

网络出版时间:2014-04-25 15:48

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.027

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.027.html>

泥沙级配对迷宫流道滴头堵塞及 毛管内泥沙沉积的影响

吴泽广^{1,2}, 牛文全^{1,2}

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2 中国科学院/水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】设计对不同泥沙级配的浑水进行滴灌试验,为泥沙机械组成对滴头堵塞的影响过程研究提供理论参考。【方法】采用短周期法,设计了粒径小于 0.1 mm 的 3 种不同级配泥沙(编号分别为 A、B、C,其 <0.03 mm, $\geq 0.03 \sim \leq 0.05$ mm, $>0.05 \sim \leq 0.1$ mm 粒径泥沙所占比例分别为 58.38%,27.17%,14.45%;48.50%,13.20%,38.30%;20.13%,23.55%,56.32%)及 3 种不同含沙量(0.5,1.0,1.5 g/L)组合的滴头抗堵塞试验,分析了毛管中沉积泥沙的位置与粒径组成及滴头流量与含沙量的变化。【结果】当含沙量不大于 1.0 g/L 时,泥沙级配 C 最易造成滴头堵塞,而级配 B 次之,级配 A 最不易造成滴头堵塞;当含沙量大于 1.0 g/L 时,泥沙级配对堵塞的影响有所降低。当毛管上的滴头发生严重堵塞时,毛管内的淤积泥沙主要分布在毛管中段 0.6~1.0 m 处,未发生堵塞或者发生非常轻微堵塞的毛管泥沙淤积主要分布在毛管尾端。粒径 $>0.05 \sim \leq 0.1$ mm 的泥沙最易沉积在毛管内,而小于 0.03 mm 的泥沙颗粒最易随水流排出滴头。【结论】泥沙级配是影响滴头堵塞的主要因素,当大于 0.05 mm 的泥沙颗粒含量较高时,非常易造成滴头堵塞,泥沙级配对其在毛管中的淤积位置影响较小,但对泥沙淤积量有一定的影响。

【关键词】 滴灌系统;迷宫流道;泥沙级配;含沙量;滴头堵塞

【中图分类号】 S275.6

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)05-0223-06

Influence of sediment composition on clogging of labyrinth channels emitters and deposition in emitter-pipe

WU Ze-guang^{1,2}, NIU Wen-quan^{1,2}

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences/Ministry of Water, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This paper conducted drip-irrigation tests using muddy water with different sediment compositions to investigate the effects of sediment compositions on emitter clogging. 【Method】 Combinations of three sediment compositions (A: ratios of particles with diameters of <0.03 mm, $\geq 0.03 \sim \leq 0.05$ mm, and $>0.05 \sim \leq 0.1$ mm were 58.38%, 27.17%, and 14.45%; B: ratios of particles with diameters of <0.03 mm, $\geq 0.03 \sim \leq 0.05$ mm, and $>0.05 \sim \leq 0.1$ mm were 48.50%, 13.20%, and 38.30%; C: ratios of particles with diameters of <0.03 mm, $\geq 0.03 \sim \leq 0.05$ mm, and $>0.05 \sim \leq 0.1$ mm were 20.13%, 23.55%, and 56.32%) and three sand levels (0.5, 1.0, and 1.5 g/L) were tested based on short-period repeatability method for anti-clogging experiments. The location of alluvial sediments, size compositions, sediment concentrations and flow changes were analyzed. 【Result】 When the sediment concentration

【收稿日期】 2013-11-19

【基金项目】 国家高技术发展计划(863 计划)项目(2011AA100507)

【作者简介】 吴泽广(1988—),男,山东莱芜人,在读硕士,主要从事灌溉理论与节水技术研究。E-mail: wuzeguang1106@126.com

【通信作者】 牛文全(1972—),男,甘肃甘谷人,研究员,博士生导师,主要从事灌溉理论与节水技术研究。

E-mail: nwgq@vip.sina.com

was ≤ 1.0 g/L, C was the easiest to cause clogging, followed by B and A. When the sediment concentration was > 1.0 g/L, influence of sediment composition on clogging decreased. Sediment deposition appeared in the middle section 0.6–1.0 m of emitting-pip when clogging happened, while sediment deposition appeared in the tail when there was no or slight clogging. The sediment particles with size of $> 0.05 - \leq 0.1$ mm easily deposited in the emitter-pips, while particles with size of < 0.03 mm could be discharged from the emitters easily. 【Conclusion】 Sediment composition was the main factor of emitter clogging. When the size of particles was > 0.05 mm, it easily caused clogging. Sediment composition had small effect on the location of sediment siltation, but had certain influence on sedimentation volume.

