

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.033

# 浑水滴灌过程中不同类型滴头堵塞的动态变化特征

温圣林<sup>1,2</sup> 牛文全<sup>1,3</sup> 邬梦龙<sup>1,2</sup> 张文倩<sup>1,2</sup> 李学凯<sup>1,2</sup> 杨小坤<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为了研究滴头类型对浑水滴灌滴头堵塞的影响过程, 选取 7 种滴头、配置 2 种浑水进行周期性间歇灌水试验, 提出了滴头结构系数指标, 对比分析了不同类型滴头的堵塞状况。结果表明: 滴头类型是影响滴头堵塞的重要因素, 滴头结构系数可作为衡量不同类型滴头抗堵塞性能的重要指标, 滴头抗堵塞性能随着结构系数增大而提高。结构系数相同的 2 种不同浑水试验后, 圆柱滴头的平均相对流量均大于片式滴头, 当结构系数为 2% 时, 2 种浑水试验后, 圆柱滴头的平均相对流量分别为 91.66% 和 79.63%, 而片式滴头的平均相对流量仅为 75.84% 和 65.08%; 随着灌水次数的增加, 片式滴头比圆柱滴头更容易发生大部分滴头整体堵塞现象; 不同类型滴头堵塞物质量随着结构系数增大而减小, 圆柱滴头和片式滴头结构系数由大到小依次为 E1、E2、E3 和 E4、E5、E7、E6, 2 种浑水试验后, 滴头堵塞物质量由大到小依次为 E3、E2、E1 和 E6、E7、E5、E4。

**关键词:** 滴头; 浑水; 堵塞; 滴头类型; 结构系数

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)03-0287-08

OSID:



## Dynamic Characteristics of Different Emitters Clogging in Drip Irrigation with Muddy Water

WEN Shenglin<sup>1,2</sup> NIU Wenquan<sup>1,3</sup> WU Menglong<sup>1,2</sup> ZHANG Wenqian<sup>1,2</sup> LI Xuekai<sup>1,2</sup> YANG Xiaokun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of emitter type on the process of emitter clogging in drip irrigation with muddy water, seven kinds of emitters were selected and two kinds of muddy water were allocated for periodic intermittent irrigation tests. Clogging characteristics of different emitters were compared by putting forward the emitter structure coefficient. The results showed that the type of emitter was an important factor affecting the blockage of emitter, and the structure coefficient of emitter could be used as an important index to measure the anti-blockage performance of the different emitters. The anti-clogging performance of emitter was increased with the increase of structure coefficient. When the structure coefficients were the same, the relative flow rate of the cylindrical emitter was larger than that of the flat emitter after two different muddy water tests. For example, when the structure coefficient was 2%, the relative flow rate of the cylindrical emitter was 91.66% and 79.63%, respectively. However, the relative flow rate of the flat emitter was only 75.84% and 65.08%. With the increase of irrigation times, the overall blockage of most emitters was more likely to occur in the flat emitters than in the cylindrical emitters. The clogging mass of different emitters was decreased with the increase of structure coefficient. The order of the structure coefficient of cylindrical emitters and flat emitters in descending trend was E1, E2, E3 and E4, E5, E7, E6. However, the order of the emitters clogging mass after two kinds of muddy water tests in descending trend was E3, E2, E1 and E6, E7, E5, E4.

**Key words:** emitter; muddy water; clogging; emitter type; structure coefficient

收稿日期: 2019-07-28 修回日期: 2019-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679205)和国家重点研发计划项目(2016YFC0400202)

作者简介: 温圣林(1994—),男,博士生,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: wenshenglinxn@sina.com

通信作者: 牛文全(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事水土资源高效利用与节水灌溉研究,E-mail: nwq@vip.sina.com

## 0 引言

灌溉所用地下水或地表水即使通过沉淀、过滤等措施,细小的泥沙颗粒仍然能够随水流进入结构狭小的滴头流道中,导致滴头堵塞,从而影响灌溉效益,限制滴灌技术的推广使用。因此,许多学者研究了灌溉水质、流道结构以及滴灌系统运行模式等因素对滴头堵塞的影响<sup>[1-2]</sup>,试图探明滴头堵塞的诱发机制。研究表明,存在造成滴头堵塞的敏感粒径范围和最易引起堵塞的临界含沙量<sup>[3-6]</sup>。马晓鹏等<sup>[7]</sup>研究发现,滴头抗堵塞性能随着流道断面最小尺寸的增大而提高。还有研究发现,滴头流道的齿间距、齿转角以及流道深对滴头抗堵塞性能也有一定影响<sup>[8-9]</sup>。ZHOU等<sup>[10]</sup>设置3个灌水频率进行硬水滴灌试验,发现灌水间隔越短,滴头堵塞越严重。然而,滴头类型对滴头堵塞影响以及滴头流道结构参数标准化的相关研究鲜见报道。

滴头种类繁多,滴头抗堵塞性能参差不齐,研究滴头类型对滴头堵塞的影响对于确保滴灌系统使用寿命、促进滴灌技术发展与推广使用具有重要意义。李久生等<sup>[11]</sup>研究发现,在再生水或者地下水滴灌条件下,压力补偿内镶片式滴头抗堵塞性能优于压力

补偿管上式滴头。刘海军等<sup>[12]</sup>研究发现,在3种滴头类型中,压力补偿孔口式滴头的流量在试验期间变化最小,内镶式滴头次之,而单翼迷宫式滴头的流量变化最大。ZHOU等<sup>[13]</sup>研究发现,当再生水或者地下水滴灌试验时,内镶圆柱式滴头抗堵塞性能优于内镶片式滴头。不同研究结论不同,浑水滴灌试验滴头类型是否影响滴头堵塞,以及不同类型滴头堵塞过程是否相同,这些问题仍需进一步探讨。

