

施肥对浑水灌溉滴头堵塞的加速作用

李康勇¹, 牛文全^{1,2*}, 张若婵¹, 刘璐^{2,3}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100;
3. 宝鸡文理学院, 宝鸡 721000)

摘要: 为探究水肥一体化灌溉过程中, 施肥对滴头堵塞的影响, 分别配置了 4 个施肥浓度 (0, 0.4, 0.6 和 1.2 g/L), 3 种泥沙级配, 进行浑水间歇灌水堵塞试验, 并用场发射扫描电镜分析了堵塞物的结构与成分。结果表明: 施肥对于迷宫滴头堵塞具有明显的加速作用, 施肥浓度越大, 加速堵塞效果越明显, 当施肥 1.2 g/L 时, 3 种级配浑水的有效灌水次数比未施肥的对照处理分别下降了 36.4%, 77.8% 和 78.8%; 当施肥 0.4 g/L 时, 有效灌水次数分别下降 9.1%、33.3% 和 14.3%, 施肥浓度 ≤ 0.4 g/L 时, 加速滴头堵塞的效果较小。浑水中增加化肥增强了水体中泥沙颗粒间的絮凝作用, 促进了稳定而致密团聚体的形成, 这是施肥加速滴头堵塞的主要原因; 施肥后堵塞物表面结构复杂程度增加, 堆积体间隙减小, 堵塞以完全堵塞为主。该试验结果为水肥一体化滴灌技术推广提供理论依据。

关键词: 肥料; 灌溉; 泥沙; 堵塞; 加速; 堵塞形式

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.011

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-17-0081-10

李康勇, 牛文全, 张若婵, 刘璐. 施肥对浑水灌溉滴头堵塞的加速作用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 81-90.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.011 <http://www.tcsae.org>

Li Kangyong, Niu Wenquan, Zhang Ruochan, Liu Lu. Accelerative effect of fertigation on emitter clogging by muddy water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 81-90.

(in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.011 <http://www.tcsae.org>

0 引言

水肥一体化滴灌技术正在迅速发展, 但水肥一体化存在加剧滴头堵塞问题^[1-3]。堵塞有物理、化学和生物堵塞 3 类^[4]。灌溉水中的泥沙颗粒是物理堵塞的主要原因^[5], 泥沙粒径段与含沙量是滴头堵塞的决定性因素^[6-8], 另外, 工作压力、水温等也对滴头物理堵塞具有一定的影响^[9-11]。一般认为, 通过对灌溉水过滤、沉淀等处理可以有效预防滴头的物理堵塞^[1, 12], 但由于沉淀过滤等处理并不能完全消除灌溉水中的固体颗粒^[10], 进入滴头流道中粒径 < 0.1 mm 的泥沙颗粒仍然会造成滴头物理堵塞^[13-14], 但滴头的堵塞一般不是物理、化学或生物单因素造成的, 实际灌水中往往是 2 种或者 3 种因素共同作用的结果^[15]。如再生水灌溉过程中, 由于生物和物理共同作用, 滴头堵塞容易发生^[16-18], 采用地下水或者重水灌溉时, 由于化学和物理因素共同作用, 也易造成滴头堵塞^[19-20]。近年来, 随着水肥一体化滴灌技术应用的快速扩大, 化学、物理共同作用越来越成为滴头堵塞的主要原因。研究发

现钙、镁和磷等离子盐沉淀是造成堵塞的重要原因, 碱性越强, 越易发生堵塞^[21], 温室水肥一体化滴灌中钙镁离子沉淀也是造成堵塞的主要原因^[3]。有研究指出阳离子浓度增加会加强泥沙颗粒间的絮凝作用, 而泥沙颗粒通过絮凝沉积形成团聚体是浑水灌溉造成堵塞的重要原因^[22-23]。水肥一体化灌溉时, 施肥会带入大量阳离子, 而灌溉水在过滤后仍有泥沙颗粒 (如用 120 目网上过滤器过滤后, 灌溉水中仍然存在 < 0.12 mm 的泥沙颗粒), 目前对于施肥与细小泥沙颗粒相互作用对滴头堵塞的研究较少。有研究指出存在易堵塞的敏感粒径范围^[7, 23-24], 但不同的研究结果不同, 敏感粒径范围是否与滴头流道结构、泥沙级配有关, 施肥是否影响敏感粒径的范围等, 仍需进一步研究。

因此, 为探究水肥一体化灌溉过程中, 施肥对滴头堵塞的影响, 本研究分析了泥沙级配浑水和不同施肥浓度对内镶片式滴头流道结构滴头堵塞的影响; 并应用电镜观测堵塞物质并定量分析了堵塞物质的主要成分和结构, 为进一步阐明水肥一体化滴灌技术中滴头堵塞机理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

试验选用内镶片式迷宫流道滴灌带 (杨凌秦川节水灌溉设备工程有限公司), 在 40 kPa 工作压力下设计流量为 2.3 L/h、管径为 16 mm。滴头进水口为 8 mm \times 2 mm 的长方形, 进水口栅格数为 8, 流道宽 0.8 mm, 齿高

收稿日期: 2015-05-25 修订日期: 2015-08-10

基金项目: 国家支撑计划课题 (2015BAD24B01); 自然科学基金项目 (51379024)

作者简介: 李康勇, 男, 湖南耒阳人, 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: likangyong520@126.com

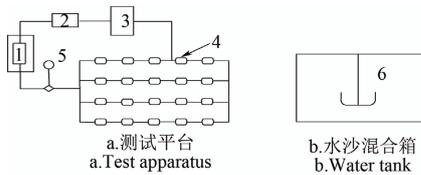
*通信作者: 牛文全, 男, 甘肃甘谷人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事灌溉理论与节水技术研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: nwwq@vip.sina.com

1.1 mm, 齿间距为 3 mm, 流道单元数 14 个, 滴头的制造偏差为 1.76%。

试验化肥为复合肥(陕西景盛肥业集团有限公司), 主要成分为磷酸一胺、磷酸二胺、硫酸铵、硫酸钾和尿素, 其中 N、P 和 K 3 种养分的比例为 1:1:1。试验用水为地下水, pH 值为 7.34, 细菌总数为 0, 硬度为 2.58 mmol/L, 悬浮颗粒为 0, 电导率为 560 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。本室内模拟试验在冬季进行, 灌水前, 测试每次灌溉水的温度, 试验期间最高水温为 8 $^{\circ}\text{C}$, 最低为 3 $^{\circ}\text{C}$, 平均为 5 $^{\circ}\text{C}$ 。

试验泥沙是经过水筛洗后的杨凌沙壤土, 为消除泥沙表面吸附的盐对试验的干扰, 先用清水冲洗泥沙过 0.1 mm 筛子, 收集过筛浑水, 沉淀去除上层清液。先后分别用 0.067 与 0.034 mm 筛子对沉积泥沙反复淋洗, 收集残留在筛子里的泥沙。对粒径 < 0.034 mm 泥沙进行沉淀去除上层清液, 加水稀释后再重复此操作, 最后收集沉积泥沙备用。

