

PP棉孔径对涌泉根灌入渗特性的影响

郭子悦^{1,2}, 代智光³, 任乐言^{1,2}, 万奇霖^{1,2}, 朱寄子星^{1,2},
李世纪^{1,2}, 任利宇⁴, 蔡耀辉^{5,6}

- (1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;
3. 河南科技大学 农业工程学院, 河南 洛阳 471003;
4. 陕西崇仁水利工程有限公司, 陕西 西安 710000;
5. 西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100;
6. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探明将PP棉作为黄土高原苹果涌泉根灌配套套管时的最佳孔径, 以陕西延安黄绵土为例, 开展室内土箱试验, 采用对比试验设计, 研究不同孔径PP棉(1 μm 、10 μm 、20 μm 和 50 μm)作为涌泉根灌套管时对土壤水分入渗特性的影响。结果表明: 不同PP棉孔径时, 水分入渗所形成湿润体的形状均近似为椭球形, 各方向湿润锋的运移距离与入渗时间均符合幂函数关系($P < 0.05$); 通过对比不同PP棉孔径的湿润体特性, 确定PP棉孔径为50 μm 时, 湿润体的湿润锋运移距离、湿润体体积和湿润体内高含水率区域均最大, 且在再分布过程中, 湿润体内土壤水分分布也最均匀。研究结果可为套管参数选取提供理论依据, 对涌泉根灌技术在黄土高原地区苹果园大面积推广具有重要意义。

关键词: 涌泉根灌; 湿润锋; 湿润体; 水分分布; 孔径

中图分类号: S275.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)06—0204—07

Effects of Pore Size of PP Cotton on the Infiltration Characteristics of Surge-root Irrigation

GUO Ziyue^{1,2}, DAI Zhiguang³, REN Leyan^{1,2}, WAN Qilin^{1,2}, ZHU Jizixing^{1,2},
LI Shiji^{1,2}, REN Liyu⁴, CAI Yaohui^{5,6}

- (1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid in Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. College of Agricultural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, He'nan 471003, China;
4. Shaanxi Chongren Water Conservancy Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China;
5. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
6. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The surge-root irrigation supporting casing has significant effects on its outflow process. In order to find out the optimal pore size of PP cotton as a supporting casing for surge-root irrigation in apple on the Loess Plateau, an indoor soil box test was carried out on the example of Yan'an yellow sandy soil in Shaanxi Province, and a comparative experimental design was used to analyze the effects of different pore sizes of PP cotton (1 μm , 10 μm , 20 μm and 50 μm).

收稿日期: 2023-08-11

修稿日期: 2023-09-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900700); 国家自然科学基金项目(52069016); 陕西省“两链”融合重点专项(2023LLRH-01); 唐仲英基金会项目; 西北农林科技大学大学生创新创业训练计划项目(NO. S202110712551)

作者简介: 郭子悦(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: 1756121364@qq.com

通讯作者: 蔡耀辉(1991—), 男, 副研究员, 主要从事节水灌溉理论与技术研究工作。E-mail: yaohui_cai@163.com

μm) on the soil moisture infiltration characteristics when used as a casing for surge-root irrigation. The results are as follows. Under different PP cotton pore sizes, the shape of the wetting body formed by water infiltration was approximately ellipsoidal, and the transport distance of the wetting front in each direction was in line with the power function relationship with the infiltration time ($P < 0.05$). By comparing the characteristics of the wetting body with different PP cotton pore sizes, it was determined that when the pore size of the PP cotton was $50\ \mu\text{m}$, the transport distance of the wetting front of the wetting body, the wetting body volume, and the region of high water content within the wetting body were all the largest, and the redistribution process was also the largest, and the redistribution process was the largest. In the redistribution process, the distribution of soil moisture in the wetted body is also the most uniform one. The results of the study can provide theoretical basis for the selection of casing parameters, which is of great significance for the large-scale popularization of surge-root irrigation in apple orchards in the Loess Plateau region.

Keywords: surge-root irrigation; moist front; moist bodies; moisture distribution; pore size

黄土高原地区土壤干旱,降水时空分布不均,日间蒸发量大,导致作物生长所需水分供求出现矛盾^[1],不利于作物生长发育,造成作物大面积减产,严重制约当地农业的可持续发展^[2]。为提高灌溉水分利用效率,增加作物产量,喷灌、滴灌、微喷灌、涌泉根灌等多种先进的节水灌溉技术已得到推广应用^[3-4]。其中涌泉根灌是采用套管将大流量灌水器与土壤隔离,通过灌水器直接将水肥输送到作物根区的灌溉技术,有效避免了地表蒸发和深层渗漏,提高了作物水分利用效率,极大程度地改善了灌水器堵塞问题,同时不受地形条件限制,适合在黄土高原地区大面积推广^[5-6]。

