

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.031

# 微孔陶瓷渗灌与地下滴灌土壤水分运移特性对比

蔡耀辉<sup>1</sup> 吴普特<sup>1,2</sup> 张林<sup>2</sup> 朱德兰<sup>1,2</sup> 任改萍<sup>1,3</sup> 陈俊英<sup>1</sup>

(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. 洛南县水务局, 商洛 726100)

**摘要:** 以微孔陶瓷灌水器为研究对象,在0 m工作水头下进行土壤水分运移特性试验,并以10 m额定工作水头下工作的地下滴灌灌水器作为对照。通过对比分析2种灌溉方式下累计入渗量、流量、湿润体特征和土壤含水率变化,结果表明:相同灌溉时间下微孔陶瓷渗灌的累计入渗量、湿润锋运移距离、湿润体截面面积均明显小于地下滴灌。微孔陶瓷渗灌的流量随时间逐渐减小,直至接近于零;试验后期,微孔陶瓷渗灌湿润体内整体土壤含水率变化较小;由于微孔陶瓷渗灌为无压连续灌溉,因此在其工作过程中可为作物提供一个恒定的水分环境。而地下滴灌的流量则会维持稳定,使得土壤含水率一直增大,停止灌溉后由于土壤水分再分布而减小。地下滴灌为被动恒压灌溉,因此其灌溉条件下作物生长的水分环境处于干湿交替的循环变化状态。

**关键词:** 微孔陶瓷; 渗灌; 地下滴灌; 土壤水分运移; 土壤含水率

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)04-0242-08

## Comparison of Characteristics of Soil Moisture Transfer for Porous Ceramic Infiltration Irrigation and Subsurface Drip Irrigation

CAI Yaohui<sup>1</sup> WU Pute<sup>1,2</sup> ZHANG Lin<sup>2</sup> ZHU Delan<sup>1,2</sup> REN Gaiping<sup>1,3</sup> CHEN Junying<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&amp;F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&amp;F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Luonan Water Affairs Bureau, Shangluo 726100, China)

**Abstract:** Aiming to have insights into characteristics of soil moisture transfer of porous ceramic infiltration irrigation, soil moisture transfer experiment was conducted by using porous ceramic emitter, of which the working head was 0 m, meanwhile, subsurface drip irrigation tape with working head of 10 m was used to carry out a control test. The comparisons of cumulative infiltration, emitter discharge, wetting soil characteristic and change of soil water content of two different irrigation methods were made. The results indicated that when the irrigation time was the same, the cumulative infiltration, wetting front and wetting zone sectional area of porous ceramic infiltration irrigation were less than those of subsurface drip irrigation. The discharge of porous ceramic infiltration irrigation was decreased gradually with the increase of time, which was closed to 0 L/h at last, in contrast, the discharge of subsurface drip irrigation was relatively stable. In the late experimental period, soil water contents in the wetting zone of porous ceramic infiltration irrigation were changed slightly. While water contents of subsurface irrigation were increased continuously, and then they got decreased after stopping irrigation because of soil water redistribution. Because porous ceramic infiltration irrigation was a continuous irrigation method, thus it could provide a constant soil moisture environment for crops. But subsurface drip irrigation was a passive and intermittent irrigation method, and soil moisture environment for crops was alternate drying - wetting. The present study provided valuable information for the popularization and application of porous ceramic infiltration irrigation.

**Key words:** porous ceramic; infiltration irrigation; subsurface drip irrigation; soil moisture transfer; soil water content

收稿日期: 2016-08-05 修回日期: 2016-09-01

**基金项目:** “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01-02)、国家自然科学基金项目(51409221)、西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目(2014YB061)和石河子大学高层次人才科研启动资金专项(RCZX201434)

**作者简介:** 蔡耀辉(1991—),男,博士生,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: yaohui\_cai@163.com

**通信作者:** 吴普特(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事水资源高效利用研究,E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

## 引言

微孔陶瓷渗灌是近来新兴的一种灌溉方式,通过将微孔陶瓷灌水器埋置于地下进行微压或零压灌溉,是一种较为节水、节能的新型地下灌溉技术<sup>[1-5]</sup>。地下滴灌是目前应用最为广泛的地下灌溉技术,其通过地下灌水器将水、肥均匀的输送到作物根部进行灌溉,大大减少了土壤的表层蒸发,使水的利用效率有了极大的提高<sup>[6-7]</sup>。目前微孔陶瓷渗灌土壤水分运移特性的研究仍较少,其与地下滴灌同属于地下灌溉技术,因此有关地下滴灌土壤水分运移特性的研究可为其提供参考和借鉴。