试验装置如图 1 所示, 由压力变频器、数据自动采集设备、水沙混合设备和堵塞测试台组成。工作水头控制精度为 0.01 m; 设定数据自动采集时间间隔为 1 s, 数据采集误差为 0.2 g, 水沙混合设备由水箱、潜水泵和搅拌机组成, 通过搅拌机搅拌使浑水混合均匀。每组测试 4 条滴灌带, 每条有 5 个灌水器, 每次灌水结束后计算 20 个滴头的平均流量。



1. 水沙混合箱及潜水泵 2. 电脑 3. 变频箱 4. 灌水器; 5. 压力表
6. 搅拌叶轮
1. Water tank and pump 2. Computer 3. Frequency conversion box 4. Emitter 5. Pressure gauge 6. Agitators

图 1 浑水试验测试平台示意图

Fig.1 Schematic of experimental layout of drip irrigation system

1.2 试验方法

采用间歇浑水滴灌测试方法, 测试所用泥沙粒径 < 0.1 mm。根据文献[23]的研究结果, 配置的灌溉水含沙量为 1 g/L。用水筛法将泥沙筛分 3 个粒径段, 根据各粒径段质量百分比, 设置 3 个泥沙级配 A、B、C, 每种级配中某一粒径段泥沙含量超过 50%。根据预试验, 当施肥浓度 $\rho > 1.2 \text{ g/L}$ 时特别容易引起堵塞, 因此设置最大施肥浓度 ρ 为 1.2 g/L, 查阅相关资料^[11, 25]知当施肥浓度 < 1.2 g/L 时, 泥沙絮凝作用会随施肥浓度的增加而加强, 为确定对加速堵塞作用影响较小的低浓度值, 增大了浓度梯度差距, 设置了 2 个较低的施肥浓度 ρ 分别为 0.6 和 0.4 g/L, 以不施肥 ($\rho=0$) 为对照, 按照完全随机试验处理, 共 12 个处理, 每个处理重复 2 次, 试验设计见表 1。试验设定工作压力为 40 kPa。每次灌水 30 min, 灌水间隔 4 h, 每次灌水测试结束后, 计算平均相对流量 q_r , 即 20 个滴头浑水平均流量与设计流量之比, 当 $q_r < 70\%$ 时, 停止灌水并记录灌水次数。每组试验结束后, 取下滴灌

带, 对测试装置冲洗 3 次, 确保装置中无残留颗粒后换上新滴管带进行下次试验。将堵塞滴头在自然状态下风干, 收集淤积在滴灌带内泥沙, 用场发射扫描电镜观测滴头中的堵塞物质。

表 1 试验设计

Table 1 Experiment design

泥沙 编号 No. of sediment	不同粒径颗粒所占比例 Sediment gradation/%			施肥浓度 Fertilizer concentration/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
	0~0.034 mm	>0.034~ 0.067 mm	>0.067~ 0.1 mm	
A	56.12	24.16	19.72	0, 0.4, 0.6, 1.2
B	14.21	58.34	27.45	0, 0.4, 0.6, 1.2
C	20.27	19.47	60.26	0, 0.4, 0.6, 1.2

1.3 评价指标与方法

采用相对流量 q_r 和均匀度 C_u 评价系统堵塞程度。根据现行微灌工程技术规范^[26]规定, 当滴头流量小于设计流量的 75% 时, 认为滴头发生堵塞, 同时规定设计灌水均匀度系数 $C_u > 85\%$ 。为了适当延长试验过程中的灌水次数, 本试验以 $q_r < 70\%$ 为堵塞判断标准, 平均相对流量 q_r 和均匀度 C_u 的计算公式分别为:

$$q_r = \left(\sum_{i=1}^n q_i \right) / (n \cdot q_0) \quad (1)$$

$$C_u = 1 - \left(\sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}| \right) / (n \cdot \bar{q}) \quad (2)$$

其中: q_r 为相对流量, %; C_u 为均匀度; i 为滴头序号; n 为滴头总数; q_i 为第 i 个滴头的流量, L/h; q_0 为滴头设计流量, L/h; \bar{q} 为平均流量, L/h。对于 $q \geq 70\%$ 的灌水过程称为有效灌水, 有效灌水过程的次数称为有效灌水次数。将发生堵塞滴头数与总滴头数之比称为堵塞率。

1.4 堵塞滴头数量、堵塞发生位置及淤积泥沙统计

每次灌水结束后, 根据监测到的滴头流量数据, 确定并标记部分和完全堵塞的滴头位置。对所有滴灌带放置在室内进行风干, 约 4 月后滴头流道内水分完全风干后剖开滴灌带, 记录完全堵塞滴头堵塞物聚集的位置, 统计滴头数量, 由于未完全堵塞滴头剖开后, 堵塞物均没有聚集在一起, 无法记录堵塞位置, 仅统计未完全堵塞滴头的数量。测试滴头数总计为 480 个(共 12 个处理, 每个处理 2 个重复, 每次试验 20 个滴头), 记录堵塞滴头数量后, 计算完全堵塞率(完全堵塞滴头与所统计滴头总数之比)和堵塞率(完全堵塞滴头与部分堵塞滴头数量之和与所统计滴头总数之比)。本文完全堵塞滴头是指最后一次灌水完成时, 流量为 0 滴头的堵塞状况, 对于最后一次测试后, 实测流量介于额定流量 0~70% 之间滴头的堵塞状况, 称之为部分堵塞。在判断堵塞位置时, 对于只有进水口处被堵塞物完全填充的情况, 定义为进水口堵塞; 对于只有流道被泥沙完全填充或者从流道与进水口完全被堵塞物填充, 流道出口未被堵塞物完全填充的情况, 称之为流道堵塞; 对于出水口被泥沙完全填充的情况, 称之为出水口堵塞^[24]。试验结束后, 按照不同的泥沙级配收集 4 个施肥浓度情况下所有试验毛

管内淤积的泥沙，混合均匀后分析其颗粒组成。

1.5 堵塞物结构和主要成分分析方法

在堵塞滴头数量统计过程中，对于所有完全堵塞滴头的堵塞物进行采样，并按照泥沙级配和施肥浓度，将同一处理的堵塞物样本混合均匀后制作电镜标本，然后用场发射扫描电镜 S-4800（日本日立 HITACHI）扫描放大 800 倍的结构图分析堵塞物结构，并分析堵塞物的基本元素质量比例。

