排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2011 年 11 月 Nov. 2011 | 第 29 卷 第 6 期 Vol. 29 No. 6

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.06.017

浑水泥沙粒径与含沙量对迷宫流道堵塞的影响

牛文全[1,2]，刘　璐[1,3]

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；2. 西北农林科技大学水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；3. 中国科学院研究生院，北京 100049)

摘要： 为客观评价浑水中泥沙特性对滴头流道堵塞的影响以及合理选择滴灌水质处理方法，采用 $L_9(3^4)$ 的正交试验设计方法，进行了浑水间歇灌水测试，并提出了以滴头平均相对流量和灌水均匀度系数作为基本参数的滴头堵塞程度综合评价方法，比较分析了压力、含沙量以及泥沙粒径等变化对滴头堵塞比例和堵塞程度的影响规律. 研究结果表明：对于粒径小于 0.1 mm 的泥沙颗粒，工作压力对流道堵塞的影响非常显著，其次为泥沙粒径；滴头堵塞程度的大小是由粒径、含沙量、工作压力三者相互耦合作用引起的，且相互之间不存在单调相关关系. 在实际灌水过程中，当灌溉水中含有较多小于 0.1 mm 的泥沙颗粒时，应尽量滤除粒径小于 0.048 mm 的颗粒，并可加入分散剂，阻止细小黏粒的团聚絮凝作用，以提高滴头抗堵塞能力.

关键词： 迷宫流道；颗粒物质；堵塞；含沙量；粒径

中图分类号： S274.2　**文献标志码：** A　**文章编号：** 1674-8530(2011)06-0547-06

Influence of muddy water concentration and particle diameter on clogging of labyrinth channels

Niu Wenquan[1,2], *Liu Lu*[1,3]

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences/Ministry of Water, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A better understanding of the effect of suspended solids characteristics in muddy water on labyrinth-path emitters is critical to prevent an emitter from clogging and select an appropriate water treatment approach in drip irrigation systems. In this study, the impacts of sediment particle size, sediment concentration and inlet pressure on the clogging level of the emitters used in drip irrigation systems were investigated by means of intermittent muddy water tests scheduled with the $L_9(3^4)$ orthogonal design table. The clogging level was evaluated with the relative average flow rate and irrigation uniformity coefficient of flow through an emitter. The result showed that the clogging level is determined by sediment particle size, sediment concentration and inlet pressure, but not monotonically related to a single factor. The clogging level is significantly influenced by the inlet pressure followed by sediment particle size when particle size <0.1 mm. In field irrigation practice, it is recommended to filter the fine sediment particles (<0.048 mm) and add dispersants to inhibit the flocculation of tiny viscous particles and so as to improve the performance of emitters. The findings from this study will help enhance our understanding of the clogging mechanisms of emitters and the use of high-sediment water in drip irrigation.

Key words: abyrinth path; granular matter; clogging; sediment concentration; particle size

收稿日期： 2011-08-03
基金项目： 国家 863 计划项目(2011AA100507)
作者简介： 牛文全(1972—)，男，甘肃甘谷人，副教授(nwq@vip.sina.com)，主要从事灌溉理论与节水技术研究.
刘　璐(1986—)，女，陕西宝鸡人，硕士研究生(luluhuzi@126.com)，主要从事灌溉理论与节水技术研究.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