国内外学者对陶罐、陶瓷管道在土壤中的入渗特性进行了研究<sup>[8-10]</sup>。GUPTA等<sup>[11]</sup>研究表明陶瓷渗水管的出流量会随着工作压力的增大而增大,土壤水分运移会随着土壤含水率的变化而发生变化。VASUDEVAN等<sup>[12]</sup>研究发现随着温度、湿度的变化,土壤水势会发生变化,进而对陶罐的渗水速率造成影响,认为陶罐在温度高的干旱地区有较好的应用前景。SIYAL等<sup>[13-14]</sup>利用陶罐在2种不同质地的土壤中灌溉发现,陶罐不同导水率情况下湿润体的大小和形状接近一致。以上研究对正压条件下陶瓷渗水装置的出流特性进行了分析,但对于零压条件下陶瓷渗水装置出流特性的阐述较少。国内外学者对地下灌溉土壤水分运移特性进行了较多研究<sup>[15-19]</sup>。SHANI等<sup>[20]</sup>研究表明地下滴灌灌水器出口处会形成正压,并通过理论分析给出了该正压的计算公式。COTE等<sup>[21]</sup>通过模拟不同土质条件下地下滴灌灌水器的出流特性发现,在中低渗透性土壤中,地下滴灌可以较好地湿润灌水器周围区域,增加作物的水分利用效率。因此,微孔陶瓷渗灌土壤水

分运移特性可以借鉴地下滴灌的研究,但是2种灌溉方式仍有较大的差别,且目前的研究未对其差异及原因进行说明。

为深入了解微孔陶瓷渗灌土壤水分运移规律,在借鉴地下滴灌研究的基础上,对2种灌溉方式下土壤水分运移规律和机理进行区分。本文以微孔陶瓷灌水器为研究对象,在0 m工作水头下进行入渗特性试验;以地下滴灌灌水器为对照,在10 m额定工作水头下进行入渗特性试验。通过对比分析2种不同灌溉方式下累计入渗量、流量、湿润体特征和土壤含水率变化,以明确微孔陶瓷渗灌的土壤水分运移规律,进而揭示微孔陶瓷渗灌与地下滴灌土壤水分运移规律的差异及原因,以为微孔陶瓷渗灌的推广应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

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。试验装置(图1a)由土箱、土壤水分监测系统、称量装置、供水装置和入渗装置组成。试验土箱由厚度10 mm的有机玻璃制作,尺寸为45 cm×45 cm×70 cm(长×宽×高)。采用美国Decagon公司生产的EM50型土壤含水率监测系统对入渗过程中的土壤含水率、湿润锋运移进行实时监测,EC-5型土壤水分探头的埋设位置如图1a所示。称量装置采用精度为10 g的电子秤实时记录土箱的质量变化。供水装置分为两类:当进行微孔陶瓷渗灌土壤水分运移特性试验时,打开阀门B、关闭阀门A,采用马氏瓶进行供水,马氏瓶横截面直径10 cm,高度70 cm。当进行地下滴灌土壤水分运移特性试验时,打开阀门A、关闭阀门B,采用恒压变

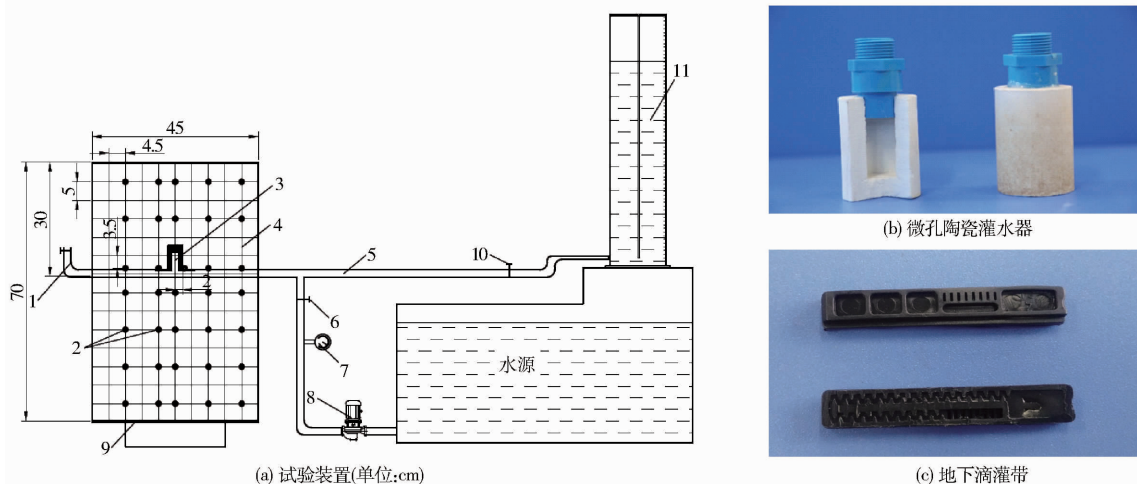


图1 试验装置与入渗装置图

Fig. 1 Schematics of experiment device and infiltration devices

1. 排气口 2. 探头 3. 灌水器 4. 试验土箱 5. 输水管道 6. 阀门A 7. 压力表 8. 水泵 9. 称量装置 10. 阀门B 11. 马氏瓶

频柜控制水泵 (ISW40-200 型) 供水。入渗装置分别采用微孔陶瓷灌水器 and 地下滴灌带 (图 1b)。微孔陶瓷灌水器为西北农林科技大学旱区节水农业研究院自行研制的砂基微孔陶瓷灌水器<sup>[22]</sup>, 灌水器为圆柱形腔体结构, 尺寸为 4 cm × 2 cm × 5 cm × 6.8 cm (外径 × 内径 × 内孔深 × 高), 0.2 m 水头下灌水器流量为 0.87 L/h。地下滴灌带为 Netafim 超级台风贴片式滴灌带, 额定工作水头为 10 m, 经测定空气中的流量为 1.6 L/h。