2 结果与分析

2.1 施肥浓度对滴头堵塞的影响

施肥浓度不同，相对流量 q_r 与均匀度 C_u 随灌水次数的变化趋势明显不同，如图 2 和图 3 所示。

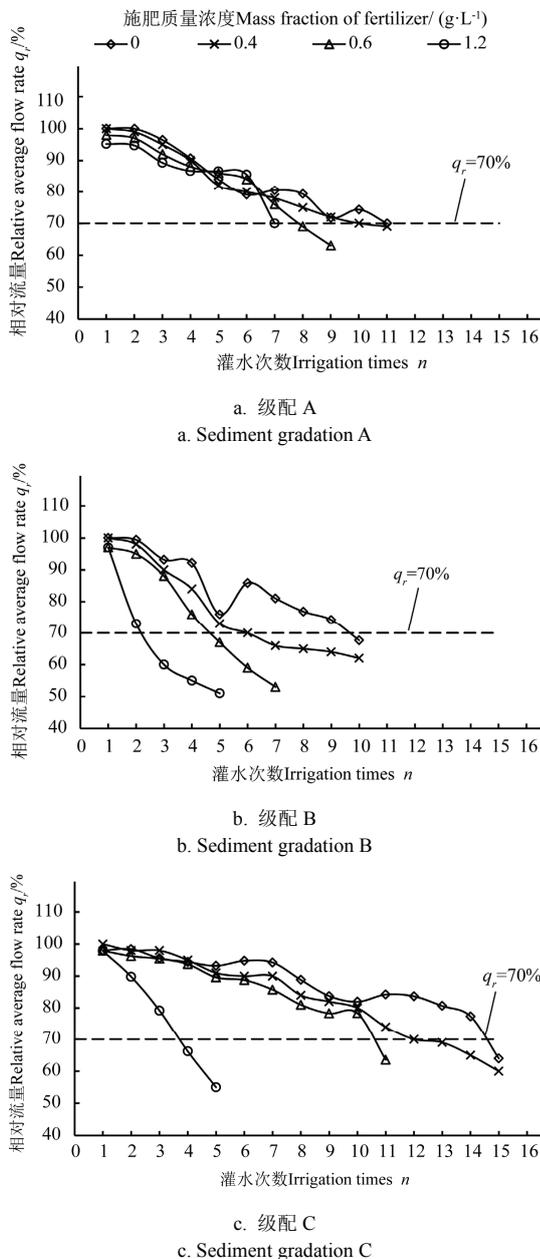


图 2 泥沙级配和施肥浓度对相对流量的影响

Fig.2 Influence of sediment gradation and fertilizer concentration on relative flow rate

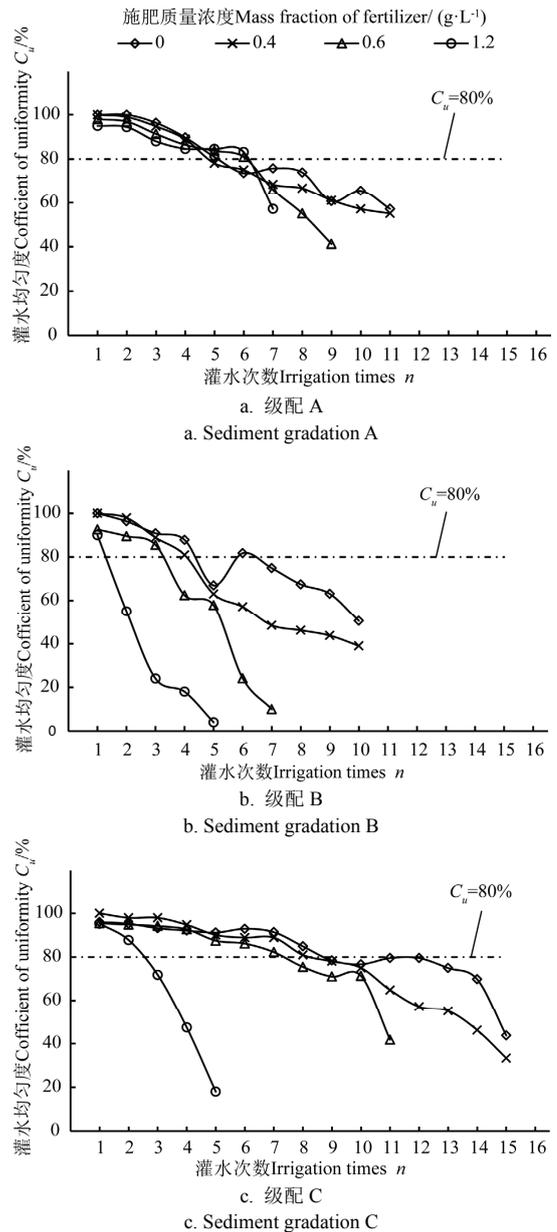


图 3 泥沙级配和施肥浓度对灌水均匀度的影响

Fig.3 Influence of sediment gradation and fertilizer concentration on uniformity

从图 2 可以看出，与未施肥对照比较，灌溉水中增加化肥后，不同级配浑水灌水的滴头相对流量 q_r 随灌水次数增加的下幅度均呈增加趋势，说明施肥加快了滴头堵塞。当施肥浓度为 0.4 g/L 时， q_r 比对照减小的程度较小，此时施肥对于滴头堵塞的加速作用较弱，当施肥浓度增大为 0.6 g/L 时， q_r 比对照减小的程度进一步增大，但与施肥浓度为 0.4 g/L 时非常接近；当施肥浓度为 1.2 g/L 时， q_r 均快速下降，滴头堵塞率和堵塞程度均明显加大， q_r 比对照减小的程度明显增大，施肥加速滴头堵塞作用显著。从图 3 可以看出，施肥后，当施肥浓度为 0.4 g/L 时， C_u 也随灌水次数增加的下幅度均呈增加趋势，随着施肥浓度的增加，与不施肥相比， C_u 差距加大，说明施肥加剧灌水均匀度的下降。当施肥浓度为 0.4 和 0.6g/L 时， C_u 与对照减小的程度较小，当施肥浓度为 1.2 g/L 时，

差距明显增大。

另外,施肥与不同级配浑水组合对滴头堵塞的加速作用不同,从图 2 可以看出,当灌水 7 次后,施肥浓度从 0.4、0.6 增大到 1.2 g/L 时, A 级配的相对流量 q_r 分别为 78%、76%和 70%,比对照(未施肥)分别下降了 2.5%、5.0%和 12.5%,而 B 级配分别下降了 18.5%、34.6%和 38%以上, C 级配分别下降 4.3%、8.5%和 47%以上,施肥浓度较小时,对于滴头堵塞的加速作用较小,滴头堵塞的主要影响是泥沙级配,当泥沙浓度增大为 1.2 g/L 时,施肥对滴头堵塞加速作用明显增强,远大于施肥浓度为 0.4 和 0.6 g/L 的情况。

根据本文 1.3 的标准统计每次试验的有效灌水次数,与不施肥相比,施肥浓度为 0.4 g/L 时,3 种泥沙级配的有效灌水次数非常接近, A、B 和 C 3 种级配有效灌水次数分别下降 9.1%、33.3%和 14.3%,加速滴头堵塞的作用非常小,当施肥 1.2 g/L 时,3 种级配浑水的有效灌水次数比未施肥的对照处理分别下降了 36.4%、77.8%和 78.8%,加速滴头堵塞的作用明显增强。如表 2 所示,级配 B 的有效灌水次数最少,级配 B 最容易造成滴头堵塞。对于 <0.034 mm 颗粒超过 50%的 A 级配,当施肥浓度从 0.4 g/L 增大到 1.2 g/L 时,有效灌水次数分别从对照 11 次减少为 10、8 和 7 次,有效灌水次数的减小幅度较小;粒径为 0.034~0.067 mm 颗粒超过 50%的 B 级配有效灌水次数分别从对照 9 次减少为 6、4 和 2 次,有效灌水次数随着施肥浓度的增大而迅速减少,减少幅度大于 A 级配;粒径为 0.067~0.1 mm 颗粒超过 50%的 C 级配有效灌水次数分别从对照 14 次减少为 12、10 和 3 次,当施肥浓度为 1.2 g/L 时对于滴头堵塞的加速作用最显著。说明粗颗粒含量越多,高施肥浓度对于滴头堵塞的加速作用越显著。

