

减缓滴头堵塞风险的毛管首次冲洗时间及周期的确定

张文倩^{1,2}, 牛文全^{1,3,4*}, 李学凯^{1,2}, 吕敏^{1,2}, 杨小坤^{1,2}, 温圣林^{1,2}

(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, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要:为探究引黄滴灌区水肥一体化灌溉过程中毛管冲洗周期对滴头堵塞风险的影响, 该研究分别对浑水和浑水+尿素滴灌后不同毛管冲洗周期(3、5、7、10 d)对滴灌滴头堵塞的控制效果进行了研究。结果表明:毛管冲洗周期对滴头相对流量有极显著影响, 在浑水滴灌条件下, 毛管冲洗处理的相对流量比未冲洗的对照处理高 14.29%~47.77% ($P<0.05$), 在浑水+尿素滴灌条件下, 毛管冲洗处理的相对流量比未冲洗的对照处理高 12.89%~126.67% ($P<0.05$)。按照毛管冲洗对滴头流量的保持能力可将滴灌系统运行分为 3 个阶段: 冲洗钝感期、冲洗敏感期和冲洗无效期, 首次冲洗应在冲洗钝感期结束前进行。宁夏中卫段黄河水浑水滴灌和浑水+尿素滴灌后的首次冲洗应该分别在第 2 灌水和第 9 次灌水后进行, 适宜的毛管冲洗周期分别为 5 和 7 d。研究结果可为宁夏中卫段黄河水灌区采取适宜的抗堵塞措施提供参考。

关键词:滴头; 堵塞; 泥沙; 引黄滴灌; 毛管冲洗周期

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.07.009

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-07-0070-08

张文倩, 牛文全, 李学凯, 吕敏, 杨小坤, 温圣林. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.07.009 http://www.tcsae.org

Zhang Wenqian, Niu Wenquan, Li Xuekai, Lü Min, Yang Xiaokun, Wen Shenglin. Determination of first lateral flushing time and period to mitigate risk of emitter clogging in drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(7): 70-77. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.07.009 http://www.tcsae.org

0 引言

中国引黄灌区多处于干旱半干旱区, 水资源紧缺, 滴灌是该区发展速度最快和发展潜力最大的灌水技术。在甘肃、宁夏和内蒙古等地段黄河水含沙量非常高, 这些地区滴灌工程一般修建较大的沉砂池+多级过滤装置, 首部过滤设施和设备不但占用了土地, 而且需要投入大量的人力, 花费大量的资金。并且即使经过多级过滤处理后, 仍然有大量粒径小于 76 μm 的颗粒进入滴灌系统^[1]。滴灌系统中, 滴头的流道和进、出水口断面尺寸狭小, 极易被水中泥沙或者有机杂质堵塞, 因此, 滴头堵塞问题是制约黄河水滴灌最主要的限制性因素。为此, 许多学者研究了黄河水泥沙粒径级配^[2-3]、肥料浓度和种类^[4], 以及黄河泥沙表面特征和微生物增长状况、活性^[5]等对滴头堵塞的影响, 试图揭示滴头堵塞的诱发机制, 探寻减缓或者防治滴头堵塞的主要途径。一般认为, 冲洗滴灌带(毛管)是一种简易、方便、有效的滴头抗堵塞方法, Puig-Bargués 等^[6-8]试验发现毛管冲洗影响再生水滴灌的滴头堵塞情况, 1 次冲洗可使毛管内泥沙量大幅度减少,

多次冲洗可使泥沙减少效果更佳。Zhou 等^[9]研究发现, 冲洗可减缓再生水滴灌滴头内部微生物的生长, 抑制生物膜的形成, 毛管冲洗措施具有缓解滴灌系统堵塞的作用。Song 等^[10-11]研究发现加氯冲洗效果更好, 并认为 2 周冲洗 1 次效果最佳。但 Feng 等^[12]研究发现毛管冲洗并不能显著减缓微咸水滴灌的滴头堵塞状况。总体而言, 毛管冲洗措施影响滴头堵塞过程, 但是对于不同水质的作用不同, 如可降低再生水滴灌的滴头堵塞风险, 而对于微咸水效果不明显。对于毛管冲洗是否可以缓解微生物含量较少、含沙量较多的黄河水滴灌的滴头堵塞风险, 目前还未发现相关研究报道。

为了提高滴灌技术在引黄灌区适应能力, 降低黄河水滴灌的滴头堵塞风险, 本研究采用不同冲洗周期和不同水源进行滴灌试验, 分析毛管冲洗下滴灌系统不同时期的运行特征, 探究毛管冲洗措施对滴头堵塞风险的影响, 提出适宜降低宁夏中卫段黄河水滴灌堵塞的毛管冲洗方法, 拟为宁夏中卫段黄河水滴灌灌区的运行管理提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

1.1.1 试验材料

根据实地考察, 宁夏黄河水引水渠口含沙量在 0.61~1.10 g/L 之间, 故试验配置的含沙量为 0.8 g/L, 采用渭河河滩泥沙, 过 0.1 mm 筛网, 基本与宁夏中卫黄河段引水渠口过滤后泥沙级配和成分相同, 其中黏粒、粉粒和砂

收稿日期: 2018-09-19 修订日期: 2019-03-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400202); 国家自然科学基金项目(51679205); 宁夏重点研发计划项目(2018BBF02006)

作者简介: 张文倩, 博士生, 主要从事节水灌溉新技术研究。

Email: zhwq0417@163.com

*通信作者: 牛文全, 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技术研究。Email: nwq@nwfufu.edu.cn

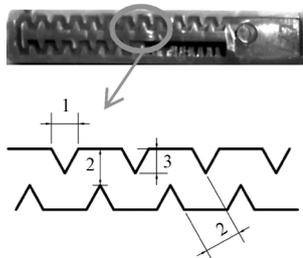
粒的体积分数分别为 8.17%、23.02%和 68.81%；试验用水为杨凌示范区居民用水。泥沙矿物质成分如表 1。