因此,本文选择普遍使用的内镶圆柱式滴头和内镶片式滴头,进行水力性能和抗堵塞性能测试,分析内镶圆柱式滴头与内镶片式滴头在不同浑水滴灌条件下滴头堵塞的动态变化特征及其堵塞机理,为在同一地区不同水质情况下使用滴灌带提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与装置

试验用毛管为1种非压力补偿内镶片式滴灌带(简称片式滴头)、3种非压力补偿内镶圆柱滴灌带(简称圆柱滴头)和3种压力补偿内镶片式滴灌带(简称补偿片式滴头),7种滴头参数如表1(表中 $D$ 为滴头流道深度, $W$ 为流道宽度)所示。

表1 试验用滴头参数

Tab.1 Parameters of tested emitters

滴头编号	滴头类型	额定流量/ ( $L \cdot h^{-1}$ )	$\min(D, W)/$ mm	齿间距/ mm	流道 单元数	结构系数/ %	流量 系数	流态 指数	制造偏差 系数/%
E1	圆柱滴头	2.1	0.74	2.36	13	2.4	0.80	0.48	2.9
E2	圆柱滴头	3.2	0.78	2.52	16	1.9	1.75	0.50	1.9
E3	圆柱滴头	2.3	0.70	2.67	46	0.6	1.15	0.53	1.6
E4	片式滴头	1.5	0.69	1.43	16	3.0	0.99	0.47	4.0
E5	补偿片式滴头	1.5	0.76	1.52	21	2.3	1.56	0.02	1.8
E6	补偿片式滴头	1.6	0.63	1.78	25	1.4	1.58	0.02	4.1
E7	补偿片式滴头	2.0	0.70	2.45	16	1.8	1.93	0.08	2.9

表1中流量系数 $k$ 越小则表明流量波动越小,而流态指数 $x$ 越小则表明滴头流量对进口压力越不敏感<sup>[14]</sup>。7种滴头制造偏差系数根据SOLOMON<sup>[15]</sup>所提出方法计算所得,根据其提出衡量滴头制造水平的标准可知,除了E4和E6制造水平为一般,其余滴头都为优等。

浑水配置:试验用水为杨凌自来水,2种泥沙分别来自渭河陕西杨凌段河漫滩地河床淤泥和西北农林科技大学灌溉站沙壤土,经自然风干,去除小石子等杂物,研磨后过140目筛网(0.104 mm),由这2种泥沙配置的浑水分别记为浑水1和浑水2。

### 1.2 试验设计与方法

采用周期性间歇灌水法,以宁夏段黄河水含沙

量为0.61~1.1 g/L为依据<sup>[16]</sup>,为了加快滴头堵塞以缩短试验周期,用粒径小于0.1 mm的泥沙配置含沙量为3 g/L的浑水进行灌水试验。LIU等<sup>[17]</sup>提出滴头在60~100 kPa工作压力范围内时滴头抗堵塞性能变化很小,故本试验设置工作压力75 kPa。每个处理为7支6 m长的不同毛管,灌水频率为每天2次,每次灌水时间为3 h,灌水结束后分别在7支毛管首部、中部和尾部各选取2个滴头测其流量。

灌水结束后,在每个处理的滴灌带首部、中部和尾部各截取长5 cm(包括滴头)的毛管用来取样,截取的毛管用自封袋装好放入60℃干燥箱中干燥,再用电子天平(精度为万分之一)称取干燥后毛管质

量。然后往装有样品的每个自封袋中加入 15 mL 去离子蒸馏水,再放入超声波清洗机中 3 h 以清洗出毛管淤积物。取出清洗过的样品前需要摇晃 10 min 以保证毛管脱落的淤积物都被清洗出来,然后再放入 60℃ 的干燥箱干燥。最后再用电子天平(精度为万分之一)称取干燥后毛管质量,毛管淤积物的质量为清洗前后毛管质量差。滴头堵塞物质量数据获取步骤与毛管淤积物一样,毛管淤积物质量和滴头堵塞物质量分别记为  $m_1$  和  $m_2$ 。

### 1.3 评价指标与方法

#### 1.3.1 滴头水力性能评价指标

滴头流量取决于进口压力与滴头结构,滴头流量计算公式为<sup>[18]</sup>

$$q = kH^x \quad (1)$$

式中  $q$ ——滴头流量, L/h

$H$ ——进口压力, kPa

#### 1.3.2 滴头抗堵塞性能评价指标

一般用滴头的相对流量与滴灌的均匀度来评估滴灌系统滴头抗堵塞性能<sup>[19]</sup>,灌水均匀度为克里斯琴森均匀系数  $C_u$ <sup>[20]</sup>,即

$$C_u = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_0|}{n\bar{q}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中  $q_i$ ——第  $i$  个滴头的流量, L/h

$q_0$ ——滴头额定流量, L/h

$n$ ——滴头总数

$\bar{q}$ ——滴灌带滴头的平均流量, L/h

将一种滴头的平均流量占额定流量的百分比定义为该滴头的平均相对流量<sup>[21]</sup>,计算公式为

$$D_{ra} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{nq_0} \times 100\% \quad (3)$$