表 2 不同处理的有效灌水次数

泥沙编号 No. of sediment	施肥浓度 Fertilizer concentration/(g·L ⁻¹)			
	0	1.2	0.6	0.4
A	11	7	8	10
B	9	2	4	6
C	14	3	10	12

从图 2 和图 3 中对本次试验 3 个对照组的 q_r 与 C_u 进行分析可得,3 种不同泥沙级配的 q_r 随灌水次数增加的下降速度不同,说明泥沙级配对于滴头堵塞影响明显。C 级配相对流量随灌水次数增加的变化相对平缓,灌水 15 次后,相对流量 $<70%$,而 A 和 B 级配相对流量随灌水次数增加的下降趋势较快,灌水 11 次后,它们的相对流量 $<70%$ 。灌水 5 次后,级配 B 的相对流量为 75.97%, C_u 为 66.98%,而级配 A 的 q_r 、 C_u 分别为 83.98%和 76.73%,级配 C 的分别为 93.22%和 91.39%,级配 A 和 B 接近堵塞标准,而 C 级配流量和灌水均匀度都非常高。当灌水 11 次后, A、B 级配试验的部分滴头已发生严重堵塞, A、B 级配相对流量 q_r 分别仅为 69.56%、62.34%, C_u 分别仅

为 53.11%、41.03%。A 级配, C 级配显著高于 A、B 级配,灌水 11 次后, C 级配相对流量 q_r 仍大于 80%,为 84.22%,其抗堵塞能力明显高于 A、B 级配。就相对流量和灌水均匀度判断, C 级配不易堵塞,有效灌水次数为 14 次,而 A、B 级配易造成滴头堵塞,其中 B 级配堵塞程度略大于 A 级配,有效灌水次数分别为 11 和 9 次。本试验收集了淤积在 48 条滴管带内的泥沙,其级配见表 3。淤积泥沙中粒径 >0.067 mm 所占比例与配置泥沙级配相对(见表 1)都有所上升,其中 A 级配中此粒径段比例上升最大,为 39%,B 次之,为 19.37%,C 最小,为 17.93%。说明该粒径段泥沙易沉积在毛管中。

表 3 不同级配泥沙在滴灌带内的淤积质量比

Table 3 Mass percentage of particle left in drip tape with different particle size gradation

泥沙编号 No. of sediment	淤积泥沙所占比例 Proportion of each size in total/%			淤积总量 Sediment deposition/g
	0~ 0.034 mm	>0.034~ 0.067 mm	>0.067~ 0.1 mm	
	A	21.12	17.16	
B	10.21	40.97	48.82	82.9
C	9.44	12.37	78.19	176.1

2.2 施肥浓度对滴头堵塞位置及堵塞类型的影响

试验结束后,统计了所有试验的 480 个测试滴头的堵塞情况。施肥情况下,每种级配统计了 3 种施肥浓度试验的 120 个滴头中的堵塞滴头数量。未施肥情况,每种级配统计了 40 个滴头中堵塞滴头数量。结果见表 4。

表 4 滴头堵塞情况统计

Table 4 Statistics of emitter clogging condition

泥沙编号 No. of sediment	灌溉水类型 Type of irrigation water	完全堵塞滴头数 Emitters with complete clogging			部分堵塞滴头数 Emitters with partial clogging		$n_{cc}:(n_{cc}+n_{pc})/\%$	$n_{cc}:n/\%$
		进口栅 Import	渠道 Chann	流道 el	$n_i:n_c$	n_{pc}		
A	NF	6	4	1.50	4	71.43	25.00	
	FI	22	12	1.83	8	80.95	28.33	
B	NF	10	4	2.50	2	87.50	35.00	
	FI	34	18	1.89	4	92.86	43.33	
C	NF	6	2	3.00	14	36.36	20.00	
	FI	28	10	2.80	8	82.61	31.67	
小计 Sum	NF	22	10	2.20	20	61.54	26.67	
	FI	84	40	2.10	20	86.11	34.44	

注: NF 为未施肥灌水情况, FI 为施肥灌水情况。

Note: NF is non-fertilization condition, FI is fertilization condition.

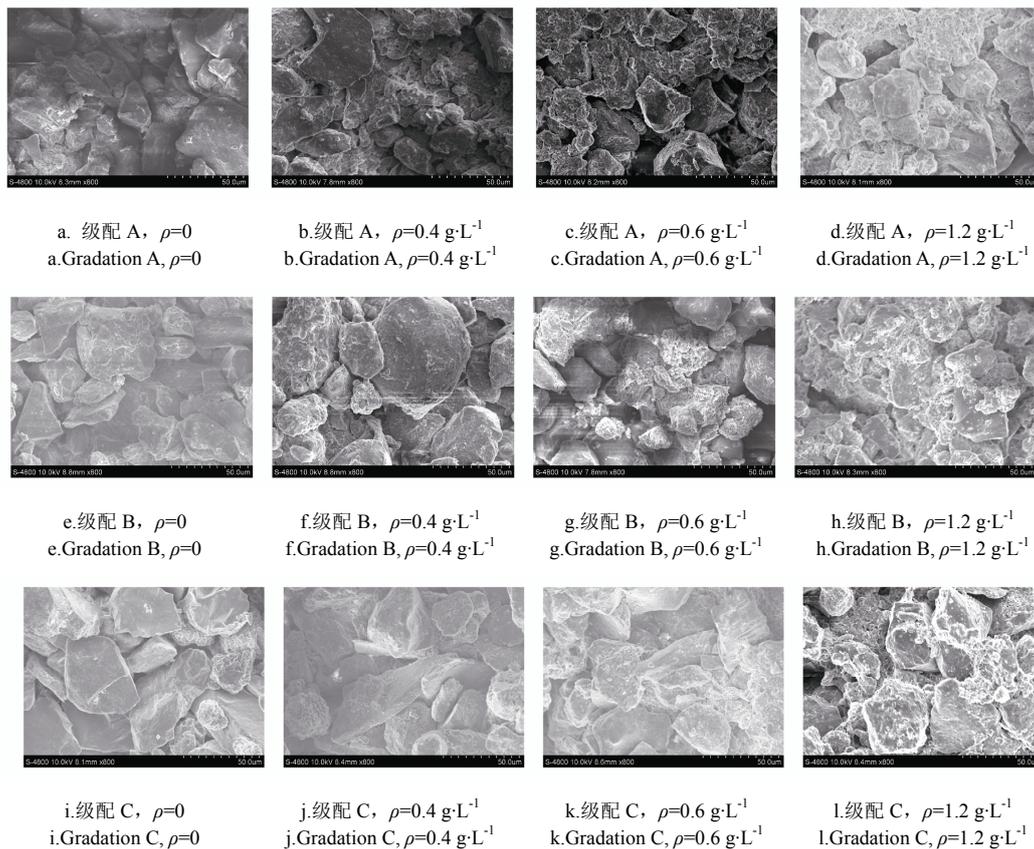
从表 4 可以看出,发生完全堵塞的滴头共有 220 个,堵塞率为 30.6%,部分堵塞滴头有 80 个,堵塞率为 11.1%,浑水灌溉的迷宫滴头以完全堵塞为主。在进口栅和流道处堵塞的滴头数分别为 150 个和 70 个,在进口栅处堵塞机率明显大于流道,是流道处堵塞的 2.14 倍。施肥后,与未施肥的对照处理比较,进口栅和流道断面发生完全滴头的数量都有所增加,分别从 66 个和 30 个增大到 84 个和 40 个。由于施加化肥处理的有效灌水次数比为添加