自涌泉根灌技术提出以来^[7],历经十余年,国内外相关学者对涌泉根灌技术开展了大量研究,并取得一系列成果。针对涌泉根灌技术在田间应用效果,Dai等^[8-9]对黄土高原枣树进行了涌泉根灌水氮耦合试验,研究表明,涌泉根灌能有效提高枣树水肥利用效率。李哲等^[10]以陕北山地苹果为研究对象,建立了涌泉根灌条件下苹果树蒸腾蒸发量关于叶面积指数的估算模型,对陕北山地苹果涌泉根灌灌溉制度制定提供理论支撑。Hao等^[11]对陕北山地苹果进行调亏灌溉,分析了苹果各物候期的耗水规律和土壤根部含水率对果树光合特性、果实产量和品质的影响,发现在苹果萌芽展叶期和果实膨大期进行调亏灌溉可稳定苹果产量,提高苹果品质。

以上田间试验的研究结果均为黄土高原山地果树灌溉管理提供了理论指导,但在实际应用中,由于灌水技术参数设置不合理而降低水分利用效率的问题依然存在。土壤水分入渗能力直接影响灌溉水分的利用效率,因此,明晰涌泉根灌下土壤水分入渗特性,确定合理的灌水技术参数至关重要。近年来,相关学者对涌泉根灌土壤水分入渗特性进行了深入研

究。汪有科等^[12]在黄土坡地利用剖面法研究涌泉根灌不同孔径、孔深条件下土壤水分运移规律,确定涌泉根灌适宜孔径深度为 $30\ \text{cm} \sim 40\ \text{cm}$,孔洞直径为 $6\ \text{cm}$;牛文全等^[13]通过室内土箱试验,研究涌泉根灌条件下土壤初始含水率对均质土壤水分扩散的影响,结果表明初始含水率对湿润体大小有显著影响,且随着土壤含水率增加,各向湿润锋速度及湿润体内水分分布均匀度均不断增大;刘风华等^[14]以江西红壤土为例开展室内试验,结果表明土壤初始入渗能力随容重增加而减小,土壤水分入渗衰减速度随容重增大而增大;赵新宇等^[15]研究了相同灌水量下,灌水流量对涌泉根灌湿润体的影响,室内土壤试验结果表明灌水流量越大,湿润体形状越扁平;何振嘉等^[16]将黄土高原枣园试验区原状土作为观测面,研究涌泉根灌湿润体水氮运移特征规律,试验表明涌泉根灌入渗能力与肥液质量浓度呈正相关;代智光等^[17]通过土壤剖面入渗试验,研究灌水器埋深对涌泉根灌双点源交汇入渗特性的影响,结果表明,涌泉根灌条件下,灌水器埋深对红壤土水氮运移分布有显著影响,且埋深超过 $60\ \text{cm}$ 时,造成氮肥淋失,不利于作物吸收。

上述研究主要集中于灌水技术参数和土壤物理参数等,但涌泉根灌的出流过程是灌水器 and 套管共同影响的结果,灌水器材料的选择对其水力性有显著影响^[18-19]。目前在实际的田间应用中,涌泉根灌灌水器及配套套管制作材料多为聚丙烯材料,但该材料在田间长时间留存是否会通过降解引起环境污染的问题尚需明确^[20]。已有研究中有学者将PP棉滤芯作为配套套管,该套管以不易产生二次污染的聚丙烯为材料,通过热熔方式缠绕而成^[21],且压差稳定,不易产生土壤颗粒和根系堵塞,价格低廉,使用寿命长。

陈俊英等^[22]以室内土箱试验为基础,研究 PVC 和 PP 棉两种套管材料对涌泉根灌土壤入渗湿润体特性的影响,结果表明灌水后两种材料所形成的土壤表面湿润半径均与时间的自然对数呈线性关系,并建立了由表面湿润半径反演最大水平湿润半径和深度的预测模型;刘珂瑶等^[23]采用室内土箱试验,研究将 PP 棉作为涌泉根灌滤芯时灌水器流量和套管长度对土壤入渗的交互作用,结果表明灌水器流量为 12 L/h、套管长度为 40 cm 的配套组合最有利于土壤水分运移。

综上,目前对涌泉根灌技术研究主要集中在田间布设和材料选择等方面,但关于不同孔径 PP 棉对涌泉根灌入渗特性的研究未见报道。本试验选用不同孔径 PP 棉作为涌泉根灌套管,研究不同孔径 PP 棉对涌泉根灌出流特性的影响,揭示不同孔径对土壤入渗特性的影响机制,以期为涌泉根灌技术的应用提供指导依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

涌泉根灌土壤入渗试验在西北农林科技大学旱区节水农业研究院灌溉水力学试验大厅进行。试验系统由供水装置、灌水装置、土箱和土壤水分传感器 4 部分组成,如图 1(a) 所示。其中供水装置由水箱、水泵和输水管道等组成;灌水装置由灌水器 and 不同孔径 PP 棉套管组成,不同孔径 PP 棉微观结构如图 1(b) 所示,PP 棉套管长度为 40 cm,内径为 2.8 cm,厚度为 1.7 cm。灌水装置埋置于土箱一角,以模拟实际大田中 1/4 的土壤水分入渗情况,进水口距土壤表层 10 cm^[23]。黄土高原地区矮化密植苹果树根系主要集中在 0~80 cm 土层^[24],为较好地确定苹果根系湿润体区域,选择规格为 45 cm×45 cm×75 cm 的有机玻璃土箱,土箱底部与分层土壤中不透水层特征一致^[25]。

