润体特性的主要因素是线源长度和出水方式.

文中以室内试验为基础, 研究不同配套产品对涌泉根灌土壤入渗湿润体的影响, 对涌泉根灌系统设计、田间布设间距和宽度等的选择具有重要的生产实际意义.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验用土取自杨凌西北农林科技大学试验田表层 0~40 cm 土壤, 土壤类型为黏壤土, 试验前将土壤风干后过 2 mm 孔径筛子, 土壤的基本物理特

性如下: 粒径在 < 0.001 , $0.001 \sim 0.005$, $0.005 \sim 0.05$, $0.05 \sim 2.00$ mm 时, 土粒质量分数分别为 21.4%, 11.1%, 57.7% 和 9.8%.

1.2 试验系统

试验系统由试验土箱和供水系统 2 个部分组成. 试验采用矩形土箱, 土箱由 10 mm 厚的有机玻璃制成, 其规格分别为 80 cm × 60 cm × 100 cm (长 × 宽 × 高), 试验采用涌泉根灌灌水器形成湿润体的 1/4 作为研究对象. 供水系统由供水箱、马氏瓶、涌泉根灌灌水器及配套套筒组成, 其中马氏瓶提供恒定水头, 通过调节马氏瓶通气管的高度来控制供水压力, 避免压力过大造成供水管头向上冒水, 本试验全部采用 15 cm 的恒定水头.

为提高涌泉根灌灌水器的灌水质量和灌水速度, 同时为提高涌泉根灌灌水器的堵塞问题, 分别开发了 2 种材料的 5 个不同长度的灌水器配套产品, 1 种是以 PVC 为材料做成套筒, 并在套筒部打上小孔, 提高灌水速度, 如图 1 所示. 另 1 种是以 PP 棉材料做成套筒, 通过 PP 棉自身的孔径向外渗水, 此材料防堵效果较好, 使用寿命较长. 相关参数如表 1 所示, 其中 d_i 为透水孔径, mm; h_b 为套筒壁厚, mm; r_i 为套筒内径, cm; r_o 为套筒外径, cm; l 为管长类型, cm; l_i 为透水部长度, cm; θ_k 为开孔度. 涌泉根灌灌水器及配套套筒为独立的部件, 配套套筒与灌水器可以通过螺口直接安装或拆卸. 采用 PVC 配套套筒进行试验时, 管中填充有直径为 3~5 mm 碎石 (以保证在灌水过程中水面始终是充满套筒打孔部分, 即在不同处理条件下灌水器有相同的供水面积, 开孔部分用纱布包裹, 防止土壤颗粒进入管内产生堵塞).

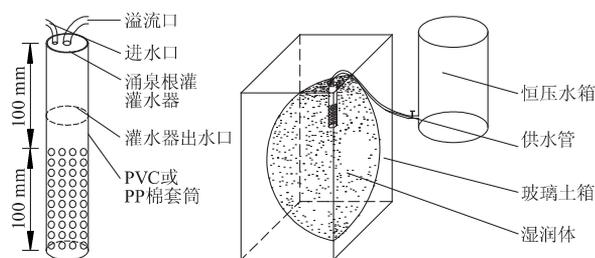


图 1 试验系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of experimental system

表 1 涌泉根灌配套套筒装置参数
Tab. 1 Parameters of sleeve tube for bubble-root irrigation emitters

名称	d_i /mm	h_b /mm	r_i /cm	r_o /cm	l /cm	l_i /cm	θ_k
PVC 套筒	5	2	4.0	4.4	10, 15, 20, 25, 30	10, 15, 20, 25, 30	20%
PP 棉套筒	0.005	10	4.0	5.0	10, 15, 20, 25, 30	10, 15, 20, 25, 30	—

1.3 试验方法和观测内容

试验设置了套筒长度为 10, 15, 20, 25 和 30 cm 共 5 个处理, 每个处理重复 3 次. 将试验土样风干碾碎过筛后, 按 1.35 g/cm^3 的容重分层装入试验土箱中, 每 5 cm 为 1 层, 共装 20 层. 在试验过程中设置所有土壤初始含水率为 7.0%, 用烘干法测定土壤含水率, 按设定的土壤含水率配制后用塑料防水布裹好放置 24 h 后, 让水分充分分布, 以保证土壤内部含水率基本均匀. 把涌泉根灌灌水器 and 安装的不同配套产品垂直埋入土中, 涌泉根灌灌水器顶部与土壤表面平齐, 供水管露出地面 5 cm, 如图 1 所示. 试验开始后用秒表计时, 定时观测涌泉根灌柱体的表面水平湿润半径、最大水平扩散半径和垂直入渗深度, 在有机玻璃上描出湿润体的形状, 用钢尺量取湿润锋距离. 上述试验均在西北农林科技大学中国旱区农业节水研究院实验室内进行.