化肥的对照处理减少很多，因此，施肥后部分堵塞的滴头数 < 未施肥的对照处理。对于 A、B 和 C 等 3 种级配浑水，施肥后，完全堵塞与部分堵塞的比值均显著增加，与对照比较分别从 2.5、7.0 和 0.6 增大为 5.3、13.0 和 4.8，施肥显著提高了发生完全堵塞的滴头数量，施肥使完全堵塞滴头占堵塞滴头总数的平均比率从 61.54% 提高到 86.11%，占总滴头的平均比率也从 26.67% 提高到 34.44%。分析完全堵塞滴头堵塞物积聚的位置，发现施肥后，进口栅格处与流道滴头除在 A 级配泥沙浑水灌溉

情况外，施肥减小了它们之间的比值，如 B、C 级配分别从 2.50 和 3.00 减小为 1.89 和 2.80，但其差异较小。总体情况下，施肥基本不改变完全堵塞滴头堵塞物的聚集位置（施肥时为 2.10，未施肥时为 2.20）。

2.3 施肥浓度对堵塞物质结构与主要成分的影响

用场发射扫描电镜 S-4800 观察堵塞物质微观结构，通过对堵塞物质进行能谱分析得出堵塞物质中各主要元素质量百分比。用电镜对不同级配堵塞泥沙与施肥后堵塞泥沙放大 800 倍观测得图 4。



注： ρ 为施肥质量浓度；放大 800 倍。

Note: ρ is mass fraction of fertilizer; Pictures are magnified by 800 times.

图 4 不同施肥浓度与不同级配浑水堵塞物电镜观测扫描结构

Fig.4 Blockage structure under different fertilizer concentration and particle size gradation observed by FESEM

从图 4 可发现，未施肥时 3 种级配堵塞泥沙表面相对光滑，颗粒间絮凝作用不明显，骨料颗粒吸附细小颗粒能力较弱，且随大颗粒（直径 > 0.067 mm）所占百分比增加，颗粒堆积空隙增大，其中 A 级配堵塞泥沙中细小颗粒（直径 < 0.034 mm）所占比例大，泥沙堆积密度大，泥沙堆积最致密，且堆积体表面出现细小泥沙絮凝形成絮状体现象。B、C 堵塞泥沙堆积体空隙大，堆积密度相对较小，颗粒间絮凝现象弱，颗粒表面难以吸附细小泥沙，颗粒堆积体间隙细小颗粒填充较少。与不施肥相比，施肥后堵塞泥沙堆积体致密性增加，表面结构复杂程度显著增加，絮凝作用明显增强，大颗粒表面附着大量絮状物质，颗粒间被絮状填充形成致密的堆积体，随着施肥浓度的增加，作用越显著。

从图 4 还可以发现，对于不同泥沙级配，施肥浓度对泥沙堆积结构影响效果不同。当施肥浓度较低为

0.4 g/L 时，A 级配堵塞泥沙颗粒间的絮凝作用已非常显著（图 4b），絮状物质发育明显且吸附在颗粒上起到连接作用，促进致密堆积体的形成，随着施肥浓度的增加絮凝有所增强，但变化相对较小。级配 B 堵塞泥沙堆积体表面复杂程度随施肥浓度变化差异显著，与不施肥时相比，施肥浓度为 0.4 g/L 时，颗粒间絮凝作用增加，絮状物质有所增加，但部分颗粒表面仍然光滑，对细小颗粒吸附能力相对较弱，泥沙堆积体空隙明显（图 4f），随着施肥浓度增加，颗粒絮凝作用明显增强，颗粒间被絮凝物质填充连成致密堆积体，施肥浓度对 B 级配堵塞泥沙结构的影响大于 A 级配。当施肥较低为 0.4 g/L 时，C 级配堵塞泥沙与不施肥时无明显变化（图 4j），当施肥浓度为 0.6 g/L 时，絮状物质形成明显增加（图 4k），颗粒间絮凝作用明显增强，堆积体大部分空隙被絮状物质填充而形成致密的结构。对于所有级配的泥沙，当施肥

浓度为 1.2 g/L, 絮凝作用都较强, 堵塞物泥沙表面结构复杂, 在 800 倍放大图中大颗粒泥沙表面有明显的絮团附着物, 大颗粒间形成空隙间的絮团清晰可见(图 41)。施肥增强了细小颗粒形成絮状物的机率, 填充和连接大颗粒骨料, 更易引起滴头堵塞。

不同处理堵塞物中不同元素的质量百分比见表 5。施肥对于堵塞物主要元素含量影响较小, 堵塞物中主要元素质量百分比与未施肥的对照处理差异非常小。堵塞物主要成分为硅酸盐, O 和 Si 元素所占比例分别约为 38% 和 28%。所有处理的 N、Al 元素含量均无明显差异, 同

种级配, 不同处理间 N 元素含量差异 < 0.8%, Al 元素差异 < 0.9%。C 级配的 P、K、Fe、Mg 元素含量在不同处理之间无明显差距, 施肥浓度为 0.4 g/L 的 Ca 含量与对照比较存在一定的差异, 但随施肥浓度增加差距反而缩小, 而此时堵塞却加剧, 这说明加速堵塞的主要原因并不是 Ca 盐沉淀引起的。A 和 B 级配虽然不同处理间的 P、K、Ca 元素含量存在一定的差异, 但是差距都比较小, 且没有明显的规律, 且 B 级配施肥后 Ca 元素含量小于对照, 说明施肥加速滴头堵塞主要原因不是由于 P、Ca、Mg 等元素含量的增加。

表 5 不同处理堵塞物质各元素质量百分比分析
Table 5 Mass percentage of blockage composition under different treatments

泥沙 编号 No. of sediment	施肥浓度 Fertilization concentration/ (g L ⁻¹)	%										
		C	N	O	Si	P	K	Ca	Fe	Mg	Al	其他 Others
A	0	5.11	2.47	38.74	28.14	2.87	1.92	5.40	5.03	2.23	6.93	1.16
	0.4	5.97	2.06	42.12	28.09	2.66	2.07	3.62	4.08	1.72	6.24	1.37
	0.6	4.86	2.02	35.10	29.16	2.56	2.82	3.24	11.10	1.08	6.50	1.56
	1.2	5.88	1.89	35.58	27.03	3.59	2.41	5.89	7.43	2.19	7.13	0.98
B	0	7.70	2.03	35.15	26.04	1.83	3.79	4.95	8.89	1.67	6.52	1.43
	0.4	6.56	2.23	38.84	26.63	2.11	2.97	4.85	7.01	1.38	6.94	0.48
	0.6	6.38	2.22	40.75	24.78	3.85	2.22	5.03	4.01	2.48	6.89	1.39
	1.2	9.48	1.58	37.75	28.34	2.33	2.18	2.95	5.95	1.36	6.67	1.41
C	0	4.93	1.77	38.47	28.91	3.02	2.56	4.10	5.80	1.78	7.35	1.31
	0.4	6.65	1.61	38.56	28.63	3.48	2.42	3.33	5.04	1.96	7.33	0.99
	0.6	5.18	1.75	38.32	28.23	3.36	2.66	3.87	5.91	1.97	7.86	0.89
	1.2	4.49	1.58	39.76	28.31	3.35	2.06	4.41	5.58	2.15	6.84	1.47

