

泥沙粒径与含沙量对迷宫流道滴头堵塞的影响

吴泽广¹, 张子卓¹, 张珂萌¹, 罗春艳¹, 牛文全^{1,2*}, 喻黎明³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100;
3. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410114)

摘要: 为探明泥沙粒径与含沙量对内镶片式斜齿形迷宫流道滴头的堵塞过程和原因, 采用筛分法, 分选出6个小于0.1 mm的粒径段, 配制成不同含沙量的浑水, 在恒压条件下, 采用周期性间歇灌水试验观测流量变化, 通过电镜扫描法观测堵塞泥沙结构。试验结果表明: 粒径为 $0.075 \leq D < 0.1$ mm和 $0.03 \leq D < 0.038$ mm的泥沙易引起滴头堵塞; 粒径为 $0.038 \leq D < 0.05$ mm和 $D < 0.02$ mm的泥沙较难引起堵塞, 且含沙量变化对堵塞的影响较小; 粒径 $0.02 \leq D < 0.03$ mm和 $0.05 \leq D < 0.075$ mm的堵塞情况介于上述两者之间。当含沙量为 $>1.2 \sim 1.3$ g/L时, 是最易引起堵塞的临界含沙量。当 $0.038 \leq D < 0.1$ mm时, 泥沙在流道内不易形成团聚体, 造成滴头堵塞的原因是泥沙沉降、堆积; 当 $D < 0.038$ mm时, 泥沙易在流道中凝结成大的团聚体, 是造成滴头堵塞的主要原因。

关键词: 粒径; 泥沙; 灌溉; 含沙量; 迷宫流道; 滴头; 堵塞

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.07.012

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-07-0099-10

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)

0 引言

滴灌技术由于其高效节水、适应地形能力强等优势^[1], 被广泛应用于推广。但滴头堵塞问题一直是困扰滴灌技术应用的一个难题^[2-4]。目前大部分研究主要围绕滴头流道结构等对堵塞的影响^[5-7]。Bucks等^[8]将堵塞归结为物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞3种类型。其中物理堵塞最为普遍, 研究发现, 在实际灌水过程中, 即使水质良好且有较完备的沉淀过滤措施, 仍有粒径小于0.1 mm的泥沙颗粒进入滴头, 致使1/3的滴头在多次灌水后发生物理堵塞^[9], 是堵塞最为常见也是造成堵塞的最直接原因^[10], 因此研究者对物理堵塞进行了大量研究。李治勤等^[11], 徐文礼等^[12]研究指出, 对于介于流道尺寸1/3~1/7的泥沙颗粒, 粒径是造成迷宫流道滴头堵塞的主要原因, 含沙量仅加快流道完全堵塞的速度。葛令行等^[13]利

用FLUENT软件对沙粒在迷宫灌水器中运动与沉积规律进行模拟得出, 当粒径大于0.05 mm时, 滴头堵塞的危险系数急剧增加。王文娥等^[14]对片状迷宫滴头颗粒浓度分布进行模拟得出, 灌水器出口、缓水区、拐角处浓度较大。闫大壮等^[15]采用计算流体动力学(computational fluid dynamic, CFD)模拟迷宫流道内悬浮颗粒的运动情况, 得出粒径大于0.075 mm的颗粒不能很好地随水流动, 是引起堵塞的主要物质。牛文全等^[16]模拟研究了迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响, 得出当转角为60°时, 抗堵塞性能相对较强。王文娥等^[17]采用计算流体力学方法对粒径小于0.1 mm颗粒在流道中的运移情况进行模拟研究指出, 粒径在0.01~0.04 mm范围内, 不易引起滴头堵塞。刘璐等^[18]通过研究得出易引起迷宫流道滴头堵塞的敏感粒径范围为0.031~0.038 mm。曹蒙等^[19]通过研究得出流道壁面糙度对颗粒物质的黏附作用, 使流道阻力系数增大, 同时改变颗粒浓度的分布, 使流道更容易发生堵塞。多数学者研究认为, 堵塞往往是一个反复渐进的过程, 绝大多数情况下是在多次堵塞, 反复冲洗的过程中逐渐或者突然完全堵塞^[20-21]。王建东等^[22], 穆乃君等^[23], 通过研究压力对堵塞的影响得出, 工作压力是影响堵塞的重要因素, 但是堵塞性能并不完全随额定工作压力的增大而提高。

收稿日期: 2013-10-28 修订日期: 2014-01-16

基金项目: 国家高技术发展计划(863计划)课题(2011AA100507);

自然科学基金项目(51379024)

作者简介: 吴泽广(1988—), 主要从事灌溉理论与节水技术研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: wuzeguangle1106@126.com

*通信作者: 牛文全(1972—), 研究员, 博士生导师, 主要从事灌溉理论与节水技术研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: nwq@vip.sina.com

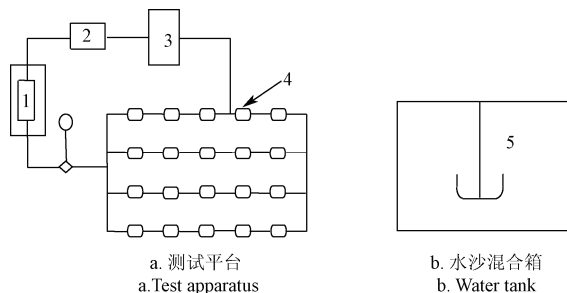
但是以往对细小颗粒泥沙(0~0.1 mm)堵塞的研究多采用计算机模拟方法,试验验证相对较少,大多数研究仅从宏观角度观察堵塞情况。另外,研究提出的敏感粒径范围尚需进一步验证,不同粒径范围泥沙对应的易引起堵塞的含沙量需深入研究。

本文通过不同粒径、不同含沙量条件下,浑水滴灌试验,分析造成滴头堵塞的敏感泥沙粒径范围与含沙量,并通过电镜观测,分析不同粒径泥沙堵塞形成的结构体特点,探明不同粒径造成堵塞的机理,为选取合适的过滤方式提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

