doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.032

# 不同冲洗措施下迷宫流道灌水器泥沙运行分布机理研究

喻黎明[1]　余兴娇[1]　李　娜[1]　张桂林[1]　韩　栋[2]　崔宁博[3]

(1.昆明理工大学农业与食品学院,昆明 650500;2.农业农村部工程建设服务中心,北京 100081;
3.四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,成都 610065)

**摘要**:评估了 3 种冲洗流速(0.25、0.50、0.75 m/s)和 5 种冲洗频率(2 d 冲洗 1 次、4 d 冲洗 1 次、7 d 冲洗 1 次、10 d 冲洗 1 次和无冲洗对照组)对内嵌式齿形迷宫流道灌水器抗堵塞性能的影响,利用激光粒度仪对水源泥沙、滴头排出泥沙、滴头内滞留泥沙进行级配对比和粒径分析,并对不同冲洗处理下灌水器的相对流量和灌水均匀度进行拟合。结果表明:冲洗处理对齿形迷宫流道灌水器抗堵塞性能有显著影响,12 种冲洗处理提高了内嵌式齿形迷宫流道灌水器的输沙能力,使滴头使用年限平均提高了 39.58%;在冲洗作用下,泥沙凝聚沉降的机会降低,流道内小颗粒泥沙及时排出,没有形成体积较大的团聚体,滴头堵塞形成缓慢,灌水均匀度和流量系数下降缓慢;冲洗处理能有效减少毛管内泥沙堆积,降低大颗粒泥沙进入迷宫流道的机率,从而提高了齿形迷宫流道灌水器的抗堵塞性能。

**关键词**:迷宫流道灌水器;堵塞;冲洗流速;冲洗频率;粒径分布

**中图分类号**:S275.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)07-0304-09　　**OSID**:

# Sediment Distribution Mechanism of Labyrinth-channel Emitters under Different Flushing Measures

YU Liming[1]　YU Xingjiao[1]　LI Na[1]　ZHANG Guilin[1]　HAN Dong[2]　CUI Ningbo[3]

(1. *Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650500, *China*
2. *Center of Engineering and Construction Service, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing* 100081, *China*
3. *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu* 610065, *China*)

**Abstract**: Flushing is the necessary measures of micro-irrigation system maintenance, the laboratory experiment was conducted at Kunming University of Science and Technology to evaluate the effect of three targeted flushing velocities (0.25 m/s, 0.50 m/s and 0.75 m/s) and five flushing frequencies (flushing every two days, flushing every four days, flushing every seven days, flushing every ten days, and non-flushing control group) on the anti-clogging performance of the emitter. The laser particle size analyzer was used to analyze the particle size of the water source sediment, the sediment discharged by the dripper, and the retained sediment in the dripper. The relative flow rate and irrigation uniformity of the emitter were fitted under different flushing treatments. The results showed that the irrigation treatment had a significant effect on the anti-clog performance of the emitter, and the 12 irrigation treatment measures increased the service life of the emitter by 39.58% on average. Flushing can effectively reduce the accumulation of sediments in the dripline and decrease the probability of coarse particles flowing into emitters and fine particles aggregating and cementing in the labyrinth channel, thus relieving the emitter clogging. The capillary flush treatment improved the uniformity of irrigation and reduced the probability of sudden blockage of the emitter. Flushing can effectively reduce sediment accumulation in the capillary, reduce the probability of large sediment entering the labyrinth channel, and improve the anti-clogging performance of the drip head. Therefore, dripline flushing can effectively slow down clogging in muddy water drip irrigation system. The recommended flushing velocity should be set at 0.75 m/s, and the flushing intervals should be extended appropriately but not more than 7 days.

**Key words**: labyrinth-channel emitters; plugging; flushing velocity; flushing frequency; particle size distribution

收稿日期:2020-09-02　修回日期:2020-10-12

**基金项目**:国家自然科学基金项目(51769009)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019CDPZH-10)

**作者简介**:喻黎明(1976—),男,教授,主要从事水动力学和水力机械、节水灌溉理论与设备研究,E-mail:liming16900@sina.com

**通信作者**:韩栋(1979—),男,高级工程师,主要从事高效节水灌溉理论与应用研究,E-mail:13910661975@163.com

## 0　引言

我国干旱半干旱地区灌溉用水日趋紧张，利用含沙率较高的地表水源作为滴灌水源，已成为缓解灌溉用水紧张的有效途径之一[1]。但滴灌灌水器几何结构复杂和流道狭窄（仅 0.5 ~ 1.2 mm），水中的多种沉积物容易导致灌水器堵塞，直接影响灌水均匀度，甚至使整个滴灌系统失效[2-3]。我国甘肃、宁夏、内蒙古等黄河灌区的灌溉用水含沙量非常高，即使经过沉沙池和多级过滤仍然有大量的泥沙进入滴灌系统[4]。这些泥沙可作为单个颗粒通过过滤器，随后会絮凝、附着在管道内壁或有机残留物上，最终变得足够大，从而堵塞滴头[5]。因此，需要定期冲洗毛管，以清除毛管侧壁内积聚的泥沙颗粒和生物体[6-7]。一般认为，冲洗滴灌带是一种简单、方便、有效的抗堵塞方法，为保证冲洗效果，必须以适当的速度和频率进行冲洗，以移动和清除堆积的沉积物[8]。美国农业和生物工程师协会工程实践EP-405[9]建议，最小冲洗速度为 0.3 m/s；但 BRENES 等[10]认为，当需要移动排除较大粒径的沉积物时，建议冲洗速度为 0.5 ~ 0.6 m/s；PUIGBARGUÉS 等[11]认为，在冲洗速度为 0.64 m/s 时，单次冲洗效果较好。对于最佳冲洗流速至今没有一致的结论。

很多学者还探索了不同冲洗频率对抗堵塞性能的影响，RAVINA 等[12]研究了每日冲洗的影响，HILLS 等[13]研究了每周两次冲洗和每周一次冲洗的影响，PUIGBARGUÉS 等[14]研究了每两周冲洗一次的影响。PUIGBARGUÉS 等[15]还比较了每次灌水结束、每月和季节性灌水结束以 3 种频率冲洗毛管的效果，发现在没有灌水的情况下，毛管远端灌水器堵塞更为严重，而后两种冲洗频率对灌水器堵塞的影响没有显著差异。LI 等[16]在滴灌试验中评估了 3 种冲洗频率（3 周、双周和单周）对灌水器堵塞的影响，发现双周冲洗优于单周冲洗和 3 周冲洗。王亚林等[17]认为，当进入滴灌系统的泥沙超过 40% 时，应该定期冲洗毛管，最好的效果是每次灌水结束都对毛管进行冲洗。张文倩等[18]认为，冲洗周期在 5 ~ 7 d 时效果最好。对于最佳冲洗周期也没有统一的方案，本文评估 3 个冲洗流速和 5 种冲洗频率对滴灌系统中灌水器堵塞的影响，利用激光粒度仪对滴头排出泥沙和残留在滴头内的泥沙进行级配和粒径分布分析，为浑水灌区毛管冲洗提供方案选择。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验材料与装置