表 1 试验用泥沙矿物成分

Table 1 Mineral components of tested sedimentation

矿物成分 Mineral component	质量分数 Content/%	矿物成分 Mineral component	质量分数 Content/%
石英 Quartz	43	白云石 Dolomite	3
斜长石 Albite	15	云母 Muscovite	11
微斜长石 Microcline	7	绿泥石 Clinocllore	9
方解石 Calcite	8	闪石 Amphibole	4

试验用尿素（云南三环化工股份有限公司）为直径 1~2 mm 的白色颗粒状，极易溶于水，尿素质量分数为 1%。试验用内镶片式迷宫流道滴灌带（莱芜市春雨滴灌技术有限公司）在工作压力 100 kPa 时，流量为 1.80 L/h，流态指数 0.492，流量系数 0.748。滴头迷宫流道齿高为 1.13 mm，齿宽为 1.25 mm，流道宽度为 1.69 mm，流道深度为 0.75 mm（图 1）。毛管管径为 16 mm。

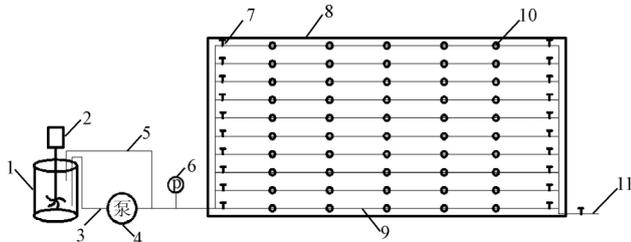


1.齿宽 2.流道宽 3.齿高
1.Tooth width 2.Channel width 3.Tooth height
图 1 滴头迷宫结构

Fig.1 Emitter's labyrinth channel structure

1.1.2 试验装置

测试平台由蓄水桶（164 L）、水泵（JET100 自吸泵，扬程 45 m，转速 2 900 r/min，额定流量 2.4 m³/h）、搅拌机（单相异步电动机与减速搅拌机装配而成）、压力表、控制阀门以及待测滴灌带（毛管）和尾部排水管等组成（图 2）。试验 1 次灌水水量约为 2.4 m³，为了减小水样制备工作量，本试验采用循环供水方式，每天更新 1 次水源。搅拌机在水泵运行 5 min 前开始搅拌，并且在整个灌水期间持续保持工作。测试系统中水流流速较缓，不超过 0.55 m/s，转速为 126 r/min。在这样的运动状态下，



1.蓄水桶 2.搅拌机 3.吸水管 4.水泵 5.回水管 6.压力表 7.阀门 8.回水槽 9.毛管 10.滴头 11.排水管
1.Water tank 2.Blender 3.Suction pipe 4.Pump 5.Backwater pipe 6.Pressure gauge 7.Valve 8.Backwater groove 9.Laterals 10.Emitter 11.Drain-pipe

图 2 滴灌系统试验平台示意图

Fig.2 Schematic of experimental layout of drip irrigation system

泥沙颗粒相互碰撞后发生破碎的几率较小，因此本试验未考虑由于试验过程中泥沙颗粒碰撞引起机械破碎造成的机械组成变化。首部利用分流原理调节回水流量控制工作压力，压力控制精度为 1.25%，压力表量程为 0.25 MPa。本试验设置含沙量为假定黄河水过滤后情况，滴灌系统未配置过滤设备。每次测试的毛管为 10 条。目前大田毛管铺设长度一般在 60~120 m 之间，毛管铺设长度越短，灌水均匀度越好^[13]，为控制灌水均匀度，本试验滴灌带长度为 6 m，即实际大田毛管长度最小值的 1/10。每条毛管上有 20 个滴头，滴头间距为 30 cm。

1.2 试验过程

试验为室内短周期间歇模拟试验，分别测试毛管冲洗对浑水和浑水+尿素滴灌条件下滴头堵塞的影响。设定 4 个不同的冲洗周期，分别为灌水 3、5、7、10 d 冲洗 1 次毛管和不冲洗处理(CK)，冲洗时间为 5 min^[14-15]。浑水水源为含沙量为 0.8 g/L 的滴灌水源，浑水+尿素水源为含沙量为 0.8 g/L 和尿素质量分数 1%的滴灌水源。试验时间 2017 年 5 月 7 日—7 月 6 日和 9 月 1 日—10 月 10 日，共 70 d。所有处理每天灌水 1 次，每次灌水时间为 6 h。

试验开始前先测定工作压力为 100 kPa 时的额定流量，即滴头清水流量。清水流量测试结束后进入滴灌运行阶段，并对滴头的流量进行监测和记录。每个处理组在运行周期结束时打开待冲洗毛管的进、出口端阀门，关闭其他不进行冲洗毛管的进、出口端阀门，冲洗过程中调节首部回流阀门保证毛管压力保持 100 kPa，同时收集毛管末端流出的泥沙，烘干后测试淤积在毛管内的泥沙质量和机械组分。相同水质滴灌的所有处理总灌水时间保证相同：浑水滴灌灌水 30 次停止试验，施加尿素后浑水滴灌由于堵塞程度减轻，因此施加尿素滴灌处理组的灌水次数适当延长，灌水 40 次结束试验。由于毛管长度为 6 m，毛管内不同位置滴头入口的压力差异较小，毛管上 20 个滴头可以作为 20 个重复。为了提高测试效率，每次测定每条毛管上 6 个滴头流量。整个试验运行阶段水温变化如图 3。

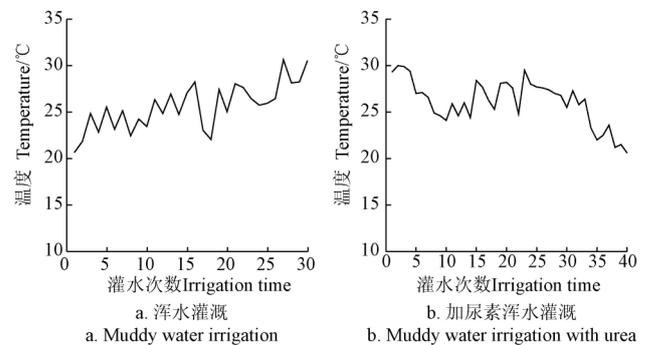


图 3 试验期间温度变化

Fig.3 Variation of temperature during experiment period

1.3 评价指标与方法

1.3.1 平均相对流量

平均相对流量可表征整个滴灌管（带）的整体堵塞

水平, 一般以实测流量与清水流量比值小于 75%判定滴头发生堵塞^[16]。

$$D_i = q_i / q_{0i} \times 100\% \quad (1)$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^m D_i}{m} \quad (2)$$