2 结果与分析

涌泉根灌条件下, 土壤湿润体呈“梨”形, 与垂直线源灌类似, 土壤湿润体的 3 个特征值是土壤表面水平湿润半径、最大水平湿润半径和垂直湿润深度. 掌握特定土壤条件下, 涌泉根灌不同材料和不同套筒长度入渗过程中各值与入渗时间的关系, 是确定田间布置方式的重要依据.

2.1 不同配套产品表层湿润半径与时间的关系

由于涌泉根灌灌水器埋入土中时, 顶部与土壤表面平齐, 套筒部出水口与土壤表面相距 10 cm, 表面水平湿润锋在开始时并未出现, 直到供水一段时间后才慢慢向表面湿润, 同类材料不同套筒长度 (10, 15, 20, 25 cm) 的土壤表面水平湿润锋出现时间大致相同, PVC 材料分别为 49, 48, 49, 49 min, PP 棉材料的分别为 58, 58, 59, 57 min, 如图 2 所示. 图中显示了涌泉根灌灌水器供水时, 不同材料不同套筒长度土壤表面水平湿润半径 (R_s) 与时间的关系, 不同套筒长度的变化规律基本一致, 随着时间的延长, 土壤表面水平湿润半径不断增大; 而在同一时间, 不同套筒长度的土壤表面水平湿润半径相差不

明显, 总体表现为表面水平湿润半径随时间的变化趋势呈抛物线状.

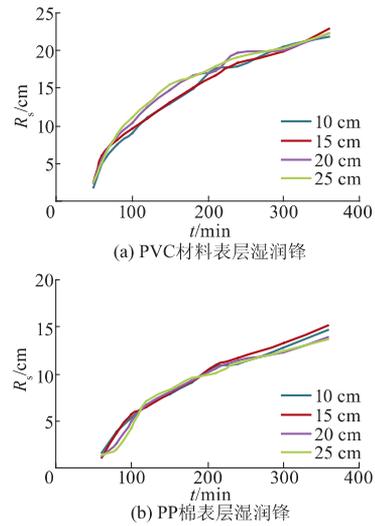


图 2 不同配套产品土壤表面湿润锋运移曲线
Fig. 2 Wetted front on soil surface at different sleeve lengths

随着灌溉时间的延长, 地表湿润半径逐渐增大, 但相同材料下, 土壤表面湿润半径随着不同套筒长度的增大而无显著差异, 可用对数函数关系拟合不同材料表面水平湿润半径与时间的关系, 拟合公式为

$$R_s = a \ln t - b, \quad (1)$$

式中: R_s 为土壤表面水平湿润半径, cm; t 为时间且大于不同配套产品下土壤表面出现湿润锋的时间, min; a, b 为拟合参数.

用式 (1) 对图 2 中不同材料不同套筒长度表层湿润锋运移曲线进行拟合, 具体拟合关系如表 2 所示.

从表 2 中可以看出, 参数 a 和 b 随套筒长度的增大而无显著变化, 则不同材料下, 土壤容重为 1.35 g/cm^3 , 初始含水率为 7.0% 的黏壤土, 土壤表面水平湿润半径与时间的关系为

$$R_{s1} = 9.745 \ln t - 34.883, \quad R^2 = 0.985, \quad (2)$$

$$R_{s2} = 7.235 \ln t - 28.287, \quad R^2 = 0.987, \quad (3)$$

式中: R_{s1}, R_{s2} 为分别为 PVC 材料和 PP 棉材料土壤表面水平湿润半径, cm.