#### 1.1.1　试验材料

试验中使用 Malvern2000 型激光粒度分析仪（Malvern Instruments Ltd.，Malvern，英国）分析泥沙和沉积物的级配及粒径分布，粒度分析仪的尺寸测量范围为 0.02 ~ 2 000 μm，颗粒尺寸按升序排列，当累积体积为 10%、25%、50%、75%、90% 时，测得沉积物中的最大粒径分别表示为 V10、V25、V50、V75、V90。配制浑水的试验用土采自云南省昆明市呈贡区的砂壤土，由于滴灌系统中通常采用 120 目网式过滤器，其网眼直径为 0.125 mm[19-20]，因此本试验用土经自然风干研磨后过 120 目筛网。灌水器选取大禹节水集团股份有限公司生产的内嵌式齿形迷宫流道灌水器（图 1）进行灌水试验，滴灌带的结构参数为：外径 16 mm，壁厚 0.36 mm，流道深 0.61 mm，流道宽 1.02 mm，迷宫流道齿高 0.86 mm，齿宽 1.25 mm，齿间角 38.5°。

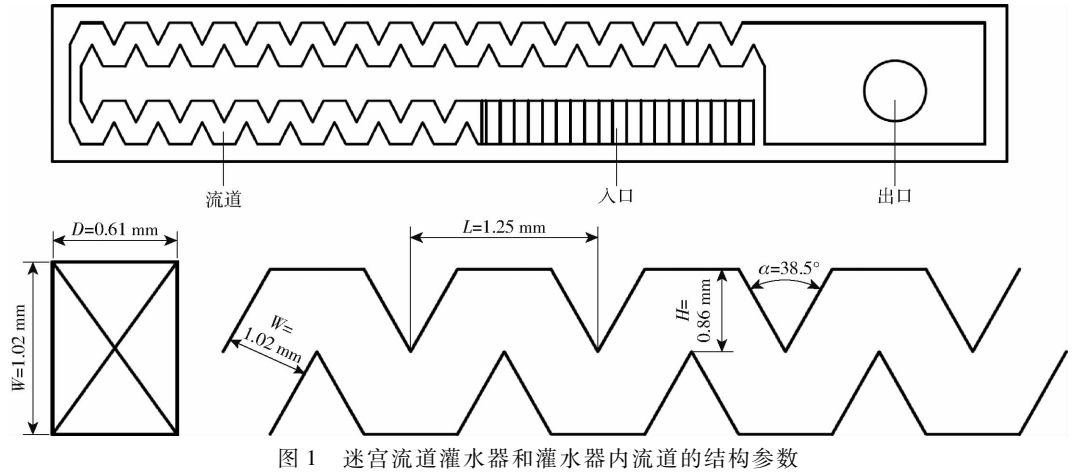


图 1　迷宫流道灌水器和灌水器内流道的结构参数

Fig. 1　Labyrinth-channel emitter and parameters of flow path in emitters

#### 1.1.2　试验装置

试验测试装置如图 2 所示，主要包括储存清水和浑水的两个直径 0.6 m、高 1 m 的圆柱形蓄水桶，浑水桶内配置一个功率 1.8 kW、额定扬程 35 m、流

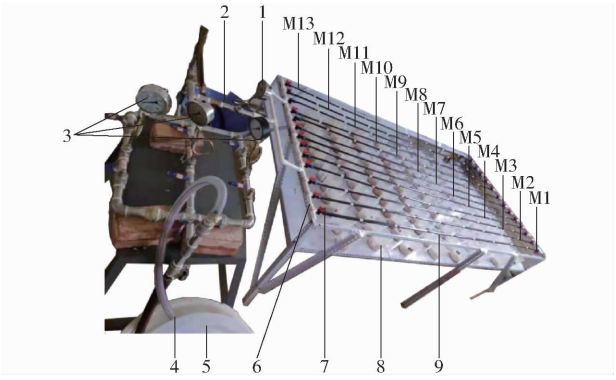


图 2 试验测试装置

Fig. 2 Test platform

1. 压力表Ⅰ 2. 浑水箱 3. 压力表Ⅱ 4. 潜水泵 5. 清水箱 6. PVC 管 7. 球阀 8. 量杯 9. 滴灌带

量 1.8 $m^3/h$ 的潜水泵提供工作压力,主干管与浑水桶中的潜水泵相连,进水口处装有压力表Ⅰ,量程和精度分别为 0.4 MPa 和 25%,用来调节灌溉时的进口压力。清水桶配置 1 个功率 0.37 kW、额定扬程 16 m 的潜水泵,功率较小方便调节冲洗流速,3 根平行管道与清水桶中的潜水泵相连,每根管道的前、后端均装有控制阀和压力表Ⅱ,量程 0.06 MPa,精度 25%,用来调节冲洗流速。滴灌系统平台长 3.0 m,宽 2.8 m,高 0.8 m,13 条毛管安装在试验平台上,毛管的两端均装有球阀,由于毛管铺设长度越短,灌水均匀度越好,为控制灌水均匀度,本试验的毛管铺设长度 2.2 m,毛管间距 0.16 m,每条毛管上装有 8 个滴头,滴头间距 0.3 m。

### 1.2 试验方案和方法

试验分清水试验和浑水灌溉试验两部分进行。

#### 1.2.1 清水试验

清水试验按照 ISO 9261 的标准进行[21],测量 0.01 ~ 0.1 MPa 间隔为 0.01 MPa 的滴头流量,测量方法:灌水时在每个滴头下方放置一个 1 000 mL 量杯用来收集灌水器排出的清水,每次灌水持续时间 30 min,间隔 1 h,用数字天平称量,其精度为 0.01 g,取各流量的平均值作为每个压力点的流量。