当  $D_{ra}$  小于 75%, 则认为滴头发生堵塞,  $D_{ra}$  越小, 则滴头堵塞越严重<sup>[22]</sup>。

#### 1.3.3 滴头结构系数

为了对比不同类型滴头的堵塞状况,本文构建了滴头结构系数指标。一般认为,滴头断面尺寸越小或者滴头流道长度越长越易发生堵塞,因此,以流道深度、宽度的最小值与流道长度比表征与滴头抗堵塞能力相关的结构系数

$$\lambda = \frac{\min(D, W)}{ml} \times 100\% \quad (4)$$

式中  $m$ ——滴头流道单元数

$l$ ——齿间距, mm

7 种试验滴头的结构系数见表 1。

### 1.4 数据处理

每次灌水结束后,称取滴头的出水量,计算相对

流量和灌水均匀度。再用 SPSS 软件、多重比较方法分析不同类型滴头抗堵塞性能、毛管淤积物质量以及滴头堵塞物质量的显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型滴头平均相对流量和灌水均匀度

图 1 为在 2 种浑水滴灌过程中不同类型滴头平均相对流量和灌水均匀度随运行时间的变化趋势。从图 1 可以看出,2 种浑水滴灌时,补偿片式滴头 E6、E7 和圆柱滴头 E3 的平均相对流量下降速度较快,补偿片式滴头 E6 的灌水均匀度下降较快。浑水 1 试验时,圆柱滴头 E1、E2 和片式滴头 E4 的平均相对流量和灌水均匀度一直在波动变化,圆柱滴头 E3 以及补偿片式滴头 E5、E6 和 E7 的平均相对流量和灌水均匀度先一直波动变化,然后分别在 11~16 次和 14~18 次灌水后开始直线下降,试验结束时,其平均相对流量和灌水均匀度分别降低了 28.14%~60.66% 和 7.54%~39.7%。浑水 2 试验时,7 种滴头的平均相对流量和灌水均匀度先波动,经过 10~12 次和 10~15 次灌水后直线下降,灌水结束时,分别下降了 18.48%~51.88% 和 10.7%~43.06%。

灌水试验结束后,对不同类型滴头的平均相对流量和灌水均匀度进行显著性分析,结果如表 2 所示。2 种浑水试验时,在补偿片式滴头中 E5 抗堵塞性能最优, E7 其次, E6 最差;在圆柱滴头中 E1 抗堵塞性最优, E2 其次, E3 最差。浑水 1 试验后,补偿片式滴头中抗堵塞性能最优滴头 E5 平均相对流量下降幅度比片式滴头 E4 大,而浑水 2 试验后补偿片式滴头 E5 平均相对流量比片式滴头 E4 下降更少。说明从平均相对流量和灌水均匀度的变化趋势看,不同类型滴头之间没有明显的差异,滴头压力补偿作用不是影响滴头堵塞的主要因素,主要是因为 7 种滴头的流道结构不同。

为了综合考虑不同类型滴头之间滴头流道结构对滴头堵塞的影响,将不同类型滴头在 2 种浑水滴灌试验结束后进行平均相对流量与结构系数拟合,见图 2。2 种浑水灌溉结束后,7 种滴头的平均相对流量与结构系数均呈线性相关关系。当结构系数相同时,2 种不同浑水灌水试验结束后圆柱滴头的平均相对流量均大于片式滴头,当结构系数为 2% 时,2 种浑水试验后,圆柱滴头的平均相对流量分别为 91.66% 和 79.63%,而片式滴头的平均相对流量仅为 75.84% 和 65.08%,圆柱滴头的抗堵塞性能明显优于片式滴头。另外,两种浑水试验后,圆柱滴头平

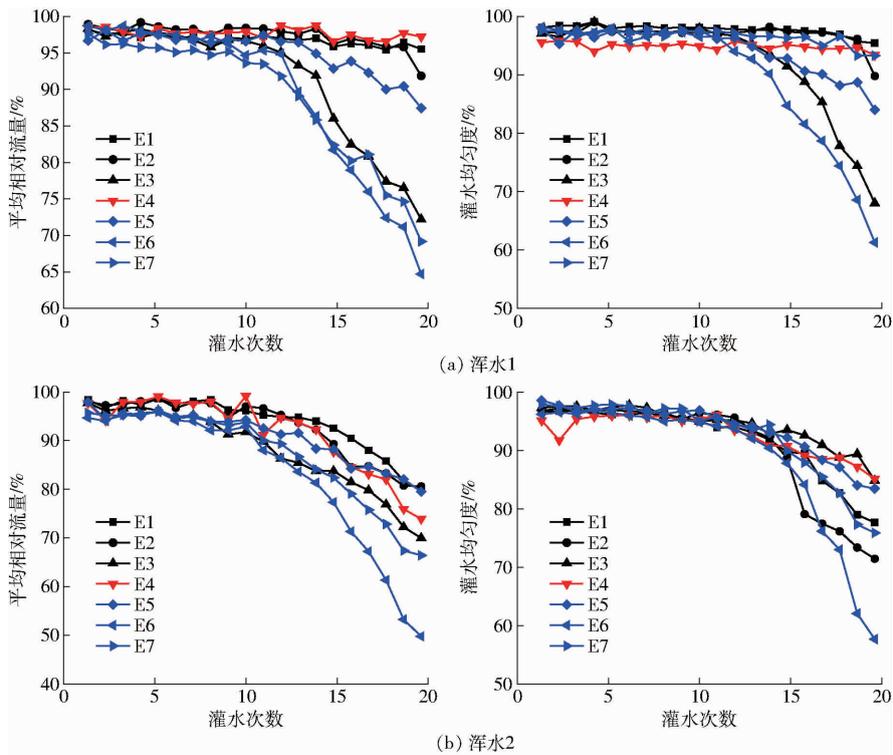


图1 不同浑水试验时滴头相对流量和灌水均匀度的变化曲线

Fig. 1 Changing curves of relative flow rate and irrigation uniformity of emitter in different muddy water tests