式中 q_i 为第 i 个滴头的实测流量, L/h; q_{0i} 为第 i 个滴头的清水流量, L/h; m 为毛管上测试滴头的个数; D_i 为第 i 个滴头的相对流量, %; D 为每个处理的平均相对流量, %。

1.3.2 流量回升速率

用流量回升速率表征冲洗前后流量回升的程度。

$$V_{rf} = \frac{\sum_{j=1}^k ((D_{bj} - D_{aj}) / D_{aj}) \times 100\%}{k} \quad (3)$$

式中 D_{aj} 为第 j 次冲洗毛管之前的平均相对流量, %; D_{bj} 为第 j 次冲洗毛管之后的平均相对流量, %; V_{rf} 为流量回升速率, %/次; 处理组中 k 为总冲洗次数, 未冲洗处理组中 k 为总灌水次数。

1.3.3 毛管淤积泥沙冲洗率

冲洗过程中, 收集从毛管中排出的淤积泥沙并在 105 °C 烘 7 h, 烘干后称取质量, 并计算毛管淤积泥沙冲洗率 (R_s), 简称冲洗率。

$$R_s = M_s / t \quad (4)$$

式中 R_s 为冲洗率, g/h; M_s 为从毛管中冲洗收集的泥沙总质量, g; t 为总灌水时间, h。

1.4 数据处理方法

采用 SPSS18.0 软件方差分析不同冲洗周期对相对流量影响差异的显著性, 采用 OriginPro8 软件作图, 分析不同冲洗周期对平均相对流量和毛管泥沙冲洗率的影响。

2 结果与分析

2.1 冲洗对滴头相对流量的影响

图 4a 为浑水滴灌不同冲洗周期下滴头相对流量随时间的变化趋势。从图 4 可以看出, 毛管冲洗处理对滴头流量随灌水次数增加下降趋势有一定的减缓作用, 灌水 30 次后, 毛管冲洗处理的相对流量比未冲洗的对照处理高 14.29%~47.77%, 未冲洗处理流量下降量显著大于冲洗周期为 3、5 和 7 d 处理 ($P < 0.05$)。冲洗周期为 3 d 的处理保持滴头流量稳定的效果最明显, 滴头相对流量基本在 95% 附近小幅波动变化。冲洗周期为 5 d 处理的滴头相对流量在灌水前期下降速率较快, 灌水 15 次时已经堵塞 ($D < 75\%$), 毛管冲洗之后流量恢复并持续保持至 80% 以上。冲洗周期为 7 d 处理的滴头相对流量基本保持在 85%~90% 之间。而冲洗周期为 10 d 的处理效果较差, 灌水 10 次后, 滴头相对流量就基本下降到 75% 以下。

图 4b 为浑水+尿素滴灌下不同冲洗周期各滴头流量随时间的变化趋势。从图 4b 可以看出, 第 40 次灌水后, 冲洗处理的相对流量比未冲洗的对照处理高 12.89%~126.67%, 未冲洗处理相对流量显著低于冲洗周期为 3、5 和 7 d ($P < 0.05$) 冲洗处理。在灌水 28 次之前, 冲洗周期

为 3、5 和 7 d 处理滴头流量变化趋势基本相同。而冲洗周期为 10 d 处理在灌水 24 次至 40 次流量下降速率为 2.61%/次, 与不冲洗处理的流量下降速率 2.57%/次基本相同 ($P = 0.33 > 0.05$)。

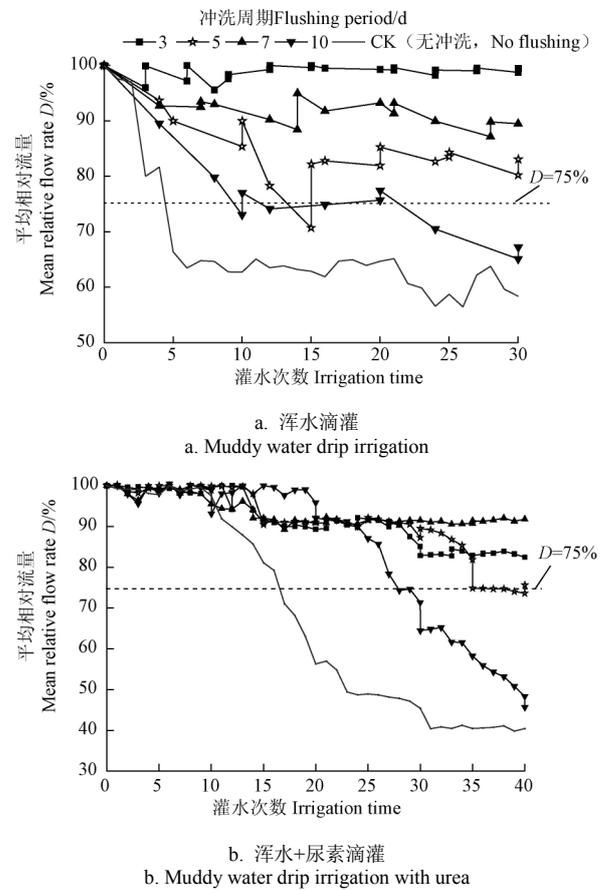


图 4 毛管冲洗周期对浑水以及浑水+尿素滴灌滴头流量的影响
Fig.4 Influence of lateral flushing period on flow rate in muddy water and muddy water with urea drip irrigation system