表 2 不同配套产品表层湿润半径与时间的关系

Tab.2 Relationship between radius of wetted front on soil surface and time at different lengths of PVC sleeves

l/cm	PVC 湿润锋与时间关系	R^2	PP 棉湿润锋与时间关系	R^2
10	$R_s = 9.70 \ln t - 34.145$	0.987	$R_s = 7.01 \ln t - 27.037$	0.996
15	$R_s = 9.54 \ln t - 34.180$	0.991	$R_s = 7.26 \ln t - 28.560$	0.978
20	$R_s = 9.96 \ln t - 36.515$	0.995	$R_s = 7.17 \ln t - 28.067$	0.993
25	$R_s = 9.78 \ln t - 34.694$	0.989	$R_s = 7.01 \ln t - 27.037$	0.996

2.2 不同配套产品湿润体与时间的关系

土壤最大水平湿润半径和垂直湿润深度是研究湿润体时具有代表性的值,了解涌泉根灌不同配套产品下,最大水平湿润半径和垂直湿润深度与时间的关系,就可以根据灌溉时间确定湿润宽度和湿润深度。

2.2.1 PVC 产品湿润体与时间的关系

图 3 显示了不同管长的 PVC 产品下,土壤最大水平湿润半径和湿润深度与时间的关系。 R_x 为水平湿润锋半径; R_z 为垂直湿润锋半径。从图 3 可以看出,随着时间的延长,土壤最大水平湿润半径和湿润深度不断增大。

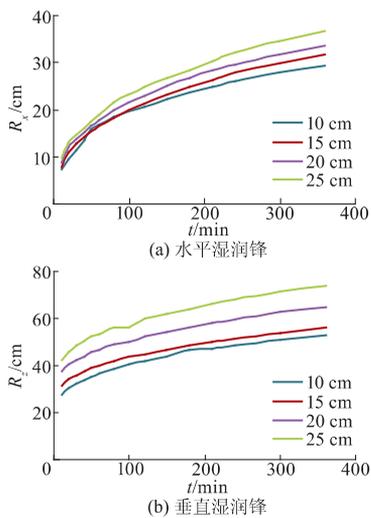


图 3 PVC 产品土壤湿润锋运移曲线

Fig. 3 Wetted front position at different lengths of PVC sleeve

根据土壤水分运动湿润锋与时间理论关系进行分析,土壤最大水平湿润半径和湿润深度与时间呈幂函数关系,拟合公式符合式(4) - (5)。

$$R_{x_1} = A_1 t^{0.38}, \quad (4)$$

$$R_{z_1} = B_1 t^{0.17}, \quad (5)$$

式中: R_{x_1} 为 PVC 材料的土壤最大水平湿润半径, cm; R_{z_1} 为 PVC 材料的土壤垂直湿润深度, cm; A_1, B_1 为拟合参数。

用式(4) - (5)对图 3 中不同 PVC 产品的湿润

锋运移曲线数据进行拟合,可得土壤入渗湿润锋运移距离与入渗时间的关系,如表 3 所示。

表 3 PVC 产品湿润锋运移距离与入渗时间的关系

Tab.3 Relationship between depth of wetted front and time at different lengths of PVC sleeve

l/cm	水平湿润锋关系	R^2	垂直湿润锋关系	R^2
10	$R_x = 3.19 t^{0.38}$	0.988	$R_z = 19.21 t^{0.17}$	0.991
15	$R_x = 3.39 t^{0.38}$	0.999	$R_z = 20.75 t^{0.17}$	0.991
20	$R_x = 3.74 t^{0.38}$	0.998	$R_z = 23.88 t^{0.17}$	0.988
25	$R_x = 3.95 t^{0.38}$	0.999	$R_z = 27.08 t^{0.17}$	0.987

由表 3 可以看出,参数 A_1 和 B_1 随套筒长度的增大而增大,则 PVC 材料下,土壤容重为 1.35 g/cm^3 ,初始含水率为 7% 的黏壤土,土壤入渗湿润锋运移距离与入渗时间的关系为

$$R_{x_1} = (0.0526l + 2.647) t^{0.38}, \quad R^2 = 0.988, \quad (6)$$

$$R_{z_1} = (0.5348l + 13.371) t^{0.17}, \quad R^2 = 0.978. \quad (7)$$

2.2.2 PP 棉产品湿润体与时间的关系

图 4 显示了不同管长的 PP 棉产品下,土壤最大水平湿润半径和湿润深度与时间的关系。从图 4 可以看出,随着时间的延长,土壤最大水平湿润半径和湿润深度不断增大,而且增加速度随套筒长度的增大而增大。