Key words: drip-irrigation system; labyrinth channel; composition of sediment; sediment concentration; emitter clogging

滴头堵塞一直是滴灌技术面临的技术难题,滴头堵塞成因^[1]和滴头结构对抗堵塞性能的影响^[2-6]一直是该领域的研究热点。Bucks 等^[1]根据堵塞的成因将堵塞分为物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞 3 大类。其中物理堵塞是以灌溉水中的泥沙为主要成分,在流道内沉积、固结造成滴头流量减小或者完全堵塞流道的现象。目前研究人员采用数值模拟计算、实测等方法,研究了不同粒径段泥沙及在不同含沙量时对迷宫滴头堵塞的影响, Niu 等^[7]和牛文全等^[8-9]对粒径小于 0.1 mm 的泥沙段进行浑水灌溉研究,得出易造成堵塞的敏感粒径为 0.031~0.038 mm,认为温度低时较易造成滴头堵塞。徐文礼等^[10]、李治勤等^[11]对粒径 0.1~0.25 mm 的泥沙进行浑水灌溉试验,认为泥沙粒径是引起迷宫灌水器堵塞的主要因素。但是在浑水灌溉前,通过沉淀、过滤处理后,灌溉水中还会含有可通过过滤网孔的各种粒径段泥沙颗粒,滴头堵塞也是由于不同粒径段泥沙相互作用造成的,单纯研究某粒径段或者某几个粒径段组合对滴头堵塞的影响,并不能反映不同粒径间相互作用对堵塞的影响。另外,不同来源的灌溉水过滤后,水中泥沙颗粒的粒径组成级配不同,对于同一种迷宫滴头造成的堵塞状况也可能不同,目前对于不同泥沙级配在迷宫滴头流道内的淤积、堵塞、运行状况的研究相对较少。

本研究在以往学者研究成果的基础上,分析了 3 种不同颗粒级配及 3 种不同含沙量的浑水组合对迷宫流道滴头堵塞的影响,并观测了滴灌管中泥沙的淤积位置、含量及粒径组成情况,旨在为探明泥沙机械组成对滴头堵塞过程的影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

试验选取的滴灌带结构参数为:管外径 16

mm,滴头间距 30 cm,壁厚 0.4 mm。迷宫流道滴头的齿高 1.0 mm,齿间距 1.0 mm,流道深 0.8 mm,流道长度 300 mm,流道单元数 14 个,在额定压力为 100 kPa 时的额定流量为 2.1 L/h。每次试验时,分别截取 4 段长度为 1.6 m 的滴灌带,每条滴灌带上 有 5 个滴头,每次试验观测的滴头数量为 20 个。

试验装置由水沙混合装置、压力变频装置、数据自动采集装置组成(图 1),水箱上有搅拌机,在试验过程中,搅拌机连续运行搅动水箱中的水,保证水沙混合均匀。数据采集装置为电子称,质量误差 0.2 g,可以任意设定采集数据的时间间隔,并通过连接的计算机自动记录采集的数据。

1.2 试验设计及方法

本试验的泥沙以杨凌壤土的级配为基础进行配制。灌溉水经沉淀、过滤处理后,仍有粒径(D) < 0.1 mm 的泥沙进入滴灌系统^[12]。有研究表明,当粒径 > 0.05 mm 时,灌水器堵塞的危险系数急剧增加^[13];在相同含沙量条件下,粒径 < 0.03 mm 颗粒对堵塞最为敏感^[9]。故本试验选取粒径 < 0.1 mm 的泥沙,以粒径 > 0.05 mm 颗粒逐渐增多, < 0.03 mm 颗粒逐渐减少为原则,组合 3 种不同级配的泥沙进行试验(表 1)。