## 1.2 试验土壤

试验土壤取自陕西渭河三级阶地, 将取得的试验土壤风干、碾压、混合后过 2 mm 筛网制成试验土样。土壤颗粒组成采用沉降法测定; 采用环刀法测定田间持水率和饱和含水率。按国际制土壤质地分类标准, 试验土壤属于粘壤土, 其物理性质见表 1。

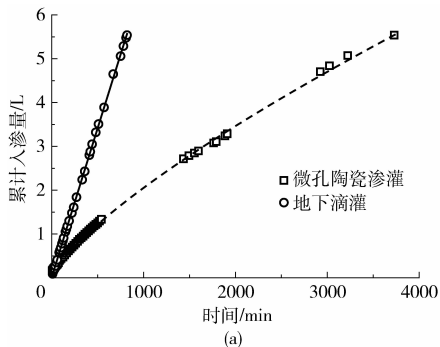
表 1 试验土壤的物理性质

Tab.1 Physical properties of test soil

参数	设计 干容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	田间 持水 率/%	饱和 含水 率/%	土壤颗粒质量分数/%		
				黏粒 (0 ~ 0.002 mm)	粉粒 (0.002 ~ 0.05 mm)	砂粒 (0.05 ~ 2 mm)
数值	1.35	24	46	23	73	4

## 1.3 试验方法及测定内容

微孔陶瓷灌水器埋深为 28.5 cm (以灌水器中心计), 工作水头为 0 m; 滴灌带埋深为 30 cm, 工作水头为 10 m。将试验土样按照设计干容重分层装入土箱, 层间打毛, 使土壤颗粒充分接触。表面用塑料薄膜覆盖, 防止土壤水分蒸发影响试验结果。试验过程中, 采用微孔陶瓷渗灌时, 当灌水器的流量变化量小于 0.01 L/h 时停止灌水, 记录此时的



累计入渗量, 地下滴灌时采用与其相同的灌水量。试验过程中检测指标和计算方法如下: 微孔陶瓷灌水器累计入渗量根据马氏瓶读数和横截面积计算, 流量为单位时间入渗量。滴灌带累计入渗量根据电子秤读数记录, 流量为单位时间入渗量。湿润锋运移: 试验中将微孔陶瓷灌水器 and 滴灌带埋置于土箱中央是为了更加真实地模拟实际情况, 但势必导致湿润体特征难以直接用肉眼观察, 因此采用 EM50 监测的含水率变化时刻作为湿润锋运移到探头位置的时刻 (监测时间间隔 2 min, 含水率变化量超过 0.25 个百分点认为湿润锋到达该探头)。并由此计算湿润体截面面积、垂直湿润锋和水平湿润锋。土壤含水率: 通过 EM50 探头实时记录土壤含水率变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 累计入渗量和流量随时间的变化

图 2 分别是微孔陶瓷渗灌与地下滴灌土壤累计入渗量和流量随时间的变化曲线。由图 2a 可以看出, 微孔陶瓷渗灌与地下滴灌的累计入渗量随时间不断增加。相同入渗时间下, 微孔陶瓷渗灌的累计入渗量要明显小于地下滴灌; 入渗 600 min 时, 微孔陶瓷渗灌和地下滴灌的累计入渗量分别为 1.42 L 和 4.13 L。试验结束时, 两者的灌水量均为 5.54 L, 微孔陶瓷渗灌用时 3 750 min 左右, 而地下滴灌则用时 820 min, 仅为微孔陶瓷渗灌的 21%。由图 2b 可以看出, 微孔陶瓷渗灌的流量逐渐减小, 由初始的 0.47 L/h 逐渐下降至 0.07 L/h, 降低了 85.2% 左右, 且仍在不断减小, 有减小为零的趋势; 而地下滴灌的流量变化则较小, 基本在 0.4 L/h 左右波动。

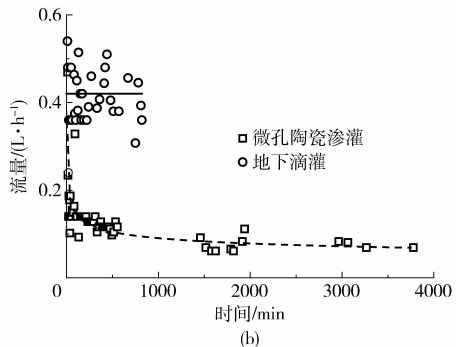


图 2 微孔陶瓷渗灌与地下滴灌土壤累计入渗量和流量

Fig. 2 Cumulative infiltration and discharge of porous ceramic infiltration irrigation and subsurface drip irrigation

利用 Kostiakov 入渗模型分别对微孔陶瓷渗灌和地下滴灌累计入渗量  $I$  与时间  $t$  的变化关系进行拟合<sup>[23]</sup>, 可得:

$$\text{微孔陶瓷渗灌} \quad I = 0.029t^{0.633} \quad (R^2 = 0.993)$$

$$\text{地下滴灌} \quad I = 0.013t^{0.888} \quad (R^2 = 0.994)$$

由拟合公式可以看出, 微孔陶瓷渗灌的入渗系数虽然大于地下滴灌, 但其入渗指数却明显小于地下滴灌。微孔陶瓷渗灌的入渗指数在 0.633 左右, 说明随着入渗时间的增加, 累计入渗量的变化将越来越小, 最终趋近于某个定值。而对于地下滴灌, 其