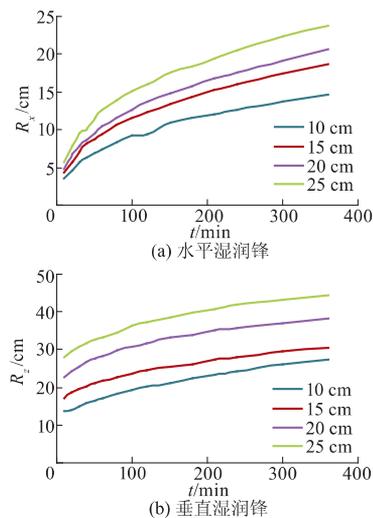


图 4 PP 棉材料土壤湿润锋运移曲线

Fig. 4 Wetted front position at different lengths of PP sleeve

根据土壤水分运动湿润锋与时间理论关系进行分析,土壤最大水平湿润半径和湿润深度与时间呈幂函数关系,拟合公式符合式(8) - (9)。

$$R_{x_2} = A_2 t^{0.40}, \quad (8)$$

$$R_{z_2} = B_2 t^{C_2}, \quad (9)$$

式中: R_{x_2} 为 PP 棉产品土壤最大水平湿润半径, cm; R_{z_2} 为 PP 棉产品土壤垂直湿润深度, cm; A_2, B_2, C_2 为拟合参数。

用式(8) - (9)对图4中不同 PP 棉产品的湿润锋运移曲线数据进行拟合,可得土壤入渗湿润锋运移距离与入渗时间的关系,如表4所示。

表 4 PP 棉材料湿润锋运移距离与入渗时间的关系

Tab.4 Relationship between depth of wetted front and time at different lengths of PP sleeve

l/cm	水平湿润锋关系	R ²	垂直湿润锋关系	R ²
10	$R_x = 1.55t^{0.40}$	0.998	$R_z = 8.45t^{0.20}$	0.971
15	$R_x = 2.01t^{0.40}$	0.999	$R_z = 11.18t^{0.17}$	0.989
20	$R_x = 2.21t^{0.40}$	0.999	$R_z = 15.78t^{0.15}$	0.994
25	$R_x = 2.55t^{0.40}$	0.997	$R_z = 20.68t^{0.13}$	0.981

由表4可以看出,参数 A_2, B_2 随套筒长度的增大而增大,参数 C_2 随着套筒长度的增大而减小,则 PP 棉材料下,土壤容重为 1.35 g/cm^3 ,初始含水率为 7.0% 的黏壤土,土壤入渗湿润锋运移距离与入渗时间的关系为

$$R_{x_2} = (0.0640l + 0.960)t^{0.40} \quad R^2 = 0.978, \quad (10)$$

$$R_{z_2} = (0.8258l - 0.429)t^{(0.243 - 0.0046l)} \quad R^2 = 0.985, \quad (11)$$

2.3 湿润体特征值预测模型

采用涌泉根灌灌水时,因为土壤入渗湿润体呈“梨”形分布,所以土壤最大水平湿润半径出现在地表下,一般情况下,只能观测到土壤表面水平湿润锋的运移状况.建立土壤表面水平湿润半径与最大水平湿润半径和湿润深度的关系,可以根据表面水平湿润半径推求最大水平湿润半径和湿润深度。

2.3.1 PVC 材料湿润体特征值预测模型

由式(2)可知,土壤表面水平湿润半径与时间的对数呈线性关系,与 PVC 材料的套筒长度无关,所以,式(2)可以变换为

$$t_{s_1} = e^{\left(\frac{R_{s_1} + 34.883}{9.745}\right)}, \quad (12)$$

根据土壤表面水平湿润半径,由式(12)可以求得涌泉根灌灌水时间.已知灌水时间以及 PVC 材料的套筒长度,根据式(6) - (7)得到土壤最大水平湿润半径和湿润深度,即

$$R_{x_1} = (0.0526l + 2.647) \left[e^{\left(\frac{R_{s_1} + 34.883}{9.745}\right)} \right]^{0.38}, \quad (13)$$

$$R_{z_1} = (0.5348l + 13.371) \left[e^{\left(\frac{R_{s_1} + 34.883}{9.745}\right)} \right]^{0.17}. \quad (14)$$