试验测试装置由压力变频设备、数据自动采集设备、水沙混合设备组成。试验水箱规格为1 m×0.5 m×0.5 m的长方形箱体,上端固定搅拌机,通过搅拌保证水沙混合均匀;潜水泵额定扬程45 m;压力表量程0.16 MPa,精度等级0.25级。变频调压设备控制工作压力,控制精度为0.01 m水头。数据自动采集设备由计算机、处理软件及电子秤组成,该系统可以根据人为设定的数据采集时间间隔自动实时记录滴头的累计出水质量和时间,误差为0.2 g,然后可以根据记录的累计水量和时间,计算测试时间内,滴头不同时刻的平均流量。试验装置如图1所示。



1. 水沙混合箱及潜水泵 Water tank and pump 2. 电脑 Computer
3. 变频箱 Frequency conversion box 4. 灌水器 Emitter 5. 搅拌叶轮 Agitators

图1 浑水试验测试平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of Experimental layout of a drip irrigation system

滴灌带采用甘肃大禹节水股份有限公司生产的迷宫流道滴灌带,其基本参数为:管外径16 mm,额定流量3.5 L/h,进口栅格数3个,齿高2.0 mm,齿间距1.0 mm,流道深1.0 mm,流道长度150 mm,流道单元数8个,缓水区为正方形,边长5 mm。试验用土样采用杨凌沙壤土,王文娥等^[17]研究表明,当颗粒小于流道最小尺寸的1/10时,易造成滴头堵塞,所以选取泥沙最大粒径为0.1 mm(泥沙粒径范围与流道最小尺寸关系如表1),同时根据泥沙

在水中的跟随性^[15]、颗粒对滴头堵塞的危险性^[13]、以及已有研究确定的敏感粒径范围^[18],将采集的土样研磨、筛分处理,分为6种粒径范围,如表1所示。为加快堵塞进度,以农田灌溉水质标准^[24]为基础,选取灌溉水中悬浮物浓度(质量浓度≤0.1 g/L)的5倍以上,设定浑水含沙量为0.5、1.0、1.2、1.3和1.5 g/L。试验过程中压力恒定为0.1 MPa。

为确定不同粒径相互作用对滴头堵塞的影响,按照单粒径段试验结果,设置了表2所示的3种泥沙级配,配置成含沙量为1.0 g/L的浑水进行抗堵塞试验每次灌水时间与灌水时间间隔也均为30 min,当滴头的相对平均流量小于50%时,停止试验。

表1 试验编号与粒径对应表
Table 1 Test numbers and particle size

粒径段编号 Numbers	D6	D5	D4	D3	D2	D1
颗粒与流道最小尺寸比例 Proportion between sediment and flow channel	<1/500	3/100~1/500	19/500~3/100	1/20~19/500	3/40~1/20	1/10~3/40
粒径 D Size/mm	D<0.02	0.02≤D<0.03	0.03≤D<0.038	0.038≤D<0.05	0.05≤D<0.075	0.075≤D<0.1

表2 泥沙级配表
Table 2 Sediment gradation

级配编号 No.	A	B	C	%
0.05≤D<0.1 mm	14.45	27.17	58.38	
0.03≤D<0.05 mm	38.30	13.20	48.50	
D<0.03 mm	56.32	23.55	20.13	

1.2 试验方法

采用间歇性浑水滴灌测试方法,将6种粒径范围的泥沙分别配制成含沙量为0.5、1.0和1.5 g/L的浑水,将3种级配置成含沙量1.0 g/L的浑水。参考短周期堵塞测验方法,每次灌水时间为30 min,试验间隔30 min。滴头流量实时采集。每组处理结束后,更换新的滴灌管,并对系统管道、水箱、泵等冲洗3次,保证系统中无泥沙残留,然后进行后续试验。每个处理的测试时间根据堵塞快慢,在4~9 h之间。为深入分析粒径对堵塞的影响,试验结束后将发生堵塞的滴头剖开,在自然状态下风干,然后采集堵塞在流道内的泥沙,用场发射扫描电镜S-4800观察堵塞物颗粒间的连接结构。

1.3 评价指标与方法

一般认为^[25],衡量滴头制造水平的指标:滴头制造偏差 $CV<0.03$ 为优等。本试验测得滴头制造偏差 $CV=0.013$,属于优等。一般将实测流量与设计流量的75%对比来判定单个滴头是否发生堵塞^[26],但对于灌水系统,目前还没有一个统一的堵塞评价

标准和方法，因此，本文采用克里斯琴森均匀度系数、平均相对流量和流量降幅相结合的方法评价堵塞情况。当滴头发生堵塞时，克里斯琴森均匀度系数和平均相对流量数值均减少，堵塞越严重，减少的幅度越大，而流量降幅相应升高。克里斯琴森系数的计算公式为：

$$C_u = 1 - \left(\sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}| \right) / (n\bar{q}) \quad (1)$$

式中： C_u 为克里斯琴森均匀度系数； i 为滴头序号； n 为滴头总数； q 为滴头设计流量，L/h； q_i 为第 i 个滴头的实测流量，L/h； \bar{q} 为平均流量，L/h。

由于本次试验滴灌系统滴头发生了较为严重的堵塞，不同滴头之间流量差异较大，因此由克里斯琴森法计算的部分克里斯琴森均匀度系数 C_u 为负值，当计算的 $C_u < 0$ 时，本文将 C_u 的取值确定为

0。当含沙量较大时，灌水 9 次后，大部分滴头均已发生严重堵塞，因此本文将第 9 次灌水后的 C_u 作为评价指标之一。平均相对流量 $q_r = \bar{q} / q_0$ ，指在额定压力下，每次试验 20 个滴头的浑水平均流量 \bar{q} 与清水平均流量 q_0 的比值，%。流量降幅 $q_d = (q_0 - q_i) / q_0$ ，指额定压力下，清水流量 q_0 与每个滴头浑水流量 q_i 之差与清水流量 q_0 的比值，%。

2 试验结果与分析

2.1 泥沙粒径对滴头堵塞的影响

用 DPS9.5 数据处理系统对 6 种粒径段浑水的试验结果进行方差分析，以第 9 次灌水后的平均流量作为因变量，结果表明，粒径对堵塞的影响具有显著差异 ($P < 0.05$)。不同粒径范围浑水的平均相对流量 q_r 与灌水 9 次的克里斯琴森均匀度系数 C_u 如图 2 所示。

