

硫酸钾对浑水滴灌滴头堵塞的影响

官雅辉^{1,2,3}, 牛文全^{1,4a}, 刘璐^{4a}, 武志广^{4b}, 潘雅阁^{4b}

(1 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;

3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 西北农林科技大学 a 水土保持研究所, b 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】分析引黄灌溉过程中肥料硫酸钾对滴头堵塞的影响, 为水肥一体化滴灌的实施提供参考。**【方法】**分别配置了3种含沙量(1.0, 1.5和2.0 g/L)和3种硫酸钾质量浓度(10, 20和30 g/L)进行间歇灌水堵塞试验, 计算滴头的平均相对流量和灌水均匀度, 利用场发射扫描电镜分析流道堵塞物结构, 收集并分析滴头输出泥沙和毛管淤积泥沙的机械组成。**【结果】**施加硫酸钾后浑水滴灌滴头堵塞出现加速现象, 硫酸钾质量浓度越大, 加速堵塞作用越明显。当硫酸钾质量浓度为30 g/L时, 含沙量1.0, 1.5和2.0 g/L处理的有效灌水次数分别较未施肥处理减少4, 9和8次, 滴头堵塞率较未施肥处理增加30%~35%; 施加硫酸钾显著增大了水的电导率, 未施加硫酸钾的浑水电导率为0.16 ms/cm, 硫酸钾质量浓度为30 g/L时, 含钾浑水的电导率为25.19 ms/cm。硫酸钾质量浓度对滴头堵塞的位置有一定影响, 对进水口堵塞影响较小, 对滴头流道堵塞影响较大, 当硫酸钾质量浓度为10, 20和30 g/L时, 流道堵塞滴头数较未施肥处理分别增加了7, 18和17个。硫酸钾改变了灌溉水的电导率, 易产生硫酸盐沉淀而造成滴头堵塞。施加硫酸钾肥后, 浑水中泥沙颗粒易吸附K⁺, 增加了泥沙颗粒之间的团聚, 导致堵塞物表面结构复杂程度提高, 堵塞物致密性和稳定性增强; 浑水中施加硫酸钾肥后, 输出泥沙中粉砂和黏粒比例较毛管淤积泥沙大, 砂粒比例则较毛管淤积泥沙小, 淤积泥沙的分形维数与平均相对流量呈显著负相关。**【结论】**选用硫酸钾滴灌时, 硫酸钾质量浓度宜小于10 g/L, 以减缓其对滴头堵塞的影响。

【关键词】 滴灌; 水肥一体化; 硫酸钾; 浑水灌溉; 滴头堵塞

【中图分类号】

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2018)10-0137-10

Effect of potassium sulfate on clogging of dripper with muddy water

GUAN Yahui^{1,2,3}, NIU Wenquan^{1,4a}, LIU Lu^{4a}, WU Zhiguang^{4b}, PAN Yage^{4b}

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4 a Institute of Soil and Water Conservation, b College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** In order to provide reference for the implementation of water and fertilizer integrated drip irrigation, this study evaluated the effects of potassium sulfate on the clogging of the drip in fertigation with muddy water such as the Yellow River water. **【Method】** Three kinds of sediment content (1.0, 1.5 and 2.0 g/L) and three kinds of potassium sulfate mass concentration (10, 20 and 30 g/L) were arranged. A kind of intermittent irrigation clogging experiment was designed, the changes of average relative

【收稿日期】 2017-07-03

【基金项目】 国家自然科学基金项目(51679205); 国家重点研发计划项目(2016YFC0400202)

【作者简介】 官雅辉(1993—), 男, 江西临川人, 在读硕士, 主要从事水土资源高效利用研究。

E-mail: guanyahui15@mails.ucas.ac.cn

【通信作者】 牛文全(1971—), 男, 甘肃甘谷人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用与节水灌溉技术研究。