灌水开始阶段, 不同冲洗周期处理与对照之间的滴头流量差异非常小, 该阶段冲洗对滴头流量的变化几乎没有影响, 滴头流量随灌水次数的变化趋势基本一致, 滴头相对流量大于 90%。如浑水灌水 2 次, 冲洗周期为 3、5、7、10 d 和不冲洗处理的滴头相对流量分别为 98.67%, 96.84%, 96.36%, 94.77% 和 97.04%, 为冲洗钝感期 (图 4a); 浑水+尿素滴灌 10 次, 冲洗周期为 3、5、7 和 10 d 处理与不冲洗处理之间滴头流量并无明显差异 (图 4b)。冲洗钝感期后, 不同处理的滴头流量变化差异增大, 毛管冲洗处理的滴头流量下降速度明显小于未冲洗的对照处理, 即进入毛管冲洗对滴头堵塞的冲洗敏感期。该阶段滴头相对流量维持在 75% 以上, 毛管冲洗处理的滴头流量下降速度小于对照处理 ($P < 0.05$), 每次毛管冲洗后, 下次灌水滴头流量均有所恢复。不同冲洗周期处理的冲洗敏感期不同, 对于浑水滴灌冲洗周期为 3、5 和 7 d 处理超过 30 次灌水, 而冲洗周期为 10 d 处理不大于 20 次灌水 (图 4a); 对于浑水+尿素滴灌冲洗周期为 3、5 和 7 d 处理超过 40 次灌水, 而冲洗周期为 10 d 处理不超过 30 次灌水, 第 10 次灌水后, 洗周期为 3、5 和 7 d 处理

滴头相对流量均在 75%以上，且毛管冲洗后流量分别回升 3.67%，12.44%和 10.05%（图 4b）。冲洗敏感期结束后，继续进行冲洗，滴头流量也可能会有所恢复，但是总体趋势为滴头流量迅速下降，滴头相对流量小于 75%，该阶段为冲洗无效期，毛管冲洗处理已经无法使滴头流量恢复到额定流量的 75%以上。如冲洗周期为 10 d 浑水滴灌处理在灌水 20 次之后流量从 75.72%迅速下降至 65.14%，虽在灌水 30 次冲洗后回升至 67.24%，仍远小于 75%（图 4a）；相同冲洗周期的浑水+尿素滴灌处理在灌水 20 次后，滴头流量从 87.04%迅速下降至 45.71%，下降速率与不冲洗处理无明显差异。

灌水试验结束后，对每条毛管的所有滴头进行流量测试并进行方差分析，结果如表 2 所示。施加尿素和冲洗周期分别单独或交互对滴头相对流量的影响极显著，说明在一定泥沙浓度范围内，施加尿素会影响滴头堵塞风险，且不同冲洗周期对滴头相对流量影响也有很大差异，同时两者存在交互作用。

表 2 不同水质和冲洗周期处理下流量方差分析

Table 2 Variance analysis on flow rate in different water types and flushing periods

方差来源 Sources of variance	方差和 Sum of variances	自由度 Freedom degree	均方差 Mean square error	F 值 F value
施加尿素 Urea addition(UA)	119 057.64	1	119 058	359**
冲洗周期 Flushing period (FP)	5 587.04	4	1 397	4**
UA×FP	5 337.09	4	1 334	4**
误差 Error	26 535.22	80	332	

注 (Note)：**， $P<0.01$ 。

计算毛管冲洗前后毛管流量回升速率（表 3）可知，在浑水滴灌条件下，流量回升速率分为 3 个梯度：冲洗周期为 5 d 的处理组流量回升速率最高，与其他冲洗周期以及对照处理之间及有显著性差异；冲洗周期为 3、7 和 10 d 处理滴头的平均流量回升速率约为 0.36%/次~0.41%/次之间，不同冲洗周期之间无显著性差异；未冲洗对照组流量持续下降 ($V_{if}<0$)。说明在浑水滴灌条件下，冲洗处理对流量恢复起重要作用。浑水+尿素滴灌条件下，冲洗周期为 3、5 和 7 d 处理滴头流量均有不同程度恢复，冲洗周期为 10 d 的处理组和未冲洗对照组流量持续下降 ($V_{if}<0$)，但冲洗周期为 10 d 处理组的下降速率显著小于未冲洗对照组。

表 5 2 种水质滴灌条件不同冲洗周期下淤沙粒径组成体积百分数

Table 5 Particle composition of sediment under different flushing periods and 2 types of drip irrigation water

粒级 Particles	处理 Treatment	冲洗周期 Flushing period/d					初始体积分数 Initial content
		3	5	7	10	CK (No flushing)	
黏粒 Clay	浑水 Muddy water	9.67 b	8.93 d	9.43 bc	10.07 a	9.29 c	8.17 e
	浑水+尿素 Muddy water with urea	11.02 bc	10.58 c	10.65 c	11.82 a	11.41 ab	8.17 d
粉粒 Silt	浑水 Muddy water	19.19 ab	19.00 cd	19.98 c	21.03 bc	18.77 d	23.02 a
	浑水+尿素 Muddy water with urea	22.65 ab	21.42 cd	21.69 c	22.13 bc	20.67 d	23.02 a
砂粒 Sand	浑水 Muddy water	71.14 ab	72.06 a	70.59 b	68.9 c	71.93 a	68.81 c
	浑水+尿素 Muddy water with urea	66.34 c	68.00 ab	67.66 b	66.05 c	67.92 ab	68.81 a

表 3 冲洗后毛管流量回升速率

Table 3 Recovery rate of flow after flushing events

灌溉水质 Type of water	冲洗周期 Flushing period/d				CK (No flushing)
	3	5	7	10	
浑水 Muddy water	0.40 b	0.70 a	0.41 b	0.36 b	-1.12 c
浑水+尿素 Muddy water with urea	0.39 a	0.29 a	0.16 a	-0.62 b	-1.49 c

注：同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters in same row indicate significant difference ($P<0.05$). Same as below.