表2 灌水试验结束时不同滴头平均相对流量与灌水均匀度差异的显著性分析

Tab. 2 Significant analysis of relative flow and irrigation uniformity of different emitters at end of irrigation experiment %

滴头编号	平均相对流量		灌水均匀度	
	浑水1	浑水2	浑水1	浑水2
E1	96.13 <sup>a</sup>	80.51 <sup>a</sup>	96.21 <sup>a</sup>	75.02 <sup>ab</sup>
E2	92.29 <sup>a</sup>	81.52 <sup>a</sup>	90.08 <sup>a</sup>	71.80 <sup>ab</sup>
E3	71.86 <sup>bc</sup>	70.01 <sup>ab</sup>	67.26 <sup>b</sup>	89.30 <sup>a</sup>
E4	95.82 <sup>a</sup>	75.87 <sup>a</sup>	95.25 <sup>a</sup>	85.47 <sup>a</sup>
E5	87.73 <sup>ab</sup>	80.45 <sup>a</sup>	84.42 <sup>a</sup>	84.68 <sup>a</sup>
E6	64.10 <sup>c</sup>	48.12 <sup>bc</sup>	60.68 <sup>b</sup>	56.94 <sup>b</sup>
E7	68.45 <sup>c</sup>	66.03 <sup>ab</sup>	92.46 <sup>a</sup>	78.68 <sup>ab</sup>

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

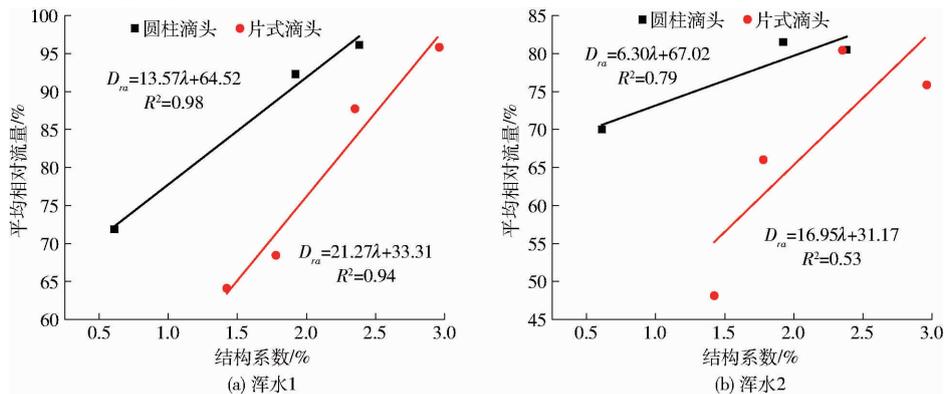


图2 2种浑水下不同类型滴头平均相对流量与其结构系数的拟合关系

Fig. 2 Fitting relationship between relative flow rate and structure coefficients of different emitters in two kinds of muddy water test

均相对流量与结构系数关系曲线的斜率分别为13.57和6.30, 小于片式滴头的21.27和16.95, 说明片式滴头抗堵塞性能对结构系数非常敏感, 当片式滴头结构系数略有减小, 则抗堵塞性能会有较大幅度的下降, 而圆柱滴头在结构系数减小时, 其抗堵塞性能下降较慢。如在浑水1灌溉下, 只要圆柱滴头结构系数大于1%, 其平均相对流量大于75%, 而片式滴头结构系数需要大于2%。同种浑水条件下不同类型滴头相对流量变化曲线之间开口程度为两者曲线方程斜率比, 浑水1试验后, 滴头平均相对流量与结构系数关系曲线的斜率比为1.57, 小于浑水2试验后曲线斜率比2.69。说明在浑水2滴灌试验条件下, 滴头类型对滴头堵塞影响更大。

## 2.2 不同类型滴头平均相对流量与灌水均匀度的动态变化

将相同灌水次数后的平均相对流量和灌水均匀度进行对比分析,结果见图3和表3。从图3可知,圆柱滴头和片式滴头 $D_{ra}$ 与 $C_u$ 动态变化具有协同性,均随着灌水次数的增加,平均相对流量和灌水均匀度同步减小,平均相对流量与灌水均匀度之间呈一定的线性相关关系。从其关系曲线斜率看,当结构系数不小于1%时,圆柱滴头平均相对流量和灌水

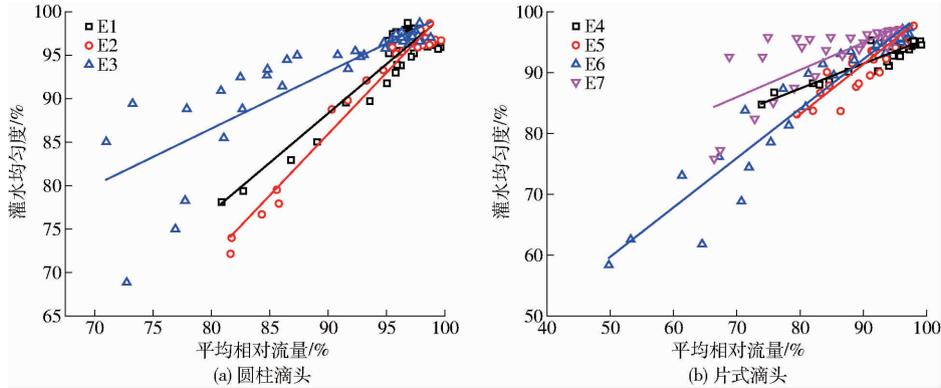


图3 7种滴头 $D_{ra}$ 和 $C_u$ 的协同变化过程

Fig.3 Coordinated variation of  $D_{ra}$  and  $C_u$  of seven kinds of emitters

表3 浑水滴灌过程中7种滴头 $D_{ra}$ 与 $C_u$ 之间关系

Tab.3 Relationship between  $D_{ra}$  and  $C_u$  of seven kinds of emitters during drip irrigation

