

细小泥沙粒径对迷宫流道灌水器堵塞的影响

刘璐^{1,4}, 牛文全^{2,4*}, Bob Zhou³

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. Agricultural and Biosystem Engineering Department, Iowa State University, Ames, IA 50011, USA, 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为探明细小泥沙粒径对迷宫流道灌水器抗堵塞性能的影响, 该文以内镶片式斜齿形迷宫流道灌水器为研究对象, 应用类短周期堵塞测验方法对 8 种粒径小于 0.1 mm 的泥沙颗粒进行浑水测试。在此基础上, 分析了泥沙粒径和含沙量对灌水器堵塞的影响, 探讨引起灌水器发生堵塞时的敏感粒径范围与含沙量水平。试验结果表明: 对于粒径小于 0.1 mm 的细小颗粒, 含沙量是引起灌水器堵塞的主要原因, 当浑水含沙量水平大于 1.25 g/L 时, 影响尤其显著, 呈正相关关系; 粒径对堵塞的影响并不是单调的递增或递减, 堵塞发生的敏感粒径范围在 0.03~0.04 mm 之间。试验结果有助于进一步提高含沙水源滴灌的应用水平。

关键词: 粒径, 沙粒, 含量, 迷宫流道, 堵塞, 灌水器

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.017

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0087-07

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 emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 87-93. (in Chinese with English abstract)

0 引言

灌水器堵塞问题是影响滴灌系统使用寿命与效益的重要因素, 自 1971 年第一届国际滴灌会议在以色列召开以来, 众多的科研学者试图从合理配置过滤设备、化学加酸加氯处理以及灌水器流道优化设计等方面解决堵塞问题, 虽取得了许多成果^[1-4], 但该难题至今依然没有得到很好的解决。

无机颗粒物是引起灌水器堵塞的主要因素之一, 是造成灌水器堵塞的直接原因, 基于此研究者对颗粒物与灌水器堵塞性能之间的关系展开了大量的研究工作。热点集中在泥沙粒径介于流道最小尺寸 1/3~1/7 之间的堵塞问题, 采用浑水灌溉测试方法, 而对于粒径小于流道最小尺寸 1/7 的颗粒采用软件模拟的方法进行了研究并取得了一定成果^[5-9], 认为影响堵塞主要因素为悬浮颗粒的流速、粒径和含沙量^[10-11], 也有研究认为当粒径大于 0.05 mm 时, 灌水器堵塞的危险系数急剧增加^[12], 存在易于堵塞的敏感泥沙粒径范围, 但缺乏试验的验证。从西北地区的灌水现状出发, 当采用天然河道、沟渠水等水源灌溉时, 即使经过沉淀和过滤(120 目), 仍有粒径小于 0.10 mm 的细小沙粒进入灌水器流道^[12], 这些细小沙粒在灌水器内部会产生胶结、絮凝、输移等一系列

微观流场水动力学行为, 在流道内产生絮团, 由此产生的沉淀富集成为灌水器流量下降的主要原因^[13], 改变其堵塞发生行为。不论是从堵塞研究现状还是从滴灌的实际情况, 针对细小颗粒造成灌水器堵塞的规律研究相对较少, 尤其对于小于 0.10 mm 的细小泥沙颗粒粒径对灌水器堵塞的影响, 更有待于深入试验研究。

基于上述认识, 本文借助不同粒径、含沙量条件下的细小泥沙颗粒浑水滴灌试验, 分析造成灌水器堵塞泥沙颗粒的敏感粒径范围和含沙量标准, 为提高灌水器的抗堵塞性能以及合理选择过滤方式提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

测试装置由具有泥沙搅拌功能的水箱和流量自动采集装置组成, 水箱为周长 2 m, 高 0.5 m 的圆柱形箱体, 装有排水阀, 用于每次试验结束后系统的冲洗; 潜水泵额定扬程为 45 m, 流量为 1.37 t/h; 压力表量程为 0.16 Mpa, 精度等级为 0.25 级。在连接水泵的进水管分支回水管上每隔 8 cm 打一个直径为 6 mm 小孔并将其末端堵死, 浑水通过回水管的喷射作用实现水沙搅拌功能。毛管布设于测试系统架上, 每根包含 5 个灌水器, 其间距为 0.3 m, 共有 4 条, 20 个灌水器(由于测试平台 2 个流量传感器出现故障, 故实际有效灌水器为 18 个)。试验装置如图 1 所示。

迷宫灌水器为内镶片状斜齿型迷宫流道, 其基本特性为: 管径 $\varphi=16$ mm, 工作水头 $P=10$ m, 额定流量 $q_0=3$ L/h。结构参数为, 流道宽 $w=1.0$ mm, 流道深 $d=0.8$ mm, 流道长度 $L=300$ mm, 流道单元 $n=14$ 个。经清水测试后得到流量系数 $k=0.301$, 流态指数 $x=0.53$ 。