入渗指数为 0.888, 接近于 1, 因此地下滴灌的累计入渗量与时间接近于线性关系。说明时间的累计效应对地下滴灌的影响较小, 但对于微孔陶瓷灌水器的影响则较为明显。

微孔陶瓷渗灌与地下滴灌的累计入渗量和流量均有明显的差异, 这主要是由其不同的工作机理所导致。微孔陶瓷渗灌与地下滴灌工作时其出流的驱动力均为内外的水势差。微孔陶瓷渗灌的内部工作水头为 0 m, 因此其主要利用外部土壤的基质势出流。灌溉过程中, 微孔陶瓷渗灌周围的土壤会逐步湿润, 含水率上升, 土壤基质势变大(绝对值减小), 使得驱动微孔陶瓷渗灌出流的势能降低, 内外水势差降低, 出流量则会相应减小。当土壤含水率增加至饱和含水率时, 此时的土壤基质势为零, 微孔陶瓷渗灌就会停止出流。而地下滴灌内部工作水头为 10 m, 出流过程中地下滴灌出口处会形成一定的正

压抑制其出流, 随着灌溉的进行, 该正压会基本稳定在某个定值附近。根据 GIL 等<sup>[24-26]</sup>和仵峰等<sup>[27-28]</sup>的研究, 地下滴灌水器出流的流量和土壤因素关系密切, 灌水器在土壤中的流量大约为其空气中自由出流量的 25% ~ 50%, 因此地下滴灌在土壤中的流量会小于其在空气中的额定流量, 但是会一直以恒定大于零的流量出流。

### 2.2 湿润锋运移距离

图 3 为 2 种灌溉方式下湿润体湿润锋水平运移距离( $X$ )、湿润锋垂直向下运移距离( $Z_1$ )和湿润锋垂直向上运移距离( $Z_2$ )随时间( $t$ )的变化过程。2 种灌溉方式下  $X$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$  均随着灌溉时间的增加而增加, 地下滴灌  $X$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$  的变化速率要明显大于微孔陶瓷渗灌的。相关学者研究表明<sup>[29-30]</sup>,  $X$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$  和灌溉时间  $t$  之间的关系可用幂函数表示, 即  $X = at^b$ 、 $Z_1 = at^b$  和  $Z_2 = at^b$ , 拟合参数见表 2。

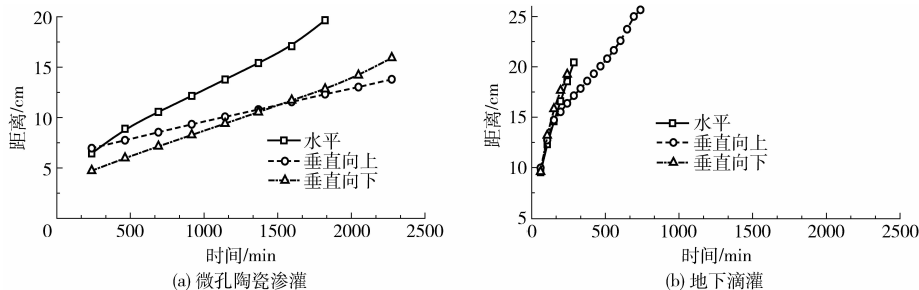


图 3 微孔陶瓷渗灌与地下滴灌湿润锋变化曲线

Fig. 3 Changing curves of wetting front with time for porous ceramic infiltration irrigation and subsurface drip irrigation

表 2 湿润锋运移距离  $X$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$  和湿润体截面积  $S$  与时间  $t$  的拟合情况

Tab. 2 Fitting of wetting front distances  $X$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  and wetting zone sectional area  $S$  with time  $t$

项目	微孔陶瓷渗灌			地下滴灌		
	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
垂直向上 $Z_2$	0.66	0.39	0.95	2.65	0.33	0.98
垂直向下 $Z_1$	0.25	0.52	0.96	1.74	0.44	1
水平 $X$	0.42	0.50	0.99	1.76	0.43	1
截面积 $S$	0.31	0.94	0.98	7.13	0.78	0.99

由表 2 可以看出, 采用幂函数对  $X$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$  和  $t$  之间的关系进行拟合, 其决定系数均达到 0.95 以上。参数  $a$ 、 $b$  均大于 0, 说明随着灌溉时间的增加,  $X$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$  会一直增加。相同灌溉时间下微孔陶瓷渗灌的  $X$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$  均小于地下滴灌。灌溉过程中, 微孔陶瓷渗灌的  $X$  一直大于  $Z_1$ 、 $Z_2$ ; 灌溉初期  $Z_1 < Z_2$ , 后期  $Z_1 > Z_2$ 。但地下滴灌则一直符合  $Z_1 > X > Z_2$ 。这是因为微孔陶瓷渗灌灌溉过程中基质势的作用占主导地位, 随着灌溉的进行, 湿润锋运移, 重力势的作用逐渐上升, 使得垂直向下湿润锋的运移加速, 因而使得在灌溉后期  $Z_1 < Z_2$ 。但是对于地下滴灌而言,