水力特征可用流量和压力的关系表示为

$$q = k_d h^x \tag{1}$$

对式(1)两边取自然对数得

$$\ln q = \ln k_d + x \ln h \tag{2}$$

式中 $q$——清水流量,$m^3/s$

$h$——压力水头,m

$k_d$——流量系数

$x$——流态系数

将清水试验中灌水器在不同压力下的流量代入式(2),通过回归计算可得到流态系数为 1.12,流量系数为 0.49,0.1 MPa 下清水流量为 0.42 $m^3/s$。

#### 1.2.2 浑水试验

试验为短周期间歇性灌水试验,测试不同冲洗处理(表 1)对内嵌式齿形迷宫流道灌水器抗堵塞性能的影响,设定 5 种冲洗频率分别为 2 d 冲洗 1 次(F1/2)、4 d 冲洗 1 次(F1/4)、7 d 冲洗 1 次(F1/7)、10 d 冲洗 1 次(F1/10)和无冲洗对照组,3 种冲洗流速为 0.25、0.50、0.75 m/s,对应冲洗压力为 0.004、0.008、0.012 MPa,固定前端闸阀的位置,冲洗时仅打开末端闸阀,依次冲洗毛管,冲洗时间持续 5 min。

**表 1 毛管冲洗处理措施组合**

**Tab. 1 Combination of capillary flushing treatment measures**

| 毛管编号 | 冲洗频率/(次·$d^{-1}$) | 冲洗流速/(m·$s^{-1}$) |
|---|---|---|
| M1 | 1/2(2 d 冲洗 1 次) | 0.75 |
| M2 | 1/2 | 0.50 |
| M3 | 1/2 | 0.25 |
| M4 | 1/4(4 d 冲洗 1 次) | 0.75 |
| M5 | 1/4 | 0.50 |
| M6 | 1/4 | 0.25 |
| M7 | 1/7(7 d 冲洗 1 次) | 0.75 |
| M8 | 1/7 | 0.50 |
| M9 | 1/7 | 0.25 |
| M10 | 1/10(10 d 冲洗 1 次) | 0.75 |
| M11 | 1/10 | 0.50 |
| M12 | 1/10 | 0.25 |
| M13 | 无冲洗(对照组) | |

#### 1.2.3 试验过程

试验在昆明理工大学实验室进行,为防止温度对灌水器流量和抗堵塞性能的影响,试验于 2019 年 10 月 7 日—11 月 7 日 13:00—17:00 开展,试验设置 3 个重复,重复组开展的时间为 2019 年 11 月 10 日—12 月 5 日,2019 年 12 月 10 日—2020 年 1 月 10 日,灌水时段相同,试验配置浑水质量浓度为 3.0 g/L,灌水时工作压力为 0.1 MPa,灌水持续时间 30 min,试验过程中一直搅拌浑水,使水沙均匀混合防止泥沙沉积,在所有滴头的下方放置一个 1 000 mL 烧杯,收集滴头排出的浑水,用数字天平称量每个灌水器排出的浑水,用来测量滴头流量,每一条毛管所有滴头排出的浑水在测量质量后,倒入浑水收集箱中充分混合,用烧杯取样,考虑所有的毛管,每次灌水取 13 个样本,用激光粒度仪对泥沙的粒径及分布情况进行分析,试验中一共测量 20 × 13 × 3 个样本。每一轮灌水试验结束后,取下所有的毛管放在通风处晾干,然后将毛管分前、中、后 3 段,剖开滴头,清洗并收集滴头内沉积泥沙,分别进行标号,将溶液充分混合后倒入激光粒度仪测量粒径分布,试验中共测量 13 × 3 × 3 个(13 条毛管,3 次重复,每条毛管分

为 3 段)样本。每组试验结束后,更换新的毛管并对水桶、水泵进行冲洗,排出支管、干管内的泥沙后进行后续试验。

### 1.3　水源泥沙粒径分析

试验用土经筛网进行过滤,装入密封袋搅拌均匀后,从中随机抽取 5 个泥沙样品,经激光粒度仪分析得到试验泥沙粒径分布,V10 为 3.29 μm,V25 为 7.83 μm,V50 为 16.86 μm,V75 为 31.07 μm,V90 为 48.80 μm。

### 1.4　评价指标及方法

采用相对流量 $D_{ra}$、克里斯琴森均匀度(灌水均匀度)$C_u$相结合的方法评价灌水器抗堵塞性能[22],$D_{ra}$为灌水器浑水流量占相同进口压力下的清水流量的百分比,$D_{ra}$越小,说明灌水器的抗堵塞性能越差,以实测灌水器浑水流量占清水流量百分比小于 75%判定滴头发生堵塞[21],相对流量计算公式为

$$D_{ra}=\frac{q_n}{nq_o}\times 100\% \tag{3}$$

式中　$q_n$——第 $n$ 次试验滴头实测平均流量,L/h

$q_o$——0.1 MPa 下滴头清水流量,L/h

$n$——测试滴头总数

微灌工程技术规范要求滴灌工程的灌水均匀度 $C_u>80\%$[23],均匀度是根据每个滴头流量和平均流量之差的绝对值建立的,是各种灌水均匀度的普遍表示方法,可以应用于整个滴灌系统、支管系统或者 1 条独立的毛管,$C_u$ 计算公式为

$$C_u=\left(1-\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|q_i-\bar{q}|}{\bar{q}}\right)\times 100\% \tag{4}$$

式中　$q_i$——第 $i$ 个滴头的实测流量,L/h

$\bar{q}$——滴头实测平均流量,L/h

### 1.5　数据处理

数据采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,采用主效应方差分析不同的冲洗频率和冲洗流速及两因素的交互作用对滴头抗堵塞性能的影响,当方差分析主效应显著时($P<0.05$),用 LSD 事后检验法检测组间差异显著性,所有数据分析前进行方差同质性和正态性检验。利用 Origin 8.5 软件进行绘图。

## 2　结果与分析

### 2.1　冲洗处理对灌水器流量的影响

图 3 为浑水灌溉时不同冲洗组合措施下灌水器流量与灌水次数的关系,水平直线表示在工作压力 0.1 MPa 下初始流量的 75%,一般认为当滴头相对流量小于 75%时,滴头发生严重堵塞。