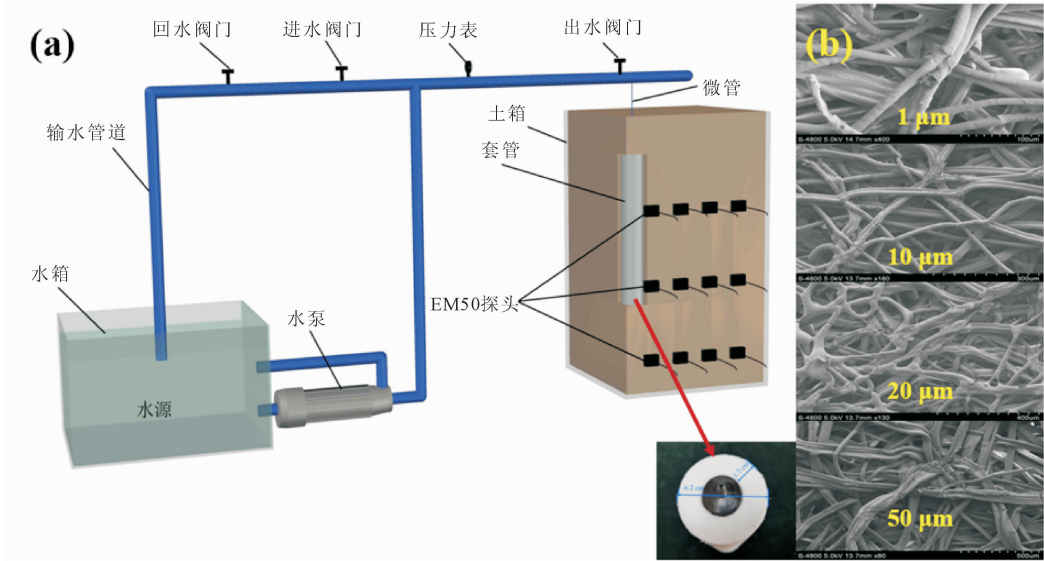


图 1 试验装置、灌水器 and PP 棉套管细部结构及电镜扫描示意图

1.2 供试土壤

供试土壤为田间原状土,取自陕西省延安市宝塔区苹果园距土壤表面 0~75 cm 处,土壤类型为黄绵土。试验前土壤经自然风干、碾压、粉碎后过 2 mm 筛,按每层 10 cm 装入土壤,层间打毛。土壤颗粒组成由马尔文激光粒度分析仪 MS2000 测定,具体结果见表 1,按照国际制,判定该土壤质地为砂壤土。试验过程中用塑料薄膜覆盖土壤表面,以防止土壤水分蒸发干扰试验结果。

1.3 观测指标

试验各处理灌水量相同,灌水量计算公式如下:

$$m = \gamma zp(\theta_{\max} - \theta_{\min}) \tag{1}$$

式中: m 为灌水定额,mm; γ 为土壤密度,取 1.35 g/cm³; z 为计划湿润层深度,取 0.75 m; p 为湿润比,取 0.35; $\theta_{\max}, \theta_{\min}$ 为土壤含水率上下限(质量百分比),本试验分别取 41.08% 和 1.89%。

表 1 供试土壤物理性状

土壤类型	颗粒组成/%			自然风干后土壤含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)
	黏粒	粉粒	砂粒		
黄绵土	16.15	28.36	55.49	1.89	1.35

经计算,总灌水量为 7 L。试验设置了 4 个不同

孔径 PP 棉(1 μm、10 μm、20 μm 和 50 μm),试验设计方案见表 2。本试验灌水器流量为 4 L/h,试验时模拟大田试验 1/4 湿润体情况,因此实际灌水器流量取大田使用流量的 1/4 进行室内土箱试验, $Q=1$ L/h。

表 2 不同孔径 PP 棉试验设计方案

设计方案	H1	H2	H3	H4
套管孔径/μm	1	10	20	50

入渗开始后,用秒表计时,定时观测所形成湿润体在竖直向上方向、竖直向下方向和水平方向湿润锋的变化情况,并按照先密后疏的原则在有机玻璃外壁描出不同时刻所对应湿润体的形状,并用毫米钢板刻度尺测量湿润锋运移距离,并利用 EM50 土壤水分监测系统(Decagon 公司,美国)测定土壤含水率,共设置 12 个土壤水分传感器(布设方式见图 1(a)),横向间距为 9 cm,竖向间距为 25 cm,每 10 min 测定一次。