3 讨论

3.1 施肥浓度对滴头堵塞的影响

本试验发现施肥对滴头堵塞具有明显的加速作用, 一定范围内, 随着施肥浓度的增大, 加速滴头堵塞作用越明显, 与未施肥相比, 施肥浓度为 1.2 g/L 时, 3 种级配 (A、B、C) 有效灌溉次数分别下降了 4、7 和 11 次, 下降比例分别为 36.4%、77.8% 和 78.8%, 当施肥 0.4g/L 时, 下降幅度分别为 9.1%、33.3% 和 14.3%, 下降幅度明显减小。这是由于大多数细颗粒泥沙带有负电荷, 而阳离子可中和压缩泥沙表面的双电层结构从而使颗粒之间的静电斥力减小, 使泥沙的絮凝作用增强。柴朝晖等^[27]利用图像分析法对底泥研究表明加入絮凝剂会减小絮体空隙, 刘林等^[28]对泥沙絮凝研究指出絮凝沉降与絮凝结构均受离子浓度影响, 一定范围内, 离子浓度增加, 絮凝沉降速度增大。Ronojoy 等^[29]研究指出阳离子浓度增大会增强颗粒间的连接力。这与本试验结果相吻合。施肥后, 水中阳离子浓度增加, 这使泥沙颗粒间的黏性增强, 促进了絮凝结构的形成, 起到颗粒间的桥接作用, 增加絮体沉降速度, 使泥沙更容易沉积在滴头中, 且阳离子浓度的增加减小了絮体的空隙, 使其发育形成稳定而致密的堆积体, 造成加速滴头堵塞现象, 当施肥浓

度降低时, 水中阳离子浓度变小, 加速堵塞效果减弱。而 David 等^[21]研究指出碳酸钙、碳酸镁沉淀是造成堵塞的主要原因, Sefer 等^[2]研究了地下水不同施肥灌溉方式对堵塞的影响, 指出 Ca(NO₃)₂ 和 K₂SO₄ 2 种肥料共同作用是造成堵塞的主要原因, 刘燕芳等^[3]等对温室自来水水肥灌溉研究指出 Ca 和 Mg 沉淀是造成堵塞的主要原因。这与本试验结论存在一定的差异, 主要是由于上述研究灌溉水中固体颗粒含量非常小, 而人为增加了大量的 Ca 和 Mg 离子, Ca 和 Mg 离子含量远大于本试验, 其堵塞形式为单纯的化学沉淀堵塞。本试验含沙量为 1 g/L, 固体颗粒沉积是造成堵塞的主要因素, 施肥加强了颗粒间的絮凝。也有研究^[16, 30]指出堵塞是以生物富集开始的, 微生物膜的发育及微生物分泌的胞外聚合物会吸附在泥沙颗粒上, 呈现出复杂的絮凝结构, 且生物膜覆盖泥沙表面充斥于颗粒孔隙之中^[31]。而本试验中施肥给微生物生长提供了 N、P 等必要的营养物质, 加之滴头中温度适宜、环境湿润, 随着试验时间的增加, 滴头中发育形成生物膜可能性较高, 连接颗粒形成复杂的絮凝结构, 加速滴头堵塞, 在这方面需继续研究。还有温度对水肥一体化滴头堵塞的影响也需进一步研究。

本试验还发现泥沙级配是造成滴头堵塞的主要影响因素。就本试验所采用滴头, 0.034~0.067 mm 的颗粒含

量大于 50% 的 B 级配泥浑水最易引起滴头堵塞, 0~0.034 mm 颗粒含量大于 50% 的 A 次之, 0.067~0.1 mm 颗粒含量大于 50% 的 C 最不易引起堵塞, A、B 级配以完全堵塞为主, C 级配以部分堵塞为主。收集的 48 条滴管带内泥沙(表 3)中 0.067~0.1 mm 颗粒所占比例与初始级配(见表 1)比较, 都有所上升, 其中 A 级配中此粒径段比例上升最大, 为 39%, B 其次, 为 19.37%, C 最小, 为 17.93%, 这与文献[32]的测试结果相同。说明该粒径段泥沙在容易沉降淤积在毛管中, C 级配 0.067~0.1 mm 泥沙含量超过 50%, 容易在毛管中淤积, 降低了大颗粒进入滴头内的几率, 且以推移质形式运动^[14, 33]。当压力较低时, 水流流速低, 推移向前运动缓慢, 大颗粒更易淤积, 而贴片式滴头突出于毛管壁面, 一定程度上阻碍了推移质进入滴头流道。大颗粒堆积密度相对较小, 絮凝作用弱, 难以形成致密的团聚体, 因此 C 级配大颗粒含量多, 但不易引起堵塞。B 级配 0.034~0.067 mm 泥沙占 56.34%, 该粒径段是团聚体形成的主要骨料, 颗粒空隙易被细小颗粒填充形成稳定絮凝体, 导致滴头发生完全堵塞。A 级配 0~0.034 mm 泥沙占 56.12%, 该粒径段泥沙在水中跟随性较强, 易随水流冲出^[34], 团聚体仍以 0.034~0.067 mm 泥沙为主要骨料(图 4), 细小颗粒絮凝作用强, 容易与骨料沉积形成致密的团聚体, A 级配骨料泥沙含量较少, 造成的堵塞次于 B 级配。对于滴头流道结构、温度等因素对敏感堵塞级配的影响还需进一步研究。

3.2 施肥浓度对滴头堵塞位置及堵塞类型的影响

本试验发现施肥浓度对滴头堵塞发生的位置影响不明显, 对堵塞类型影响较大, 主要以完全堵塞形式为主。这是因为除水质因素外, 滴头结构设计及工作压力对滴头的抗堵塞性能也有重要的影响, 一般认为滴头进口及流道低流速区域和紊动强度大的区域是颗粒容易沉积引起堵塞主要位置, 而工作压力增大, 水流速度增大, 流道低流速改变水流力学性能影响滴头的抗堵塞性能^[35-36]。当工作压力、流道结构不变时, 泥沙颗粒粒径及泥沙浓度是堵塞发生位置的的决定性因素。本试验中泥沙浓度不变, 对于同种级配泥沙, 施肥主要是通过增强颗粒间的絮凝作用加速滴头堵塞, 促进泥沙粘结沉积形成稳定致密的堆积体, 使堵塞类型以完全堵塞为主, 而对滴头的水力性能无明显影响, 因此施肥对滴头堵塞发生位置无明显影响。