在灌水初期,12 种冲洗处理与无冲洗对照组的灌水器流量下降缓慢,该阶段冲洗对灌水器流量的影响较小,随着灌水次数的增加,所有灌水器流量均呈下降趋势,中后期灌水器流量降幅总体大于灌水初期,表明随着灌水次数的增加滴头堵塞程度逐渐加重。流量在下降过程中存在波动,说明灌水器的堵塞存在着堵塞冲开再堵塞的循环过程,灌水 8 次以后,灌水器流量减小速度加快,灌水 20 次后所有灌水器的平均流量均低于初始流量的 75%,滴头发生严重堵塞。在不同的冲洗组合中,M13(无任何冲洗措施)首先达到初始流量的 75%,且在试验结束时流量最小,仅经过正常灌水 8.89 次后发生堵塞。在 12 种冲洗处理组中冲洗频率最小、冲洗流速最低的 M12 流量下降最快,最先达到堵塞,其正常灌水次数仅比未冲洗组提高 2.27%。冲洗频率为 F1/2、F1/4 的灌水器,其平均流量在整个灌水过程中下降缓慢,降幅最大分别为 2.18%、6.03%,而冲洗频率为 F1/7、F1/10 的冲洗组,灌水器平均流量下降速率较快,最大降幅分别为 27.03%、27.83%,且冲洗对灌水器流量恢复影响较小,进入了冲洗无效期,因此毛管的冲洗频率应不小于 F1/7 才能获得较佳的冲洗效果。冲洗频率为 F1/2 和冲洗流速为 0.75、0.50、0.25 m/s 的毛管(M1、M2 和 M3)比冲洗频率为 F1/4 相应冲洗流速下正常灌水次数分别提高 15.07%、22.34%、29.58%,表明低速冲洗时,需要频繁冲洗毛管才能延缓堵塞进程,高速冲洗毛管时冲洗周期可以适当延长,但是不宜超过 7 d,12 种冲洗处理使灌水器使用年限平均提高了 39.58%。本研究在冲洗频率为 F1/2、冲洗流速为 0.75 m/s 时效果最佳。

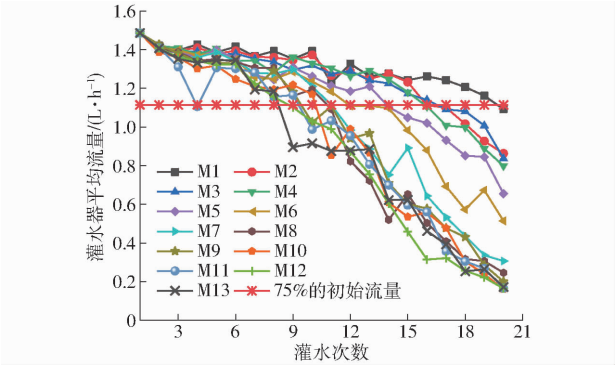


图 3　灌水器平均流量随灌水次数的变化曲线

Fig. 3　Average discharge of emitter varied with number of irrigations

根据方差分析(表 2,FV × FF 为冲洗流速与冲洗频率的交互项),冲洗流速和冲洗频率均对灌水器提供正常灌溉次数有极显著的影响,其交互作用对灌溉次数无显著影响,表明在进行浑水灌溉时,增加冲洗流速或者提高冲洗频率均能有效延缓灌水器

流量的下降,延长灌水器的使用时间。

**表 2 冲洗流速、冲洗频率对正常灌水次数影响的方差分析**

**Tab. 2 Analysis of variance of flushing velocity and frequency to normal irrigation times**

| 方差来源 | 离差平方和 | 自由度 | 平均离差平方和 | $F$ |
|---|---|---|---|---|
| 冲洗流速 | 26.78 | 2 | 13.39 | 7.56** |
| 冲洗频率 | 194.27 | 3 | 64.75 | 36.57** |
| FV × FF | 21.88 | 6 | 3.65 | 2.06 |

注:** 表示差异极显著($P<0.01$)。

## 2.2 冲洗处理对灌水均匀度的影响

图 4 中 $C_u$ 随灌水次数的增加而下降,即随着灌水时间的增加,滴头发生了不同程度的堵塞,滴灌系统的 $C_u$ 越来越差,冲洗频率为 F1/2、F1/4 时毛管 $C_u$ 在整个灌水期间波动变化较小,最大降幅发生在 11 ~ 18 d,冲洗频率为 F1/7、F1/10 的冲洗组 $C_u$ 下降速率均较快,最大降幅发生在 9 ~ 16 d,灌水 20 次后,毛管冲洗处理组 $C_u$ 比未冲洗对照组提高 10.96% ~ 84.05%,冲洗频率为 F1/2 和冲洗流速为 0.75、0.50、0.25 m/s 的毛管 $C_u$ 在 93.2% ~ 69.1%、90.3% ~ 58.6%、94.5% ~ 56.9% 之间,下降幅度相差不大,说明每 2 d 冲洗毛管,流速对 $C_u$ 的影响较小。当冲洗流速为 0.25 m/s,频率为 F1/2、F1/4、F1/7 和 F1/10 时,经过 20 次灌水后,$C_u$ 分别下降到 69.12%、50.67%、12.65% 和 5.53%,表明冲洗频率为 F1/7、F1/10 时,$C_u$ 快速下降,就整个灌水周期而言,在前 6 次灌水中冲洗处理和无冲洗组之间没有显著的差异,在滴灌系统提供 8 次灌水以后差异逐渐明显。这是由于过滤后的泥沙粒径较小,灌水时泥沙随水流进入流道,由于流道内水流速度极低,卷入后很难再被冲出,泥沙碰撞凝聚沉降,由于冲洗周期长,流道内的小颗粒泥沙没有及时排出,形成体积较大的团聚体,造成滴头堵塞。

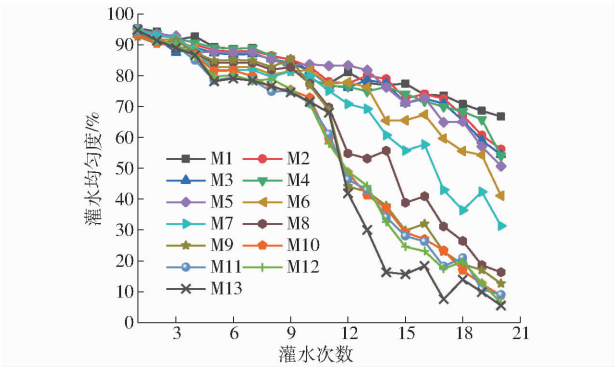


图 4 灌水均匀度随灌水次数的变化曲线

Fig. 4 Change of uniformity of emitter with irrigation times

## 2.3 滴头相对流量与灌水均匀度的动态变化

将滴头的 $D_{ra}$ 和 $C_u$ 进行拟合分析,结果见图 5 和表 3。由图 5 可知,滴头的 $D_{ra}$ 与 $C_u$ 的动态变化

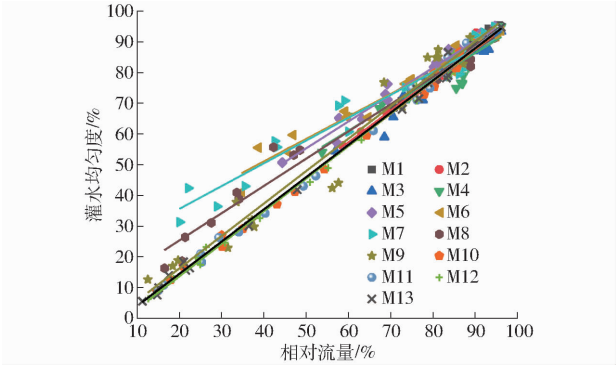


图 5 不同冲洗措施下滴头相对流量和灌水均匀度的协同变化曲线

Fig. 5 Correlation between relative emitter discharge and Christiansen uniformity coefficient