1.4 数据处理

所有数据采用 SPSS 26 进行分析,采用 Origin 2018 软件绘制湿润锋运移图, Surfer 15 软件绘制土

壤水分分布及再分布图。

2 结果与分析

2.1 不同孔径 PP 棉对涌泉根灌湿润体形状的影响

图 2 为不同套管孔径时水平、竖直向上和竖直向下方向上湿润锋随时间的动态变化曲线。由图 2 可以看出,不同设计方案沿各方向湿润锋运移距离变化趋势基本相同,均随入渗时间增加而不断增大,且湿润锋运移速率随时间推移表现出不断减小的趋势,最终趋于稳定。灌水结束时,各设计方案(H1, H2, H3, H4)在水平方向湿润锋运移距离依次为 20.0 cm、24.0 cm、31.1 cm、31.4 cm,竖直向上方向湿润锋运移距离依次为 12.0 cm、19.4 cm、18.8 cm、21.8 cm,竖直向下方向上湿润锋运移距离均超过土箱边界。综合比较各设计方案,发现 H4 设计方案,即套管孔径为 50 μm 时,竖直向下方向上的湿润锋运移速率最大,在灌水开始 100 min 后,最先到达土箱边界,灌水结束时水平方向和竖直向上方向上湿润锋运移距离最大。

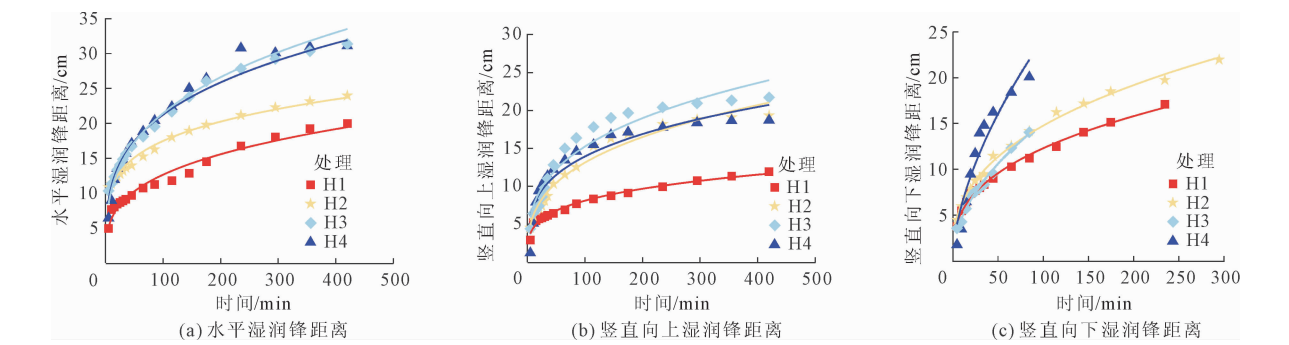


图 2 不同 PP 棉孔径湿润锋动态变化

经分析,不同设计方案在水平、竖直向上和竖直向下方向上所形成湿润锋运移距离均与入渗时间呈幂函数关系,即 $R(t)=ab^t$,结果如表 3 所示。可以看出,各拟合方程的相关系数 R^2 均在 0.89 以上,且

均大于 0.05 显著性水平对应的临界相关系数 ($R_{0.05}=0.514$),这说明表 3 各方程能较好地拟合涌泉根灌土壤入渗湿润锋与入渗时间的关系。

表 3 湿润锋运移距离幂函数拟合结果

设计方案	水平方向		竖直向下		竖直向上	
	公式	R^2	公式	R^2	公式	R^2
H1	$R(t)=3.21t^{0.30}$	0.97	$R(t)=2.33t^{0.36}$	0.99	$R(t)=2.57t^{0.25}$	0.98
H2	$R(t)=6.64t^{0.21}$	0.98	$R(t)=2.59t^{0.38}$	0.99	$R(t)=2.94t^{0.33}$	0.97
H3	$R(t)=5.17t^{0.31}$	0.98	$R(t)=1.54t^{0.60}$	0.92	$R(t)=3.95t^{0.28}$	0.89
H4	$R(t)=5.80t^{0.28}$	0.99	$R(t)=1.42t^{0.51}$	0.99	$R(t)=3.61t^{0.31}$	0.94

灌水结束后,土壤水分继续运移,但运移的速率远小于灌水开始时的运移速率。表 4 为灌水结束后 24 h 后湿润锋的运移距离,可以看出再分布过程中各方向湿润锋变化幅度随套管孔径的增大而减小,其中 H1 设计方案水平方向和竖直向上方向上湿润锋的变化幅度分别为 34.0% 和 45.8%,变化幅度最大,H4 设计方案水平方向和竖直向上方向上湿润锋的变化幅度分别为 14.0% 和 13.8%,变化幅度最小。

表 4 再分布过程中湿润锋运移距离

设计 方案	水平方向			竖直向上方向		
	灌水结 束/cm	结束后 24 h/cm	变化幅 度/%	灌水结 束/cm	结束后 24 h/cm	变化幅 度/%
H1	20.0	26.8	34.0	12.0	17.5	45.8
H2	24.0	31.0	29.2	19.4	22.5	16.0
H3	31.1	36.6	17.7	18.8	25.1	33.5
H4	31.4	35.8	14.0	21.8	24.8	13.8