试验时,压力保持在 0.1 MPa。以农田灌溉水质标准为基础,为加速堵塞,本试验以灌溉水悬浮物质量浓度(≤ 0.1 g/L)的 5 倍以上设定试验的 3 种含沙量,分别为 0.5、1.0 和 1.5 g/L。本试验采用全组合试验方案,即 3 种泥沙级配分别与 3 个不同含沙量进行完全组合设计,共 9 组试验,分别观测试验过程中滴头流量的变化。

采用周期性滴灌测试方法,以短周期堵塞测验程序为基础,灌水时间 30 min,间隔时间 30 min,电子称采集滴头流量。选含沙量为 1.5 g/L 的 3 种级配组成试验,收集每次灌水时 20 个滴头的输出水

量,将浑水静置、沉淀、烘干,收集 20 个滴头的泥沙输出量。试验结束时,将滴灌管晾干,并按照长度 20 cm 剪裁,分别统计不同毛管位置的泥沙淤积量,

并分析每个粒径段所占比例。每组试验完成后,更换新的滴灌管,将试验系统的管道、水箱、水泵冲洗 3 次,排出管道内淤积的泥沙后进行后续试验。

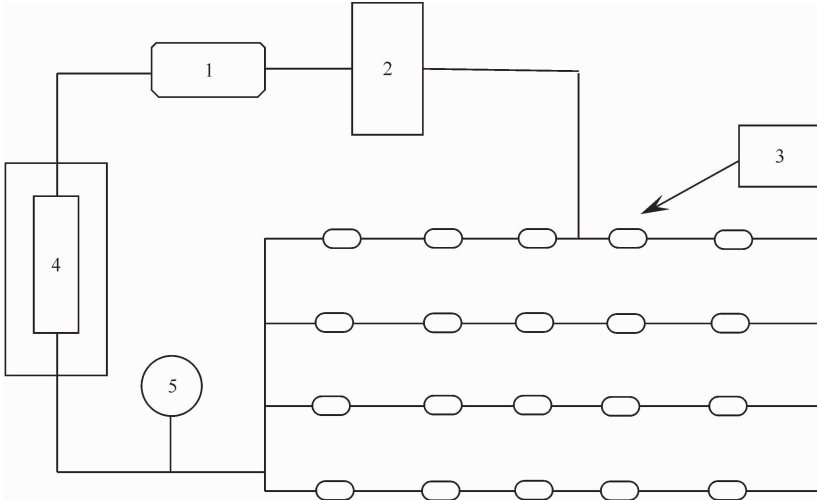


图 1 浑水滴灌试验测试平台示意图

1. 计算机;2. 变频箱;3. 试验毛管及滴头;4. 水沙混合水箱及潜水泵;5. 压力表

Fig. 1 The schematic diagram of experimental layout for a drip irrigation system

1. Computer;2. Frequency conversion box;3. Drip irrigation pip and emitter;4. Water tank and pump;5. Pressure gauge

表 1 试验编号与泥沙级配对应表

Table 1 Test code and sediment composition %

编号 Number	泥沙级配 Sediment composition		
	$0.05 < D \leq 0.1 \text{ mm}$	$0.03 \leq D \leq 0.05 \text{ mm}$	$D < 0.03 \text{ mm}$
A	14.45	27.17	58.38
B	38.30	13.20	48.50
C	56.32	23.55	20.13

1.3 评价指标

本研究采用克里斯琴森系数(Cu)和平均相对流量(q_r)评价堵塞情况。微灌工程技术规范要求滴灌工程的灌水均匀度系数,即 $Cu > 80\%$ ^[14]。定义平均相对流量 $q_r = \bar{q}/q_0$,指在额定压力下,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,一般当滴头的相对流量 $q_r < 75\%$ 时,认为该滴头发生了严重堵塞。

2 结果与分析

2.1 泥沙级配对滴头流量的影响

选取滴头平均相对流量和灌水均匀度系数进行分析,图 2 为不同级配与含沙量组合试验的流量变化曲线。分析图 2 可以发现,在 3 种泥沙级配浑水灌溉条件下,随灌水次数的增加,滴头流量变化快慢程度并不相同。当级配 A 浑水的含沙量为 0.5 g/L 时,随着灌水次数增加,流量变化较缓慢,连续灌水 14 次后,其平均相对流量不低于 75%,灌水均匀度系数接近 100%,说明该级配浑水在含沙量为 0.5