3.3 堵塞物质的结构与主要成分

本研究发现施肥浓度对堵塞物质结构的影响明显, 且对不同级配泥沙影响效果不同, 但对堵塞物的主要成分无明显影响。由于施肥后, 颗粒间絮凝现象增强, 堵塞物表面结构变复杂, 颗粒堆积体间隙减小, 堆积密度变大。随着施肥浓度的增加, 堆积作用越显著。张德茹等^[22]对天然细颗粒泥沙研究指出粒径越小, 絮凝作用越强, 粒径>0.03 mm, 絮凝作用就不明显。本试验所用泥沙是经过水淋洗的, 消除了天然泥沙表面吸附盐分对颗粒絮凝的影响, 因此当不施肥时, 对以粒径>0.067 mm

为主的 C 级配泥沙, 颗粒间絮凝作用较弱, 大颗粒表面光滑, 细小颗粒吸附少, 絮团的空隙较大。A 级配以粒径<0.034 mm 泥沙为主, 该粒径段颗粒絮凝作用强, 絮体空隙小, 填充在大颗粒间形成致密的结构。施肥后, 各不同级配泥沙堵塞物质的结构变复杂, 絮状物质明显形成增加, 这是因为施肥会增加水中阳离子的含量, 从而增强颗粒间絮凝作用, 促进絮状结构的形成, 在颗粒间起到连接作用, 使大颗粒吸附大量的细小颗粒形成更为复杂的结构。对着施肥浓度的增加, 不同泥沙级配, 堵塞物质结构变化不同, 其 B、C 级配堵塞物质结构随施肥浓度的增加变化较大, A 相对变化较小, 这是因为 A 中细小颗粒占近 60%, 而此粒径段颗粒絮凝作用本来就比较强, 所以当施肥浓度变化不大时, 对泥沙絮凝结构改变不是很明显。而 B、C 级配中粒径>0.034 mm 泥沙约占 80%, 该粒径段泥沙絮凝作用较弱, 随阳离子浓度增加, 絮凝作用会增强, 颗粒间更易形成复杂絮凝结构, 而使堵塞物质的结构变化较明显。由于堵塞物质的主要成分是泥沙, 对于同级配泥沙, 各化学元素成分比例相似, 而化肥中的化学元素所占比例相对较小, 因此施肥浓度对堵塞物质的主要成分无明显影响。

4 结 论

1) 在灌溉水中施加可溶性化肥后, 对滴头堵塞具有明显的加速作用, 一定浓度范围内, 随着施肥浓度的增加, 加速效果增强。当施肥 1.2 g/L 时, A、B、C 3 种级配有效灌水次数下降幅度分别为 36.4%, 77.8% 和 78.8%, 当施肥 0.4 g/L 时, 有效灌水次数下降幅度分别为 9.1%, 33.3% 和 14.3%, 下降幅度明显小于施肥浓度为 1.2 g/L 时的情况。

2) 施肥对滴头堵塞的加速作用与泥沙级配有关。就本试验选择的滴灌带而言, 当粒径为 0.034~0.067 mm 颗粒的含量越大, 加速作用越明显。

3) 灌溉水中施加化肥后, 增加了泥沙颗粒间粘结性, 促进沉积物形成稳定的絮凝结构, 这是加快堵塞的重要原因, 施肥对堵塞物的结构影响明显, 但泥沙级配不同, 其影响效果不同。施肥对滴头堵塞位置与堵塞物主要成分影响不明显。

4) 泥沙级配是影响滴头堵塞的主要因素, 本试验滴头最易堵塞的级配为 0.034~0.067 mm 的颗粒质量分数大于 50% 的 B 级配, 0~0.034 mm 颗粒质量分数>50% 的 A 级配次之, 0.067~0.1 mm 颗粒质量分数>50% 的 C 最不易引起堵塞, A、B 级配以完全堵塞为主, C 级配以部分堵塞为主。

[参 考 文 献]

- [1] Human D Z. Causes and prevention of emitter plugging in micro-irrigation systems[J]. University of Florida IFAS Extension, 1990(8): 1-11.
- [2] Sefer Bozkurt, Bulent Ozekici. The effect of fertigation management in the different type of In-line emitters on trickle