收稿日期: 2011-07-15 修订日期: 2011-11-22

基金项目: “十二五”国家 863 计划项目(2011AA100507)

作者简介: 刘璐(1986—), 女, 陕西宝鸡人, 主要从事灌溉理论与节水技术研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。

Email: luluhuzi@126.com

*通信作者: 牛文全(1972—), 男, 甘肃甘谷人, 副教授, 主要从事灌溉理论与节水技术研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。

Email: nwq@vip.sina.com

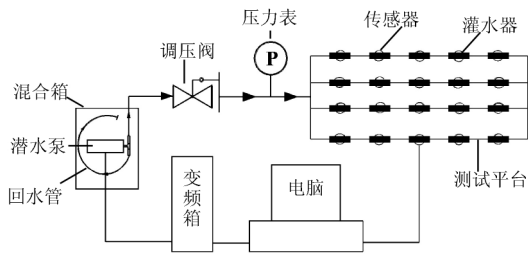


图1 浑水试验测试平台

Fig.1 Schematic diagram of testing apparatus

泥沙为风干沙壤土, 粒径 (D) 小于 0.10 mm, 采用筛网 150~500 目 (mesh) 筛网, 经过高频振荡研磨并过筛处理, 将其分为 8 种粒径范围; 以实际灌溉用水的最大含沙量值 (约 0.8 g/L) 作为中值, 设定浑水含沙量 (m) 为 0.25、0.50、0.75、1.00、1.25、1.50、1.75、2.0 g/L, 见表 1。灌水器浑水试验的压力水头 (H) 其额定压力 10 m。

表1 试验泥沙颗粒粒径分级参数表

Table1 Sediment particle size distribution for each treatment		粒级组成划分 (中国制)		
试验因子 水平编码	粒径范围/mm	细沙/%	粉粒/%	黏粒/%
D_1	0.075~<0.1	85.89	3.68	10.43
D_2	0.061~<0.075	62.94	19.02	18.85
D_3	0.058~<0.061	71.21	5.97	23.02
D_4	0.045~<0.058	21.31	45.41	33.28
D_5	0.038~<0.045	30.2	56.66	13.14
D_6	0.034~<0.038	16.31	30.31	53.38
D_7	0.031~<0.034	14.61	32.35	53.04
D_8	<0.031	10.68	28.74	60.58

1.2 试验方案

浑水滴灌试验分为 2 部分, 第 1 部分采用类短周期连续加沙试验测试确定堵塞敏感的泥沙粒径以及浑水含沙量, 第 2 部分采用混合粒径抗堵塞试验, 以验证第 1 部分的结论。

类短周期堵塞试验: 参照美国灌溉手册推荐的短周期连续加沙测试程序^[14], 适当延长每阶段灌水时间和灌水间隔时间, 分别对筛选出的 8 种粒径范围泥沙, 在 10 m 进口压力水头下, 以初始浑水含沙量 0.25 g/L 进行浑水堵塞试验, 测试时间 30 min, 灌水间隔 6 h 后, 将浑水含沙量增加到 0.5 g/L, 继续浑水堵塞试验 30 min, 间隔 6 h 后进入下一阶段, 直到浑水含沙量达到 2.0 g/L 的阶段 8 为止。每次试验灌水器的数目为 20 个, 试验结束后, 根据相对流量变异度大小及方差分析结果将 8 种粒径范围泥沙颗粒分为难堵塞, 容易堵塞和极易堵塞 3 种。每种粒径试验约 46 h, 合计约 3 d 完成 1 组试验, 8 组试验共进行 24 d。

验证试验: 考虑到不同粒径颗粒间的相互作用, 将类短周期堵塞试验结果划分出的极易堵塞、易堵塞和难堵塞 3 种等级粒径范围的泥沙颗粒各自按照等质量比 1: 1: 1 混合, 为加强试验对比效果, 将混合后的极易堵塞组粒径段设置为低含沙量水平 1.0 g/L, 易堵塞组粒径段含沙量设置为 1.5 g/L, 难堵塞组粒径段设置为高含沙量水平 2.0 g/L 进行堵塞试验。测试压力为 0.1 Mpa, 测试时间为 30 min, 灌水间隔 6 h, 设计灌水次数为 22 次, 每组试验约 137 h, 合计约 7 d 完成一