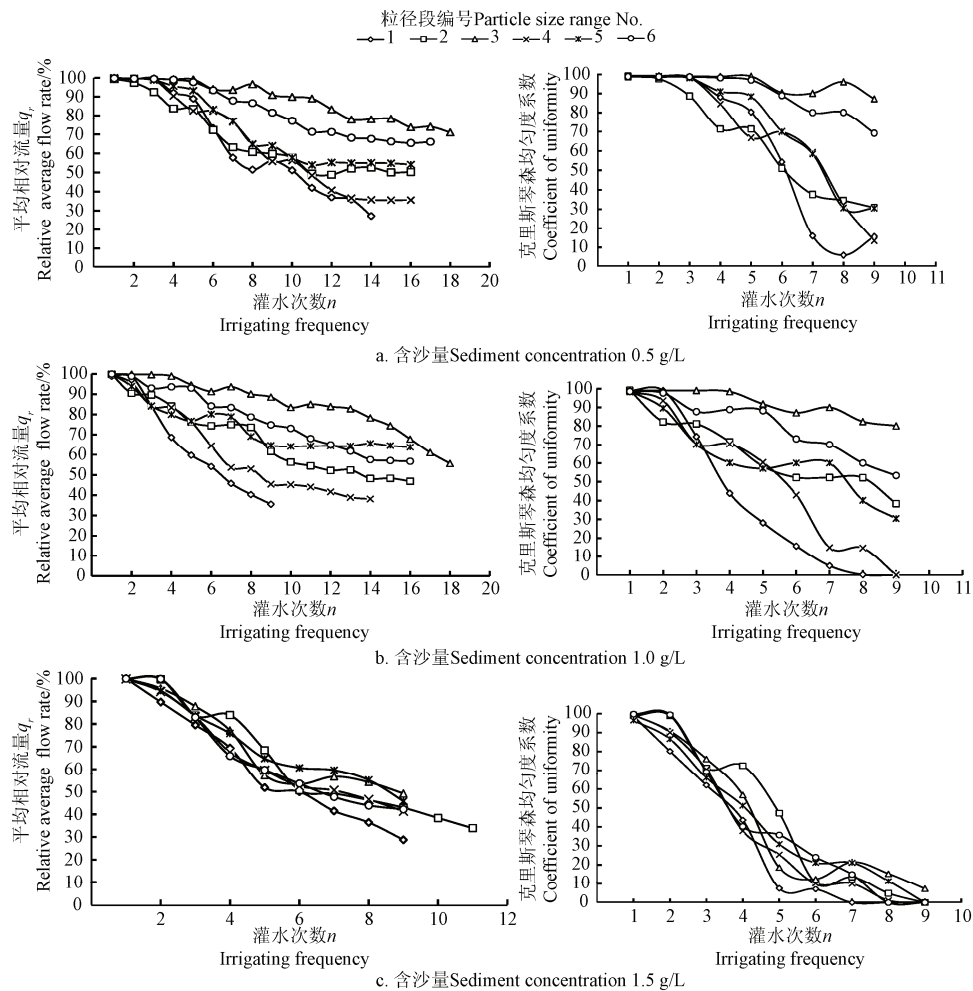


图 2 相对流量与克里斯琴森均匀度变化趋势图

Fig.2 Variety process of mean emitter discharge and C_u over irrigation times and different size

从图 2 可以看出，滴头堵塞程度并不是完全随着粒径的增大而加快，部分粒径较小的浑水堵塞发

展快于粒径较大的浑水，说明在一定的含沙量范围内，存在易造成滴头堵塞的敏感粒径范围。粒径段

D3、D6 配制的含沙量 0.5 g/L 的浑水灌水 16 次后, 相对流量 q_r 分别为 73.67% 和 65.40%, 灌水 9 次后, C_u 分别为 88.41% 和 77.33%, 当含沙量为 1.0 g/L 时, q_r 与 C_u 数值均接近含沙量为 0.5 g/L 时, 说明在含沙量不大于 1.0 g/L 时, 该粒径段泥沙对滴头堵塞的影响较小。这是因为 D3 范围内的泥沙不易絮凝成团, D6 颗粒较小, 受水的布朗运动影响明显, 颗粒在流场中长久悬浮, 加之其具有较高的跟随性, 易随水流出^[18], 所以粒径 D3 和 D6 引起堵塞的概率较低。粒径 D1、D4 浑水在含沙量为 0.5 g/L 时, 灌水 14 次后 q_r 为 30% 左右, 灌水 9 次后 C_u 仅约为 15%, 当含沙量为 1.0 g/L 时, 仅灌水 9 次, 粒径 D1 与 D4 的平均相对流量降至 35.56% 和 45.40%, 说明即使在低含沙量 (0.5 g/L) 条件下, 此 2 种粒径段浑水也较易引起滴头的堵塞, 且堵塞程度随着含沙量的升高而快速发展。这是因为 D1 粒径较大, 不易随水流动^[15], 易发生沉积堵塞。D4 粒径段, 颗粒结构复杂, 易形成大絮团堵塞滴头。当含沙量小于 1.0 g/L 时, 粒径 D2、D5 灌水结束时, q_r 为 50% 左右, 灌水 9 次后 C_u 为 30%, 部分滴头发生了较为严重的堵塞, 说明粒径 D2、D5 也易造成滴头堵塞, 但影响程度较 D1、D4 次之。

当含沙量为 1.5 g/L 时, 6 种粒径段浑水平均相对流量随着灌水次数的增加均迅速降低, 灌水 9 次时 C_u 均降至 10% 左右, 大部分滴头发生了较为严重的堵塞, 说明当含沙量大于 1.5 g/L 时, 堵塞的主要控制因素是含沙量, 而粒径大小的影响非常微小。

按照表 2 配制的不同泥沙级配浑水堵塞试验结果见图 3。

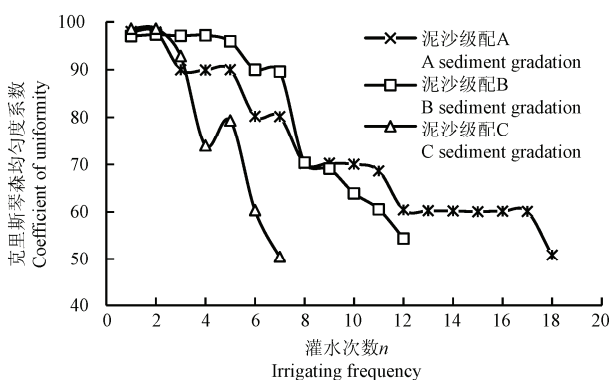


图 3 灌水均匀度系数随灌水次数变化趋势图
Fig.3 Changes of C_u with irrigation times

从图 3 可以看出, 当含沙量为 1.0 g/L 时, >0.05 mm 颗粒含量 (级配 C 最高, 级配 B 次之, 级配 A 最少) 越高的级配越易造成滴头堵塞。级配 A 以粒径 <0.03 mm 的颗粒为主, 其含量 (质量)