灌溉初期由于土壤各向同性使得  $X$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$  还较为接近, 但其出流量较大, 受重力势的作用较为明显, 因此使得水分向下运移的速率加快, 所以表现为  $Z_1 > X > Z_2$ 。但是结合图 2 可以发现, 随着灌溉时间的继续延长,  $X$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$  的变化速率将趋近于零, 因此湿润锋也就停止变化, 此时灌水器流量的变化也接近于零。而对于地下滴灌而言, 其灌溉过程中流量变化较小, 湿润体会一直扩展, 水分更多地向土壤深层发展。造成两者不同的原因在于: 在微孔陶瓷渗灌灌溉过程中, 灌水器内部工作水头为 0 m, 因此灌水器的流量直接受灌水器外部土壤水势控制<sup>[31]</sup>, 当灌水器周围湿润范围达到极限时, 灌水器的流量会趋于停滞; 但对于地下滴灌而言, 其工作水头为 10 m, 灌溉过程中由于出流会造成正压的产生, 但正压一般不会超过其工作压力<sup>[25,27]</sup>, 因此湿润体扩展的范围以及湿润体内部高含水率区域对于出流的影响不大, 其流量会基本维持在某一特定值附近<sup>[27]</sup>。这也是微孔陶瓷渗灌与地下滴灌的区别之一。

### 2.3 湿润体形状与面积

图 4 为微孔陶瓷渗灌和地下滴灌灌溉条件下湿

润体的变化过程。由图4可以看出,微孔陶瓷渗灌和地下滴灌周围湿润体形状均接近为椭圆形,微孔陶瓷渗灌水平方向直径大于垂直方向,但地下滴灌垂直方向要大于水平方向。微孔陶瓷渗灌灌溉条件下,湿润锋在3750 min左右到达土壤表层;而地下滴灌灌溉条件下湿润体发展迅速,在埋深30 cm的条件下,预计1200 min左右湿润锋便可到达土壤表层。

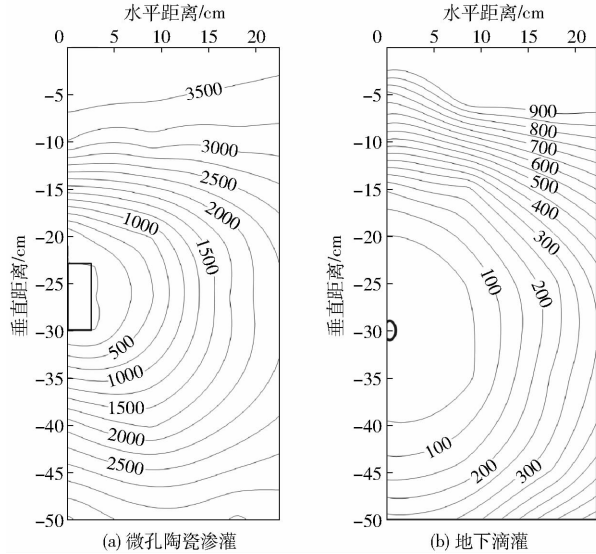


图4 微孔陶瓷渗灌与地下滴灌湿润体截面形状变化(单位:min)

Fig. 4 Changes of wetting front section shape for porous ceramic infiltration irrigation and subsurface drip irrigation (unit: min)

微孔陶瓷渗灌与地下滴灌灌溉条件下湿润体截面形状差别较小,均为椭圆形。在灌溉前期,微孔陶瓷渗灌湿润体截面接近于中心靠上的椭圆形,但是随着入渗进行,椭圆的重心逐渐向下,演变为重心靠下的椭圆形。而地下滴灌周围的湿润体截面形状则一直为重心靠下的椭圆形。这是因为:微孔陶瓷渗灌入渗过程中,土壤水分运动的主要驱动力为基质势。入渗前期,水分在均质土壤中入渗,土壤各方向基质势梯度差别不大,因此水分在各方向(除下部)发展都较为均衡,但下部由于连接管道作为不透水边界,使得向下运移的水分较少,因此湿润体形状近似为重心向上的椭圆形。在入渗后期,土壤重力势的作用逐渐增大,使得湿润体的形状发生变化,重心逐渐向下移动。因此在处理微孔陶瓷渗灌水分运移特性的问题时,必须对其边界加以考虑,不能当作单纯的点源处理,可以作为柱状面源加以分析。但对于地下滴灌,其为点源灌溉方式,在土壤基质势梯度差别不大的情况下,土壤水分受重力势的作用更为明显,因此随着灌溉时间的增加,湿润锋会一直向下部运移,因而湿润体的形状也一直表现为重心靠下

的椭圆形。微孔陶瓷渗灌为连续灌溉,因此其湿润体形状在后期会一直维持椭圆形,变化较小。但是对于地下滴灌而言,当灌溉停止后,湿润体内水分会重新分布,湿润体形状会发生变化<sup>[29]</sup>。这也是微孔陶瓷渗灌与地下滴灌的区别之一。