组试验, 3 组试验共需 21 d。

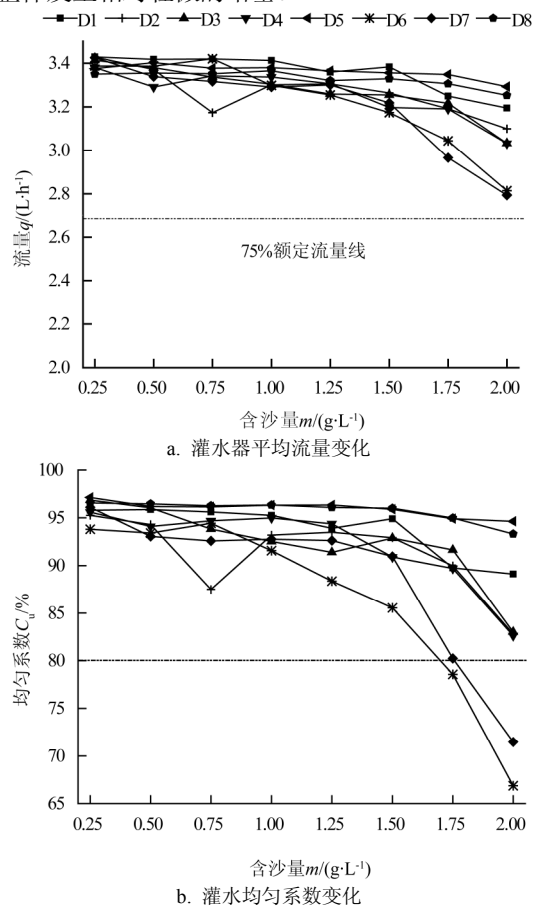
1.3 评价指标

为了便于描述, 本文将额定压力的浑水流量 q_i 与清水流量 $q_{清}$ 的比值称为相对流量, 记作 q_r 。一般认为当 q_r 小于 75% 时灌水器发生严重堵塞^[14]。将 2 个相邻试验阶段末测试的质量流量之差称为流量变化量, 记作 Δq_i 。而堵塞概率 η 是指堵塞灌水器的个数 n 与参与试验总灌水器个数 N 的比值。采用克里斯琴森系数 C_u 表征灌水均匀系数, 微灌工程技术规范中明确规定: $C_u > 80\%$ ^[15]。

2 结果与分析

2.1 灌水器堵塞情况分析

为了更加全面地分析堵塞的变化规律, 选取灌水器平均流量和灌水均匀系数进行分析, 如图 2 所示。从整个测试过程中, 随着含沙量的增加, 流量均呈下降趋势, 即灌水器都发生了不同程度的堵塞 (图 2a)。堵塞发生既存在缓慢渐进过程 (如 D_8), 试验末流量的降幅只有 8.4%, 也存在浑水流量快速递减过程 (如 D_7), 降幅可达到 21.3%, 同时存在堵塞、冲洗的反复过程 (如 D_2)。从均匀度系数 C_u 的变化幅度可看出 (图 2b), D_6 灌水器的堵塞程度在整个灌水周期内呈现急速下降的趋势, 变化幅度最大, 试验结束时 C_u 下降了 29.12%。粒径影响下, 流量变化较小的试验组相应的灌水均匀度系数变化趋势也相对平缓, 说明灌水器整体发生相对轻微的堵塞。



注: $D_1 \sim D_8$ 代表各种泥沙粒径颗粒范围。

图2 灌水器流量及均匀变化过程曲线

Fig.2 Effect of sediment concentration in muddy water on emitter discharge and Christiansen uniformity coefficient (C_u)

本试验以 75%额定流量线作为堵塞标准, 8 阶段试验结束后, 统计灌水器的堵塞情况, 结果如表 2 所示。测试总滴头数为 144 个, 其中流量逐渐减小最终流量变为 0 的灌水器个数是 4 个; 灌水器迷宫流道断面发生逐渐部分堵塞的个数为 14 个; 本试验中由于泥沙粒径较小, 发生流量从标准流量突然减小到 0 的突然完全堵塞现象为 0。就各种粒径条件下的灌水器堵塞的情况来看, 各种粒径颗粒 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_8 试验组堵塞灌水器数量比例分别为 6.67%、6.67%、26.67%、13.33%、6.67%、26.67%、20%、13.3%。