滴头编号	$D_{ra}$ 与 $C_u$ 线性关系	$R^2$
E1	$C_u = 1.14D_{ra} - 14.04$	0.84
E2	$C_u = 1.41D_{ra} - 41.72$	0.95
E3	$C_u = 0.65D_{ra} + 34.80$	0.69
E4	$C_u = 0.41D_{ra} + 55.28$	0.88
E5	$C_u = 0.82D_{ra} + 17.30$	0.83
E6	$C_u = 0.81D_{ra} + 19.19$	0.92
E7	$C_u = 0.45D_{ra} + 55.51$	0.60

## 2.3 不同类型滴头毛管淤积物质量变化情况

图4(图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同)为试验结束后收集的毛管内泥沙淤积量。补偿片式滴头E5、E6和E7单位面积毛管淤积物质量比圆柱滴头小。浑水1试验结束后,补偿片式滴头单位面积毛管淤积物质量为 $0.0078 \sim 0.0210 \text{ g/cm}^2$ ,而圆柱滴头的为 $0.0212 \sim 0.0425 \text{ g/cm}^2$ ,其中E6和E7单位面积毛管淤积物质量都与E1有显著性差异;浑水2试验结束后,补偿片式滴头单位面积毛管淤积物质量为 $0.0393 \sim 0.1464 \text{ g/cm}^2$ ,而圆柱滴头的为 $0.1480 \sim 0.2345 \text{ g/cm}^2$ 。这说明采用圆柱滴头的毛管内更容易沉积泥沙,减小泥沙进入滴头,而采用补偿片式滴头的毛管,泥沙相对不易沉降在毛管内,更多的泥沙易通过滴头流道排出毛管。从图5可以看出,毛管

均匀度相关曲线斜率均大于1,而片式滴头的小于1,圆柱滴头 $D_{ra}$ 与 $C_u$ 的拟合直线斜率分别为1.14、1.41和0.65,片式滴头分别为0.41、0.82、0.81和0.45。当斜率大于1时,滴头灌水均匀度下降速度比平均相对流量快,斜率小于1则相反,说明随着灌水次数的增加,不同圆柱滴头之间发生堵塞程度的差异较大,而片式滴头之间差异较小,片式滴头比圆柱滴头更容易发生大部分滴头整体堵塞现象。

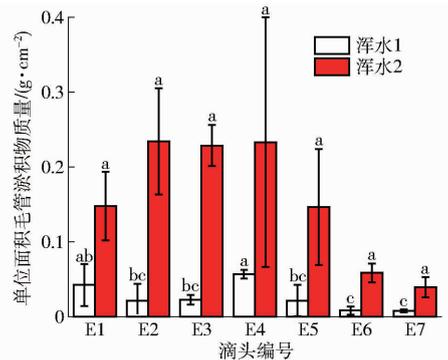


图4 7种滴头单位面积毛管淤积物质量

Fig.4 Weight of seven emitters' capillary deposit

内淤积泥沙的质量和滴头结构系数呈良好的线性关系,随着滴头结构系数的增加,毛管内淤积的泥沙质量增加。

## 2.4 不同类型滴头堵塞物质量变化情况

2种浑水试验结束后,测量7种滴头堵塞物质量并进行多重比较分析,结果如图6所示。总体而言,不同类型滴头在2种浑水灌溉结束后堵塞物质量较小。浑水1试验后,圆柱滴头堵塞物质量为 $0.0087 \sim 0.0138 \text{ g}$ ,而片式滴头为 $0.0014 \sim 0.0119 \text{ g}$ ,其中圆柱滴头E2和E3与片式滴头E4堵塞物质量有显著性差异。浑水2试验结束后,圆柱滴头堵塞物质量为 $0.0185 \sim 0.0668 \text{ g}$ ,而片式滴头为 $0.0043 \sim 0.0267 \text{ g}$ ,其中圆柱滴头E2和E3与片式滴头E4堵塞物质量有显著性差异。

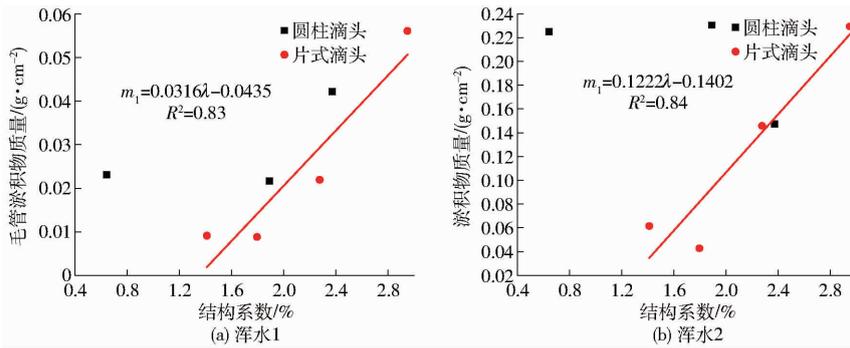


图5 7种滴头毛管淤积物质量与结构系数的拟合关系

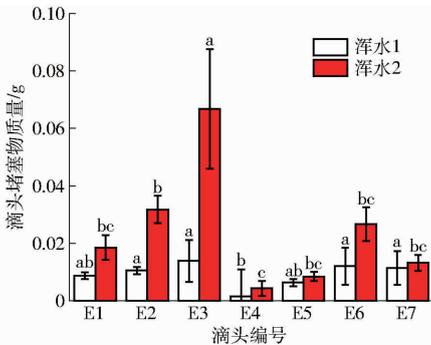
Fig. 5 Fitting relationship between  $m_1$  and structure coefficient of seven emitters