E-mail: nwq@nwfau.edu.cn

flow rate and coefficient of uniformity of the dripper were calculated. After that period, the siltation's characteristics and structure of the runner block had been analyzed by field emission scanning electron microscopy. Lastly, the dripper output sediment and deposition sediment were collected and analyzed. 【Result】 Adding potassium sulfate into muddy water accelerates the clogging of dripper, and the higher potassium sulfate mass concentration was, the more obvious the effect of accelerating the clogging was. When potassium sulfate mass concentration was 30 g/L, the effective irrigation times of different sediment content, which were 1.0, 1.5 and 2.0 g/L, reduced by 4 times, 9 times and 8 times respectively and the clogging rate increased by 30%—35%. Potassium sulfate increased the conductivity significantly, the conductivity of muddy water was 0.16 ms/cm when there was no fertilization, and however the conductivity which potassium sulfate mass concentration of 30 g/L was 25.19 ms/cm. The potassium sulfate mass concentration has a certain effect on the clogging position of the dripper, which has little effect on the inlet's clogging and has a great effect on the channel block. The potassium sulfate mass concentration was 10, 20 and 30 g/L, and the total number of blocked flow blockage was increased by 7, 18 and 17 respectively than without fertilizer. Potassium sulfate changes the conductivity of irrigation water, affecting sulfate precipitation and resulting in dripper clogging. After the application of potassium sulfate, the sediment in the water is easy to adsorb K^+ , which increases the agglomeration between the sediment particles, resulting in the increase of the complexity of surface structure of the clogging and the compactness and stability of the clogging material. After applying potassium sulfate in muddy water, the proportion of silt and clay in the output sediment is larger than that in the capillary, and the proportion of sand is less than the deposition sediment in the pipe. The fractal dimension of siltation sediment was negatively correlated with the average relative flow rate. 【Conclusion】 If using the potassium sulfate fertilizer for drip irrigation, people should reduce the potassium sulfate concentration below 10 g/L, in order to slow the dripper clogging.

Key words: drip irrigation; fertigation; potassium sulfate; irrigation with muddy water; dripper clogging

为缓解农业水资源供需矛盾,滴灌技术越来越多地应用到大田作物灌溉。近年来,引黄灌区灌溉面积逐渐扩大,但黄河水所携带的泥沙成为引黄灌区节水农业发展的制约因素^[1],即使采用各类相关配套过滤设施过滤掉大部分泥沙,小于 0.1 mm 的泥沙仍会大量存在于灌溉水体中,成为滴头堵塞的重要影响因素。因此,研究黄河水等含有较高泥沙水质滴灌时滴头的堵塞过程,以及水肥一体化滴灌中滴头堵塞的发生发展规律,对提高黄河水滴灌效果,扩大黄河水滴灌面积等具有重要意义。钾肥对植物生长和发育具有重要作用,引黄灌区土壤中有效钾含量较低,为保证作物的正常生长并提高农产品产量、品质,需人为向土壤中施用钾肥^[2-3],因此研究黄河高含沙水质的硫酸钾一体化灌溉技术对引黄灌区农业生产具有十分重要的实际意义。

王心阳等^[4]利用 2 种管径的滴灌带进行清水施钾肥(氯化钾)试验,发现在灌水 6~8 次后灌水均匀度几乎为 0,滴头堵塞率达 50% 以上。刘璐等^[5]发现,随水施用硫酸钾滴灌时离子交换形成的钙镁沉淀会导致流道壁面粗糙度升高,由此引起的滴头流

道过水断面减小是造成堵塞的重要因素。Hills 等^[6]研究表明,水体中高浓度的 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是造成滴头流道堵塞的重要因素。Bozkurt 等^[7-8]研究了当地井水随水施肥(3 种施肥策略)对滴灌滴头堵塞的影响,发现同时含有硫酸根离子和钙离子的肥料较其他肥料更容易造成滴头堵塞;Kadam^[9]利用可溶性肥料进行滴灌施肥时发现,造成堵塞的主要因素是水质而不是肥料;Ansari Samani 等^[10]研究表明,增加肥料浓度会显著影响滴头流量,促进滴头堵塞。国内外学者通过研究,提出的水肥一体化滴灌的肥料类型、肥料浓度、水肥管理方式等不尽相同,目前尚未形成能有效控制堵塞的施肥技术标准,尤其是针对引黄灌区水源特性与钾肥进行水肥一体化滴灌时的滴头堵塞研究,目前还未见报道。

为此,本试验选择了 3 种不同硫酸钾质量浓度和 3 种不同含沙量水源,探究含沙浑水中施入钾肥对滴灌滴头堵塞的影响,分析滴头堵塞的机理,以期引黄灌区中浑水灌溉与施钾一体化滴灌技术的建立提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