表 2 灌水器堵塞情况统计表
Table 2 Summary of emitter clogging

项目	滴头堵塞过程形式			颗粒堵塞流道部位		
	逐渐完全堵塞	逐渐部分堵塞	突然完全堵塞	进口	拐角	出口
滴头 / 个	4	14	0	9	8	1

试验结束后将风干的滴灌带剖开, 观察堵塞颗粒的沉积部位, 图 3 为 4 个典型迷宫灌水器流道泥沙颗粒沉积位置的情况, 并统计淤积部位, 见表 2。

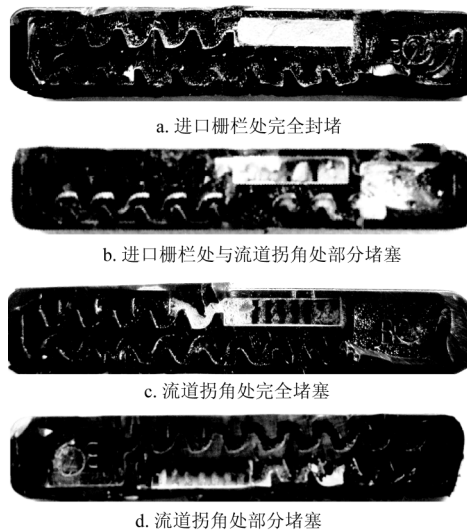


图 3 迷宫流道堵塞情形

Fig.3 Illustration of emitter clogging in labyrinth-channels

从表 2 可以看出, 灌水器进口和拐角处是发生堵塞主要位置, 出口发生堵塞的情况较少。发生堵塞的位置既表现出一定的规律性, 即进水口、拐角处易发生堵塞的规律性, 又表现出流量堵塞单元的随机性。根据相对流量 75%的堵塞判断标准以及颗粒主要沉积位置统计得到, 堵塞灌水器中进口处、拐角处、出口处堵塞的比例分别为 58.54%、36.59%、4.87%, 其中图 3b 堵塞位置的判定为流道进口处部分堵塞。细小悬浮颗粒拥有巨大的表面力, 在黏粒表面电荷的影响下使颗粒间彼此黏结长大, 胶结成的絮团随水流运动, 堵塞灌水器进口处的过滤栅栏或者进入流道, 复杂细小的流道加上附壁应力和场内涡流使细小颗粒彼此胶结成更大的团聚体, 由此产生的凝絮浆和沉淀会累积到此处, 成为堵塞流道的根本原因^[16-17]; 灌水器出口缓水区内, 颗粒近似于在静水中沉

降, 颗粒间的碰撞概率很小, 细颗粒本身的不等速沉降在絮团形成过程中的作用不容忽视, 而且沉降本身会限制絮团的发展^[18], 故由于沉积造成出口部位的堵塞十分少见。

2.2 泥沙粒径对灌水器堵塞的影响

图 4 是连续加沙试验第 8 阶段末相对流量 q_r 与泥沙颗粒粒径 D 的柱状关系。从图 4 可以看出, 灌水器的堵塞既没有随着泥沙粒径的增大而单调增强, 也没有呈现出单调减弱的趋势, 而是存在堵塞敏感粒径段。仅从流量变化率来看, 粒径为 D_7 和 D_6 的颗粒较其他各粒径段颗粒更加易于发生堵塞。灌水器堵塞会引起灌水均匀度变差, 从图 2b 中均匀度系数的变化过程也反映出 D_6 、 D_7 最易发生堵塞。采用 SPSS17.0 统计软件分析 8 种粒径范围泥沙颗粒对灌水器堵塞影响, 以灌水器平均流量作为方差分析的因变量, 统计结果表明, 粒径对堵塞的影响存在显著的差异 ($p < 0.01$)。将各粒径范围试验组 8 阶段流量变异系数作为变量对 8 种粒径进行快速聚类分析, 并结合图 5 得出, 泥沙颗粒粒径 D_6 和 D_7 为极易堵塞沙粒组, 粒径 D_5 、 D_8 为难堵塞沙粒组, 粒径 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为易堵塞沙粒组, 见表 3。

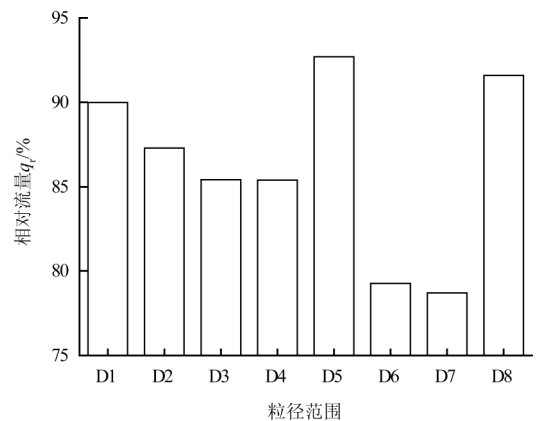


图 4 粒径与灌水器相对流量关系

Fig.4 Impact of particle size distribution on relative flow

表 3 堵塞难易程度分类表

Table 3 Classification of clogging level based on sediment particle size range

粒径/mm	难堵塞	易堵塞	极易堵塞
		0.038~<0.045 <0.031	0.075~<0.1 0.061~<0.075 0.058~<0.061 0.045~<0.058

2.3 含沙量对灌水器堵塞的影响

采用 Origin8.0 软件对各测试阶段流量变化量 Δq_i 进行双因素方差分析, 发现含沙量对灌水器堵塞流量变化的影响达到显著水平 ($p=0.00108$), 说明细小颗粒浑水含沙量是堵塞发生特性的另一个重要因素。图 5 为 8 种粒径浑水试验各阶段平均相对流量变化量随灌水次数变化的关系曲线。从图 5 可以看出, 不同粒径条件下含沙量对灌水器堵塞的影响略有不同, 但总体而言, 随着含沙量的增大流量变化量总体呈现增大趋势, 具体表现为灌水器平均流量在反复震荡过程中呈下降变化趋势。当含沙量为 0.25 g/L 时, 含沙量对堵塞性能的影响均极微弱, 在灌水时间较短的情