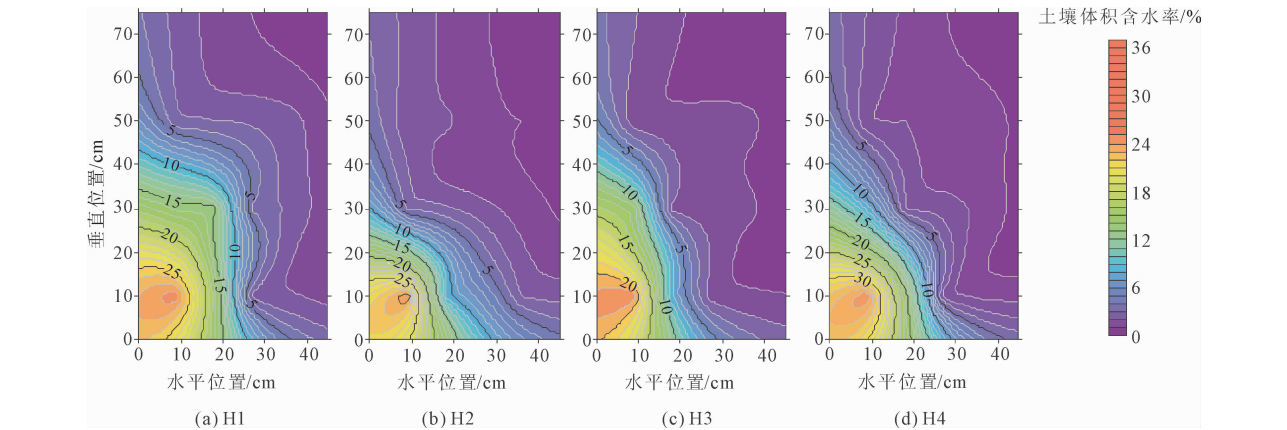


图 3 不同设计方案灌水结束时土壤剖面水分分布图

表 5 湿润体内最高体积含水率 单位:%

设计方案	灌水结束后	灌水结束 24 h	变化幅度
H1	28.58	25.44	11.0
H2	30.92	21.91	29.1
H3	21.57	18.33	15.0
H4	34.91	27.91	20.1

2.3 灌水结束后不同孔径 PP 棉对湿润体内土壤水分再分布的影响

图 4 为不同套管孔径下灌水结束后 24 h 时沿竖直方向湿润体内土壤剖面体积含水率分布图。与灌水结束时各设计方案的湿润体土壤含水率最大值相比,此时湿润体土壤含水率的最大值明显减小,其中 H1 设计方案最高体积含水率变化幅度为 11.0%,H2 设计方案最高体积含水率变化幅度为

2.2 不同孔径 PP 棉对湿润体内土壤水分分布的影响

图 3 为不同套管孔径下灌水结束时沿竖直方向湿润体内土壤剖面体积含水率分布图。观察图 3 可知,受套管埋设位置和长度的影响,灌水结束时,不同孔径所形成湿润体的高含水率区均出现于灌水器下方偏右位置,由表 5 可知,H1 设计方案最高体积含水率为 28.58%,H2 设计方案最高体积含水率为 30.92%,H3 设计方案最高体积含水率为 21.57%,H4 设计方案最高体积含水率为 34.91%。H4 设计方案所形成湿润体的最高含水率远大于其他设计方案。观察湿润体的形状和土壤水分分布规律,发现灌水结束后各设计方案湿润体内的含水率等值线分布由内到外呈由疏到密分布,即距离灌水器越远,土壤含水率越小,水势梯度越大。H4 设计方案形成湿润体的高含水率区域最大,湿润体的体积也越大,且水分分布最均匀,最有利于土壤水分运移。

29.1%,H3 设计方案最高体积含水率变化幅度为 15.0%,H4 设计方案最高体积含水率变化幅度为 20.1%,H2 设计方案变化幅度最大,H1 设计方案变化幅度最小。最高体积含水率减小的原因是在重力势和土壤水势的共同作用下土壤水分由高含水区域向各个方向运移,使水分分布趋于均匀,同时湿润体的体积也明显增大。通过比较得出,灌水结束 24 h 后,H4 设计方案形成湿润体的体积最大,且水分分布最均匀,最有利于土壤水分运移。