2.2 冲洗周期对毛管淤积泥沙的影响

2.2.1 泥沙冲洗率

从表 4 中 2 种水质滴灌条件下不同冲洗周期内的泥沙冲洗率可以看出，在 2 种水质滴灌条件下，泥沙冲洗率整体上呈现随冲洗周期增加而降低的趋势，表明毛管内泥沙沉降累积主要发生在灌水初期，随着灌水时间的延长逐渐减小。

表 4 毛管泥沙冲洗率

Table 4 Flushing rate of sediment in laterals

灌溉水质 Type of water	冲洗周期 Flushing period/d			
	3	5	7	10
浑水 Muddy water	4.93 a	4.94 a	3.39 b	2.23 c
浑水+尿素 Muddy water with urea	3.36 a	3.28 a	3.17 b	2.65 c

2.2.2 泥沙粒径

对 2 种水源滴灌条件下毛管淤积泥沙粒径组成的方差分析结果表明：冲洗周期对沉降泥沙有较大影响，不同冲洗周期对沉降泥沙组成的影响不同（表 5）。相同水质滴灌不同处理之间毛管淤沙的黏粒、粉粒和砂粒含量均具有显著性差异 ($P<0.05$)。浑水滴灌毛管淤积泥沙中黏粒含量较初始值（体积百分数 8.17%）高 8.51%~21.23%，浑水+尿素滴灌毛管淤积泥沙中黏粒含量比初始含量显著高 22.78%~30.88%。说明在灌水过程中细颗粒泥沙容易在毛管内沉降。多重比较分析结果表明浑水+尿素滴灌毛管淤积泥沙中黏粒和粉粒含量分别显著高于相同冲洗周期处理浑水滴灌的黏粒和粉粒含量，而砂粒含量显著降低 ($P<0.05$)。说明尿素的施加使毛管中沉降的黏性细颗粒增多，而粗颗粒成分则相应减少。

2.3 冲洗周期对滴头堵塞的影响

2.3.1 毛管冲洗减缓黄河水滴灌滴头堵塞的机理

滴头物理堵塞的主要原因是灌溉水中悬浮固体颗粒物发生絮凝、吸附作用,容易附着在迷宫流道入口以及流道壁面上,附着物不断发育造成流道入口以及格栅过流面积逐渐减小最终完全堵塞。通过对堵塞滴头的剖切观察到滴头堵塞主要为入口堵塞和流道堵塞,入口堵塞率大于50%,且堵塞主要发生在入水口位置(表6)这与仵峰等^[17]的研究结果一致。计算可知,本文毛管流速为0.003~0.55 m/s,根据沉降速率公式^[18-19]可以计算得到本文中泥沙沉降速度约为0.401 m/s,较大颗粒的泥沙容易沉降,覆盖在滴头进水口栅格处,导致滴头流量下降。另外,水流进入迷宫流道后,边界条件变化,水流流线发生改变,当进口处有泥沙淤积时,由于水流扰动,迷宫流道内的水流含沙量会瞬间增加很多,滴头迅速堵塞的风险也会很高^[20]。采取毛管冲洗措施,打开毛管尾端,尾端压强迅速降低,流速增大,水力剪切力可能变大,流量增大,绝大部分沉积在毛管底端的泥沙携裹输出毛管,恢复流道入口截面积,同时也降低含沙量瞬间升高的机会,因此,适当频率的毛管冲洗处理可以降低浑水滴灌滴头堵塞风险,延长有效灌水次数。

表6 滴头堵塞位置统计
Table 6 Statistics of position of clogging emitters

灌溉水质 Type of water	总数 Total number	入口 Entrance		流道 Channel		出口 Exit	
		个数 Number	占比 Ratio/%	个数 Number	占比 Ratio/%	个数 Number	占比 Ratio/%
浑水 Muddy water	25	24	96	1	4	0	0
浑水+尿素 Muddy water with urea	44	24	54	17	39	3	7

本试验发现,水质不同,毛管冲洗处理对降低滴头堵塞风险的效果不同。当每3、5和7 d灌水冲洗1次时,浑水+尿素滴灌的冲洗率均小于浑水滴灌(表4),每灌水10 d冲洗1次时,浑水+尿素滴灌的有效灌水次数大于浑水滴灌,在30次灌水期间,不同冲洗周期处理下浑水+尿素滴灌的有效灌水次数均不小于浑水滴灌(图4)。这可能是不同水质滴灌条件下毛管内不同粒径泥沙的淤积沉降速率不同导致淤积泥沙的机械组成不同的缘故。如本试验发现浑水+尿素滴灌毛管淤积泥沙中黏粒和粉粒体积百分比均大于浑水滴灌的,砂粒体积百分比则相反(表5)。这表明在灌水过程中施加尿素可能会减少泥沙沉降量,同时降低了浑水的黏滞系数(黏滞系数测试结果表明在肥料质量分数分别为0和1%时溶液的黏滞系数分别为 1.51×10^{-3} 和 1.31×10^{-3} Pa·s),可见,细小泥沙颗粒在含尿素水中更易沉降,粘附在入口格栅的堵塞结构中细颗粒含量成分增加,颗粒骨料间的咬合作用以及内摩擦角降低,结构抗冲切承载力降低^[21-22],更易被破坏,这些导致淤积泥沙更容易被冲出毛管。因此,毛管冲洗措施对于浑水+尿素滴灌维持滴头流量的效果略好于浑水滴灌。这种现象在再生水滴灌中也有表现^[10-11],

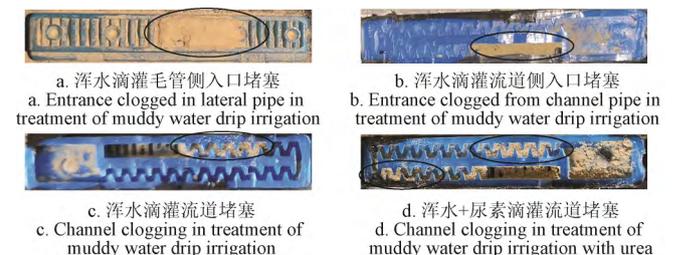
在灌水停歇周期静水环境中细菌容易大量滋生,在灌水时进入滴头的细菌增多,增加了生物堵塞的几率。毛管冲洗措施可以将毛管内细菌团排出毛管,抑制了细菌的持续增长,因此,毛管冲洗措施可以减小堵塞风险。但是在硬水和微咸水滴灌过程中,由于 CaCO_3 、 CaSO_4 和 MgCO_3 等化学沉淀^[23]易形成紧密的化学垢^[24],同时粘附在流道入口迷宫流道壁面上,毛管冲洗措施几乎不可能减少化学垢,改变化学垢的增长率,因此,毛管冲洗对这类水质滴灌的滴头几乎没有抗堵塞作用^[12]。