况下, 流量变化量接近于 0, 近似于清水流量; 当含沙量在 0.5~1.25 g/L 之间时, 虽灌水器流量变化量呈高低波动状态, 但堵塞程度并不明显, 说明该范围内存在明显的流道冲淤现象; 当含沙量大于 1.25 g/L 时, 灌水器流量变化量开始剧烈变化增高, 灌水器堵塞程度发生明显激增。说明高含沙量浑水 (>1.25 g/L) 中, 颗粒在流道壁面频繁冲淤

交替, 最终大量来沙在流道内淤积沉降, 导致灌水器堵塞程度加剧。粒径 D_5 、 D_8 流量变化量随含沙量变化趋势非常平缓, 变化量仅在 0.056 g 范围内波动, 而粒径 D_6 、 D_7 变化的非常剧烈, 变化量最高可达到 0.245 g, 说明确实存在迷宫流道堵塞的敏感泥沙粒径段, 粒径段 D_6 、 D_7 浑水随着含沙量升高特别容易发生堵塞。

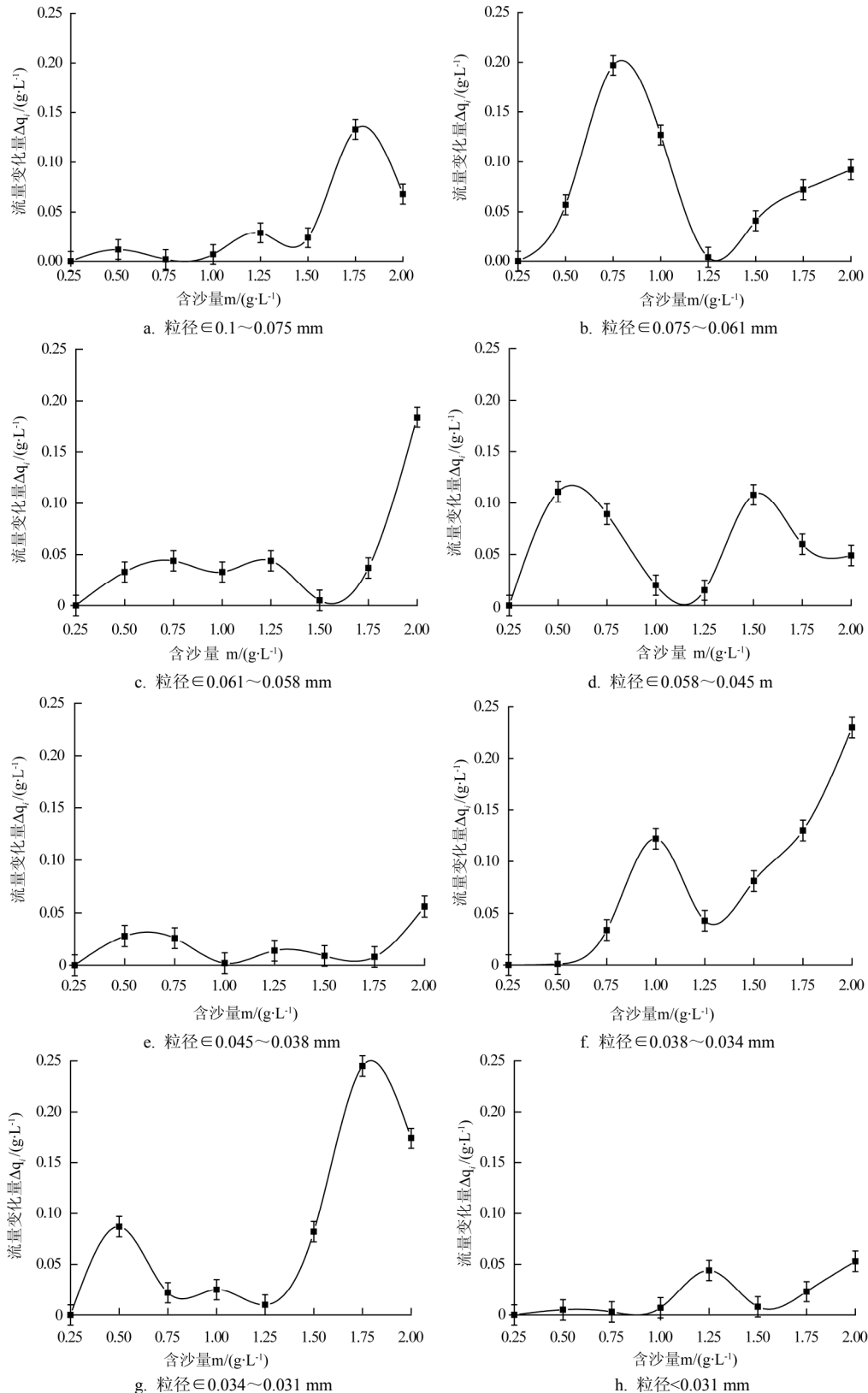


图 5 含沙量与流量变化量关系

Fig. 5 Effect of sediment concentration in muddy water on change of flow discharge