滴灌的致命弱点是滴头的堵塞，即使在水质良好且具有完善沉淀过滤措施的条件下，仍有 1/3 滴头可能在多次灌水后发生物理堵塞[1]. 对于物理堵塞，国内外学者利用水力性能测试以及软件模拟的方法进行了大量研究. Nakayama 等[2]、Pitts 等[3]、李志勤等[4]、徐文礼等[5]研究指出物理堵塞是最为常见的堵塞形式，对于粒径介于流道尺寸 1/3 ~ 1/7 的泥沙颗粒，粒径是造成迷宫流道滴头物理堵塞的主要原因，含沙量仅影响堵塞发生后流道完全封堵的速度. 葛令行等[6]、王文娥等[7]采用计算流体力学的方法，模拟分析了小于 0.1 mm 颗粒在流道内的运动轨迹、速度以及浓度分布情况，指出入流粒径在 0.01 ~ 0.04 mm 不易造成堵塞，当颗粒大于 0.05 mm 时，滴头堵塞的危险系数急剧增加. 而根据对内蒙古运行 3 年滴头流道电镜照片分析发现，粒径小于 0.01 mm 的物理黏粒是堵塞最大威胁[8]. 当滴头类型一定时，灌溉水中固体颗粒的物理特性(如颗粒浓度、颗粒粒径等)是影响滴头堵塞性能的重要因素[7,9]，浑水含沙量水平和泥沙颗粒粒径并不是独立作用于滴头堵塞，对于小粒径的含沙水源两者间存在交互作用. 以往的研究侧重于两者各自对堵塞的影响规律，针对特定粒径范围泥沙颗粒是否存在堵塞的敏感含沙量水平等问题，目前相关的研究较少.

因此，文中通过对细颗粒浑水滴灌下，内镶片式迷宫滴头堵塞规律的研究，观测分析粒径、含沙量及进口压力三者对滴头浑水流量及其灌水均匀度系数随灌水次数变化规律，最终确定泥沙粒径和含沙量耦合作用对滴头堵塞发生特性的影响规律，并以此为依据确定不同粒径浑水滴灌的敏感含沙量标准，为合理制定滴灌抗堵塞可控措施提供试验依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

试验选取国内比较常见的滴头流道结构如图 1 所示，滴灌带为杨凌秦川节水灌溉设备工程有限公司生产的内镶片式斜齿型迷宫滴灌带，其滴头的基本结构参数及性能指标：管径 $\varphi = 16$ mm，工作水头 $H = 10$ m，额定流量 $q_0 = 3.0$ L/h，流道宽 $w = 0.8$ mm，流道深 $d = 0.8$ mm，流道单元数 $n = 14$ 个，流量系数 $k = 0.301$，流态指数 $x = 0.53$.

试验装置由水沙混合装置、计算机自动采集装置、压力变频装置和堵塞测试装置组成. 采用潜水泵的水路回流系统保证水沙混合均匀，以防止因重力作用泥沙颗粒的沉淀. 电子称重方式采集并计算滴头的流量，变频调压设备调节与控制工作压力，其控制精度在 0.01 m 以内，如图 2 所示. 该测试装置，可以连接 4 条毛管，共 20 个滴头. 计算分析时，以 20 个滴头的流量平均值为分析数据.



图 1 灌水器流道结构

Fig. 1 Flow path structures of emitters

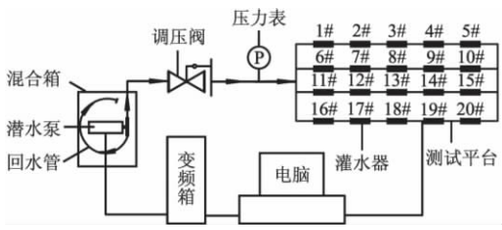


图 2 浑水试验测试平台

Fig. 2 Experimental layout of drip irrigation system

试验浑水泥沙为风干的沙壤土，根据预试验测试结果，将测试泥沙经研磨过筛划分为 0.048 mm < $D \leqslant$ 0.100 mm，0.031 mm < $D \leqslant$ 0.048 mm，$D <$ 0.031 mm 共 3 组粒径范围. 为了加快试验进度，采用高于农田灌溉水质标准对悬浮物浓度要求的 10 倍以上(质量浓度小于 0.1 g/L)，故设置含沙量(m)水平为 1.0，1.5 和 2.0 g/L 共 3 种. 测试压力(p)为 0.1，0.08 和 0.06 MPa.

1.2 试验方法

为了缩短试验时间，选用 3 因素 3 水平 $L_9(3^4)$ 正交试验设计，根据 1.1 中的因素水平配置不同粒径范围及含沙量的浑水，分别在 3 种进口压力下进行抗堵塞试验，试验方案如表 1 所示.