表2给出了微孔陶瓷渗灌和地下滴灌条件下湿润体截面积与时间的函数关系,2种灌溉方式下湿润体截面积 $S$ 和时间 $t$ 均符合幂函数关系,即 $S = at^b$ ,决定系数 $R^2$ 均达到0.98以上,拟合效果较好。由拟合公式可以看出,随着灌溉时间的增加,2种灌溉方式下 $S$ 均是增大的。微孔陶瓷渗灌下 $S$ 变化较为缓慢,地下滴灌下 $S$ 变化较快。随着灌溉的进行, $S$ 的变化越来越小。微孔陶瓷渗灌属于连续灌溉,灌溉过程中,湿润体截面积变化会越来越小,而后基本维持不变;在蒸发、作物消耗等因素的作用下,灌水器可以实时补充土壤中的水分,因此湿润体截面积的变化较小。对于地下滴灌而言,灌溉过程中,湿润体截面积会一直增大,直至灌溉停止后土壤水分再分布达到最大值;而后由于蒸发、作物消耗的影响,湿润体内含水率逐渐降低,湿润体截面积减小;再次灌溉时则会重复以上过程,以此往复循环。2种灌溉方式下湿润体形状和截面积变化规律的不同也直接表明了两者的灌溉机理的不同,微孔陶瓷渗灌采用的是无压连续灌溉,而地下滴灌采用的则是恒压间歇灌溉。

## 2.4 土壤含水率变化

图5为微孔陶瓷渗灌与地下滴灌2种灌溉方式下埋深为28.5 cm处探头测得的不同水平位置处土壤含水率随时间的变化过程。由图5可以看出,开始灌溉后,微孔陶瓷渗灌和地下滴灌周围的土壤含水率都迅速增加。微孔陶瓷渗灌周围土壤含水率在500 min左右接近饱和含水率,但地下滴灌则仅需130 min左右。微孔陶瓷渗灌灌溉时为连续灌溉方式,灌水器周围湿润体内的含水率在达到某一定值后会维持不变。对于地下滴灌,在820 min停止灌溉后,土壤水分有一个再分布的过程,湿润体内的土壤含水率降低,土壤水分继续向外扩散,湿润体扩大。由图还可以看出,微孔陶瓷渗灌灌溉开始灌溉时,土壤水分的变化速率要明显小于地下滴灌,这是由于滴灌带的流量较微孔陶瓷灌水器大,因此使得土壤含水率快速增加。灌溉500 min后,距离滴灌带30 cm范围内的土壤含水率均已经高于田间持水率,地下滴灌周围土壤含水率均已经达到饱和含水率,产生积水。灌溉停止后,地下滴灌湿润体范围内的土壤水分又重新分布,使得作物生长的水分环境处于干湿交替的循环变化状

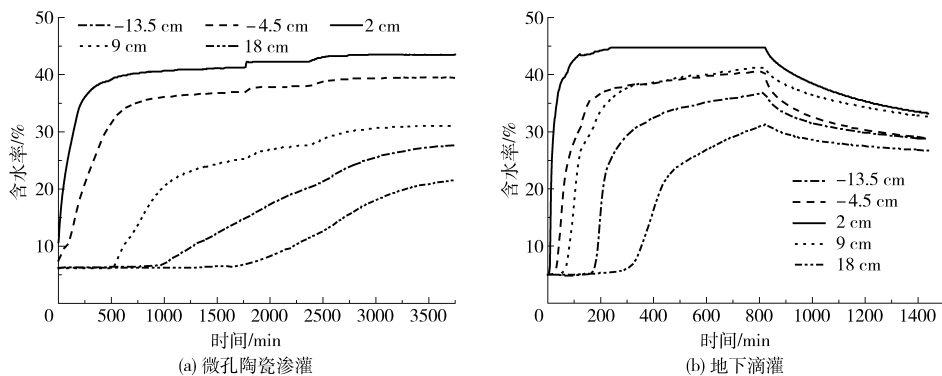


图5 微孔陶瓷渗灌与地下滴灌条件下不同位置土壤含水率随时间的变化曲线

Fig. 5 Changing curves of soil water contents with time for porous ceramic infiltration irrigation and subsurface drip irrigation

态<sup>[32]</sup>。2种灌溉方式下均是在灌水器或地下滴灌周围形成一个土壤水库,微孔陶瓷渗灌周围的土壤水库库容较小,但由于其是连续灌溉,具有实时的补给,因此库容可以一直维持不变,为作物提供实时的水分供给;而地下滴灌周围的土壤水库库容较大,但在一次补给之后则一直处于消耗状态,直至消耗至下次灌溉补给之前,因此其库容一直处于变动状态。由此微孔陶瓷渗灌与地下滴灌条件下土壤水分变化的区别在于,微孔陶瓷渗灌为作物提供了一个恒定的水分环境,而地下滴灌则处于干湿交替的循环变化状态。