因此,在灌水过程中,对于易在毛管内产生泥沙淤积或者其他附着物堆积减小滴头进口断面面积,并可以通过毛管冲洗消除或者减缓滴头入口堆积物的水质滴灌系统,可以采取一定冲洗周期的毛管冲洗措施,降低滴头堵塞风险,延长滴灌系统的有效灌水次数,提高滴灌系统的使用寿命。

2.3.2 适宜的首次冲洗时间和周期

按照毛管冲洗对滴头流量的恢复情况,可将冲洗过程划分为3个阶段,即冲洗钝感期,冲洗敏感期和冲洗无效期。采用黄河浑水滴灌或者浑水+尿素滴灌初期阶段,毛管与滴头迷宫流道都非常洁净,当灌水次数和灌水时间较小时,毛管内淤积物非常少,迷宫流道壁面黏附的物质也较少。冲洗对于毛管内淤积物和滴头流量的影响可以忽略,在该阶段采用毛管冲洗对于滴头流量几乎没有影响。水质不同,冲洗钝感期也不同。本试验中,由于浑水+尿素的粘滞系数较大^[25],泥沙跟随性较好^[26-28],且不利于形成大的团聚体,泥沙颗粒易随水流出^[29],毛管内淤积泥沙较少,滴头也保持较高的流量,因此,浑水+尿素滴灌的冲洗钝感期较长(图4b),浑水滴灌的冲洗钝感期小于3次灌水,浑水+尿素滴灌条件下冲洗钝感期约为10次灌水。

随着灌水时间的延长和灌水次数的增多,滴头入口格栅被沉积物覆盖后非常容易被堵塞(图5a和图5b),造成流量下降。但此时沉积泥沙黏附力较小,可以借助毛管冲洗时产生的水力剪切力将沉积物冲走恢复入口截面积从而达到恢复滴头流量的目的;同时毛管内淤积泥沙会在水泵启动瞬间的脉动压强下造成含沙量的极不均匀,高含沙量水进入滴头极易导致滴头的瞬间堵塞,在此之前冲洗可改善毛管内淤积泥沙的环境,减小堵塞风险,此阶段为冲洗敏感期。



注:圈出位置代表滴头堵塞部位;图a和图b为冲洗周期为5 d处理组的滴头,图c和图d为冲洗周期为10 d处理组的滴头。

Note: Circled positions represent blocked areas of the emitters; Emitters in the treatments of 5 d flushing period are shown in Fig.5a and Fig.5b, while those of 10 d flushing period are shown in Fig. 5c and Fig.5d.

图5 滴头堵塞部位

Fig.5 Emitters clogging positions

采取毛管冲洗措施降低黄河水滴灌滴头堵塞风险时, 如果在冲洗钝感期结束开始冲洗, 则会显著降低冲洗效果。如浑水滴灌冲洗周期为 10 d 处理(图 4a)和尿素+滴灌冲洗周期为 10 d 处理(图 4b)首次冲洗时间均为第 10 次灌水后进行, 此时, 毛管内有较多的泥沙, 迷宫流道内也逐渐附着了一定量的泥沙, 毛管冲洗虽然对于滴头流量有所回升(表 3), 但滴头迷宫流道内壁面附着物进入快速增长阶段, 已无法通过冲洗毛管从根本上改变滴头流量快速下降的趋势。分别在灌水 10~20 和 28 次后, 滴头相对流量小于 75%, 有效灌水次数远低于其他周期的冲洗处理。因此, 对于黄河水滴灌, 或者尿素+黄河水滴灌时, 首次毛管冲洗应分别在第 2 次和第 9 次灌水后进行, 防止冲洗钝感期进入迷宫流道泥沙量过多, 迷宫流道入口过早发生堵塞。

本试验发现, 虽然冲洗周期对滴头相对流量有极显著影响(表 2), 但浑水滴灌冲洗周期为 3、5 和 7 d 处理, 和浑水+尿素滴灌的冲洗周期为 3、5 和 7 d 处理在冲洗敏感期对滴头流量的保持能力差异不十分明显, 有效灌水次数分别均超过 30 次(图 4a)和 40 次(图 4b)。虽然冲洗周期越短, 对于毛管内泥沙的冲洗率越高, 但冲洗周期在一定范围内, 进入迷宫流道的含沙量和迷宫流道壁面泥沙的附着和累积速度差异并不明显, 因此, 应选择适宜的冲洗周期。从本试验的 2 种水质分析, 综合考虑流量恢复效果和操作简便性, 适宜的冲洗周期应为分别为 5 和 7 d。

当灌水时间过长(冲洗周期大于 10 d)时, 滴头迷宫流道大部分被堵塞(图 5c 和图 5d), 毛管冲洗只能减少毛管内淤积泥沙量, 而无法改变迷宫入口和流道壁面淤积泥沙量, 进入冲洗无效期, 可以考虑更换毛管或者采用加酸加氯或者微生物等措施保证滴灌系统正常运行^[30-31]。采用不同周期的冲洗措施的意义在于有效延长冲洗敏感期和延缓冲洗无效期。

但是, 滴头堵塞是与滴头结构, 灌溉水质, 灌水环境和运行管理等各方面因素密切关联的现象。如在浑水滴灌第 15 次灌水之前, 冲洗周期为 5 d 的滴头流量下降速率远高于冲洗周期为 7 d 的, 导致其流量在整个灌水期间基本小于冲洗周期为 7 d 的, 这可能是由于滴头制造偏差过大滴头抗堵塞性能减弱导致滴头在冲洗之前即发生快速下降。这并不意味着冲洗周期为 7 d 的处理必然优于冲洗周期为 5 d 的处理, 相反冲洗周期为 5 d 的处理流量回升速率最大(表 3)。因此, 在对滴头堵塞风险评价的过程中应当综合各方面因素。

3 结 论

1) 在宁夏中卫段黄河水滴灌区, 采取毛管冲洗措施可以减少毛管内淤积的泥沙量, 恢复滴头格栅入口截面积, 使滴头流量在较长时间保持在较高的水平, 毛管冲洗措施具有明显降低黄河水滴灌滴头堵塞风险的作用。