表 1 正交试验因素水平及方案表

Tab. 1 Orthogonal test design according $L_9(3^4)$ factor levels

N	p/MPa	m/(g·L^{-1})	D/mm
1	1(0.06)	1(1.0)	1(D < 0.031)
2	1	2(1.5)	2(0.048 < $D \leqslant$ 0.100)
3	1	3(2.0)	3(0.031 < $D \leqslant$ 0.048)
4	2(0.08)	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3(0.1)	1	3
8	3	2	2
9	3	3	1

N：代表试验处理数

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

每组处理共设计 22 次间歇灌水试验，每次灌水时间为 30 min，两次灌水试验间隔 6 h. 试验过程中，计算机动态采集滴头的流量变化，记录滴头堵塞个数，每组处理测试结束后，对测试装置进行 3 次清洗，保证系统中无沙粒残留，然后进行下次试验.

1.3　堵塞程度评价指标与方法

对于单个滴头一般采用相对流量来评价其堵塞程度，当相对流量小于 75% 时，认为发生严重堵塞[10]. 而对于多个滴头或灌溉系统整体的堵塞评价，目前还没有统一的标准. 在整个灌水试验过程中，滴头发生堵塞个数、堵塞程度及堵塞冲洗堆积的交替过程均存在随机性，单纯采用相对流量评价堵塞程度，难以表明各滴头间堵塞的差异性. 因此，文中采用以下 3 种指标相结合的方式，评价固体颗粒在迷宫流道滴头内的堵塞状况：①平均流量，指参与测试的 20 个滴头浑水流量的平均值；②相对流量 q_r，指一定压力条件下的浑水流量与清水流量的比值，并将 $1-q_r$ 定义为流量降幅（q_d），即滴头堵塞程度；③灌水均匀度系数 C_u，根据克里斯琴森法计算[11]，且以不大于流量偏差率的 20% 作为灌水均匀度的设计标准[12].

为了便于分析与比较，借鉴土壤渗透 G-A 活塞模型的假定，将滴头的堵塞过程假定为从个别滴头发生轻微堵塞开始，到堵塞滴头的数量与堵塞程度的逐渐增大，直至所有滴头发生完全堵塞结束的简单过程. 同时假定，已经发生堵塞的滴头其堵塞程度完全一致，未发生堵塞的滴头其流量全部保持额定流量不变. 设定额定流量为 q_0，发生堵塞滴头比为 a，可以推导出假定模型的平均相对流量 $\bar{q}_r$ 与克里斯琴森灌水均匀度系数 C_u：

$$\begin{cases}\bar{q}_r = 1-a+aq_r,\\ C_u = 1-\dfrac{2a(1-a)(1-q_r)}{1-a+aq_r}.\end{cases}$$

根据公式绘制滴头堵塞比例变化对平均相对流量以及灌水均匀度系数变化的影响曲线，见图 3. 从图 3a 可以看出，当堵塞滴头比例 a 增大时，平均相对流量呈直线下降趋势，其直线斜率随堵塞程度 $1-q_r$ 的增大而增大；从灌水均匀度系数变化趋势图（图 3b）可以看出，随堵塞滴头比例的增加，灌水均匀度系数呈现出先减小而后增大的趋势. 在不同堵塞滴头比例范围内，平均相对流量与灌水均匀度系数对堵塞程度的描述不一致，也不同步. 可直接根据相对流量和灌水均匀度变化趋势，分析滴头的堵塞状况. 当灌水均匀度系数越接近 1，表示各滴头间的堵塞程度越均匀，滴头整体堵塞程度越轻微或者越严重. 当灌水均匀度系数越小，越接近 0 时，表示滴头间发生堵塞程度的差异越明显. 当平均相对流量较大，且接近于 1 时，表征所有滴头发生的堵塞程度均非常轻微，且发生较严重堵塞滴头的比例非常小.