连续灌溉时,微孔陶瓷渗灌周围会形成高含水率区,灌水器的流量接近于零,土壤含水率的变化较小。根据前人研究发现,作物生育期内如果土壤含水率可以维持在某恒定范围内,则有利于作物根系的分布和生长<sup>[33-34]</sup>。TILIB等<sup>[35]</sup>研究得出灌溉间隔为5 d较10 d和15 d小麦产量有显著提高,这是因为稳定的水分环境有助于减少水分胁迫,同时维持表层土壤湿润有助于根系在表层的分布和吸收养分。因此使用微孔陶瓷渗灌进行灌溉可以为作物提供一个相对稳定的土壤水分环境,同时在其湿润体范围内含水率大多处于田间持水率附近,有助于作物根系在土壤表层生长和分布,有利于提高作物产量和水分利用效率。

### 3 结论

(1)微孔陶瓷渗灌和地下滴灌的累计入渗量随灌溉时间不断增加,相同入渗时间下,微孔陶瓷渗灌的累计入渗量明显小于地下滴灌。微孔陶瓷渗灌的流量随时间逐渐减小,有减小为零的趋势;而地下滴灌的流量则较为稳定。这是因为微孔陶瓷渗灌采用的是无压灌溉,主要利用土壤基质势出流;而地下滴灌则是被动恒压灌溉,出流受土壤水势影响较小。

(2)相同灌溉时间下微孔陶瓷渗灌的湿润体水平湿润锋运移距离、垂直向上湿润锋运移距离和垂直向下湿润锋运移距离均小于地下滴灌。微孔陶瓷渗灌与地下滴灌灌溉条件下湿润体形状均为椭圆形。湿润体截面积随时间增加而增加,但是微孔陶瓷渗灌湿润体截面积的变化速率显著小于地下滴灌。

(3)开始灌溉后,微孔陶瓷渗灌和地下滴灌周围的土壤含水率均迅速增加。灌溉过程中,微孔陶瓷渗灌湿润体范围内土壤含水率变化较小,而地下滴灌的土壤含水率则会一直增大,停止灌溉后由于土壤水分再分布而减小。微孔陶瓷渗灌为作物提供了一个恒定的水分环境,而地下滴灌则处于干湿交替的循环变化状态。

### 参 考 文 献

- BAINBRIDGE D A. Buried clay pot irrigation: a little known but very efficient traditional method of irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 48(2): 79-88.
- ASHRAFI S, GUPTA A D, BABEL M S, et al. Simulation of infiltration from porous clay pipe in subsurface irrigation[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(2): 253-268.
- 蔡耀辉,吴普特,朱德兰,等. 粘土基微孔陶瓷渗灌灌水器制备与性能优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 183-188. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150427&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150427&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.027.
- CAI Yaohui, WU Pute, ZHU Delan, et al. Preparation and performance optimization of clay-based porous ceramics used in subsurface irrigation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 183-188. (in Chinese)
- 蔡耀辉,吴普特,朱德兰,等. 硅藻土微孔陶瓷灌水器制备工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 70-76.

- CAI Yaohui, WU Pute, ZHU Delan, et al. Preparation technology optimization of diatomite porous ceramic irrigation emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 70-76. (in Chinese)
- 5 李向明,杨建国. 微孔陶瓷灌水器的流量影响因素研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(4):73-78. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160411&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160411&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.011.
- LI Xiangming, YANG Jianguo. Study of the factors influencing the flow rate of the microporous ceramic irrigation emitters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 73-78. (in Chinese)
- 6 邹慧,黄兴法,龚时宏. 水分调亏对地下滴灌夏玉米田水热动态的影响[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(9):72-77. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20120915&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120915&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.015.
- ZOU Hui, HUANG Xingfa, GONG Shihong. Effects of water deficit on soil moisture and temperature regimes in subsurface drip irrigated summer corn field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 72-77. (in Chinese)
- 7 LAMM F R, TROOEN T P. Subsurface drip irrigation for corn production: a review of 10 years of research in Kansas[J]. Irrigation Science, 2003, 22(3-4): 195-200.
- 8 邹朝望,薛绪掌,张仁铎,等. 负水头灌溉原理与装置[J]. 农业工程学报,2007,23(11):17-22.
- ZOU Chaowang, XUE Xuzhang, ZHANG Renduo, et al. Principle and equipment of negative pressure irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 17-22. (in Chinese)
- 9 谷川寅彦,矢部腾彦,吴景社. 低压渗灌原理与基础试验研究[J]. 灌溉排水,1992,11(2):35-38.
- 10 ABU-ZREIG M M, ABE Y, ISODA H. The auto-regulative capability of pitcher irrigation system[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(3): 272-278.
- 11 GUPTA A D, BABEL M S, ASHRAFI S. Effect of soil texture on the emission characteristics of porous clay pipe for subsurface irrigation[J]. Irrigation Science, 2009, 27(3): 201-208.
- 12 VASUDEVAN P, THAPLIYAL A, DASTIDAR M G, et al. Pitcher or clay pot irrigation for water conservation[C]//Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering (ICME), 2007: 29-31.
- 13 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.
- 14 SIYAL A A, VAN GENUCHTEN M T, SKAGGS T H. Performance of pitcher irrigation system[J]. Soil Science, 2009, 174(6): 312-320.
- 15 牛文全,樊晓康,ZHOU 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 of initial water content on soil infiltration characteristic during bubble irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 491-496. (in Chinese)
- 16 宰松梅,仵峰,范永申,等. 不同滴灌形式对棉田土壤理化性状的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(12):84-89.
- ZAI Songmei, WU Feng, FAN Yongshen, et al. Effects of drip irrigation patterns on soil properties in cotton field[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 84-89. (in Chinese)
- 17 牛文全,张俊,张琳琳,等. 埋深与压力对微润灌溉润体水分运移的影响[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(12):128-134. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20131221&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131221&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.021.
- NIU Wenquan, ZHANG Jun, ZHANG Linlin, et al. Effects of buried depth and pressure head on water movement of wetted soil during moisture-irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 128-134. (in Chinese)
- 18 李久生,杨风艳,刘玉春,等. 土壤层状质地对小流量地下滴灌水器特性的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(4):1-6.
- LI Jiusheng, YANG Fengyan, LIU Yuchun, et al. Performance of low-discharge emitters buried in soil as affected by layered-textural soils[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 1-6. (in Chinese)
- 19 仵峰,吴普特,范永申,等. 地下滴灌条件下土壤水能态研究[J]. 农业工程学报,2008,24(12):31-35.
- WU Feng, WU Pute, FAN Yongshen, et al. Distribution of soil water potential energy under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 31-35. (in Chinese)
- 20 SHANI U, XUE S, GORDIN Katz, et al. Soil-limiting flow from subsurface emitters. I: pressure measurements[J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996, 122(5): 291-295.
- 21 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.
- 22 蒲文辉,张新燕,朱德兰,等. 制备工艺对微孔陶瓷灌水器结构与水力性能的影响[J]. 水力发电学报,2015,36(6):48-57.
- PU Wenhui, ZHANG Xinyan, ZHU Delan, et al. Effect of preparation process on structure and hydraulic performance of porous ceramic irrigation emitter[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 36(6): 48-57. (in Chinese)
- 23 牛文全,薛万来. 矿化度对微润灌土壤入渗特性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(4):163-172. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20140426&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140426&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.026.
- NIU Wenquan, XUE Wanlai. Effects of mineralization degrees on soil infiltration under moisture-irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 163-172. (in Chinese)