3 讨论

土壤湿润体的大小和形状影响着作物的生长状况,对土壤水分入渗特性的研究是选择和布置涌泉根灌灌水器的前提与基础^[26]。涌泉根灌条件下,湿

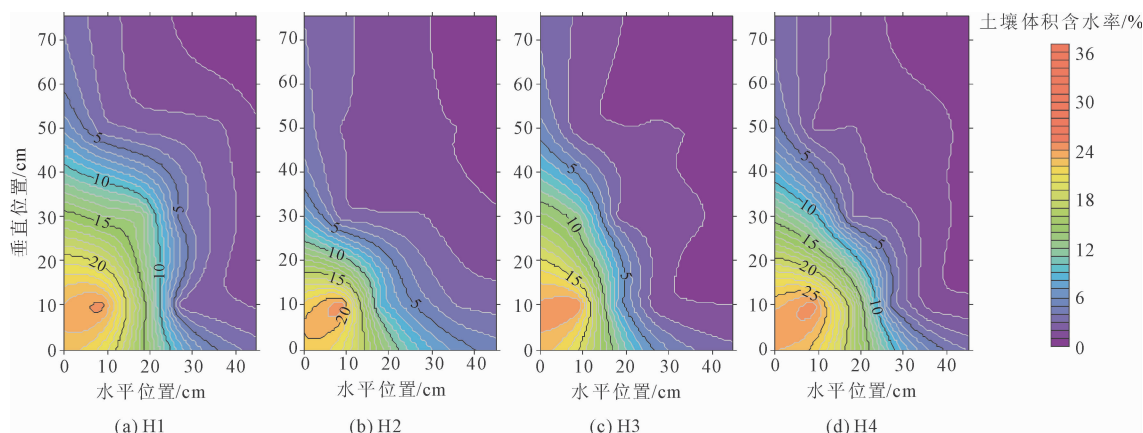


图4 不同设计方案灌水结束24 h土壤剖面水分分布图

润体的位置主要受套管长度的影响,本研究选择40 cm的PP棉套管,所形成的湿润体主要位于土箱底层,水分在土壤底部出现积聚现象。土箱底板类似分层土壤中的不透水层,可以利用该水分积聚现象,将涌泉根灌套管配合分层土壤中的不透水层使用,可以将水分积聚在作物根区。这与孙浩^[27]的研究结论吻合,下衬阻水板可以调整土壤湿润体内的土壤水分分布,使得土壤水分集中于灌水器附近及其上层土壤,从而降低深层渗漏风险,提高灌溉水分利用效率。

入渗初期,水平湿润锋运移速度大于竖直方向运移速度,随着时间的推移,竖直湿润锋运移速度大于水平方向的运移速度。这是由于竖直方向由基质势和重力势共同作用,水平方向只由基质势作为驱动力,随着灌水时间推移,重力势作用越来越明显,最终湿润体的形状为椭球体,这与费良军等^[28]对不同流量下湿润锋运移特性的研究结果一致。

试验结果表明四种设计方案的湿润体最大水平扩散半径均大于竖直入渗深度。这与何振嘉^[29]的研究结果不同,主要原因是本试验所使用的土箱尺寸限制了湿润锋在竖直向下方向的运移。另外,湿润锋竖直向上和竖直向下方向上运移距离出现差异,这是因为相同基质势下,重力势对土壤水分运移起决定性作用,竖直向上方向上,重力势对土壤中水分运移有阻碍作用,竖直向下方向上,重力势会促进土壤中水分运移。

土壤水分运移的驱动力主要来源于基质势与重力势产生的水势梯度^[30],随着入渗时间的延长,湿润锋不断向外延伸,湿润体外边缘的含水率与周围含水率之间的差值逐渐减小,水势梯度随之降低。这与杨喜莲等^[31]研究结果一致,因此,湿润锋运移

速率会随着入渗时间的增加不断降低,湿润锋的各向运移距离与入渗时间存在显著的乘幂关系。

何振嘉等^[20]通过大田试验研究发现,涌泉根灌灌水过程中,在灌水器的配套套管中会形成一定程度的积水,这与本研究的试验现象保持一致。涌泉根灌水分入渗过程中,当供水强度大于土壤水分入渗强度时,会在套管与土壤接触界面上产生积水,所形成的入渗水头会在入渗界面产生压力势,从而增大导水率,加快水分的扩散速度^[32]。这与刘显等^[33]研究结果相似,即积水深度的增加,加大了重力势及管壁侧面与土壤的接触面积,从而加快了湿润锋的运移。

灌水器流量相同时,套管孔径对积水深度的影响较小,这是由于积水深度主要受灌水器流量和土壤特性影响。各套管孔径下的积水深度与入渗历时的关系均呈现迅速变大后趋于平稳的趋势。灌水初期,灌水器出口端周围土壤含水率急速到达饱和,与周围土壤形成较大的水势梯度,水势梯度驱使土壤水分的运移,土壤入渗能力较强,因此套管内部积水深度较小。随着入渗的继续进行,土壤水势梯度不断减小,积水深度不断增大后趋于平稳。这是由于入渗水头的增加会使入渗界面的土壤骨架变形,密实度增加,导水率减小^[34],从而使供水强度与土壤入渗能力达到平衡,积水深度呈现相对平稳的趋势。

4 结 论

本文采用室内土箱模拟试验,研究了灌水器套管孔径对涌泉根灌土壤水分入渗特性的影响,得出以下主要结论:

(1) 涌泉根灌条件下,水分入渗所形成的湿润体形状为椭球体,各方向湿润锋运移距离与入渗时

间均符合幂函数关系。

(2) 相同灌水条件下, PP 棉套管孔径选用 50 μm 时, 湿润锋在竖直向下方向上运移速率最大, 灌水开始 80 min 后最先到达土箱边界, 在水平, 竖直向上方向上运移距离最大, 分别为 31.4 cm 和 21.8 cm。

(3) 涌泉根灌入渗过程中, PP 棉套管孔径选用 50 μm 时, 灌水结束时所形成湿润体和高含水率区域最大, 再分布 24 h 后湿润体内土壤水分分布最均匀。

参考文献:

- [1] 刘 星. 滴灌方式与灌水量对陕北山地苹果园土壤水分、果树生长和产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [2] Zhang Binbin, Su Shunshun, Duan Chenxiao, et al. Effects of partial organic fertilizer replacement combined with rainwater collection system on soil water, nitrate-nitrogen and apple yield of rainfed apple orchard in the Loess Plateau of China: A 3-year field experiment[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 260: 107295.
- [3] Cai Yaohui, Wu Pute, Zhu Delan, et al. Subsurface irrigation with ceramic emitters: An effective method to improve apple yield and irrigation water use efficiency in the semiarid Loess Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 313: 107404.
- [4] 张德儒. 高效节水灌溉技术对于农田效益的提升价值及建设措施[J]. *南方农机*, 2023, 54(13): 78-80.
- [5] Liu Xian, Xu Yueyue. Effect of integration of water and fertilizer on soil water-nitrogen transport characteristics in Bubbled root Irrigation[J]. *Irrigation Science*, 2023, 41: 379-393.
- [6] 陈静航. 毛管布设方式和施肥周期对苹果树细根生长动态和空间分布的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [7] 吴普特, 汪有科, 杨荣慧, 等. 一种适用于树木的地下涌泉根灌方法: 中国, 200810150395[P]. 2008-12-10.
- [8] Dai Zhiguang, Fei Liangjun, Huang Deliang, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen levels on yield, water and nitrogen use efficiency of surge-root irrigated jujube in a semiarid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 146-154.
- [9] Dai Zhiguang, Fei Liangjun, Li Ping, et al. Suitable strategy of water-nitrogen management for surge-root irrigation of jujube in China[J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(4): 1390-1401.
- [10] 李 哲, 费良军, 尹永乐, 等. 涌泉根灌下陕北山地苹果作物系数确定与蒸散量估算[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(2): 209-215.
- [11] Hao Kun, Fei Liangjun, Li Lihua, et al. Comprehen-

- sive evaluation on the yield, quality, and water-nitrogen use efficiency of mountain apple under surge-root irrigation in the loess plateau based on the improved TOPSIS methods[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 853456.
- [12] 汪有科, 黎朋红, 马理辉, 等. 涌泉根灌在黄土坡地的水分运移规律试验[J]. *排灌机械工程学报*, 2010, 28(5): 449-454.
- [13] 牛文全, 樊晓康, 陈俊英. 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.
- [14] 刘风华, 代智光, 费良军. 容重对红壤条件下涌泉根灌水分入渗能力影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 86-90, 97.
- [15] 赵新宇, 胡羊羊, 彭江涌, 等. 灌水流量对涌泉灌及涌泉根灌湿润体影响的研究[J]. *节水灌溉*, 2021(11): 71-73.
- [16] 何振嘉, 傅渝亮. 涌泉根灌湿润体水氮运移特性试验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2019, 37(1): 73-79.
- [17] 代智光, 蔡耀辉. 灌水器埋深对红壤区涌泉根灌双点源入渗水氮运移的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(7): 9-15.
- [18] 牛文鹏, 朱德兰, 党思思, 等. 涌泉根灌灌水器螺纹流道水力特性研究[J]. *节水灌溉*, 2011(12): 13-15.
- [19] 牛文鹏, 朱德兰, 张 琛, 等. 涌泉根灌灌水器抗堵性能试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(5): 44-46, 52.
- [20] 何振嘉, 范王涛, 杜宜春, 等. 涌泉根灌节水灌溉技术特点、应用及展望[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(8): 287-298.
- [21] 官 杰, 高翠玲, 贺祥珂, 等. PP 棉滤芯对饮用水中颗粒物净化效能的研究[J]. *中国标准化*, 2021(19): 220-224.
- [22] 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, 828.
- [23] 刘珂瑶, 吴普特, 朱德兰, 等. 套管长度和灌水器流量对涌泉根灌入渗特性的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(2): 209-216.
- [24] 刘 星, 曹红霞, 廖 阳, 等. 滴灌模式对黄土高原苹果树生长、产量及根系分布的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 57-66, 120.
- [25] El-Nesr N M, Alazba A A, Šimůnek J. Hydrus simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils[J]. *Irrigation Science*, 2014, 32(2): 111-125.