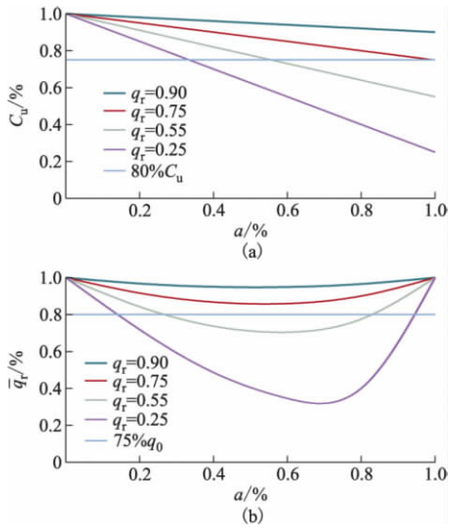


图 3　平均相对流量与灌水均匀度系数变化对比曲线

Fig. 3　Variety of mean relative emitter discharge and C_u in emitter

2　结果与分析

2.1　试验参数对堵塞影响程度分析

利用正交试验的极差分析方法得到试验各因素水平对滴头堵塞的影响，进而分析各因素的敏感程度. 图 4 是各因素不同水平时的平均值与因素水平指标图.

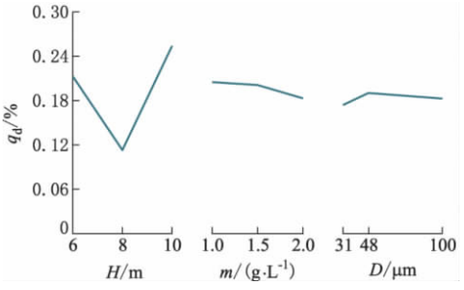


图 4　流量降幅与特征参数的因素指标

Fig. 4　Factor index of flow reduction and feature parameter

由图 4 可知，对于滴头流量降幅影响最大的参数组合为压力为 10 m 水头，含沙量为 1.0 g/L，0.031 mm < D ≤ 0.048 mm.

同时采用 SPSS17.0 软件对试验测得的流量降幅进行方差分析，结果见表 2.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 方差分析统计表

Tab. 2 Statistical table of variance analysis

来源	平方和	自由度	均方和	F 值	相伴概率
p	0.032	2	0.016	4 146.79	0.000
m	0.001	2	0.000	17.353	0.054
D	0.002	2	0.001	263.42	0.004
误差	0.000	2	0		
总计	0.034	8			

从表 2 可以看出，在 95% 的置信度条件下，由各参数相伴概率可以看出，毛管进口压力对滴头堵塞的影响极显著，其次是泥沙粒径，最后才是含沙量. 通过单因素分析表，压力为 10 m 时流量降幅均值最大，且 3 种压力水平之间差异有统计学意义. 工作压力影响流速与流态，压力增大，流速一定增大，从冲於角度而言，表现为流道冲洗强度增大，加大固体颗粒流出流道的机会；但同时由于压力增大，增加了流体的紊动性，加大了颗粒与壁面、颗粒之间碰撞的概率，小颗粒易形成大团粒，易依附在壁面，从而增强了发生堵塞的可能，所以压力与堵塞并不是单调关系[13]，而压力与含沙量、颗粒粒径的相互作用，影响堵塞的发生与发展，故其不宜作为判断滴头堵塞性能优劣的唯一参数；同理可得含沙量各水平之间差异没有统计学意义，说明本试验对含沙量参数设定范围对堵塞的影响并不敏感；$D<0.031$ mm 与其他两组粒径之间差异有统计学意义，$0.048<D\leqslant 0.100$ 和 $0.031<D\leqslant 0.048$ 粒径间差异没有统计学意义，说明 $D<0.031$ mm 在短期灌水条件下并不能引起明显的堵塞. 在实际滴灌过程中，一旦滴头类型以及管理运行方案选定后，泥沙粒径是影响滴头堵塞性能主要原因.