超过 50%, 灌水 8 次后灌水均匀度系数降至 80% 以下; 级配 B 颗粒分配相对比较均匀, 灌水 8 次后, 均匀度系数低于 80%; 级配 C 以粒径 $0.05 \sim 0.10$ mm 的大颗粒为主, 仅灌水 6 次后, 灌水均匀度系数已低于 80%。说明在含沙量相同时, 大颗粒 ($0.05 < D < 0.1$ mm) 含量越多越易引起滴头堵塞, 这与本文单粒径段试验结果相验证: 粒径段为 $0.075 \sim 0.1$ mm 的泥沙颗粒最易引起滴头堵塞, 粒径段 $D < 0.03$ mm 的泥沙颗粒不易引起滴头堵塞。

2.2 含沙量对滴头堵塞的影响

图 4 为 6 种粒径段浑水灌水 9 次, 流量降幅与含沙量的柱状关系图。从图 4 可以看出, 随着含沙量增大, 流量降幅总体呈增大趋势, 当含沙量升高到 1.5 g/L 时, 所有粒径段浑水均造成滴头严重堵塞。其中, 粒径 D1 和 D4, 滴头流量降幅随含沙量的增大呈升高趋势, 根据滴头堵塞率达到 50% 的统计结果 (见表 3), 达到 50% 堵塞率的灌水次数随含沙量的升高逐渐减少。当含沙量为 1.0 g/L 时, 两粒径分别在灌水 7 次与 9 次后滴头流量降幅超过 50%, 说明这 2 种粒径段均较易引起滴头堵塞。而粒径 D3 和 D6, 含沙量小于 1.0 g/L 时, 滴头流量变化较小, 50% 滴头堵塞率所需的灌水次数约为 20 次, 说明当含沙量小于 1.0 g/L 时, 这 2 种粒径段的泥沙不易引起滴头堵塞。粒径 D2 和 D5, 当含沙量分别为 0.5、1.0 g/L 时, 流量降幅均在 35%~40% 之间, 50% 堵塞率所需的灌水次数基本相同, 堵塞情况介于粒径 D1、D4 与粒径 D3、D6 之间。综合分析, 当含沙量不大于 1.0 g/L 时, 粒径是影响堵塞的主要因素, 存在易堵塞的敏感粒径段, 当含沙量在 $1.0 \sim 1.5$ g/L 之间时, 堵塞是粒径与含沙量共同作用的结果。而当含沙量大于 1.5 g/L 时, 影响堵塞的主要因素就是含沙量, 粒径对堵塞影响的差异性非常小。

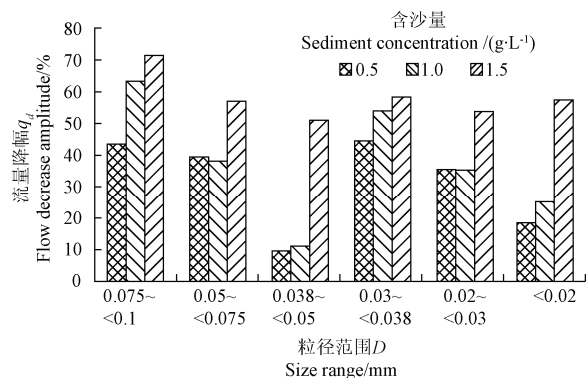


图 4 含沙量与流量降幅关系图
Fig.4 Relationships of sediment concentration and flow decrease amplitude

表 3 滴头堵塞率达到 50%所需灌水次数

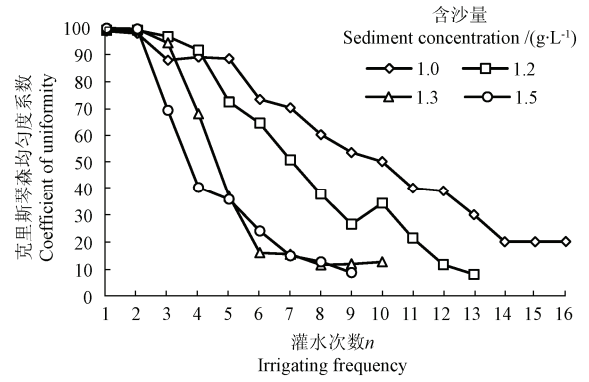
Table 3 Irrigation frequency of emitter clogging rate reaching to 50%

含沙量 Sediment concentration/(g·L ⁻¹)	D1	D2	D3	D4	D5	D6
0.5	10	11	>20	11	17	19
1.0	7	11	19	9	18	18
1.5	6	5	8	6	9	7

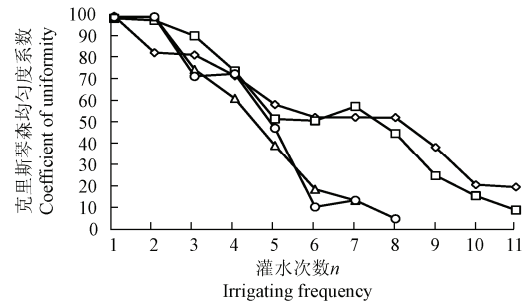
为进一步确定易堵塞的临界含沙量范围，在 1.0~1.5 g/L 之间增加了 1.2 和 1.3 g/L 2 个含沙量水平，并选取易堵塞粒径 D2 和难堵塞粒径 D6 进行试验，图 5 为灌水均匀度系数随灌水次数的变化曲线。