图6 7种滴头堵塞物质量

Fig. 6 Weight of seven kinds of emitter clogging material

浑水试验结束后,测量滴头堵塞物质量并拟合滴头堵塞物质量与结构系数之间的关系,结果如图7所示。从图7可以发现,2种浑水滴灌条件下,不同类型滴头堵塞物质量随着结构系数增大而减小,圆柱滴头和片式滴头结构系数由大到小依次为E1、E2、E3和E4、E5、E7、E6,而2种浑水试验后滴头堵塞物质量由大到小依次为E3、E2、E1和E6、E7、E5、E4。另外,2种浑水试验结束后,圆柱滴头堵塞物质量与结构系数拟合直线斜率分别为 $-0.0027$ 和 $-0.026$ ,而片式滴头相关直线斜率分别为 $-0.0069$ 和 $-0.013$ ,说明圆柱滴头堵塞物质量对结构系数的敏感程度易受灌溉水质影响。

### 3 讨论

前人研究发现,滴头流道结构是影响滴头抗堵

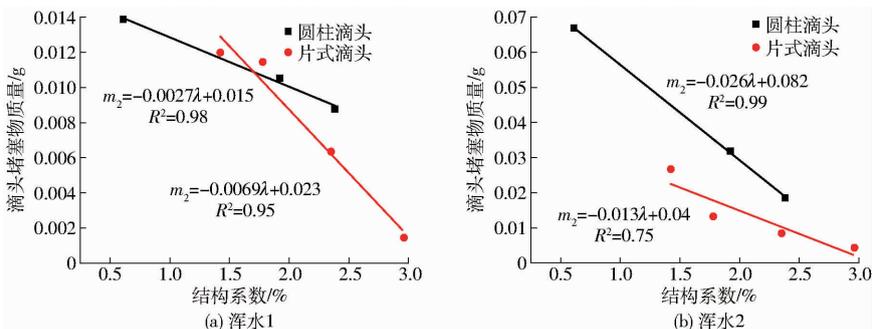


图7 7种滴头堵塞物质量与结构系数的拟合关系

Fig. 7 Fitting relationship between  $m_2$  and structure coefficient of seven kinds of emitters

塞性能的主要因素。吴显斌等<sup>[23]</sup>通过再生水滴灌试验发现滴头流道越长越易发生堵塞。穆乃君等<sup>[24]</sup>选择15种内镶片式滴头进行浑水滴灌试验发现,用单一结构参数表征其抗堵塞性能存在局限性,而断面最小尺寸等结构参数在不同程度上表征了流道的抗堵塞性能。马晓鹏等<sup>[7]</sup>通过浑水滴灌试验发现,用单一流道结构参数并不能很好地反映滴头抗堵塞性能变化趋势,而断面最小尺寸可以较好反映其与相对流量的关系。因此,本文综合考虑流道长度和断面最小尺寸这2个关键流道结构参数,以两者比值表征与滴头抗堵塞能力相关的结构系数。

2种浑水滴灌试验结束后,不同类型滴头的平均相对流量与结构系数均呈良好线性关系(图2),滴头结构系数能较好反映其与抗堵塞性能关系。浑水试验结束后,不同类型滴头的堵塞物质量随着结构系数增大而减小(图7),而滴头堵塞物质量越小说明滴头堵塞程度越小<sup>[25]</sup>。另外,马晓鹏等<sup>[7]</sup>研究发现滴头最小尺寸越大其抗堵塞性能越优,吴显斌等<sup>[23]</sup>研究发现滴头流量降幅与滴头流道长度呈正比,而结构系数增大说明滴头最小尺寸变大或者流道长度变小。因此,滴头结构系数可作为衡量不同类型滴头抗堵塞性能的重要指标,滴头抗堵塞性能随着结构系数增大而提高。本研究发现当结构系数相同时,圆柱式滴头抗堵塞性能优于片式滴头。王建东等<sup>[26]</sup>研究发现,片式滴头流道截面积较小,相对于圆柱滴头抗堵塞性能较差,与本文结论一致。

PEI等<sup>[27]</sup>通过研究得到,硬水滴灌试验时片式滴头抗堵塞性能优于圆柱滴头,这与本文试验结果存在差异。可能原因是在浑水滴灌条件下,圆柱式滴头流道断面允许较大泥沙颗粒随水流排出而不在流道内淤积,且圆柱式滴头流道内保持较大水流速度能达到反复冲洗的效果,使泥沙颗粒不易依附在流道壁面。但硬水试验时硬水中发生化学反应生成结构紧密的白色固体物质附着于圆柱式滴头流道内壁后,不易被冲散随水流排出。本文试验发现浑水1滴灌结束后,片式滴头的相对流量大于补偿片式滴头,而浑水2试验结束后,补偿片式滴头E5抗堵塞性能最优,片式滴头E4其次。LIU等<sup>[28]</sup>研究发现,在硬水滴灌过程中,补偿式滴头的相对流量比非补偿式滴头下降更少,补偿式滴头抗堵塞性能优于非补偿式滴头,而刘燕芳等<sup>[29]</sup>研究发现,硬水滴灌试验时内镶迷宫式滴头抗堵塞性能优于可拆式压力补偿滴头,滴头是否压力补偿不是影响灌水器堵塞的主要因素。DURAN-ROS等<sup>[30]</sup>通过硬水滴灌试验发现,滴头堵塞受滴头类型、滤网类型和滴头位置影响,滴头抗堵塞性能与是否压力补偿关系不大。因此,滴头抗堵塞性能不可仅以是否压力补偿进行判别,需综合考虑滴头类型、滴头结构系数以及水质等因素。