2.3.2 PP 棉材料湿润体特征值预测模型

由式(3)可知,土壤表面水平湿润半径与时间的对数呈线性关系,与 PP 棉材料的套筒长度无关,所以,式(3)可以变换为

$$t_{s_2} = e^{\left(\frac{R_{s_2} + 28.287}{7.235}\right)}. \quad (15)$$

根据土壤表面水平湿润半径,由式(15)可以求得涌泉根灌灌水时间,有了灌水时间,以及 PVC 材料的套筒长度,就可以根据式(10)和(11)得到土壤最大水平湿润半径和湿润深度,即

$$R_{x_2} = (0.0640l + 0.960) \left[e^{\left(\frac{R_{s_2} + 28.287}{7.235}\right)} \right]^{0.40}, \quad (16)$$

$$R_{z_2} = (0.8258l - 0.429) \left[e^{\left(\frac{R_{s_2} + 28.287}{7.235}\right)} \right]^{(0.243 - 0.0046l)}. \quad (17)$$

2.4 湿润体特征值预测模型的验证

分别用 PVC 和 PP 棉材料,套筒长度为 30 cm 的实测资料对经验公式(13), (14), (16)和(17)进行验证,实测值(M_s)、模拟值(M_m)及相对误差(δ)如表5所示。

表 5 涌泉根灌 PVC 产品湿润体特征值预测误差分析表
Tab.5 Error in size of wetted body between predicted and measured values for PVC sleeve

t/min	M_s /cm			M_m /cm		δ /%	
	R_{x_1}	R_{z_1}	R_{z_1}	R_{x_1}	R_{z_1}	R_{x_1}	R_{z_1}
10	0	10.2	42.4	—	—	—	—
20	0	13.3	45.8	—	—	—	—
30	0	15.1	48.7	—	—	—	—
40	0	16.7	50.5	—	—	—	—
50	2.3	18.7	52.3	18.0	56.3	3.4	7.6
60	5.4	20.2	54.6	20.3	59.3	0.4	8.8
80	8.3	23.3	57.3	22.8	62.5	2.1	9.1
100	10.1	24.7	59.4	24.4	64.4	1.1	8.6
120	11.9	26.6	62.8	26.2	66.6	1.5	6.0
150	14.0	28.7	64.9	28.5	69.1	0.8	6.4
180	15.8	30.2	67.6	30.5	71.2	0.9	5.3
210	17.4	32.2	69.2	32.4	73.2	0.6	5.8
240	18.7	33.9	72.9	34.2	75.0	1.0	2.8
300	20.2	36.3	74.4	36.2	76.9	0.3	3.4
360	22.3	38.7	76.9	39.3	79.8	1.6	3.8
平均值						1.2	6.1

由表5可知,用式(13) - (14)计算出 PVC 材

料下 R_{x_1} 预测值的最大相对误差为 3.4% ,最小相对误差 0.4% ,平均相对误差为 1.2% ; R_{z_1} 预测值的最大相对误差为 9.1% ,最小相对误差为 2.8% ,平均相对误差为 6.1% ,说明此模型的计算精度较高. 该模型是用 PVC 材料下 ,套筒直径为 4.4 cm ,套筒长度为 10 ,15 ,20 及 25 cm 的实测资料推求出的 ,经验证 ,套筒直径为 4.4 cm ,套筒长度为 30 cm 的土壤入渗湿润体特性值同样适用.

表 6 涌泉根灌 PP 棉产品湿润体特征值预测误差分析表
Tab.6 Error in size of wetted body between predicted and measured values for PP sleeve

t/min	M_s/cm			M_m/cm		$\delta/\%$	
	R_{s_1}	R_{s_2}	R_{z_2}	R_{x_2}	R_{z_2}	R_{z_2}	R_{x_2}
10	0	5.0	33.1	—	—	—	—
20	0	8.6	34.1	—	—	—	—
30	0	10.1	35.3	—	—	—	—
40	0	10.7	36.3	—	—	—	—
50	0	12.4	37.1	—	—	—	—
60	1.7	13.8	38.6	15.1	37.6	9.2	2.6
80	3.0	14.9	39.8	16.2	38.3	8.6	3.7
100	4.7	16.7	41.3	17.8	39.3	6.8	4.9
120	6.2	18.5	42.7	19.4	40.2	5.0	6.0
150	7.2	20.0	43.6	20.5	40.8	2.7	6.5
180	9.0	21.8	44.6	22.6	41.8	3.5	6.2
210	9.8	22.7	45.3	23.6	42.3	3.8	6.7
240	10.8	24.3	46.0	25.1	43.0	2.9	6.6
300	12.9	26.8	46.9	28.1	44.3	4.7	5.5
360	14.6	30.0	47.3	30.9	45.4	3.1	4.1
平均值						5.0	5.2