2.2 堵塞规律分析

堵塞既表现为流道断面减小导致流量减小的过程，也表现为固体颗粒依附流道壁面，造成流道断面缩小、流量减小的状态. 图 5 为 8 m 水头进口压力，$0.031\ \text{mm}<D\leqslant 0.048$ mm、含沙量为 1.5 g/L 的浑水试验的测试结果，为了便于分析，在每条滴灌带的相同位置各选一个滴头(3#、8#、13#和 18#滴头，具体位置见图 2) 作为分析对象，分析不同滴头的堵塞过程. 由图 5 可以看出，8#和 13#滴头流量变化趋势总体平缓，第 22 次灌水结束时流量降幅分别为 23% 和 11.3%，发生了部分的堵塞，13#滴头试验过程中存在流道堵塞和冲洗的反复过程(第 10 次和第 21 次)；18#滴头在第 13 次灌水时相对流量已小于 75% 堵塞标准线，但从第 17 次灌水开始，其流量又逐渐升高，到 19 次灌水后恢复正常出流标准，22 次灌水结束后，流量降幅只有 1%；3#滴头从 13 次灌水后流量开始明显下降，在试验结束时流量降为 0，发生了完全堵塞. 即滴头的相对流量总体而言，是随着灌水次数(n) 的增加而减少，但其变化趋势反应的堵塞过程并非为单调趋势，而是堵塞、冲洗、再堵塞的曲折反复过程，随着灌水次数 n 的逐渐增多，最终会完全发生堵塞.

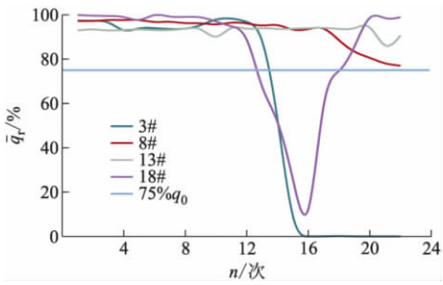


图 5 滴头流量变化过程

Fig. 5 Variety process of muddy water discharge

试验结束后，截取滴灌管晾干后剖开分析，滴头堵塞的位置大多发生在进水口处，其次为流道拐角处，而出口处堵塞最少，总体表现为堵塞位置的规律性和堵塞流道段的随机性. 统计试验过程中发生堵塞的所有滴头个数，计算各种堵塞部位发生的概率，其中进口段、中间段、出口段发生概率分别为65.22%，30.43% 和 4.35%. 分析原因，主要是由于当含沙水流由毛管进入流道内，其流态发生了明显的变化，其紊动消能作用加剧，颗粒在进口处，拐角处的碰撞概率倍增，速度减小，在流道壁面发生吸附沉积，最终淤积成稳定的絮团结构，造成滴头堵塞；位于出口处的缓水区内，颗粒近似静水沉降，碰撞概率相对较小，故由颗粒间相互作用引发的堵塞概率较低.

2.3 泥沙特性对堵塞的影响

分别将 6 m 和 10 m 试验水头条件下泥沙特性对滴头相对流量和均匀度系数的影响关系绘制成图 6 所示. 可以看出，3 种粒径段浑水灌溉试验过程中，随着灌水次数 n 的增加，平均相对流量与灌水均匀度系数均呈下降趋势，虽变化趋势基本一致，但根据 1.3 的理论分析，3 种粒径段浑水试验过程发生堵塞滴头的比例与堵塞程度均不相同，灌水 22 次后发生堵塞滴头的比例均没有超过 60%.

当 $D<0.031$ mm，含沙量为 1.0 g/L 时，在灌水进行了 13 次后，灌水均匀度系数小于 80%，而平均相对流量约为 85%，第 22 次灌水结束后，两者分别达到 68.2% 和 47.85%，对比图 3 分析认为，此种泥沙特性其堵塞过程为小比例滴头的堵塞程度随灌

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

水次数 n 的增加而逐渐加剧. 当含沙量为 2.0 g/L 时，在 10 m 水头下，灌水 16 次后灌水均匀度系数接近 80%，而平均相对流量大于 75%，说明该堵塞过程中，大比例滴头的堵塞程度仅随灌溉次数的增加而轻微增加. 此种泥沙特性其堵塞过程为大比例滴头的堵塞程度随灌水次数的增加却只有轻微的增加. 结合 2.2 试验结果分析，低工作压力条件下 $D<0.031$ mm 与低含沙量浑水之间存在影响滴头堵塞的耦合作用，其堵塞程度并不是随着含沙量的提高而提高. 分析原因，对于 $D<0.031$ mm 的浑水，在较低压力和含沙量条件下，水流紊动与颗粒碰撞作用较小，颗粒絮凝作用相对较强，更易形成较大的团聚体且与流道壁面相黏结造成堵塞. 在较高压力和含沙量条件下，水流紊动与颗粒间的碰撞作用强烈，团聚体不易与流道壁面黏结，易随水流出，因此其堵塞程度并不严重.