王文娥等<sup>[31]</sup>研究发现,粒径与流道结构的相对尺寸对流道的抗堵塞性有很大影响,增大流道截面积将有利于悬浮颗粒通过流道,入流颗粒尺寸为流道最小尺寸的1/10~1/6时滴头不易堵塞。李治勤等<sup>[32]</sup>研究发现,泥沙对迷宫灌水器的堵塞是一个

既突然又逐步发展的过程,且泥沙总是充满灌水器流道的整个横断面。徐文礼等<sup>[33]</sup>研究发现,直径在灌水器流道最小尺寸1/5以下的泥沙颗粒,在各种压力与浑水含沙量下几乎都可以较顺利地通过迷宫流道流出。滴头结构系数增大意味着滴头流道最小尺寸越大或者流道长度越小。另外,ADIN等<sup>[34]</sup>试验得到,流道越短或者越宽,泥沙颗粒越不容易依附在流道壁面。因此,滴头堵塞泥沙量随着滴头结构系数的增大而减小。

## 4 结论

(1)滴头类型是影响滴头堵塞的重要因素,滴头结构系数可作为衡量不同类型滴头抗堵塞性能的重要指标。滴头抗堵塞性能需综合考虑滴头类型、滴头结构系数以及水质等因素。当结构系数相同时,2种不同浑水试验后,圆柱滴头的平均相对流量均大于片式滴头。

(2)随着灌水次数的增加,片式滴头比圆柱滴头更容易发生大部分滴头整体堵塞现象。

(3)采用圆柱滴头的毛管内更容易沉积泥沙,较少泥沙进入滴头;而采用补偿片式滴头的毛管,泥沙相对不易沉降在毛管内,更多的泥沙易通过滴头流道排出毛管。

(4)不同类型滴头堵塞物质量随着结构系数增大而减小,圆柱滴头和片式滴头结构系数由大到小依次为E1、E2、E3和E4、E5、E7、E6;2种浑水试验后,滴头堵塞物质量由大到小依次为E3、E2、E1和E6、E7、E5、E4。

## 参 考 文 献

- [1] 李云开,周博,杨培岭.滴灌系统灌水器堵塞机理与控制方法研究进展[J].水利学报,2018,49(1):103-114. LI Yunkai,ZHOU Bo,YANG Peiling. Research advances in drip irrigation emitter clogging mechanism and controlling methods [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(1):103-114. (in Chinese)
- [2] 闫大壮,杨培岭,李云开,等.再生水滴灌条件下滴头堵塞特性评估[J].农业工程学报,2011,27(5):19-24. YAN Dazhuang,YANG Peiling,LI Yunkai,et al. Evaluation of drip emitter clogging with reclaimed wastewater irrigation [J]. Transactions of the CSAE,2011,27(5):19-24. (in Chinese)
- [3] 牛文全,刘璐.浑水特性与水温对滴头抗堵塞性能的影响[J/OL].农业机械学报,2012,43(3):39-45. NIU Wenquan,LIU Lu. Influences of sediment concentration and water temperature of muddy water on emitter clogging [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(3):39-45. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20120308&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120308&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.008. (in Chinese)
- [4] 余杨,许文其,宋时雨,等.红壤粒径肥料浓度和灌溉方式对不同灌水器堵塞的影响[J].农业工程学报,2018,34(15):92-99. YU Yang,XU Wenqi,SONG Shiyu,et al. Influence of red loam particles, fertilizer concentration and irrigation method on clogging of different irrigation emitters [J]. Transactions of the CSAE,2018,34(15):92-99. (in Chinese)
- [5] 王心阳,王文娥,胡笑涛,等.泥沙粒径及压力对滴头抗堵塞性能的影响[J].节水灌溉,2014(10):18-21. WANG Xinyang,WANG Wene,HU Xiaotao,et al. Influences of particle diameter and inlet pressure on emitter clogging [J]. Water Saving Irrigation,2014(10):18-21. (in Chinese)
- [6] 吴泽广,张子卓,张珂萌,等.泥沙粒径与含沙量对迷宫流道滴头堵塞的影响[J].农业工程学报,2014,30(7):99-108. WU Zeguang,ZHANG Zizhuo,ZHANG Kemeng,et al. Influence of particle size and concentration of sediment on clogging of labyrinth channels emitters [J]. Transactions of the CSAE,2014,30(7):99-108. (in Chinese)
- [7] 马晓鹏,龚时宏,王建东,等.额定压力及低压下内镶片式滴头抗堵塞性能试验[J].农业机械学报,2011,42(7):86-90. MA Xiaopeng,GONG Shihong,WANG Jiandong,et al. Anti-clogging performance of dental labyrinth emitters under rated pressure and low operating pressure [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(7):86-90. (in Chinese)