g/L 时滴头抗堵塞性能较好;当含沙量为 1.0 g/L 时,随着灌水次数增加,平均相对流量减小速度较快,灌水 18 次后平均相对流量低于 75%,灌水 7 次后灌水均匀度系数小于 80%,说明该级配浑水在含沙量为 1.0 g/L 时,有部分滴头发生了严重堵塞,不同滴头之间流量差异性增强,随着含沙量的提高,滴头抗堵塞性能迅速下降;当含沙量为 1.5 g/L 时,灌水 11 次后平均相对流量已降低到 75% 以下,灌水均匀度系数接近 60%,说明在该含沙量浑水灌溉条件下,随着灌水次数的增加,大部分滴头发生了严重堵塞,滴头抗堵塞性能非常低。级配 C 浑水灌溉条件下,含沙量为 0.5 g/L 时,灌水 13 次后平均相对流量下降到 75%,灌水 8 次后灌水均匀度系数小于 80%,说明该级配浑水即使在低含沙量(0.5 g/L)时也易引起滴头堵塞;当含沙量增高到 1.0,1.5 g/L 时,灌水 6~8 次后平均相对流量即小于 75%,灌水 4 次后灌水均匀度系数迅速降低到 80% 以下,说明用该级配浑水灌溉时,即使在较小含沙量时也特别容易引起滴头堵塞,当含沙量大于 1.0 g/L 时,含沙

量在一定范围的提高对堵塞的影响并不敏感。级配 B 浑水灌溉条件下,在 3 种不同含沙量时,平均相对流量与灌水均匀度系数随灌水次数增加而下降,变

化趋势基本与级配 A 浑水相似,但其下降速度大于级配 A,而小于级配 C。

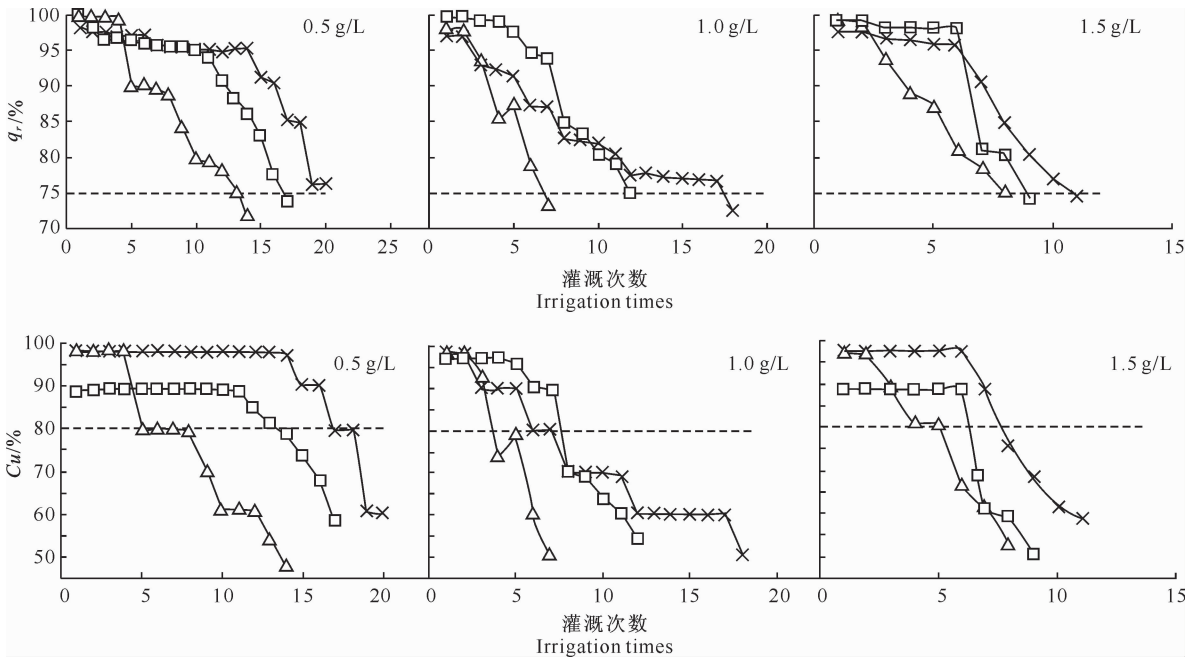


图 2 泥沙级配和含沙量对滴头平均相对流量与灌水均匀度系数的影响
—×—, A; —□—, B; —△—, C

Fig. 2 The influence of sediment composition and sediment concentration on average relative flow and Cu