从图 5 可以看出，在粒径 D6 条件下，当含沙量为 1.0 g/L 时，灌水 9 次，克里斯琴森均匀度系数仍为 53.40%，当含沙量为 1.2 g/L 时，滴头堵塞率达到 50%时仍需 12 次灌水。当含沙量升高到 1.3 g/L 时，灌水 7 次后，克里斯琴森均匀度系数降至 15.38%，系统发生了严重堵塞。当含沙量进一步升高到 1.5 g/L 时，9 次灌水克里斯琴森均匀度系数较 1.3 g/L 时仅降低 3%；粒径 D2 条件下，含沙量由 1.0 g/L 上升至 1.2 g/L 时均匀度变化基本相同，含沙量为 1.3 g/L 时，灌水 6 次，克里斯琴森均匀度系数为 18.62%，与含沙量为 1.5 g/L 时相似，综合分析认为：当含沙量由 1.2 g/L 增加到 1.3 g/L 时，堵塞发展速度最快，而当含沙量从 1.3 g/L 增加到 1.5 g/L 时，滴头的堵塞情况基本相同。由此可以得出，最易引起滴头堵塞的临界含沙量介于

1.2~1.3 g/L 之间。



a. 粒径 Sediment particle size D6(<0.02)/mm



b. 粒径 Sediment particle size D2 (0.05~<0.075)/mm

图 5 不同含沙量条件下均匀度系数随灌水次数变化曲线图
Fig.5 Changes of Christiansen uniformity coefficient with irrigation frequency under various sediment concentrations

2.3 堵塞机理分析

试验结束后，将滴灌管晾干，并统计 360 个测试滴头，堵塞分类情况见图 6，统计结果见表 4。

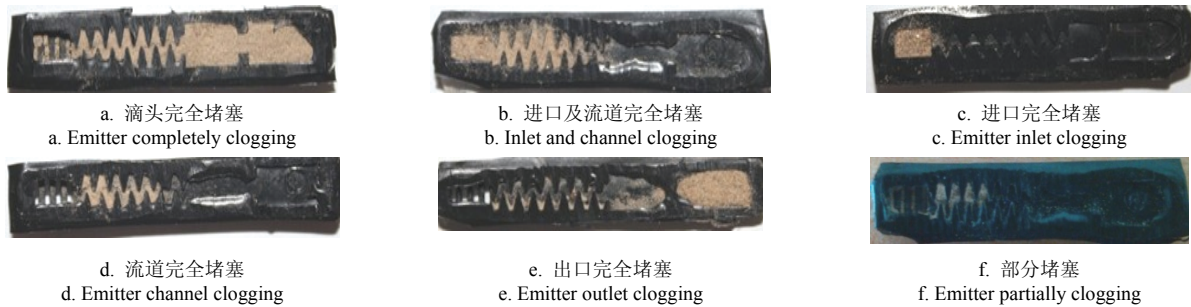


图 6 迷宫流道堵塞情形

Fig.6 Illustration of emitter clogging in labyrinth-channels

表 4 滴头堵塞情况统计表

Table 4 Summary of emitter clogging

堵塞位置 Location	完全堵塞 Completely clogging				部分堵塞 Partially clogging	未堵塞 Unclogging
	进口 Inlet	流道 Channel	进口+流道 Inlet and Channel	出口 Outlet		
滴头数 Emitters	71	32	60	13	29	155
比例 Proportion/%	19.72	8.89	16.66	3.61	8.06	43.06

从表 4 可以看出，完全堵塞的滴头共有 176 个，占全部滴头的 48.89%，占发生堵塞滴头的 85.85%。完全堵塞的滴头中进口和齿形流道处是堵塞发生的主要位置，占完全堵塞滴头的 92.61%，而出口处