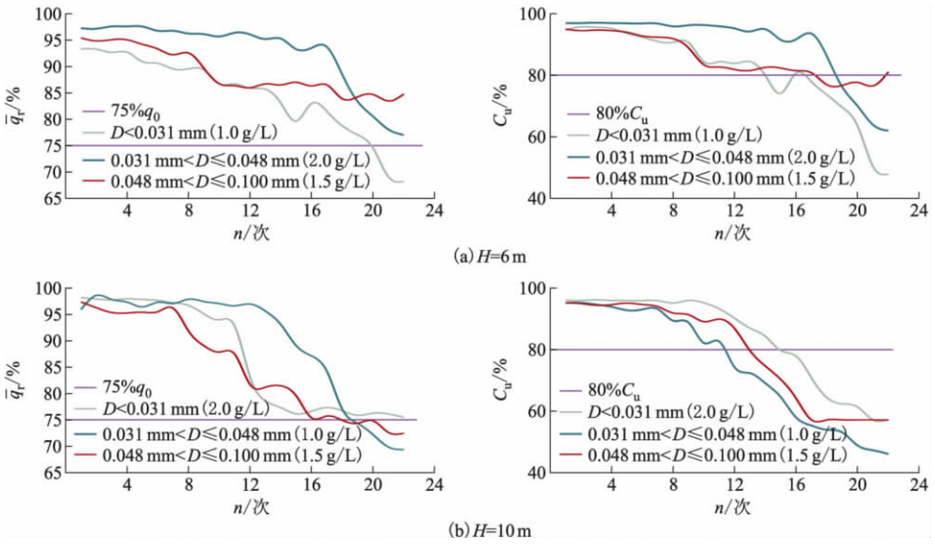


图 6　相对流量和均匀度系数变化趋势

Fig. 6　Variety process of mean emitter discharge and C_u over irrigation times

当 0.031 mm < D ≤ 0.048 mm 时，含沙量为 2.0 g/L，在 6 m 水头灌水第 17 次后，其平均相对流量约为 95%，而灌水均匀度系数约为 90%，第 18 次灌水开始平均相对流量与灌水均匀度系数均迅速减小. 对比图 3 分析认为，在第 17 次灌水前，此种泥沙特性其堵塞过程为大比例滴头首先发生轻微的堵塞，17 次灌水后其中个别滴头突然发生严重堵塞，使得平均相对流量伴随着均匀度系数而大幅度下降. 而在 10 m 工作水头条件下，含沙量为 1.0 g/L 时，滴头平均相对流量的变化趋势较其均匀度系数变化趋势表现出一定程度的落后现象. 灌水第 7 次后，滴头均匀度系数开始明显下降，而平均相对流量从第 13 次灌水开始才迅速减小，说明此种泥沙特性的堵塞过程首先为大比例滴头发生轻微堵塞而后在堵塞的冲洗作用下同时又发生了极个别滴头的严重堵塞；第 13 次灌水后，发生严重堵塞的滴头个数增多，第 22 次灌水结束后，平均相对流量仅为 69%，均匀度系数也降至 46.02%. 该粒径与含沙量、工作压力之间同样存在对滴头堵塞的耦合作用. 压力增大，虽增大了水流的紊动，但也增加了颗粒与流道壁面的碰撞概率，提高了颗粒依附于流道壁面的概率. 与 $D<0.031$ mm 的浑水比较，虽然 0.031 mm < D ≤ 0.048 mm 时在较少灌水次数条件下不易发生堵塞，但随着灌水次数的增加，滴头发生堵塞程度明显增高.