- 24 GIL M, RODRÍGUEZ-SINOBAS L, SÁNCHEZ R, et al. Evolution of the spherical cavity radius generated around a subsurface drip emitter[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(6): 1983 – 1989.
- 25 GIL M, RODRÍGUEZ-SINOBAS L, JUANA L, et al. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(6): 451 – 458.
- 26 GIL M, RODRÍGUEZ-SINOBAS L, SÁNCHEZ R, et al. Procedures for determining maximum emitter discharge in subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2011, 137(5): 287 – 294.
- 27 仵峰,李王成,李金山,等. 地下滴灌灌水器水力性能试验研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(2): 85 – 88.  
WU Feng, LI Wangcheng, LI Jinshan, et al. Hydraulic characteristics of emitter in soil of subsurface drip irrigation system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(2): 85 – 88. (in Chinese)
- 28 仵峰,李王成,范永申,等. 地下滴灌滴头出口正压试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(2): 48 – 52.  
WU Feng, LI Wangcheng, FAN Yongshen, et al. Experimental study on positive pressure in area around emitter in subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(2): 48 – 52. (in Chinese)
- 29 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/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 101 – 107.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20130519&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130519&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.019.  
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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 101 – 107. (in Chinese)
- 30 雷廷武,江培福,VINCENT F B,等. 负压自动补给灌溉原理及可行性试验研究[J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 298 – 302.  
LEI Tingwu, JIANG Peifu, VINCENT F B, et al. Principle of negative pressure difference irrigation system and feasibility experimental study[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 298 – 302. (in Chinese)
- 31 任改萍. 微孔陶瓷渗灌土壤水分运移规律研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.  
REN Gaiping. Research on soil water movement characteristic under microporous ceramic emitter irrigation [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- 32 关小康,杨明达,白田田,等. 适宜深播提高地下滴灌夏玉米出苗率促进苗期生长[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(13): 75 – 80.  
GUAN Xiaokang, YANG Mingda, BAI Tiantian, et al. Suitable deep sowing increasing emergence rate and promoting summer maize growth in seeding stage under subsurface drip irrigation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(13): 75 – 80. (in Chinese)
- 33 王建东,龚时宏,于颖多,等. 地面灌水频率对土壤水与温度及春玉米生长的影响[J]. *水利学报*, 2008, 39(4): 500 – 505.  
WANG Jiandong, GONG Shihong, YU Yingduo, et al. Effect of surface irrigation frequency on soil water and temperature as well as growth of spring maize[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(4): 500 – 505. (in Chinese)
- 34 孔清华,李光永,王永红,等. 地下滴灌施氮及灌水周期对青椒根系分布及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(增刊2): 38 – 42.  
KONG Qinghua, LI Guangyong, WANG Yonghong, et al. Effects of nitrogen application and irrigation cycle on bell pepper root distribution and yield under subsurface drip irrigation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(Supp.2): 38 – 42. (in Chinese)
- 35 EL TILIB A M A, EL MAHI Y E, MAGID H M A, et al. Response of wheat to irrigation frequency and manuring in a salt-affected semi-arid environment[J]. *Journal of Arid Environments*, 1995, 31(1): 115 – 125.