2.4 结果验证

灌水过程中, 灌水器流量及其均匀度 C_u 与灌水次数之间的规律如图 6 所示。从图 6a 中可看出, 即使含沙量较高 (2.0 g/L), 难堵塞的泥沙粒径组浑水较其他 2 种粒径组浑水依然难以发生堵塞, 而易堵塞颗粒组浑水含沙量较低 (1.0 g/L) 时, 仍比其他粒径组浑水易造成灌水器流道堵塞。易堵塞与极易堵塞的粒径组浑水灌溉在第 6 次灌水后, 由于发生局部堵塞, 流量开始出现明显下降, 灌水 16 次后达到 75% 标准流量以下。而难堵塞粒径组浑水在第 11 次灌水后, 流量在明显下降, 灌水 22 次后, 流量依然大于 75% 标准流量。灌水器堵塞必然导致灌水均匀度下降, 从图 6b 可以看出, 难堵塞粒径组即使在含沙量时, 当灌水次数 14 次后, 依然 $C_u > 80\%$, 而易堵塞粒径组即使在含沙量较低时, 灌水次数 10 次后, $C_u < 80\%$ 。上述试验结果验证了堵塞敏感泥沙颗粒确实存在, 造成堵塞的敏感粒径为 $0.031 \sim < 0.038 \text{ mm}$ 。

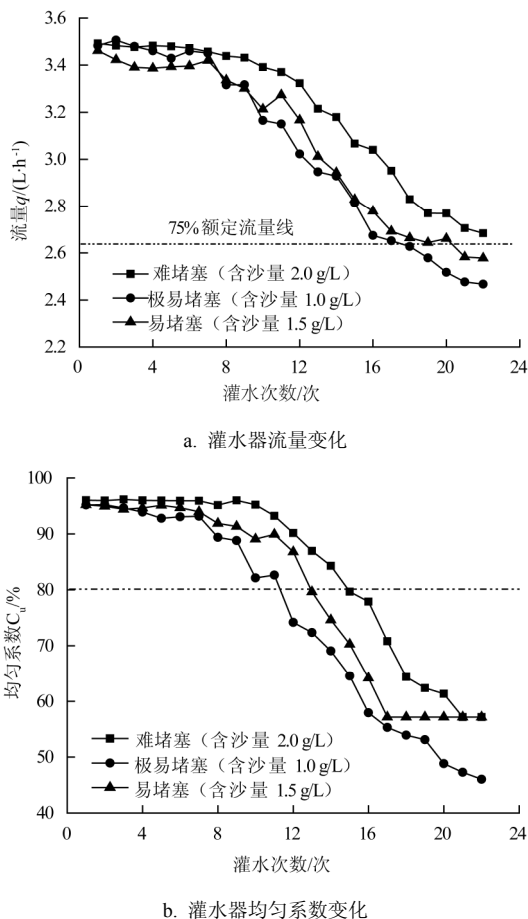


图 6 灌水器流量及均匀系数随灌水次数变化曲线
Fig.6 Effect of repeated irrigation on flow discharge and Christiansen uniformity coefficient

3 讨论

以往采用数值模拟方法认为, 粒径在流道结构最小尺寸的 $1/10 \sim 1/6$ 时不易造成堵塞^[19], 颗粒沉积概率与泥沙粒径呈正相关关系, 当粒径大于 0.05 mm 时, 灌水器堵塞的危险系数急剧增加^[12]。上述模拟研究结果与本文试验结果存在一定的差异性, 分析原因认为以往模拟研

究中无法模拟细小颗粒在流动过程中胶结絮凝情况, 偏重颗粒紊动重力沉降的考察。泥沙颗粒粒径 ($D_1 \sim D_4$) 较大时, 发生堵塞的主要作用力为泥沙随水流的碰撞、沉降和堆积, 当泥沙颗粒较小时, 发生堵塞的主要作用力为颗粒的表面活性与其自身和周围介质之间的吸附作用。综上所述, 当含有较大颗粒泥沙浑水灌溉时, 固体颗粒大小是引起迷宫流道堵塞的主要因素^[17,9,20], 而本试验采用的泥沙颗粒粒径小于 0.1 mm , 一定浓度的含沙量是造成颗粒间相互的碰撞和絮凝的必要条件, 流道内局部颗粒浓度分布随入流含沙量的增加而增加^[21], 当含沙量达到一定程度 (1.25 g/L 左右), 浑水浓度对灌水器堵塞的影响作用更明显。