当 0.048 mm < D ≤ 0.100 mm，含沙量为 1.5 g/L 时，6 m 水头灌溉试验，发生堵塞滴头的比例及堵塞程度开始时均非常小，而且发展速度均非常均匀缓慢，该粒径不易发生堵塞，其抗堵塞性能较好. 在 10 m 水头时，从第 7 次灌水开始，大比例的滴头发生轻微堵塞，第 11 次灌水后有个别滴头发生严重堵塞，灌水 17 次后其平均相对流量接近 75%，灌水均匀度系数保持在 57.14% 不变.

对比分析 3 种粒径浑水发生堵塞的情况，发生滴头堵塞是由于粒径、含沙量、工作压力的相互耦合作用引起的. $D<0.031$ mm 的浑水易导致小比例滴头发生堵塞，且其堵塞程度随灌水次数增加有所增加；0.031 mm < D ≤ 0.048 mm 的浑水易导致所有滴头发生轻微堵塞，但当灌水次数高达一定值时，其堵塞程度的发展速度较为迅速. 而 0.048 mm < D ≤ 0.100 mm 的泥沙浑水则不易造成滴头堵塞.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结 论

文中分析了不同泥沙特性在不同压力条件下滴头相对流量和均匀度系数的变化规律,得出以下结论:

1) 对于内镶片式斜齿型迷宫流道滴头在细颗粒浑水滴灌条件下,工作压力对滴头堵塞发生的影响显著,其次是泥沙粒径.

2) 在一定泥沙粒径与含沙量范围内,造成滴头堵塞的关键因素不仅仅是单纯的泥沙粒径因子或者含沙量因子,而是泥沙粒径与含沙量的耦合作用.

3) $D<0.048$ mm 时,浑水灌溉易导致滴头堵塞发生,且当灌水达到一定次数后滴头堵塞程度发展速度较快. 在实际灌水过程中应尽量滤除 $0.031\ \text{mm}<D\leqslant 0.048\ \text{mm}$ 的颗粒. 对于含有较多 $D<0.031$ mm 泥沙的浑水灌溉时,可考虑加入一些分散剂,阻止细小黏粒的团聚絮凝作用,提高抗堵塞能力.

参考文献(References)

[1] 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. Research progress in analysis of flow passage in irrigation emitters using Computational Fluid Dynamics techniques [J]. *Transactions of the CSAE*,2006,22(7):188-192. (in Chinese)

[2] Nakayama F R,Bucks D A. Water quality in drip trickle irrigation: A review [J]. *Irrigation Science*,1991,12(4):187-192.

[3] Pitts D J,Haman D Z,Smajstrla A G. Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems [C]. Gainesville: University of Florida,IFAS,Extension,2003.

[4] 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)

[5] 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 rransportation about labyrinth emitter [J]. *Shanxi Hydrotechnics*,2008(2):10-12. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 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)

[8] 钱蕴壁. 节水农业新技术研究[M]. 北京: 黄河水利出版社,2002.

[9] Zhang Jun,Zhao Wanhua,Tang Yiping,et al. Numerical investigation of the clogging mechanism in labyrinth channel of the emitter [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*,2007,70(13):1598-1612.

[10] 姚振宪,何松林. 滴灌设备与滴灌系统规划设计[M]. 北京: 中国农业出版社,1999.

[11] ISO/TC 23/SC 18/WG5 N4. Clogging test methods for emitters [S]. 2003.

[12] 朱德兰,吴普特,王 剑. 滴头制造偏差对灌水均匀度及毛管造价的影响[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(2):175-179.
Zhu Delan, Wu Pute, Wang Jian. Effect of emitters manufacturing variation of micro-irrigation on uniformity and lateral cost [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*,2011,29(2):175-179. (in Chinese)

[13] Li Guangyong,Wang Jiandong,Mahbub ul Alam,et al. The influence of geometrical parameter of dental flow passage of labyrinth drippers on hydraulic and anti-clogging performance [J]. *Transactions of the ASABE*,2006,49(3):637-643.

(责任编辑 徐云峰)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net