- irrigation system performance[J]. Journal of Applied Science, 2006, (6): 1165—1171.
- [3] 刘艳芳, 吴普特, 朱德兰. 温室水肥滴灌系统迷宫式灌水器堵塞试验研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 50—55.
Liu Yanfang, Wu Pute, Zhu Delan. Clogging of labyrinth emitters in greenhouse fertigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 50—55.(in Chinese with English abstract)
- [4] Nakayama F S, Bucks D A. Water quality in drip trickle irrigation: A review[J]. Irrigation Science, 1991, 12(1): 187—192.
- [5] Bucks D A, Nakayama F S, Gilbert R G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance[J]. Agricultural Water Management, 1979, (2): 149—162.
- [6] 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)
- [7] 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): 547—552.
Niu Wenquan Liu Lu. Influence of muddy water concentration and particle diameter on clogging of labyrinth channels[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6): 547—552.(in Chinese with English abstract)
- [8] 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(05): 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(CSAE), 2009, 25(05): 1—6.(in Chinese with English abstract)
- [9] Muharren Yetis Yavuz, Kursad Demirel, Okan Erken. Emitter clogging and effects on drip irrigation systems performance[J]. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5: 532—538.
- [10] 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)
- [11] 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 Wenquan, Liu Lu. Influences of sediment concentration and water temperature of muddy water on emitter clogging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 39—45.(in Chinese with English abstract)
- [12] 翟国亮, 吕谋超, 晖王, 等. 微灌系统的堵塞及防治措施[J]. 农业工程学报, 1999, 5(1): 144—147.
Zhuo Guoliang, Lü Mouchao, Hui Wang, et al. Plugging of microirrigation system and its prevention[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 5(1): 144—147.(in Chinese with English abstract)
- [13] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2007, 23(8): 34—39.(in Chinese with English abstract)
- [14] 王亚林, 朱德兰, 张林, 等. 滴灌毛管泥沙分布及灌水器堵塞试验研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 177—182.
Wang Yalin, Zhu Delan, Zhang Lin, et al. Experiment on sediment distribution in lateral pipes and clogging of emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 177—182.(in Chinese with English abstract)
- [15] Sagi G. Water quality and clogging of systems in Israel in 1989[J]. Water and Irrigation Bull, 1990, 280: 57—61.
- [16] 闫大壮, 杨培岭, 李云开, 等. 再生水滴灌条件下滴头堵塞特性评估[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 19—24.
Yan Dazhuang, Yang Peiling, Li Yunkai, et al. Evaluation of drip emitter clogging with reclaimed wastewater irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 19—24.(in Chinese with English abstract)
- [17] Capra A, Sciolone B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(16): 1529—1534.
- [18] I Ravina, Paz E, Sofer Z, et al. Control of clogging in drip irrigation with stored municipal sewage effluent[J]. Agricultural Water Management, 1997, 33: 127—137.
- [19] 李久生, 陈磊, 栗岩峰. 地下滴灌灌水器堵塞特性田间评估[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1272—1278.
Li Jiushen, Chen Lei, Li Yanfeng, et al. Field evaluation of emitter clogging in subsurface drip irrigation system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1272—1278.(in Chinese with English abstract)
- [20] 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)
- [21] David J Hills. Effects of chemical clogging on drip-tape irrigation uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(4): 1202—1206.
- [22] 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(12): 11—17.
Zhang Deru, Liang Zhiyong. Experiment study of effect of nonuniform fine sediment on flocculation[J]. Hydro-Science and Engineering, 1994 (12): 11—17.(in Chinese with English abstract)
- [23] 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)
- [24] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 87—93.(in Chinese with English abstract)
- [25] 王家生, 陈立, 刘林, 等. 阳离子浓度对泥沙沉速影响实验研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 169—173.
Wang Jiasheng, Chen Li, Liu Lin, et al. Experimental study on effect of positively charged ion in river on the velocity of sediment particles[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(2): 169—173.(in Chinese with English abstract)
- [26] GB/T50485—2009 微灌工程技术规范[S]. 2009.
- [27] 柴朝晖, 杨国录, 陈萌, 等. 图像分析粘性细颗粒泥沙絮体孔隙初探[J]. 泥沙研究, 2011(5): 24—29.
Chai Zhaohui, Yang Guolu, Chen Meng, et al. Study of floc pores of viscous fine sediment by image analysis [J]. Journal of Sediment Research, 2011(5): 24—29.(in Chinese with English abstract)
- [28] 刘林, 陈立, 王家生, 等. 不同离子浓度下泥沙浓度对絮凝沉降的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(1): 29—32.
Liu Lin, Chen Li, Wang Jiasheng, et al. Effect on the flocculation sedimentation velocity in different conditions of cation concentration by concentration of sediments particles[J]. Engineering Journal of Wuhan University: Engineering Science, 2007, 40(1): 29—32.(in Chinese with English abstract)
- [29] Ronojoy Duffadar, Surachate Klasin. The impact of nanoscale chemical features on micron-scale adhesion Crossover from heterogeneity-dominated to mean-field behavior[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 337(2): 396—407.
- [30] Zhou Bo, LiYunkai, LiuYaoze, et al. Effects of flow path depth on emitter clogging and surface topographical characteristics of biofilms[J]. Irrigation and Drainage, 2014,63(1): 46—58.
- [31] 赵慧明, 汤立群, 王崇浩, 等. 生物絮凝泥沙的絮凝结构实验分析[J]. 泥沙研究, 2014, (6): 12—18.
Zhao Huiming, Tang Liquan, Wang Conghao, et al. Experimental analysis on bioflocculation sediment architecture[J]. Journal of Sediment Research, 2014, (6): 12—18.(in Chinese with English abstract)
- [32] 吴泽广, 牛文全. 泥沙级配对迷宫流道滴头堵塞及毛管内泥沙沉积的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 223—228.
Wu Zeguang, Niu Wenquan. Influence of sediment composition on clogging labyrinth channels emitters and deposition in emitter-pipe[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(5): 223—228.(in Chinese with English abstract)
- [33] Li Yunkai, Yang Peiling, Xu Tingwu. CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter[J]. Irrigation Science, 2008, 26(5): 427—438.
- [34] 唐立模, 王兴奎. 推移质颗粒平均运动特性的试验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(8): 895—899.
Tang Limo, Wang Xingkui. Experimental study on average movement characteristics of bed-load particles[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(8): 895—899. (in Chinese with English abstract)
- [35] 谢巧丽, 牛文全, 李连忠. 进口结构对迷宫流道滴头性能影响的模拟研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 206—212.
Xie Qiaoli, Niu Wenquan, Li Lianzhong. Influence of inlets on performance of labyrinth channels emitter[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015, 43(1): 206—212.(in Chinese with English abstract)
- [36] Li Yunkai, Liu Hausheng, Yang Peiling, et al. Analysis of tracing ability of different sized particles in drip irrigation emitters with computational fluid dynamics[J]. Irrigation and Drainage, 2013, 62(3): 340—351.

Accelerative effect of fertigation on emitter clogging by muddy water irrigation

Li Kangyong¹, Niu Wenquan^{1,2*}, Zhang Ruochan¹, Liu Lu^{2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721007, China)

Abstract: Integrated drip irrigation and fertilizer technology develops rapidly due to its advantages of high efficiency, water saving, ability to adapt to the terrain and so on, but fertilizer may cause the clogging of drip emitter, which draws much attention. In order to explore the influence of fertilizer on emitter clogging in the process of fertigation, a periodic intermittent experiment was carried out. Three particle gradations and four fertilizer concentrations (0, 0.4, 0.6, and 1.2 g/L) were designed. The drip irrigation with fertilizer and muddy water of different particle gradations as conducted for 30 min each time under working pressure of 40 kPa. After 4 hours, the irrigation was redone. Then the relative flow rate of emitter and its uniformity were determined. After the experiment, the clogging positions of emitters were recorded. The drip tape was air-dried for 4 months for measurements of clogging status. The complete clogged emitters were used for observation by field emission scanning electron microscopy (FESEM) to analyze the structure and composition of the blockage. The results demonstrated that fertigation had an obvious acceleration effect on emitter clogging, and effect was more obvious in fertilizer solution with high concentration. When the application rate of fertilizer was 1.2 g/L, the effective irrigation times of muddy water with 3 different particle gradations decreased by 36.4%, 77.8% and 78.8% respectively; when the application rate of fertilizer was 0.4 g/L, the effective irrigation times of muddy water with 3 different particle gradations decreased by 9.1%, 33.3% and 14.3% respectively. The acceleration effect of fertilizer application on emitter was most non-obvious when the concentration of fertilizer solution was less than 0.4 g/L. The acceleration effect of fertilizer on emitter clogging was influenced by particle gradation. As for the drip tap selected in the test, the acceleration effect was more obvious in particles with dominated by 0.034-0.067 mm. Without fertilization, the particle gradation B with content of 0.034-0.067 mm particles higher than 50% was the easiest to cause clogging, followed by particle gradation A with content of 0-0.034 mm particles larger than 50%, and the particle gradation C with content of 0.067-0.1 mm particles larger than 50% was the least to cause clogging. Complete clogging was mainly in A and B particle gradation, while partial clogging was mainly in C. Fertilizer enhanced the flocculation of particles in muddy water and promoted the formation of stable and compact aggregates, which was the major cause of acceleration effect of emitter clogging. After fertigation, the surface structure of blockage was more complicated, the gap of aggregates decreased. Fertigation had little effects on clogging location and composition of blockage. The effect of fertilizer on clogging position and the main ingredient of the blockage were not obvious. After fertigation, the ratio of complete clogging to partial clogging in the 3 particle gradation increased. Compared to no fertilization, fertigation caused that the ratio of complete clogging to total clogging of emitters increased from 54% to 86.11%, and the ratio of complete clogging emitters to total tested emitters also increased from 26.67% to 34.44%. Fertigation did not change the gathering position of the blockage in emitters. The ratio of emitter import clogging to emitter channel clogging was 2.10 with fertigation, and 2.20 without fertigation. This research provides valuable information for the application and promotion of integrated drip irrigation and fertilizer technology.

Key words: fertilizers; irrigation; sediments; clogging; acceleration; clogging type