**表 3 灌水器滴灌过程中滴头相对流量与灌水均匀度之间的关系**

**Tab. 3 Relationship between emitters $D_{ra}$ and $C_u$ in muddy water drip irrigation**

| 毛管编号 | $D_{ra}$ 与 $C_u$ 线性关系式 | $R^2$ |
|---|---|---|
| M1 | $C_u = 1.056D_{ra} - 6.514$ | 0.979 |
| M2 | $C_u = 1.034D_{ra} - 4.829$ | 0.982 |
| M3 | $C_u = 1.018D_{ra} - 4.568$ | 0.941 |
| M4 | $C_u = 1.052D_{ra} - 10.433$ | 0.845 |
| M5 | $C_u = 1.047D_{ra} - 11.655$ | 0.962 |
| M6 | $C_u = 1.051D_{ra} - 21.872$ | 0.953 |
| M7 | $C_u = 0.963D_{ra} - 20.802$ | 0.947 |
| M8 | $C_u = 0.942D_{ra} - 7.632$ | 0.976 |
| M9 | $C_u = 0.923D_{ra} - 4.840$ | 0.956 |
| M10 | $C_u = 0.864D_{ra} - 6.923$ | 0.996 |
| M11 | $C_u = 0.843D_{ra} - 7.331$ | 0.953 |
| M12 | $C_u = 0.730D_{ra} - 7.476$ | 0.962 |
| M13 | $C_u = 0.741D_{ra} - 6.446$ | 0.947 |

具有协同性,两者均随着灌水次数的增加而同步减小,$D_{ra}$ 与 $C_u$ 之间呈一定的线性相关关系。从拟合曲线的斜率看,冲洗频率为 F1/2、F1/4 的冲洗处理组,其拟合直线斜率最小值分别为 1.018、1.047,均大于 1,灌水器的 $D_{ra}$ 下降速率大于 $C_u$ 的下降速率,表明在高频冲洗下滴灌带上的灌水器堵塞进程比较均匀,没有出现或极少出现大颗粒泥沙进入流道引起突然堵塞现象,滴头堵塞大多属于泥沙缓慢累积引起,属于正常的缓慢堵塞过程。冲洗频率为 F1/7、F1/10 时拟合直线斜率最大分别为 0.963、0.864,均小于 1,表明滴灌系统的 $C_u$ 下降速率快于 $D_{ra}$,这是由于冲洗频率较低,大粒径泥沙进入流道,出现了突发性堵塞现象,少数灌水器的堵塞程度突然加快,从而 $D_{ra}$ 明显低于 $C_u$。所有毛管的拟合直线 $R^2$ 均不小于 0.845,拟合程度较高,表明在整个灌水期间 $D_{ra}$ 与 $C_u$ 的变化存在明显的线性关系。

### 2.4　滴头排出泥沙的粒径分析

由图 6a 可知，在不同冲洗流速下 V10、V25、V50、V75 和 V90 的平均值分别为 1.46、3.14、6.22、11.38、5.35 μm；由图 6b 可知，不同冲洗频率下 V10、V25、V50、V75 和 V90 的平均值分别为 1.47、2.38、6.30、11.41、15.76 μm，均低于无冲洗（冲洗流速为 0 m/s）下相应的粒径。在低速和低频冲洗下，毛管内泥沙悬浮液浓度较高，在水流的作用下带动大颗粒的泥沙进入流道，因此随着冲洗频率和冲洗流速的减小，滴头排出的大颗粒泥沙 V50、V75 和 V90 偏大。不同冲洗流速及冲洗频率对排出泥沙 V50、V75 和 V90 的作用显著，对排出的小粒径泥沙 V10、V25 作用不明显，表明大颗粒泥沙易被困于管道内，且通过流道受冲洗流速和频率的影响大，而小颗粒泥沙随水流进入流道，从流道内排出受流速和频率的影响较小。

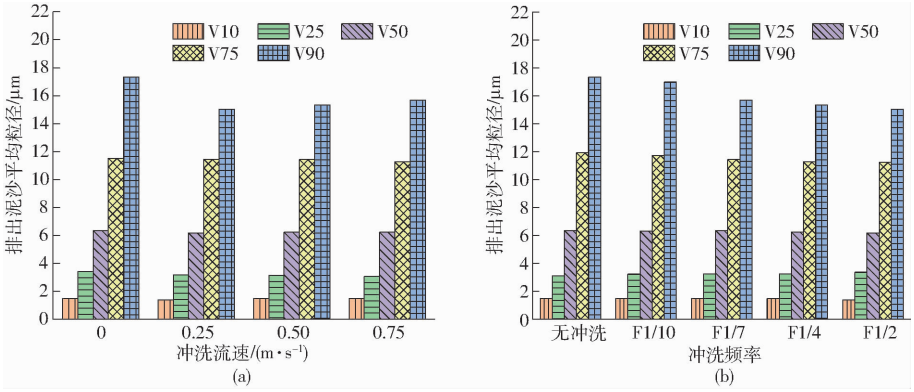


图 6　灌水器排出泥沙 V10、V25、V50、V75、V90 的均值

Fig. 6　Average value of sediment V10, V25, V50, V75 and V90 discharged from emitters