发生堵塞仅占 7.39%。

为进一步分析堵塞泥沙结构，将过筛后 6 种粒径的原状泥沙与堵塞泥沙的电镜观测图片进行对比，见图 7。

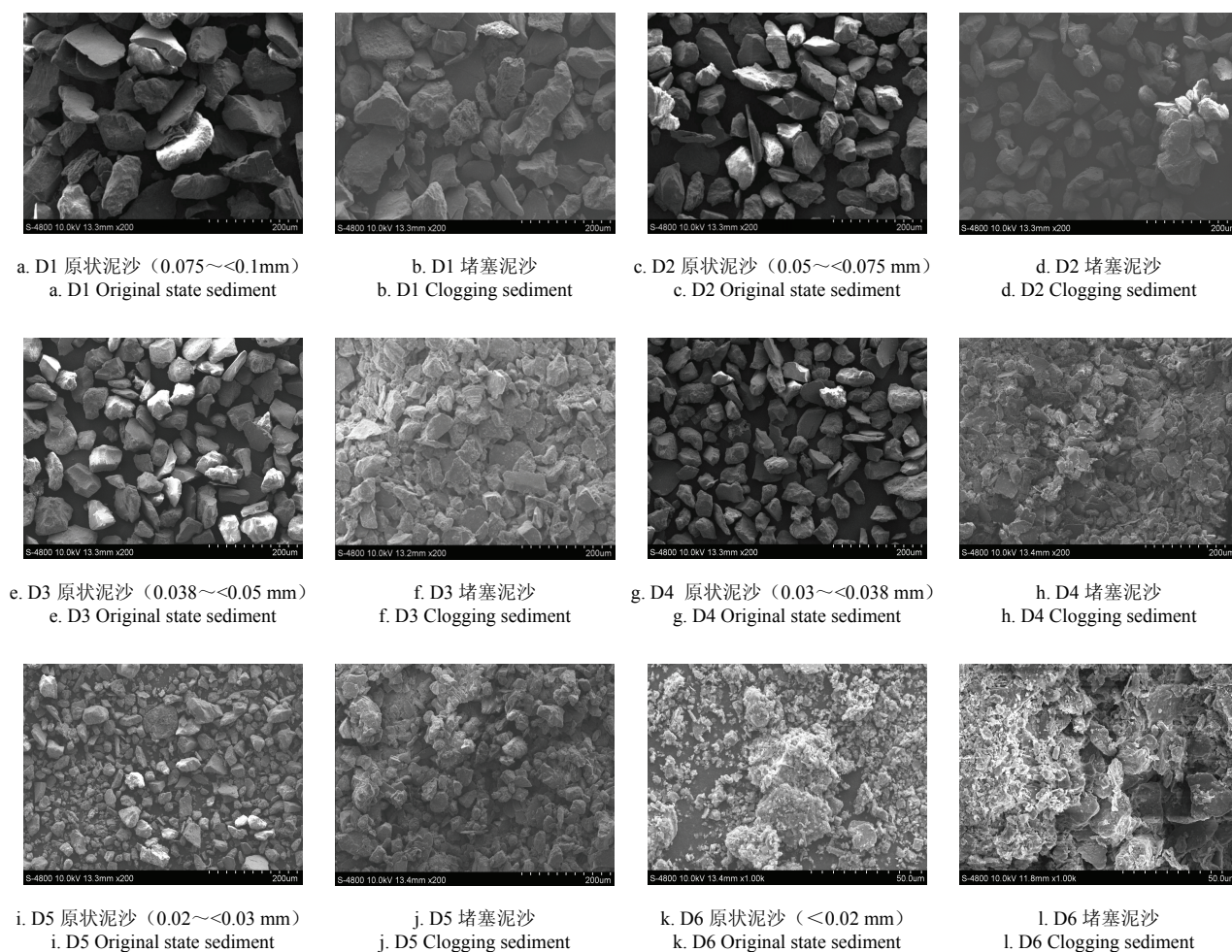


图7 不同粒径原状和堵塞泥沙电子显微镜观测图片

Fig.7 Pictures of original and clogging sediment in different size observed by electron microscope

从图7可以看出,相同放大倍数下,原状泥沙颗粒分明,颗粒之间为松散结构,当粒径 $D \leq 0.038 \text{ mm}$ 时,泥沙在流道内容易形成团聚体,造成滴头的堵塞。粒径D1、D2发生堵塞后颗粒之间的组成结构与原状泥沙类似,为大颗粒的松散堆积体,易在重力沉降作用下,聚集堆积^[27],造成堵塞。但颗粒之间空隙较大,连接不紧实,堵塞后堆积体易在水体紊动剪切作用下破坏^[28],引起流量的波动变化(由图2验证)。粒径D3中,堵塞的泥沙形成了团聚体,颗粒与颗粒之间的空隙较前2个粒径变小,部分空隙被更小颗粒填充粘接,团聚体结构相对紧实,但由于颗粒总体变小,重力堆积形成几率小于粒径D1、D2,另外,粒径过于细小的颗粒也较少,无法大量形成结构稳定的重力堆积体,因此,该粒径段泥沙引起的堵塞程度较小。粒径D4、D5形成了大量的团聚体,由于粒径变小,颗粒之间的缝隙非常小,而且大部分空隙被小颗粒填充粘接成比较稳定的团聚体,不易被分散。该粒径

段,大颗粒为骨料,小颗粒形成絮团粘接大颗粒,易造成滴头堵塞。粒径D6,干燥原状土样由于表面张力作用,形成松散的小团体结构,如图7k,观测堵塞泥沙团聚体可看出,其结构非常密实,虽有较为分散的单颗粒,但大部分为小颗粒形成的絮团结构。这是因为当粒径 $D < 0.02 \text{ mm}$ 时,粘粒较多,容易粘结在一起,此粒径范围的颗粒很难在自身重力作用下沉降,在水体紊动作用下相互碰撞,粘结密实,形成强力链网络,使团聚体体积增大,最终造成滴头的堵塞,但是由于该粒径段颗粒较小,力链缺少大颗粒堆积成的基础骨架,在连续灌溉或者团聚体没有固结之前,其形状易发生变化^[29],且此粒径范围的颗粒在水流中的跟随性和流动性较强,这也是该粒径段不易发生堵塞的主要原因。

3 讨论

3.1 粒径对滴头堵塞的影响

王文娥^[17]等对滴头流道内的悬浮颗粒分布进

行了研究, 试验结果指出, 当颗粒小于流道最小尺寸的 $1/10$ 时, 颗粒之间易发生碰撞消能致使颗粒沉积造成堵塞; 当颗粒大于流道最小尺寸的 $1/6$ 时, 颗粒之间易发生絮凝作用, 絮团沉降引起堵塞。该试验结果与文献[11-15]的试验结果基本相互印证。但文献[17]研究表明, 当泥沙含沙量一定时, 入流颗粒大小为流道最小尺寸的 $1/10 \sim 1/6$ ($0.01 \sim 0.04 \text{ mm}$) 时不易造成滴头的堵塞, 而本试验分析结果是粒径段在 $0.03 \sim <0.038 \text{ mm}$ 时, 较易引起滴头堵塞, 与王文娥等的研究结果存在差异。这是因为王文娥等研究采用数值模拟颗粒大小和浓度, 只考虑了粒径在 $0.01 \sim 0.04 \text{ mm}$ 范围内, 颗粒在水中跟随性较强, 易随水流出, 而忽略了小颗粒在流道中碰撞、粘结、絮凝作用明显, 易形成大絮团, 进而堵塞滴头。刘璐等^[18]研究表明, 粒径范围在 $0.075 \sim <0.1 \text{ mm}$ 的泥沙颗粒对堵塞的影响不是很大, 与本次试验结果相反, 可能是因为2次试验选择的滴头结构不同, 同时试验水温差异较大, 刘璐进行试验的时间主要在12月份, 平均水温低于 3°C , 而本次试验主要在6月份完成, 平均水温在 15°C 左右, 说明粒径对滴头堵塞的敏感性不仅受含沙量影响, 而且与流道结构、灌溉水温有关, 且需要继续加强影响因素的研究。

3.2 含沙量对滴头堵塞的影响

含沙量直接决定泥沙颗粒在流道内发生碰撞的机率, 通过本试验研究认为存在易堵塞的临界含沙量范围: 当含沙量小于 1.2 g/L 时, 含沙量与粒径相互作用, 引起堵塞, 在该含沙量范围内存在易堵塞的敏感粒径; 当含沙量 $>1.2 \sim 1.3 \text{ g/L}$ 之间的临界含沙量时, 任何粒径段的浑水都易造成滴头堵塞。刘璐^[18]研究得到含沙量在 $1.25 \sim 1.5 \text{ g/L}$ 时, 灌水器堵塞几率迅速提高, 与本文结论一致。李治勤等^[11]通过研究得到, 含沙量对灌水器堵塞没有明显影响, 只是在堵塞发生后影响灌水器堵死的进度。这与本试验结论存在差异, 分析原因为: 文献[11]中试验选取的泥沙粒径为 $0.25 \sim 0.224$ 、 $0.15 \sim 0.125$ 、 $0.105 \sim 0.10 \text{ mm}$, 均大于 0.1 mm 。即使浑水含沙量较小, 颗粒依靠重力沉降, 也较易堵塞灌水器, 而本试验所选泥沙粒径较小, 含沙量变大, 可增加彼此碰撞、粘结的机率, 对某些粒径而言, 易形成絮团, 造成滴头堵塞。由此也可以证实, 堵塞是粒径与含沙量相互作用的结果。