- [100] 鲁志方,杨晓华,晏长根.土工格室植被护坡防膨胀土边坡开裂机理研究[J].公路,2016,61(4):23-28.
- [101] 王成元,肖彩玲,李朝晖.蜂巢格室坡面绿化在城市水土保持中的应用[J].水土保持应用技术,2022(5):42-44.
- [102] 张冰冰,刘杰,阿肯江·托呼提,等.基于响应面法的聚丙烯高强土工格室拉伸性能[J].建筑材料学报,2021,24(6):1348-1360.
- [103] 蒋建良,王华俊,卿翠贵,等.采用土工格室的公路岩质陡坡绿化研究[J].公路,2019,64(4):305-308.
- [104] 陈晓蓉,朱兆华,徐国钢,等.高陡采石场边坡生态修复工程设计初探及效果观测[J].环境保护与循环经济,2019,39(3):42-48.
- [105] 袁以美,叶合欣,罗日洪.植绿生态挡墙及自动浇灌系统研究[J].中国农村水利水电,2020(4):177-180,185.
- [106] 张恒,丁瑜,许文年,等.植被混凝土新型生境构筑基材稳定性分析[J].水利水电技术(中英文),2018,49(4):170-178.
- [107] 李锐,黄永刚,胡筱敏.一种植入型生态护坡的制备工艺及施工方法[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(8):1201-1204.
- [108] 苏奇童,田翊,李中召,等.南太行地区裸岩边坡植被再生技术研究与应用[J].环境生态学,2023,5(7):101-106.
- [109] 刘娜,任国俊,王磊.兴隆山矿山岩质边坡生态修复技术研究[J].金属矿山,2022(10):218-225.
- [110] 李华翔,宁立波,杜博涛,等.岩质边坡生态袋覆绿技术适用条件研究[J].环境科学与技术,2017,40(4):13-18.
- [111] 李凯,程金花,祁生林.永定河流域(北京段)不同生态护岸形式坡面侵蚀及面源污染特征[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(1):74-83.
- [112] 包赛很那,苗彦军,郭云霄,等.西藏林芝地区高等级公路生态袋边坡修复技术应用研究[J].中国水土保持科学,2019,17(3):140-147.
- [113] 周云艳,钱同辉,宋鑫,等.植物根系长度对生态袋加筋土挡墙稳定性的影响[J].农业工程学报,2020,36(13):102-108.
- [114] 蒋希雁,许梦然,陈宇宏.基于三轴试验生态袋加筋土邓肯-张模型参数研究[J].中国农村水利水电,2022(10):219-227.
- [115] 蒋希雁,陈宇宏,许梦然,等.强降雨作用下生态袋护坡入渗规律模型试验研究[J].中国农村水利水电,2022(7):1-9.
- [116] 唐福尧,姚爱军,杨帆,等.岩质高切坡生态再造格宾支护结构大型现场试验研究[C]//贵州省岩石力学与工程学会,中国建筑学会工程勘察分会,中国水利学会勘测专业委员会,中国岩石力学与工程学会滑坡与工程边坡分会,北京华森启达企业管理咨询有限公司.第十二届全国边坡工程技术大会论文集,2020:360-367.
- [117] 杨果林,张梓振,杜勇立,等.煤矸石组合式加筋挡土墙现场试验研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(7):1382-1390.
- [118] 李慈航,吴红刚,陈小云.格宾-桩板墙泥石流组合拦阻结构模型试验研究[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(4):71-76.
- [119] 杨凡,张志红,吴长路,等.格宾网箱覆绿功能过滤层优化设计研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(5):235-239.
- [120] 戴德江,黄骤屹,徐仁华,等.西南高速公路岩质边坡生态防护安全性及耐久性正效应分析[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(10):153-157.

(上接第 210 页)

- [26] 李中杰.不同灌溉技术和灌水量的陕北山地苹果节水增产提质效应研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [27] 孙浩,黄修桥,韩启彪,等.下衬阻水板宽度对地下滴灌土壤水分运移的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(2):64-71.
- [28] 何振嘉.涌泉根灌单点源入渗湿润体特性研究[J].灌溉排水学报,2018,37(S1):34-37.
- [29] 费良军,曹俊,聂卫波.涌泉根灌土壤湿润体特性试验[J].排灌机械工程学报,2011,29(3):260-265.
- [30] 郑健,胡笑涛,蔡焕杰,等.局部控制地下浸润灌溉土壤入渗特性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(3):227-232.
- [31] 杨喜莲,刘扬.肥液浓度对涌泉根灌条件下湿润体的影响[J].甘肃水利水电技术,2018,54(6):19-24.
- [32] 李耀刚.涌泉根灌土壤水分运动特性试验及模拟研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [33] 刘显,费良军.灌水器流量对涌泉根灌土壤水氮运移的影响[J].排灌机械工程学报,2017,35(10):903-911.
- [34] 马娟娟,孙西欢,李占斌.入渗水头对土壤入渗参数的影响[J].灌溉排水学报,2004,23(5):53-55.