分析其原因可以发现,级配 A 泥沙组成中,粒径小于 0.03 mm 的泥沙颗粒占到 58.38%,此粒径的泥沙颗粒受水的布朗运动作用明显,且在滴头流道中很难沉降,易随水流出,因此在含沙量较低时很难造成滴头堵塞。当含沙量升高时,颗粒之间碰撞几率增大,一部分小颗粒相互凝结成一定体积的团聚体,其他颗粒迅速填充团聚体之间的孔隙,使团聚体体积增大,最终堵塞滴头。级配 C 中,粒径大于 0.05 mm 的泥沙颗粒含量是级配 A 的 4 倍,由于大颗粒含量较高,易在迷宫流道内碰撞、沉积,从而堵塞流道,因此级配 C 浑水较级配 A 更易造成滴头堵塞。而级配 B 浑水,虽然粒径大于 0.05 mm 的泥沙颗粒含量小于级配 C,但该级配中小于 0.03 mm 的极细小颗粒约为级配 C 的 2.5 倍。大颗粒含量较高时,易在流道内形成较为松散的堆积体而造成堵塞,当同时含有大量极细小的颗粒时,这些极细小颗粒填充大颗粒形成的堆积体,进而形成非常稳定的大团聚体,同时这些极细小颗粒在水中起到黏合剂作用,使更多的颗粒快速聚集起来,形成更大的团聚体,因此虽然此级配浑水大于 0.05 mm 的颗粒含量小于级配 C,但由于其含有较多的极细小颗粒(小于 0.03 mm),即使在含沙量较低时,也较易造成滴头

的堵塞。但当含沙量持续增大到一定程度(大于 1.0 g/L)时,泥沙颗粒之间碰撞加剧,在水体的紊动作用下,沉降速率相对变慢,含沙量的增加对堵塞的敏感性下降。

2.2 泥沙级配对滴头泥沙输出量的影响

图 3 为含沙量 1.5 g/L 时 3 种级配浑水灌溉试验滴头泥沙输出量(20 个滴头平均每小时随灌溉水从滴头中输出的泥沙质量)随灌水次数的变化趋势。

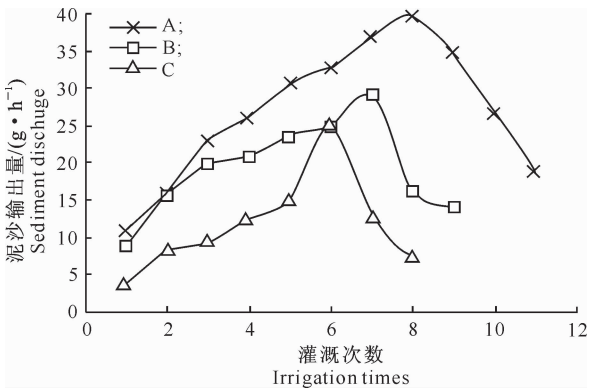


图 3 含沙量 1.5 g/L 浑水滴灌时滴头泥沙输出量变化曲线

Fig. 3 Sediment output curve when the sediment concentration was 1.5 g/L

从图 3 可以看出,泥沙输出量随着灌水次数的增加呈先增大后减少的趋势。A、B、C 3 种级配泥沙浑水灌溉时,分别在灌水第 8、7 和 6 次时滴头泥沙输出量达到最大值,之后随着堵塞滴头数量和堵塞程度的增加,泥沙输出量迅速减少,单位时间内泥

表 2 含沙量 1.5 g/L 条件下 3 种级配浑水滴灌后滴头输出泥沙的级配分析

编号 Number	泥沙级配/% Sediment composition			输出泥沙量/g Sediment volume
	$0.05 < D \leq 0.1 \text{ mm}$	$0.03 \leq D \leq 0.05 \text{ mm}$	$D < 0.03 \text{ mm}$	
A	2.30	6.99	90.71	105.46
B	6.35	10.06	83.01	85.33
C	10.59	13.24	76.17	46.07