### 2.5　滴头内滞留泥沙分析

#### 2.5.1　不同冲洗流速下滴头内滞留泥沙粒径分析

由图 7 可知，灌水器内部的沉积物 V10、V25、V50、V75 和 V90 均随着冲洗流速的增加而降低，在无冲洗时沉积泥沙的粒径最大。无冲洗时前、中、后段滴头内滞留泥沙 V90 分别为 84.61、86.78、88.05 μm，是冲洗流速 0.75 m/s 时的 1.30、1.27、1.20 倍，表明冲洗减少了大粒径泥沙进入迷宫流道，且随着毛管入口距离的增加冲洗对灌水器内泥沙粒径的作用逐渐减弱。冲洗流速为 0.75 m/s 时灌水器内沉积物 V50、V75 和 V90 的平均值分别为 33.27、44.54、68.86 μm，比冲洗流速为 0.25 m/s 时分别下降了 13.32%、18.23% 和 22.62%。所有的灌水器内沉积泥沙 V50、V75 和 V90 随冲洗流速增加而减小，而流速增加对 V10 和 V25 的影响较小，表明冲洗流速的增加可以有效减少滴头内部残留的大颗粒泥沙。

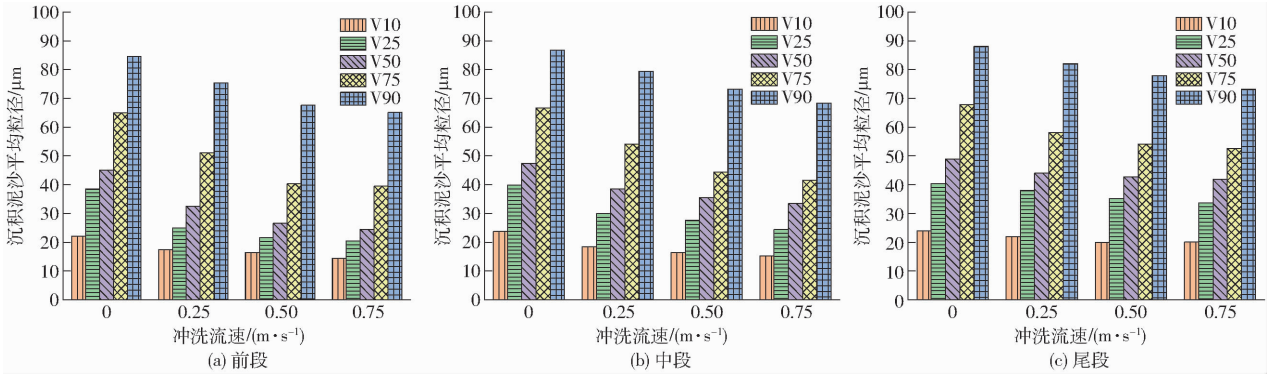


图 7　不同冲洗流速下滞留灌水器内泥沙 V10、V25、V50、V75、V90 的均值

Fig. 7　Mean values of sediment V10, V25, V50, V75 and V90 in retained emitters under different flushing velocity

#### 2.5.2　不同冲洗频率下滴头内滞留泥沙粒径分析

图 8 中毛管前段灌水器内沉积物 V50、V75、V90 随着冲洗频率的增加而减小，在频率为 F1/2、F1/4 时灌水器内滞留泥沙 V90 的平均值分别为 67.12、67.24 μm，比无冲洗降低了 21.74%、21.60%。在 F1/7 和 F1/10 条件下灌水器内滞留泥沙 V90 分别为 76.11、78.93 μm，比无冲洗降低了 11.25%、9.13%，表明冲洗频率的减少会导致毛管内泥沙堆积，使大粒径泥沙进入迷宫流道内，从而增大流道内部残留泥沙粒径导致堵塞进程加快。为获得较佳的冲洗效果，冲洗频率不宜低于 F1/7。

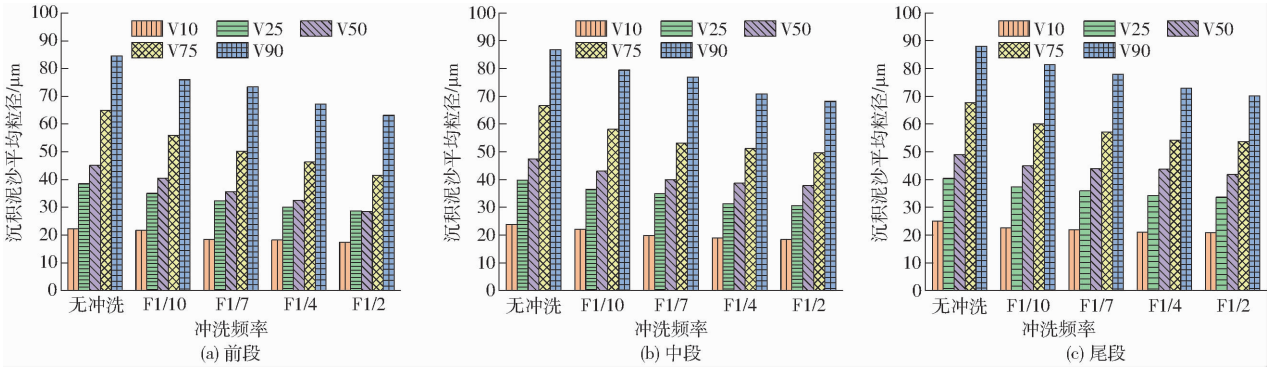


图 8 不同冲洗频率下滞留灌水器内泥沙 V10、V25、V50、V75、V90 的均值

Fig. 8 Mean values of sediment V10, V25, V50, V75 and V90 in retained emitters under different flushing frequency

## 3 讨论

### 3.1 冲洗处理对灌水器流量的影响

对于滴灌系统,定期冲洗毛管可以阻止沉积物颗粒的聚集、降低有机残留物粘附产生大颗粒,从而有效地防止滴头堵塞[24-25]。研究表明,冲洗频率为 F1/2、F1/4 时,灌水器的流量下降缓慢,堵塞时间延长,频率为 F1/7、F1/10 时,堵塞进程加快,冲洗进入无效期,冲洗对灌水器的流量恢复影响较小。