由表 6 可知 ,用式 (16) - (17) 计算出 PP 棉材料下 R_{x_2} 预测值的最大相对误差为 9.2% ,最小相对误差为 2.7% ,平均相对误差为 5.0% ; R_{z_2} 预测值的最大相对误差为 6.7% ,最小相对误差为 2.6% ,平均相对误差为 5.2% ,说明此模型的计算精度较高. 该模型是用 PP 棉材料下套筒直径为 5.0 cm ,套筒长度为 10 ,15 ,20 及 25 cm 的实测资料推求出的 ,经验证 ,套筒直径为 5.0 cm ,套筒长度为 30 cm 的土壤入渗湿润体特性值同样适用.

由表 5 可以看出 ,表 5 中预测的 R_{z_1} 均比实测值小 ,而表 6 中预测的 R_{z_2} 均比实测值大. 原因是 ,文中试验滴头入渗面属于垂直柱状地下入渗 ,随着管长的增大 ,水平方向水分与土壤接触面增大 ,且在灌水过程中套管内会有一定高度的水柱 ,形成有压渗灌 ,管长愈长 ,压力愈大 ,所以 ,表 5 中预测的 R_{z_1} 均比实测值小. 而 PP 棉材料的套筒对水柱有一定的减压作用 ,所以表 6 中预测的 R_{z_2} 均比实测值大. 此外 ,在土壤表面湿润半径开始出现时 ,模型预测误差较大 ,随着时间推移 ,预测误差逐渐变小 ,这是

由于试验时表层装土不均造成的.

3 结 论

1) 土壤表面水平湿润半径与最大水平湿润半径和湿润深度的变化规律基本一致 ,均随着时间的增大而增大; 涌泉根灌相同材料的不同套筒长度对土壤表面水平湿润锋的运移无明显影响 ,可用同一关系式表述.

2) 随着时间的增大 ,土壤最大水平湿润半径和湿润深度不断增大 ,且符合幂函数关系; 在同一时间 ,土壤最大水平湿润半径和湿润深度随着涌泉根灌配套产品套筒长度的增大而增大.

3) 随着 PP 棉材料套筒长度的变化 ,土壤垂直入渗深度与时间的关系并不是一个固定的幂指数关系 ,幂指数随套筒长度的增大呈逐渐减小的线性关系 ,这与 PVC 材料土壤入渗特性的不同之处.

4) 文中研究建立在恒定压力水头和定土壤容重条件下 ,对于在不同土壤初始含水率和不同土壤容重条件下 ,涌泉根灌不同配套产品土壤入渗特性的变化关系 ,还有待进一步研究.

参考文献 (References)

- [1] Mubarak I , Mailhol J C , Angulo - J R , et al. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation [J]. Geoderma , 2009 , 150(1/2) : 158 - 165.
- [2] Bhatnagar P R , Chauhan H S. Soil water movement under a single surface trickle source [J]. Agricultural Water Management , 2008 , 95(7) : 799 - 808.
- [3] Cote C M , Bristow K L , Charlesworth P B , et al. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation [J]. Irrigation Science , 2003 , 22(3/4) : 143 - 156.
- [4] Patel N , Rajput T B S. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion [J]. Agricultural Water Management , 2008 , 95(12) : 1335 - 1349.
- [5] 梁海军 , 刘作新 , 王振营 , 等. 地下渗灌土壤水分运动数值模拟 [J]. 农业工程学报 , 2008 , 24(10) : 11 - 14. Liang Haijun , Liu Zuoxin , Wang Zhenying , et al. Numerical simulation of soil water movement under infiltration irrigation [J]. Transactions of the CSAE , 2008 , 24(10) : 11 - 14. (in Chinese)
- [6] 曾辰 , 王全九 , 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响 [J]. 农业工程学报 , 2010 , 26(1) : 24 - 30.