从颗粒造成灌水器堵塞的机理和过程分析, 分为黏性泥沙的絮凝作用和非黏性泥沙的沉积作用。当粒径在 $0.045 \sim < 0.1 \text{ mm}$ ($D_1 \sim D_4$) 范围内时, 灌水器堵塞的发生随着粒径的减小而加剧, 从表 1 看出, $D_1 \sim D_4$ 其黏粒含量从 10.43% 增加到 33.28%, 黏粒含量越多絮凝越强。粒径在 $0.038 \sim < 0.045 \text{ mm}$ (D_5) 的颗粒其黏粒含量仅为 13.14%, 主要粒径组成为粉粒, 故可以忽略黏粒絮凝作用的影响, 李志平^[22]等人指出粒径小于 0.075 mm 的颗粒跟随性接近于 1, 泥沙颗粒速度与流体速度分布一致, 相差较小, 颗粒物质更容易随流场运动, 堵塞的可能较低。粒径在 $0.031 \sim < 0.038 \text{ mm}$ 之间的泥沙为引起灌水器发生堵塞的敏感粒径, 原因有两个, 一是其粒径相对较小, 拥有较大曳力, 容易进入流场的漩涡区不能逃逸, 发生碰撞、消能、沉淀; 二是其粒径机械组成比较复杂, 细沙、粉粒、黏粒之间发生的隐暴作用, 即较大颗粒对细粒产生隐蔽作用使细粒受到较小的拖曳力和上举力, 较粗颗粒会受到较大水流作用力, 沙粒启动需克服由于粗细颗粒相互作用而产生的附加作用力^[23]。另外颗粒团聚形成粒径较大的团聚体, 易发生沉淀造成灌水器堵塞。对于粒径小于 0.031 mm 颗粒, 粒径的机械组成相对单一, 其黏粒含量高达 60.58%, 其中小于 0.001 mm 的颗粒比例也较大, 当颗粒尺度小于 $1 \mu\text{m}$ 时, 布朗运动和颗粒的絮凝作用会对颗粒在流场中的运动有重要影响^[18,24], 使得其长久悬浮, 加之其拥有较高跟随性, 在不考虑水质含盐度和有机质含量的情况下 (本试验的设定条件), 造成堵塞的概率较低。

本文采用目前易实现的技术手段, 对粒径小于 0.1 mm 的颗粒进行分组试验, 这样与实际灌溉水中颗粒粒径非单一组成形式存在一定的差异, 如果能采用不同颗粒级配的浑水试验, 其结果将更接近于实际情况。但多粒径混合级配试验过程中, 颗粒的级配组成比例以及试验结束后流道内滞留泥沙粒径范围的确定是比较困难的。故本文主要采用单粒径段试验与部分混合粒径验证相结合的方法, 分析粒径、含沙量等对堵塞的影响, 发现确实存在浓度、粒径段组合的易堵塞区间, 试验结果也可在一定程度上反映灌水器物理堵塞的发生机理。

4 结论

本文针对粒径范围小于 0.1 mm 的泥沙颗粒, 在灌水

器额定的工作压力条件下,通过配置含沙量水平在 0.25~2.0 g/L 的 8 种含沙水源,以类短周期堵塞测验方法为基础,对浑水流量变化过程以及灌水器堵塞情况进行了测试,得出以下结论

1) 细小泥沙对内镶片式斜齿形迷宫灌水器堵塞与大颗粒泥沙堵塞位置情况类似,主要发生在流道进水口与流道拐角处。

2) 含沙量和泥沙粒径是造成灌水器堵塞的主要原因,当粒径小于 0.1 mm 时,含沙量对灌水器堵塞的影响非常显著。含沙量 ≤ 0.25 g/L 时,且灌水时间较短时,流量变化接近于清水滴灌情况;含沙量在 0.25~1.25 g/L 之间时,流道内冲淤频繁,流量波动频繁;含沙量在 1.25~1.5 g/L 时,灌水器堵塞几率迅速提高。

3) 对于迷宫流道灌水器存在影响堵塞的敏感段泥沙粒径。在水质单一的条件下,小于 0.10 mm 细小颗粒的堵塞敏感粒径为: 0.031~0.038 mm 之间。

受试验条件的影响,试验次数和组合还存在一定局限性,另外,上述结论仅为一种迷宫流道试验结果分析得来,因此,细小颗粒堵塞的微观机理等还有待于进一步验证和完善。

致谢: 本文得到西安交通大学魏正英教授, 中国农业大学李云开副教授, 中国水利水电科学研究院李久生研究员、王建东副研究员的评审与指导, 特此一并致谢。

[参 考 文 献]