3.3 堵塞机理

从堵塞的滴头可以看出, 滴头堵塞的位置基本发生在进口及主流道处。因为含沙水经进口进入流道在拐角处形成旋涡区, 在旋涡区的中心水流的速度极低, 进入涡流区水流中的泥沙颗粒被旋涡卷入

旋涡结构内, 从而使颗粒在运动过程中聚集, 由于速度极低, 卷入后很难再被冲出, 颗粒碰撞凝聚, 沉降而堵塞流道, 这是造成堵塞的根本原因^[15-17]。滴头出口经缓水区, 水流紊动作用极小, 颗粒依自身重力沉降, 碰撞几率较小, 难形成大的絮团造成滴头堵塞, 因此在出口部位堵塞情况较少。在灌水间隔期间, 滴头中的泥沙颗粒彼此凝结, 依附在壁面形成较大的絮团结构, 引起滴头的堵塞, 因此滴头堵塞是一个突然发生的过程, 流量会迅速减小。

通过对试验堵塞滴头的泥沙与过筛处理的原状泥沙进行观测得出, 当粒径 $D \geq 0.038 \text{ mm}$ 时, 颗粒主要以自身沉降为主, 即使形成大的堆积体, 结构也较为松散, 颗粒之间孔隙较多, 易被水冲散。当粒径 $D < 0.038 \text{ mm}$ 时, 粘粒数量逐渐增大, 颗粒沉降慢, 易填充絮团孔隙, 形成体积更大的团聚体, 由于小颗粒相对表面积较大, 颗粒表面活性较强, 容易形成絮团造成滴头的堵塞。张德茹等^[30]研究表明, 一般天然沙面, 粒径大于 0.03 mm , 絮凝作用不明显。本试验所得结论与上述结论存在一定的差异, 分析原因, 水质对堵塞有一定的影响, 本次试验用水为杨凌本地自来水, 金属离子含量较张德茹^[24]所用北京自来水高, 泥沙表面带负电荷, 颗粒之间相互排斥, 但水中的阳离子会中和部分负电荷, 促进絮凝, 形成絮团堵塞滴头, 粒径在 $D < 0.038 \text{ mm}$ 范围内的泥沙, 颗粒级配复杂, 水中的金属离子首先中和掉小颗粒上的电荷, 使其凝结在一起, 在碰撞的过程中小絮团附着在大颗粒表面, 使团聚体体积迅速增大, 堵塞滴头。而当 $D \geq 0.038$ 时, 颗粒较大, 很难形成体积较大的团聚体。

4 结论

以筛分后小于 0.1 mm 杨凌沙壤土配制不同含沙量的浑水进行灌溉, 对于如本试验选择的片式迷宫滴头:

1) 粒径为 $0.075 \leq D < 0.1 \text{ mm}$ 和 $0.03 \leq D < 0.038 \text{ mm}$ 的泥沙易引起滴头堵塞; 粒径为 $0.038 \leq D < 0.05$ 和 $D < 0.02 \text{ mm}$ 的泥沙较难引起堵塞, 且含沙量变化对堵塞的影响较小; 粒径 $0.02 \leq D < 0.03 \text{ mm}$ 和 $0.05 \leq D < 0.075 \text{ mm}$ 的堵塞情况介于上述两者之间。

2) 当含沙量为 $>1.2 \sim 1.3 \text{ g/L}$ 时, 泥沙粒径是引起滴头堵塞的主要原因, 是最易引起堵塞的临界含沙量, 因此灌溉水的泥沙含量应小于 1.2 g/L 。

3) 当 $0.038 \leq D < 0.1 \text{ mm}$ 时, 泥沙在流道内不易形成团聚体, 造成滴头堵塞的原因是泥沙沉降、堆积; 当 $D < 0.038 \text{ mm}$ 时, 泥沙易在流道中凝结成大的团聚体, 是造成滴头堵塞的主要原因。

[参 考 文 献]

- [1] 曹建生, 张万军. 微灌节水技术与机理研究[J]. 节水灌溉, 2000(6): 5—7.
Cao Jiansheng, Zhang Wanjun. Study on mechanism of micro-irrigation and water-saving technology[J]. Water Saving Irrigation, 2000(6): 5—7. (in Chinese with English abstract)
- [2] Nakayama F S, Bucks D A. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24(1): 77—80.
- [3] Chieng S, Ghaemi A. Uniformity in a micro-irrigation with partially clogged emitters[C]//2003ASAE Annual International Meeting. Michigan: ASAE, 2003: 1—11.
- [4] 翟国亮, 吕谋超, 王辉. 微灌系统的堵塞及防治措施[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 144—147.
Zhai Guoliang, Lü Mouchao, Wang Hui. Micro-irrigation system blockage and control measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(1): 144—147. (in Chinese with English abstract)
- [5] 魏正英, 赵万华, 唐一平, 等. 滴灌灌水器迷宫流道主航道抗堵塞设计方法研究[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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(6): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李云开, 杨培岭, 任树梅. 滴灌灌水器流道设计理论研究若干问题的综述[J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 145—149.
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei. General review on several fundamental points of design theory about flow path in drip irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (Transactions of the CSAM), 2006, 37(2): 145—149. (in Chinese with English abstract)
- [7] 牛文全, 吴普特, 喻黎明. 基于含沙量等值线的迷宫流道结构抗堵塞设计与模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 14—20.
Niu Wenquan, Wu Pute, Yu Liming. Based on the sediment concentration contours with the structure of the maze channel in anti-clogging design and simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(5): 14—20. (in Chinese with English abstract)
- [8] Bucks D A, Nakayama F R. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance[J]. Agricultural Water Management, 1979, 2(2): 149—162.
- [9] 王福军, 王文娥. 滴头流道 CFD 分析的研究进展与问题[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 188—192.
Wang Fujun, Wang Wen'e. The progress and problems on emitter path analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(7): 188—192. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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(23): 127—137.
- [11] 李治勤, 陈刚, 杨晓池. 浑水引起迷宫灌水器物理堵塞因素试验研究[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)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 王文娥, 吴福军. 片状迷宫滴头悬浮颗粒浓度分布规律数值分析[J]. 农业机械学报, 2007, 23(3): 2—6.
Wang Wen'e, Wu Fujun. Numerical analysis of the distribution rule for suspended granule concentration in labyrinth integrated emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (Transactions of the CSAM), 2007, 23(3): 2—6. (in Chinese with English abstract)
- [15] 闫大壮, 杨培岭, 任树梅. 滴头流道中颗粒物运移动态分析与 CFD 模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 71—74.
Yan Dazhuang, Yang Peiling, Ren Shumei. The analysis and CFD simulation of particulate matter's dynamic migration in the path[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (Transactions of the CSAM), 2007, 38(6): 71—74. (in Chinese with English abstract)