从表 2 可以看出,输出泥沙中粒径小于 0.03 mm 的颗粒所占比例占绝对多数,而粒径大于 0.05 mm 的颗粒比例非常小,说明粒径小于 0.03 mm 的泥沙非常容易随水流排出,不易在毛管及迷宫流道内沉积,对滴灌系统的危害较小,而粒径大于 0.05 mm 的泥沙颗粒不易随水流排出,易沉积在毛管及迷宫流道内,是造成滴头堵塞的主要因素。

2.3 泥沙级配对毛管内泥沙淤积的影响

试验结束后,将滴灌管剖开、晾干,测定不同毛管位置处泥沙的淤积量(单位长度毛管的泥沙质量与总灌水时间的比值)及淤积泥沙的颗粒级配。3 种级配与 3 种含沙量组合下 9 组试验的 36 条毛管中,有 18 条毛管上的滴头发生轻微堵塞,这些毛管中的泥沙淤积部位为毛管的尾段,泥沙淤积量占整条毛管泥沙淤积量的 65% 以上,另外 18 条毛管均发生较为严重的滴头堵塞,这些毛管中的泥沙淤积部位主要集中在毛管的中段。对泥沙淤积进行分析发现,当毛管滴头堵塞非常轻微时,毛管尾端的泥沙淤积量占整条毛管泥沙淤积量的 70% 以上,主要是由于在滴头未发生堵塞时,毛管水流通过滴头的输出量较大,毛管内水流流速也较大,泥沙颗粒在水流的推动下逐渐向毛管尾段推移而最终淤积在毛管的末端。当滴头发生比较严重的堵塞时,毛管内水流流速较小,水流紊动也较小,大颗粒沉降并淤积在毛管的中部。

由于同一泥沙级配在不同含沙量的灌水试验中,毛管不同位置泥沙淤积量的变化趋势基本一致,故任选含沙量 1.5 g/L 条件下 3 种泥沙级配灌水后滴头发生较为严重堵塞的毛管,绘制含沙量 1.5 g/L 条件下毛管泥沙淤积量的变化趋势如图 4 所示。从图 4 可以看出,利用不同级配泥沙进行浑水灌溉时,毛管不同位置处的泥沙淤积量不同,从毛管

沙输出量以级配 A 最大,级配 B 次之,级配 C 最小。从泥沙的输出量也可以看出,级配 C 最易引起滴头堵塞。将输出泥沙收集、过筛处理后,分析得到含沙量 1.5 g/L 条件下输出泥沙的级配如表 2 所示。

入水口到尾端,泥沙淤积量呈先增大后减小的趋势,最大泥沙淤积位置在毛管中段距入口 0.6~1.0 cm 处。3 种泥沙级配相比以 C 的淤积量最大, B 次之, A 最小,该结果与泥沙淤积数量的分析结果相互对应。

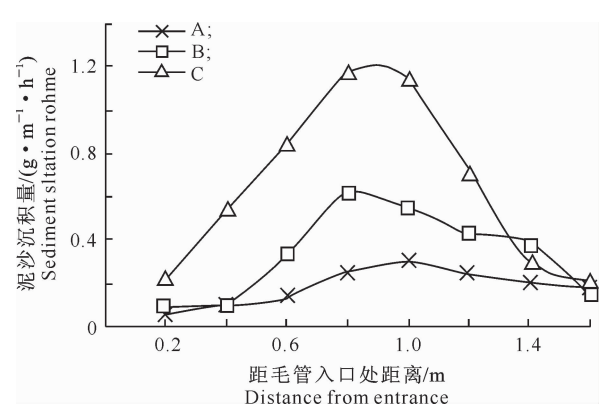


图 4 含沙量 1.5 g/L 时泥沙级配对毛管内泥沙淤积位置与淤积量的影响

Fig. 4 The influence of sediment composition on the location and siltation when sediment concentration was 1.5 g/L