- [8] 谢巧丽,牛文全,李连忠. 迷宫流道齿转角与齿间距对滴头性能的影响[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(5):449-455.  
XIE Qiaoli, NIU Wenquan, LI Lianzhong. Effect of tooth angle and pitch of labyrinth channel on performance of emitter[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5):449-455. (in Chinese)
- [9] ZHOU B, LI Y K, LIU Y Z, et al. Effects of flow path depth on emitter clogging and surface topographical characteristics of biofilms [J]. Irrigation and Drainage, 2014, 63(1): 46-58.
- [10] ZHOU B, LI Y, LIU Y, et al. Effect of drip irrigation frequency on emitter clogging using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2015, 33(3):221-234.
- [11] 李久生,陈磊,栗岩峰. 加氯处理对再生水滴灌系统灌水器堵塞及性能的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(5):7-13.  
LI Jiusheng, CHEN Lei, LI Yanfeng. Effect of chlorination on emitter clogging and system performance for drip irrigation with sewage effluent[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5):7-13. (in Chinese)
- [12] 刘海军,黄冠华,王鹏超,等. 再生水滴灌对滴头堵塞的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(9):15-20.  
LIU Haijun, HUANG Guanhua, WANG Pengchao, et al. Effect of drip irrigation with reclaimed water on emitter clogging[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9):15-20. (in Chinese)
- [13] ZHOU B, LI Y, SONG P, et al. Anti-clogging evaluation for drip irrigation emitters using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2016, 35(3):181-192.
- [14] 闫大壮,杨培岭,赵桥. 滴头流道内部含沙水流流动特征的试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(2):52-56.  
YAN Dazhuang, YANG Peiling, ZHAO Qiao. Experimental study on sediment flow hydraulic characteristics in dripper emitter path[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2):52-56. (in Chinese)
- [15] SOLOMON K. Manufacturing variation of trickle emitters[J]. Transactions of the ASAE, 1979, 22(5):1034-1038.
- [16] 张文倩,牛文全,李学凯,等. 减缓滴头堵塞风险的毛管首次冲洗时间及周期的确定[J]. 农业工程学报,2019, 35(7):70-77.  
ZHANG Wenqian, NIU Wenquan, LI Xuekai, et al. Determination of first lateral flushing time and period to mitigate risk of emitter clogging in drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7):70-77. (in Chinese)
- [17] LIU Z, XIAO Y, LI Y, et al. Influence of operating pressure on emitter anti-clogging performance of drip irrigation system with high-sediment water[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213:174-184.
- [18] 郭霖,白丹,王新端,等. 双向对冲流灌水器水力性能和消能机理模拟与验证[J]. 农业工程学报,2017,33(14):100-107.  
GUO Lin, BAI Dan, WANG Xinduan, et al. Numerical simulation and verification of hydraulic performance and energy dissipation mechanism of two-ways mixed flow emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14):100-107. (in Chinese)
- [19] ZHOU Hongxu, LI Yunkai, WANG Yan, et al. Composite fouling of drip emitters applying surface water with high sand concentration: dynamic variation and formation mechanism[J]. Agricultural Water Management, 2019, 215(4): 25-43.
- [20] 李康勇,牛文全,张若婵,等. 施肥对浑水灌溉滴头堵塞的加速作用[J]. 农业工程学报,2015,31(17):81-90.  
LI Kangyong, NIU Wenquan, ZHANG Ruochan, et al. Accelerative effect of fertigation on emitter clogging by muddy water irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17):81-90. (in Chinese)
- [21] NIU W, LIU L, CHEN X, et al. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4):25-43.
- [22] LI Y, PAN J, CHEN X, et al. Dynamic effects of chemical precipitates on drip irrigation system clogging using water with high sediment and salt loads[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 833-842
- [23] 吴显斌,吴文勇,刘洪禄,等. 再生水滴灌系统滴头抗堵塞性能试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(5):61-64.  
WU Xianbin, WU Wenyong, LIU Honglu, et al. Experimental study on anti-clogging performance of emitters for reclaimed wastewater irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5):61-64. (in Chinese)
- [24] 穆乃君,张昕,李光永,等. 内镶片式齿型迷宫滴头抗堵塞试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(8):34-39.  
MU Naijun, ZHANG Xin, LI Guangyong, et al. Experimental study on anti-clogging performance of dental labyrinth flow passage of drip emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8):34-39. (in Chinese)
- [25] LIU Lu, NIU Wenquan, GUAN Yahui, et al. Effects of urea fertigation on emitter clogging in drip irrigation system with muddy water[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2019, 145(9):4019020.
- [26] 王建东,李光永,邱象玉,等. 流道结构形式对滴头水力性能影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2005,21(增刊1):100-103.  
WANG Jiandong, LI Guangyong, QIU Xiangyu, et al. Effects of flow passage forms on hydraulic performance of emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Supp. 1):100-103. (in Chinese)
- [27] PEI Y, LI Y, LIU Y, et al. Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation[J]. Irrigation Science, 2014, 32(2):141-157.
- [28] LIU Haijun, HUANG Guanhua. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(5):745-756.
- [29] 刘燕芳,李丹,吴普特,等. 不同类型灌水器在硬水滴灌条件下的堵塞特征[J]. 农业工程学报,2018,34(3):96-102.  
LIU Yanfang, LI Dan, WU Pute, et al. Clogging characteristic of different emitters in drip irrigation with hard water[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3):96-102. (in Chinese)
- [30] DURAN-ROS M, PUIG-BARGUES J, ARBAT G, et al. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(1):67-79.
- [31] 王文娥,王福军,牛文全,等. 滴头流道结构对悬浮颗粒分布影响的数值分析[J]. 农业工程学报,2009,25(5):1-6.  
WANG Wene, WANG Fujun, NIU Wenquan, et al. Numerical analysis of influence of emitter channel structure on suspended granule distribution[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5):1-6. (in Chinese)
- [32] 李治勤,陈刚,杨晓池,等. 迷宫灌水器中泥沙淤积特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(1):229-234.  
LI Zhiqin, CHEN Gang, YANG Xiaochi, et al. Study on sedimentation characteristics in labyrinth emitter [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2009, 37(1):229-234. (in Chinese)
- [33] 徐文礼,李治勤. 迷宫灌水器堵塞与输沙能力实验研究[J]. 山西水利科技,2008(2):10-12.  
XU Wenli, LI Zhiqin. Experimental study on clogging and the capability of sediment transportation about labyrinth emitter[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2008(2):10-12. (in Chinese)
- [34] ADIN A, SACKS M. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1991, 117(6):813-826.