- [16] 牛文全, 喻黎明, 吴普特, 等. 迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 51—55.
Niu Wenquan, Yu Liming, Wu Pute, et al. Influence of angle labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (Transactions of the CSAM), 2009, 40(9): 51—55. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(5): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘璐, 牛文全. 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. The impact of sediment particle size to the labyrinth emitter clogging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 87—93. (in Chinese with English abstract)
- [19] 曹蒙, 魏正英, 葛令行, 等. 滴头壁面形貌对微颗粒与壁面黏附特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 120—124.
Cao Meng, Wei Zhengying, Ge Lingxing, et al. Influence of emitter channel wall topography on particle-wall adhesion[J]. Transactions of the Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9): 120—124. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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, 2004.
Wang Jiandong. Research of Emitter Hydraulic Performance and Anti-Clogging Performance[D]. Bei Jing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [23] 穆乃君, 张昕, 李光永, 等. 内镶片式齿形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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(8): 34—39. (in Chinese with English abstract)
- [24] GB5084-2005, 农田灌溉水质标准[S]. 中国质检出版社, 2005.
GB5084-2005, Standards for irrigation water quality[S]. China Zhijian Publishing House, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [25] Ken Solomon. Manufacturing variation of trickle emitters[S]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1979.
- [26] Drafts of ISO/TC 23/SC 18/WG5. Microirrigation emitter-Clogging procedure[S]. 2009.
- [27] 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)
- [28] 张庆河, 王殿志, 吴永胜, 等. 粘性泥沙絮凝现象研究述评(1): 絮凝机理与絮团特性[J]. 海洋通报, 2001, 20(6): 80—90.
Zhang Qinghe, Wang Dianzhi, Wu Yongsheng, et al. A review on aggregation phenomena for cohesive sediment (I) mechanism for aggregation and properties of flocs[J]. Marine Science Bulletin, 2001, 20(6): 80—90. (in Chinese with English abstract)
- [29] 孙其诚, 辛海丽, 刘建国, 等. 颗粒体系中的骨架及力链网络[J]. 岩土力学, 2009, 30: 83—87.
Sun Qicheng, Xin Haili, Liu Jianguo, et al. The skeleton and force chain network in particle system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30: 83—87. (in Chinese with English abstract)
- [30] 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)

Influence of particle size and concentration of sediment on clogging of labyrinth channels emitters

Wu Zeguang¹, Zhang Zizhuo¹, Zhang Kemeng¹, Luo Chunyan¹, Niu Wenquan^{1,2*}, Yu Liming³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences/Ministry of Water, Yangling 712100, China; 3. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Drip irrigation technology is widely used due to its advantages including high efficiency water saving, ability to adapt to the terrain and so on, but the problem of emitter clogging has been always a baffled to researchers. Emitter clogging basically has three classes, respectively is physical clogging, chemical clogging and biological clogging, of which the most common is physical clogging and it is represented by sediment clogging. Studies show that even if the irrigation water after precipitation filtration, there is still have particle size of sediment particles which are less than 0.1mm get into the emitters causing emitter clogging. However, previous studies on this problem multi-use of computer simulation method to research the influence of emitter anti-clogging by emitter structures, test verification is relatively rare and most studies only from a macro perspective to observe emitters clogging, no in-depth study on the clogging mechanism. In addition, the previous researches presents the sediment particle size range which are easily lead to cause emitters clogging need further verification, sediment concentration corresponding in different size which are easily to cause emitters clogging needs to be studied in-depth. So in order to investigate the influence of sediment particle size and sediment concentration on the clogging processes of labyrinth channels emitters, periodic intermittent drip irrigation experiments were carried out using muddy water containing particles with 6 different particle ranges (all less than 0.1 mm) which were screened by means of sieving method, each particle size range of sediment are formulated to 0.5,1.0,1.5 g/L of muddy water. Each irrigation time is 30min as same as the test interval, emitters flow collect real-time and replace new pipes after the end of each group of treatment. In these experiments, the changes of flow discharges were measured under a constant pressure and after the end of the trial clogging emitters are cut to dried in the natural state, then collect the sediment which depositing in the labyrinth channel, at least the locations of sediment clogging were observed using electron microscopy and take picture to compare the difference between the status quo sediment and the clogging sediment to proven mechanisms that cause clogging of sediment particle size in different range, it also provide a theoretical basis for how to select the appropriate filter. The results show that, the sensitive sediment particle range that cause easy clogging is depending on the sediment concentration. When the sediment concentration is less than 1.3 g/L, particle size is considered as the main cause of clogging. The most easily cause clogging particle ranges are between 0.075-0.1 mm and 0.03-0.038 mm; particle ranges from 0.05-0.075 mm and 0.02-0.03 mm are lesser; while the ranges that most difficult to cause clogging are 0.038-0.05 mm and less than 0.02 mm. When the sediment concentration is greater than the critical value that between 1.2-1.3 g/L, the effect of sediment particle size on clogging is weaker and sediment concentration becomes the main factor to cause clogging. The results also appeal that sediments can easily condense into aggregates to get drippers clogged when the sediment particle size range is less than 0.038 mm.

Key words: particle size; sediment; irrigation; sediment concentration; labyrinth channel; emitter; clogging

(责任编辑: 曾懿婷)