FENG 等[26]通过研究渤海地区的盐水发现随着灌水时间的增加迷宫流道灌水器的流量均有所下降,然而高频冲洗(每天冲洗或每 5 d 冲洗 1 次)在一定程度上延缓了灌水器流量的下降,认为每 5 d 冲洗一次毛管足以控制灌水器堵塞,而其他 3 种低频冲洗未能防止堵塞。ELBRRY 等[27]研究指出,高频冲洗下灌水器的流量明显高于低频冲洗,上述研究结果与本研究结果一致。然而很多学者研究了不同的冲洗频率对再生水灌溉中灌水器堵塞的影响,得到了一些不同的结论,PUIGBARGUÉS 等[14]发现,在冲洗流速为 0.6 m/s 的再生水灌溉系统(包括地表和地下滴灌)中,不同冲洗频率对灌水器堵塞的影响没有显著差异,每月和每季度冲洗对抑制滴头堵塞的效果相似,灌水器堵塞主要受灌水器位置和灌水器类型的影响。这可能是由于 PUIGBARGUÉS 等[14]设置的冲洗周期是 15 d 和 30 d,间隔过长,同时滴灌带长约 90 m 且地埋等原因,导致冲洗结果不理想,而本文中滴灌带长 2.2 m,易冲洗干净,最大冲洗间隔仅为 10 d,因此效果显著。此外 LI 等[28]发现,再生水滴灌系统中,以速度 0.45 m/s 进行毛管冲洗时,高频冲洗(1 周 1 次)和低频(每 3 周 1 次)冲洗的毛管没有达到预期结果,双周冲洗的效果优于单周和 3 周,这与本研究的结果不一致,原因可能是此研究中堵塞是由生物膜的生长造成,高频冲洗导致生物膜的生长停留时间短,生物膜很小但总量较多,生物膜脱落增加,导致排放口堵塞加剧,流量减小。低频冲洗时,生物膜有足够的时间生长,微生物大量生长脱落堵塞排放口中,导致灌水器流量快速减小。

此外,本试验研究了最大目标冲洗流速 0.75 m/s 与目标流速 0.25、0.50 m/s 对灌水器流量的影响,发现冲洗流速对灌水器提供有效灌水次数有显著影响,在浑水灌溉后,采用清水冲洗可使灌水器的使用年限平均提高 39.58%,且冲洗流速高能导致滴头更迟钝,从而延缓灌水器流量的下降。DURANROS 等[29]指出,冲洗流速对沉积物和污染物的去除至关重要,随着冲洗流速和冲洗量的增加,滴管内固体沉积物的去除量和/或分布更加均匀。此外 ZHANG 等[30]比较了恒压和脉冲压力对迷宫流道滴头防堵塞性能的影响,发现脉冲压力可以减轻堵塞、增加灌水器的排放,因为冲洗压力与冲洗流速呈正比,这与本研究的结果一致。然而 HILLS 等[13]使用二级废水灌溉时,研究发现每月以 2 m/s 的速度冲洗两次或以较低速度每周冲洗一次均能有效防止灌水器流量下降。PUIGBARGUÉS 等[15]描述冲洗流速大约在 0.3 m/s 时就已足够去除淤积在毛管和流道内的沉积物,冲洗流速的增加对灌水器的流量影响不大,这与本文的研究结果不一致,这可能是因为试验中采用的灌溉用水的水质不同,所引起的堵塞机理不一样,PUIGBARGUÉS 等[15]研究中滴头的堵塞主要是由化学和生物造成,此外,可能没有充分考虑灌水器中悬浮泥沙运移的复杂性。

### 3.2 冲洗处理对沉积物位置分布与滴头内泥沙粒径的影响

冲洗处理能有效去除滴灌管中的残余沉积物,并保持迷宫流道的清洁度和通过性。在本研究中采用 3 种冲洗流速(0.25、0.50、0.75 m/s)和 5 种冲洗频率(F1/2、F1/4、F1/7、F1/10 和无冲洗控制组)冲洗毛管,研究发现冲洗对迷宫流道中残余沉积物的粒径有显著影响,小颗粒泥沙跟随性好,易随水排出流道,大颗粒泥沙在迷宫流道中的滞留、淤积是造成

滴头堵塞的主要因素[31-32]，这可能是高速高频冲洗的结果。KOU 等[33]研究称散体材料（如粉末、沙子和泡沫）的无序系统在未受到干扰时会形成稳定的结构，但会在外部影响的作用下“松弛”成为流体。此外，NIU 等[34]认为，高含沙水中的颗粒数量相当多，在没有扰动时，这些颗粒易聚集在一起形成较大尺寸的沉积物，而依靠水力剪切力可以排出大量的泥沙颗粒从而有效防止细颗粒泥沙絮凝、固结堵塞滴头。类似地，无论是冲洗压力还是冲洗流速、冲洗频率都会对粒子系统产生微小扰动而使被困在毛管和迷宫流道中的一些粒子不稳定，增加流道中粒子的流动性，从而使滴头保持更大的排放量，延长灌水器的有效使用时间。

研究发现，在高速高频冲洗处理下的毛管内壁上沉积物极少出现，未冲洗和低速低频冲洗的毛管内壁上可见沉积物堆积固结，ZHOU 等[35]也发现了类似的现象，认为未进行冲洗的 SDI 滴管内的沉积物沉积明显大于冲洗的，并且几乎是冲洗滴管的 3 倍。此外，SHANNON 等[36]的滴灌支管泥沙输移与淤积研究表明，沉积物沉积和移动遵循已知的沙丘方式移动理论，并在试验中观察到了透明管中沙粒表现为沙丘式的运动，泥沙的堆积位置随冲洗间隔而变化，在较小的冲洗间隔中，较大的颗粒被带到下游更远的地方，冲洗处理会使毛管内悬浮液的沉积速度减慢，在沉积发生之前悬浮泥沙进一步向下移动。为了保持毛管的清洁度，冲洗应以足够快的频率进行，在本研究中为保持较佳的冲洗效果冲洗频率不应小于 F1/7。

ABULNAGA[37]发现，在较大的冲洗速度下，单次冲洗的泥沙去除量更大，但随着冲洗速度降低和冲洗频率增加，沉积物的去除效果会稍好一些，在固体沉积量较大而冲洗频率较低时，可能会导致沉积点的局部冲洗速度增加，从而导致沉积物更多地被冲蚀，使冲洗水的清除量更大。除冲洗流速和频率的影响外，增加冲洗时间可能是一个更重要且成本更低的方法，增加冲洗频率和提高冲洗流速会增加劳动力需求，且高流速会提高滴灌系统的运行成本，冲洗持续时间的影响应在后续的试验中加以考虑。

## 4　结论

（1）采用清水冲洗显著提高了浑水灌溉中内嵌式齿形迷宫流道灌水器的抗堵塞性能。通过冲洗能够减少大颗粒泥沙沉积在管道内、保持毛管内壁的清洁度，同时还能降低小颗粒泥沙发生絮凝、吸附在迷宫流道入口及流道内壁的机率，降低灌水器堵塞的风险，延长灌水器使用寿命，12 种冲洗处理使灌水器使用年限平均提高了 39.58%。