(下转第 828 页)

87. (in Chinese)
- [4] Irmak S , Kabenge I , Skaggs K E , et al. Trend and magnitude of changes in climate variables and reference evapotranspiration over 116-yr period in the Platte River Basin , central Nebraska – USA [J]. *Journal of Hydrology* , 2012 , 420/421: 228 – 244.
- [5] Liu Changming , Zhang Dan , Liu Xiaomang , et al. Spatial and temporal change in the potential evapotranspiration sensitivity to meteorological factors in China (1960—2007) [J]. *J Geogr Sci* , 2012 , 22(1) : 3 – 14.
- [6] 马鹏里 杨兴国 陈端生 等. 农作物需水量随气候变化的响应研究 [J]. *西北植物学报* , 2006 , 26(2) : 348 – 353.
Ma Pengli , Yang Xingguo , Chen Duansheng , et al. Responses of crop water requirements to climatic changes [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* , 2006 , 26(2) : 348 – 353. (in Chinese)
- [7] Shadmani Mojtaba , Marofi Safar , Roknian Majid. Trend analysis in reference evapotranspiration using Mann – Kendall and Spearman’s Rho tests in arid regions of Iran [J]. *Water Resources Management* , 2012 , 26(1) : 211 – 224.
- [8] Gong Lebing , Xu Chongyu , Chen Deliang , et al. Sensitivity of the Penman – Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin [J]. *Journal of Hydrology* , 2006 , 329(3/ 4) : 620 – 629.
- [9] 陕西省水利水土保持厅 , 西北农业大学. 陕西省作物需水量及分区灌溉模式 [M]. 北京: 水利电力出版社 , 1992.
- [10] Ssegane H , Tollner E W , Mohamoud Y M , et al. Advances in variable selection methods I: Causal selection methods versus stepwise regression and principal component analysis on data of known and unknown functional relationships [J]. *Journal of Hydrology* , 2012 , 438/ 439: 16 – 25.
- [11] 李相虎 赵鑫 任立良. 石羊河流域近 50 a 来水资源变化的定量分析 [J]. *河海大学学报: 自然科学版* , 2007 , 35(2) : 164 – 167.
Li Xianghu , Zhao Xin , Ren Liliang. Quantitative analysis of water resources variation for Shiyang River Basin for recent 50 years [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences* , 2007 , 35(2) : 164 – 167. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)

(上接第 810 页)

- Zeng Chen , Wang Quanjiu , Fan Jun. Effect of initial water content on vertical line-source infiltration characteristics of soil [J]. *Transactions of the CSAE* , 2010 , 26(1) : 24 – 30. (in Chinese)
- [7] 王振华 郑旭荣 任杰 等. 灌水频率对地下滴灌线源入渗土壤水分运动规律影响的试验研究 [J]. *水利学报* , 2007 , 38(S1) : 299 – 302.
Wang Zhenhua , Zheng Xurong , Ren Jie , et al. Study on effects of irrigation frequency on soil water-transport of line source permeation under subsurface drip irrigation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* , 2007 , 38(S1) : 299 – 302. (in Chinese)
- [8] 程慧娟 王全九 白云岗 等. 垂直线源灌线源长度对湿润体特性的影响 [J]. *农业工程学报* , 2010 , 26(6) : 32 – 37.
Cheng Huijuan , Wang Quanjiu , Bai Yungang , et al. Influence of line source length of vertical line source irrigation on wetted soil change characteristics [J]. *Transactions of the CSAE* , 2010 , 26(6) : 32 – 37. (in Chinese)
- [9] 黎朋红 , 汪有科 , 马理辉 等. 涌泉根灌湿润体特征值变化规律研究 [J]. *水土保持学报* , 2009 , 23(6) : 190 – 194.
Li Penghong , Wang Youke , Ma Lihui , et al. Study on eigenvalues of wetted soil under surge root irrigation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* , 2009 , 23(6) : 190 – 194. (in Chinese)
- [10] 牛文全 樊晓康 周 Xiaobo 等. 初始含水率对涌泉根灌土壤渗透特征的影响 [J]. *排灌机械工程学报* , 2012 , 30(4) : 491 – 496.
Niu Wenquan , Fan Xiaokang , Zhou Xiaobo , et al. Effect to initial water content on soil infiltration characteristics during bubble irrigation [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* , 2012 , 30(4) : 491 – 496. (in Chinese)

(责任编辑 谈国鹏)