2) 毛管冲洗对滴头相对流量作用可以分为 3 个阶段: 冲洗钝感期, 冲洗敏感期以及冲洗无效期。滴灌系统毛管的首次冲洗应在冲洗钝感期结束之前, 当进入冲

洗无效期时, 需要更换毛管或者采取其他抗堵措施。

3) 宁夏中卫段黄河水滴灌过程中, 对于浑水滴灌系统应该在最初 2 次灌水后进行首次毛管冲洗, 而对于浑水+尿素滴灌系统应在灌水 9 次后进行首次毛管冲洗, 适宜的冲洗周期为分别为 5 和 7 d。

综上, 本文通过探究黄河水滴灌条件下毛管冲洗周期对滴灌滴头堵塞的作用得到了一些初步结论, 为探究黄河水滴灌区滴头堵塞机理以及有效的系统堵塞控制提供了一定的理论依据。本文的不足之处在于: 冲洗对于滴头堵塞物质的移送作用仅限于冲洗结束前后静态结果观测, 未有动态观测数据, 此外还应考虑不同冲洗周期下不同灌水器类型对堵塞的敏感性, 在后续试验中应予以考虑并加以完善。

[参 考 文 献]

- [1] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 20-24. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘璐, 牛文全, Bob Zhou. 细小泥沙粒径对迷宫流道灌水器堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 87-93.
Liu Lu, Niu Wenquan, Bob Zhou. Influence of sediment particle size on clogging performance of labyrinth path emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 87-93. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30 (7): 99-108. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘璐, 牛文全, 武志广, 等. 施肥滴灌加速滴头堵塞风险与诱发机制研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 228-236.
Liu Lu, Niu Wenquan, Wu Zhiguang, et al. Risk and Inducing mechanism of acceleration emitter clogging with fertigation through drip irrigation systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 228-236. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王伟楠, 徐飞鹏, 周博, 等. 引黄滴灌水源中泥沙表面附生物膜的分形特征[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(10): 914-920.
Wang Weinan, Xu Feipeng, Zhou Bo, et al. Structural and fractal characteristics of biofilm attached on surfaces of sediments in Yellow River for drip irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(10): 914-920. (in Chinese with English abstract)
- [6] Puig-Bargués 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.

- [7] Puig-Bargués F R J, Lamm T. Effect of dripline flushing on subsurface drip irrigation systems[J]. Soil & Water Division of American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2010, 53(1): 147—155.
- [8] Puig-Bargués F R J, Lamm T. Effect of flushing velocity and flushing duration on sediment transport in microirrigation driplines[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013, 56(5): 1821—1828.
- [9] Zhou Bo, Li Yunkai, Liu Yaoze, et al. Effect of drip irrigation frequency on emitter clogging using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2015, 33(3): 221—234.
- [10] Song Peng, Li Yunkai, Zhou Bo, et al. Controlling mechanism of chlorination on emitter bio-clogging for drip irrigation using reclaimed water[J]. Agricultural Water Management, 2017, 184: 36—45.
- [11] 宋鹏, 李云开, 李久生, 等. 加氯及毛管冲洗控制再生水滴灌系统灌水器堵塞[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 80—86.
Song Peng, Li Yunkai, Li Jiusheng, et al. Chlorination with lateral flushing controlling drip irrigation emitter clogging using reclaimed water [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(2): 80—86. (in Chinese with English abstract)
- [12] Feng Di, Kang Yaohu, Wan Shuqin, et al. Lateral flushing regime for managing emitter clogging under drip irrigation with saline groundwater[J]. Irrigation Science, 2017, 35(3): 217—225.
- [13] 王建众, 牛文全, 吴普特, 等. 滴灌毛管灌水均匀度试验研究[J]. 人民黄河, 2008(3): 56—57.
Wang Jianzhong, Niu Wenquan, Wu Pute, et al. Experimental study on uniformity of drip irrigation capillary tube irrigation[J]. Yellow River, 2008(3): 56—57. (in Chinese with English abstract)
- [14] 于文波. 滴灌堵塞原因及解决方法[J]. 农机使用与维修, 2006(6): 47.
Yu Wenbo. Causes and solutions of drip irrigation clogging[J]. Agricultural Machinery Usage and Maintenance, 2006(6): 47. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈斌. 内镶式滴灌管滴头堵塞原因及防止方法[J]. 现代农业科技, 2006(12): 127.
Chen Bin. Causes and prevention methods of drip irrigation in the drip irrigation pipe[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2006(12): 127. (in Chinese with English abstract)
- [16] ISO. Agricultural irrigation equipment - emitters and emitting pipe-specification and test methods: ISO 9261[S]. Geneva, Switzerland, 2004.
- [17] 仵峰, 范永申, 李辉, 等. 地下滴灌灌水器堵塞研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 80—83.
Wu Feng, Fan Yongshen, Li Hui, et al. Clogging of emitter in subsurface drip irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(1): 80—83. (in Chinese with English abstract)
- [18] Abulnaga B E. Chapter 4: Heterogeneous flows of settling slurries[M]//Slurry Systems Handbook. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [19] Schiller R E, Herbich J B. Chapter 6. Sediment transport in pipes[M]//Handbook of Dredging Engineering. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [20] 吴泽广. 泥沙粒径与含沙量对滴头堵塞的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
Wu Zeguang. Influence of Particle Size, Concentration and Composition of Sediment on Clogging of Labyrinth Channels Emitters[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [21] 袁铁柱, 刘涛. 粗粒料干密度和细料含量强度参数试验研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(1): 99—100.
Yuan Tiezhu, Liu Tao. Experimental study on parameters of dry density and fines content of coarse aggregation[J]. Yellow River, 2011, 33(1): 99—100. (in Chinese with English abstract)
- [22] 何芳, 杨秋宁, 毛明杰. 骨料粒径及抗压侧配筋量对钢筋混凝土板冲切强度的影响[J]. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2016(4): 452—456.
He Fang, Yang Qiuning, Mao Mingjie. Effects of aggregate size and quantity of reinforcement in compressive side plate on punching shear strength of reinforced concrete slab[J]. Journal of Ningxia University: Natural Science Edition, 2016(4): 452—456. (in Chinese with English abstract)
- [23] Hills D M, Nawar J. Effects of chemical clogging on drip-tape irrigation uniformity[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1989, 32(4): 1202—1206.
- [24] 刘燕芳, 吴普特, 朱德兰, 等. 滴灌条件下水的硬度对滴头堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 34(20): 95—100.
Liu Yanfang, Wu Pute, Zhu Delan, et al. Effect of water hardness on emitter clogging of drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 34(20): 95—100. (in Chinese with English abstract)
- [25] Liu Lu, Niu Wenquan, Wu Zhiguang, et al. Effect of fertilization and sediment flow hydraulic characteristics on emitter clogging in muddy water drip fertigation system[J/OL]. Irrigation and Drainage, 2018, 67(4). doi: 10.1002/ird.2281
- [26] 官雅辉, 牛文全, 刘璐, 等. 肥料类型及浓度对水肥一体化浑水滴灌滴头输沙能力的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 78—84.
Guan Yahui, Niu Wenquan, Liu Lu, et al. Effect of fertilizer type and concentration on sediment transport capacity of dripper in drip fertigation with muddy water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(1): 78—84. (in Chinese with English abstract)
- [27] 官雅辉, 牛文全, 刘璐, 等. 尿素对浑水水肥一体化滴灌滴头堵塞的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 93—100.
Guan Yahui, Niu Wenquan, Liu Lu, et al. Influence of urea on emitter clogging with muddy water fertigation[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2018, 36(2): 93—100. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张德茹, 梁志勇. 不均匀细颗粒泥沙粒径对絮凝的影响试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1994(z1): 11—17.
Zhang Deru, Liang Zhiyong. Experiment study of effect of nonuniform fine sediment on flocculation[J]. Hydro-Science and Engineering, 1994(z1): 11—17. (in Chinese with English abstract)
- [29] Rupley J A. The effect of urea and amides upon water