（2）冲洗频率和冲洗流速对灌水器流量均有显著影响。低速冲洗时，需要频繁冲洗毛管才能有效控制堵塞；高速冲洗时，冲洗频率可以适当降低，但不应低于 F1/7；超过 7 d 毛管进入冲洗无效期，冲洗流速及频率的变化对冲洗效果影响较小，冲洗不能防止滴头堵塞。

（3）灌水均匀度和相对流量的变化具有协同性，在整个灌溉期内，二者有明显的线性相关关系。

## 参　考　文　献


[1] 齐学斌，樊向阳，王景雷，等. 井渠结合灌区水资源高效利用调控模式[J]. 水利学报，2004，35(10)：119-124.
QI Xuebin, FAN Xiangyang, WANG Jinglei, et al. Optimal allocation of water resources in well-canal combined irrigated area for high efficient utilization of water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(10): 119-124. (in Chinese)

[2] LIU H, HUANG G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent[J]. Agricultural Water Management, 2008, 96(5): 745-756.

[3] 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.

[4] 葛令行，魏正英，曹蒙，等. 微小迷宫流道中的沙粒沉积规律[J]. 农业工程学报，2010，26(3)：20-24.
GE Lingxing, WEI Zhengying, CAO Meng, et al. Deposition law of sand in labyrinth-channel of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 20-24. (in Chinese)

[5] BOUNOUA S, TOMAS S, LABILLE J, et al. Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches[J]. Irrigation Science, 2016, 34: 327-342.

[6] ADIN A, SACKS M. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(6): 813-826

[7] RAVINA I, PAZ E, SOFER Z, et al. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater[J]. Irrigation Science, 1992, 13(3): 129-139.

[8] GUI B, LI Y, XU T, et al. Effects of average velocity on the growth and surface topography of biofilms attached to the reclaimed wastewater drip irrigation system laterals[J]. Irrigation Science, 2012, 30(2): 103-113.

[9] Microirrigation emitter-clogging procedure: drafts of ISO/TC 23/SC 18/WG5[S]. 2003.

[10] BRENES M J, HILLS D J. Microirrigation of wastewater effluent using drip tape[J]. Applied Engineering in Griculture, 2001, 17(3): 303-308.

[11] PUIGBARGUÉS J, LAMM F R, TROOIEN T P, et al. Effect of dripline flushing on subsurface drip irrigation systems[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(1): 147-155.

[12] RAVINA I, PAZ E, SOFER Z, et al. Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent[J]. Agricultural Water Management, 1997, 33(2):127 - 137.
[13] HILLS D J, TAJRISHY M A, TCHOBANOGLOUS G. The influence of filtration on ultraviolet disinfection of secondary effluent for microirrigation[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(6):1499 - 1505.
[14] PUIGBARGUÉS J, ARBAT G, ELBANA M, et al. Effect of flushing frequency on emitter clogging in microirrigation with effluents[J]. Agricultural Water Management, 2010,97(6): 883 - 891.
[15] PUIGBARGUÉS J, LAMM T. Effect of flushing velocity and flushing duration on sediment transport in microirrigation driplines [J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(5): 1821 - 1828.
[16] LI Y, SONG P, PEI Y, et al. Effects of lateral flushing on emitter clogging and biofilm components in drip irrigation systems with reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2015, 33(3):235 - 245.
[17] 王亚林, 朱德兰, 张林,等. 滴灌毛管泥沙分布与灌水器堵塞试验研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6):177 - 182.
WANG Yalin, ZHU Delan, ZHANG Lin, et al. Experiment on sediment distribution in lateral pipes and clogging of emitter [J/OL]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):177 - 182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140627&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.027. (in Chinese)
[18] 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)
[19] OLIVEIRA F C, LAVANHOLI R, CAMARGO A P, et al. Influence of concentration and type of clay particles on dripper clogging[J]. Irrigation and Drainage Systems Engineering,2017, 6(1): 184 - 188.
[20] 喻黎明,徐霞,杨启良,等. 滴灌灌水器迷宫流道结构对泥沙运动的影响[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):255 - 261.
YU Liming, XU Xia, YANG Qiliang, et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth passage of drip irrigation emitter on sand movement[J/OL]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(2):255 - 261. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170234&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.034. (in Chinese)
[21] Agricultural irrigation equipment - emitters and emitting pipe-specification and test methods: ISO 9261[S].2004.
[22] ZHOU H, LI Y, WANG Y, 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.
[23] 农业灌溉设备滴头和滴灌管技术规范和试验方法:GB/T 17187—2009[S]. 2009.
[24] TAYEL M Y, PIBARS S K, MANSOUR A G. Effect of drip irrigation method, nitrogen source, and flushing schedule on emitter clogging[J]. Agricultural Systems,2013,4(3):131 - 137.
[25] TROOIEN T P, LAMM F R, STONE L R, et al. Subsurface drip irrigation using livestock wastewater: dripline flow rates[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(5):505 - 508.
[26] FENG D, KANG Y, WAN S, et al. Lateral flushing regime for managing emitter clogging under drip irrigation with saline groundwater[J]. Irrigation Science, 2017, 35(3): 217 - 225.
[27] ELBERRY A, ABUARAB M, ELEBABY F. Effect of flushing frequency with sulfuric and phosphoric acids on emitter clogging [C]// Proceedings of the ASABE Annual International Meeting, Louisville, KY, USA, 2011.
[28] 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.
[29] DURANROS 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.
[30] ZHANG L, WU P T, ZHU D, et al. Effect of pulsating pressure on labyrinth emitter clogging[J]. Irrigation Science, 2017, 35(4):267 - 274.
[31] 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)
[32] 温圣林,牛文全,邬梦龙,等.浑水滴灌过程中不同类型滴头堵塞的动态变化特征[J/OL].农业机械学报,2020,51(3): 287 - 294.
WEN Shenglin, NIU Wenquan, WU Menglong, et al. Dynamic characteristics of different emitters clogging in drip irrigation with muddy water[J/OL]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(3):287 - 294. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200333&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.033. (in Chinese)
[33] KOU B, CAO Y, LI J, et al. Granular materials flow like complex fluids[J]. Nature, 2017, 551:360 - 363.
[34] 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): 545 - 555.
[35] ZHOU B, LI Y, LIU Y, 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.
[36] SHANNON W,JAMES L,LBASSETT D, et al. Sediment transport and deposition in trickle irrigation laterals[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(1):160 - 164.
[37] ABULNAGA B. Slurry systems handbook[M]. McGraw-Hill, 2002.