- [1] Bucks D A, Nakayama F R. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance[J]. *Agricultural Water Management*, 1979, 2(2): 149-162.
- [2] Nakayama FR, Bucks D A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review[J]. *Irrigation Science*, 1991, 12(4): 187-192.
- [3] 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 with English abstract)
- [4] 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*, 2006, 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*, 2006, 26(5): 7-13. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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 CSAE*, 2004, 20(1): 80-83. (in Chinese with English abstract)
- [6] Haman D Z, Allen G S, Fedro S Z. Settling basins for trickle irrigation in Florida[Z]. AE65. Gainesville: University of Florida, IFAS, Extension, 2003.
- [7] 李治勤, 陈刚, 杨晓池. 浑水引起迷宫灌水器物理堵塞因素实验研究[J]. *西安理工大学学报*, 2006, 22(4): 395-398.
Li Zhiqin, Chen Gang, Yang Xiaochi. Experimental study of physical clogging factor of labyrinth emitter caused by muddy water[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2006, 22(4): 395-398. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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. Study on sedimentation characteristics in labyrinth emitter[J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University: Nat. Sci. Ed.*, 2009, 37(1): 229-234. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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 with English abstract)
- [10] 王建东. 滴头水力性能与抗堵塞性能试验研究[D]. 北京: 中国农业大学硕士论文, 2004, 29-32.
Wang Jiandong. Study on the Hydraulic and Anti-clogging Performance of Emitters[D]. Beijing: Master degree thesis of China Agricultural University, 2004, 29-32.
- [11] 王文娥, 王福军. 片状迷宫滴头中悬浮颗粒浓度分布规律数值分析[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3): 1-6.
Wang Wen'e, Wang Fujun. Numerical analysis of the distribution rule for suspended granule concentration in labyrinth integrated emitter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(3): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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 with English abstract)
- [13] 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 with English abstract)
- [14] ISO/TC 23/SC 18/WG5 N4. Clogging test methods for emitters. 2003.
- [15] 水利部农田灌溉研究所. 微灌工程技术规范(SL103-95)[S]. 北京: 水利水电出版社, 1995.
Farmland irrigation research institute. Technical standard of micro-irrigation project(SL103-95)[S]. Beijing: China waterpower press, 1995.
- [16] 魏正英, 赵万华, 唐一平, 等. 滴灌灌水器迷宫流道主航道抗堵设计方法研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(6): 1-7.
Wei Zhengying, Zhao Wanhua, Tang Yiping, et al. Anti-clogging design method for the labyrinth channels of

- drip irrigation emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [17] 金文, 张鸿雁. 灌水器内流道流场 Micro-PIV 试验分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 12—17.
Jin Wen, Zhang Hongyan. Micro-PIV analysis of flow fields in flow channel of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 12—17. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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, 1: 11—17.
Zhang Deru, Liang Zhiyong. Experiment study of effect of nonuniform fine sediment on flocculation[J]. Hydro-Science and Engineering, 1994, 1: 11—17. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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 Wen'e, 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 with English abstract)
- [20] 钱蕴璧. 节水农业新技术研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [21] 魏正英, 唐一平, 温聚英, 等. 灌水器微细流道水沙两相流分析和微 PIV 及抗堵塞实验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 1—9.
Wei Zhengying, Tang Yiping, Wen Juying, et al. Two-phase flow analysis and experimental investigation of micro-PIV and anti-clogging for micro-channels of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李志平, 李恩邦, 李淳, 等. 全场光学测量中示踪粒子跟随性的数值分析[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(20): 5208—5212.
Li Zhiqin, Li Enbang, Li Chun, et al. Numerical analysis of following behaviors of particle tracers in full flow field observation and measurement[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(20): 5208—5212. (in Chinese with English abstract)
- [23] 拾兵, 曹叔尤, 刘兴年. 非均匀沙隐暴作用的研究现状及其起动矢量式[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 33(4): 723—728.
Shi Bing, Cao Shuyou, Liu Xingnian. Present status of research and vectoria equation of incipient velocity on non-uniform sediment[J]. Journal of Ocean University of QingDAO, 2000, 33(4): 723—728. (in Chinese with English abstract)
- [24] 陆坤权, 刘寄星. 颗粒物(上)[J]. 物理, 2004, 33(9): 629—635.
Lu Kunquan, Liu Jixing. Static and dynamic properties of granular matter(I)[J]. Physics. 2004, 33(9): 629—635. (in Chinese with English abstract)

Influence of sediment particle size on clogging performance of labyrinth path emitters

Liu Lu^{1,4}, Niu Wenquan^{2,4*}, Bob Zhou³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

3. Agricultural and Biosystem Engineering Department, Iowa State University, Ames, IA 50011, USA

4. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the influence of small sediment particles containing in muddy water on anti-clogging performance of oblique dental labyrinth channel drip emitters. A total of 8 types of muddy water with different particle size distribution (all less than 0.1 mm) were tested by short-term clogging tests. Based on these trials, the effect of two factors (sediments' diameter and muddy water concentration) on emitter's clogging were analyzed, and then the range of sensitive particle diameters and the level of sediment concentration were discussed. The results showed that the performance of emitters was greatly impacted by the sediment concentration in muddy water with sediment particle size <0.1mm, especially when sediment concentration was greater than 1.25 g/L. This finding indicated the positive relationship between sediment concentration and the clogging process. On the other hand, the sediment particle diameter neither monotonically increased nor decreased the clogging. Emitters are prone to being clogged when particle size ranges between 0.03 and 0.04 mm. The findings from the study will be beneficial for the practical application of muddy water in drip irrigation.

Key words: fine sand, particle size, sediments, concentration, labyrinth path, emitter