- structure [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1964, 68(7): 2002—2003.
- [30] Eroglu Seckin, Sahin Ustun, Tunc Talip, et al. Bacterial application increased the flow rate of CaCO₃-clogged emitters of drip irrigation system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 98: 37—42.
- [31] Yu Liming, Li Na, Liu Xiaogang, et al. Influence of flushing pressure, flushing frequency and flushing time on the service life of a labyrinth-channel emitter[J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 172: 154—164.

Determination of first lateral flushing time and period to mitigate risk of emitter clogging in drip irrigation

Zhang Wenqian^{1,2}, Niu Wenquan^{1,3,4*}, Li Xuekai^{1,2}, Lü Min^{1,2}, Yang Xiaokun^{1,2}, Wen Shenglin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Yangling 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Flushing the drip tubes (laterals) is one of the simplest, most convenient and effective methods for anti-clogging of emitters. However, it is still unclear whether the lateral flushing lowers the risk of emitter clogging in the drip irrigation system watered by Yellow River. In order to explore the influence of lateral flushing periods on the risk of emitter clogging during the integrated irrigation process of water and fertilizer in Yellow River drip irrigation area, a set of short-cycle indoor drip irrigation simulation tests were carried out under 4 different flushing periods (3, 5, 7 and 10 d) and 2 kinds of water (0.8 g/L sediment concentration without urea and 0.8 g/L sediment concentration with 1% urea) in the study. The mean relative flow rate, the recovery rate of flow after flushing events, the flushing rate of sediment in laterals and the particle composition of the sediment were analyzed. The results showed that after the irrigation of muddy water, the mean relative flow rate in flushing treatments were 14.29%–47.77% higher ($P < 0.05$) than that under the no flushing (CK) treatment, while after the drip irrigation of muddy water drip irrigation with urea, the mean relative flow rate in the flushing treatments were 12.89%–126.67% higher ($P < 0.05$) than CK. It indicated that laterals flushing reduced the risk of emitter clogging in Zhongwei Yellow River drip irrigation area. According to the ability to maintain the flow rate after laterals flushing, the whole operation period of drip irrigation was classified into 3 stages: insensitive, sensitive and ineffective flushing period. And the first flushing event should be performed before the end of the insensitive flushing period. Analysis of variance results showed that the effect of applying urea and flushing period on the relative flow of emitters was extremely significant either in a separate way or in an interactive way, which indicated that within a certain concentration range of sediment, the application of urea would affect the risk of emitter clogging, and the flushing periods had a great influence on the relative flow of emitters. The treatment group with the flushing period of 5 d had the highest rate of recovery flow, and the recovery flow rate of the other flushing periods were about 0.36%/time to 0.41%/time. Under the 2 kinds of water drip irrigation conditions, the flushing rate of sediment under different flushing periods showed a decreasing trend with increasing flushing periods, indicating that the accumulation of sediment mainly occurred in the initial stage of irrigation. The variance analysis of the particle size composition of sediment showed that flushing period had a great influence on the sediment, and the effects of different flushing periods on the composition of sediment were different. Fine sediment was easy to settle in the laterals during the irrigation process. And the application of urea increased fine particles settled in the laterals. In Yellow River drip irrigation area of Zhongwei, Ningxia, lateral flushing could reduce the amount of sediment deposited in the capillary, restore the cross-sectional areas of the emitter, and maintain emitters flow at a high level for a long time. The first flushing should be taken before the end of insensitive flushing period. When drip irrigation system reached the ineffective flushing period, the laterals need to be replaced or the other anti-blocking measures should be taken. During the dripping process of the Yellow River in Zhongwei, Ningxia, the first flushing measure should be carried out after the first 2 times of irrigation for muddy water drip irrigation system, and 9 times of irrigation for muddy water drip irrigation system with urea. In addition, suitable flushing periods were 5 and 7 d for muddy water drip irrigation system and muddy water drip irrigation system with urea, respectively. The proposed suitable lateral flushing period for drip irrigation is expected to improve the adaptability of drip irrigation technology in the Zhongwei, Ningxia Yellow River drip irrigation area.

Keywords: emitters; clogging; sediment; Yellow River drip irrigation; lateral flushing periods