3 种不同级配泥沙进行浑水灌溉后,将毛管内淤积的泥沙进行晾干、过筛处理,分析淤积泥沙的级配,结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,与表 1 试验前的泥沙级配相比,毛管内淤积泥沙中粒径 $>0.05 \sim \leq 0.1 \text{ mm}$ 的颗粒比例均大于试验前配置的比例,其中级配 A 该粒径段颗粒比例较试验前升高了 14%,级配 B 升高了 7%,级配 C 升高了 5%,而小于 0.03 mm 的颗粒所占比例较试验前大幅度下降。说明大于 0.05 mm 的泥沙颗粒易在毛管中沉积,且是造成堵塞的主要因素,而小于 0.03 mm 的泥沙颗粒多随水流排出毛管,不易在毛管中沉积,对滴灌系统的危害较小。

表 3 3 种级配泥沙浑水滴灌试验中毛管淤积泥沙的级配分析
Table 3 The composition in the sediment deposition

编号 Number	泥沙级配/% Sediment composition		
	0.05<D≤0.1 mm	0.03≤D≤0.05 mm	D<0.03 mm
A	28.80	31.78	39.42
B	45.56	22.61	31.83
C	61.37	22.32	16.31

3 结 论

1)泥沙级配是造成迷宫滴头堵塞的主要原因,当含沙量不大于 1.0 g/L 时,不同颗粒级配浑水对滴头堵塞的影响有显著差异,而当含沙量大于 1.0 g/L 时,泥沙级配对堵塞的影响有所降低。泥沙级配中大于 0.05 mm 的颗粒含量是滴头堵塞的主要影响因素。大于 0.05 mm 颗粒含量较高的级配 C 是最易造成滴头堵塞的泥沙级配。

2)滴头发生严重堵塞的毛管,淤积泥沙主要分布在毛管中段距入口 60~100 cm 处,未发生滴头堵塞或者堵塞非常轻微的毛管,淤积泥沙主要分布在毛管尾段,泥沙级配对毛管中泥沙的淤积位置影响较小,但对毛管中泥沙的淤积量影响较大。

[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] 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 W Q,Wu P T,Yu L M. Anti-clogging experimental investigation and optimized design of micro-channels of emitter based on isoline of sand content [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(5):14-20. (in Chinese)

[3] 李云开,杨培岭,任树海. 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 Y K,Yang P L,Ren S H. General review on aeveral fundamental points of design theory about flow path in drip irrigation emitters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(2):145-149. (in Chinese)

[4] 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 W E,Wang F J,Niu W Q,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)

[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 Z Y,Zhao W H,Tang Y P,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)

[6] 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 W,Zhang H Y. Micro-PIV analysis of flow fie in flow channel of emitter [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(2):12-17. (in Chinese)

[7] Niu W Q,Liu L,Chen X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters [J]. Irrigation Science,2013,31:545-555.

[8] 牛文全,刘 璐. 浑水泥沙粒径与含沙量对迷宫流道堵塞的影响 [J]. 排灌机械工程学报,2011,29(6):548-552.
Niu W Q,Liu L. The influence of sediment size and sediment concentration on labyrinth channels emitters [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2011,29(6):548-552. (in Chinese)

[9] 牛文全,刘 璐. 浑水特性与水温对滴头抗堵塞性能的影响 [J]. 农业机械学报,2012,43(3):39-45.
Niu W Q,Liu L. Muddy water features and water temperature on the anti-clogging performance of emitters [J]. Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(3):39-45. (in Chinese)

[10] 徐文礼,李治勤. 迷宫灌水器堵塞与输沙能力试验研究 [J]. 山西水利科技,2008(2):10-12.
Xu W L,Li Z Q. Experimental study on clogging and the capability of sediment transportation about labyrinth emitter [J]. Shanxi Hydrotechnics,2008(2):10-12. (in Chinese)

[11] 李治勤,陈 刚,杨晓池,等. 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 Z Q,Chen G,Yang X C,et al. 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)

[12] 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 F J,Wang W E. Research progress in analysis of flow passage in irrigation on emitters using Computational Fluid Dynamics technique [J]. Transactions of the CSAE,2006,22(7):188-192. (in Chinese)

[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 L X,Wei Z Y,Cao M,et al. Deposition law of sand in labyrinth-channel of emitter [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(3):20-24. (in Chinese)

[14] 水利部农田灌溉研究所. SL 103—95 微灌工程技术规范 [S]. 北京:水利水电出版社,1995.
Farmland Irrigation Research Institute,Ministry of Water. SL 103—95 Technical standard of micro-irrigation project [S]. Beijing:China WaterPower Press,1995. (in Chinese)