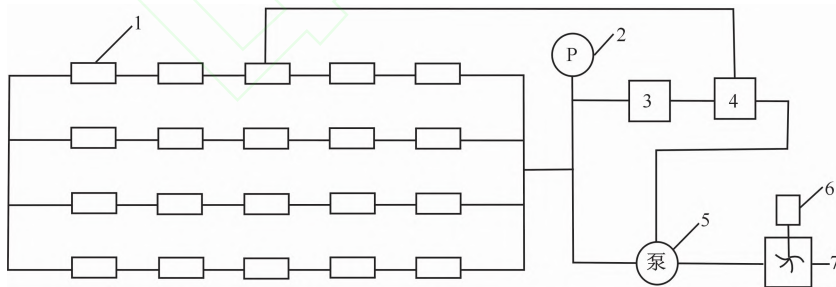
试验用毛管为内镶片式迷宫流道滴灌带(莱芜市春雨滴灌技术有限公司产品),滴头流道宽 0.67 mm,齿高 0.93 mm,流道深为 0.95 mm,齿尖角为 30° ,毛管管径为 16 mm。滴灌系统运行的常压水头为 100 kPa,而低压滴灌的工作水头不大于 50 kPa,实际生产中滴灌系统的运行压力大多介于两者之间。前期预试验发现,工作压力对滴头堵塞的影响非常小,工作压力在 60~120 kPa 时,滴头堵塞情况基本一致,这与前人的研究结果^[11]也基本相同。故本试验采用工作压力为 70 kPa。

钾肥为农用硫酸钾(国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司产品,后面简称为 K 肥), K_2O 质量分数 $\geq 51\%$,将硫酸钾加入水中,经充分搅拌溶解,静置分层后,滤除溶液底层沉淀,取上清液配置试验用肥液。

由于试验条件有限,不便于直接引用黄河水进行试验,因此以泥沙与水混配方式模拟黄河含沙水流。试验用水为自来水;试验泥沙取自渭河陕西杨凌段河漫滩地河床淤泥,即将河床淤泥表面的树枝、草等杂质剔除之后,用铁铲收集表层 0~15 cm 淤泥,带回实验室风干、研磨,最后过 0.1 mm 的筛网。试验用泥沙级配为粒径 < 0.002 mm 的占 13.24%,

$\geq 0.002 \sim 0.005$ mm 的占 3.61%, $\geq 0.005 \sim 0.01$ mm 的占 4.85%, $\geq 0.01 \sim 0.02$ mm 的占 11.98%, $\geq 0.02 \sim 0.05$ mm 的占 41.4%, $\geq 0.05 \sim 0.1$ mm 的占 24.92%,其中黏粒、粉砂和砂粒分别占 13.24%,20.44%和 66.32%。因此,为了减少测试过程中过滤设备对配置泥沙量的影响,测试系统未配置过滤装置。结合本课题组已有调查结果,试验用泥沙级配与引黄灌溉水流中泥沙级配大致相同,因此本试验所配置浑水基本能代表引黄灌溉的浑水情况。

抗堵塞测试平台(图 1)参照 SL/T 67.1-94《微灌灌水器 滴头》、GB/T 17187-2009《农业灌溉设备 滴头和滴灌管 技术规范 and 试验方法》以及国际抗堵塞研究标准草案^[12]关于室内滴灌滴头堵塞敏感性测试试验搭建而成,试验装置由压力变频器、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的间隔为 1 s,水沙混合设备由水桶和搅拌机组成,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^[13]。本试验目的是探究浑水中施用硫酸钾造成滴头堵塞的机理,选择较短的滴灌带长度能减小各滴头受工作压力和毛管不同位置泥沙含量差异性的影响,提高试验结果的可靠性。



1. 滴头;2. 压力表;3. 电脑;4. 变频箱;5. 水泵;6. 搅拌机;7. 水箱

1. Emitter;2. Pressure gauge;3. Computer;4. Frequency conversion box;5. Pump;6. Blender;7. Water tank

图 1 浑水滴灌抗堵塞试验测试平台示意图

Fig. 1 Test platform schematic of drip anti-clogging with muddy water

1.2 试验方法

根据 GB/T 50485-2009《微灌工程技术规范》^[13]并结合相关研究成果^[14],考虑到黄河水含沙量大、泥沙颗粒小的特点,按照过滤后灌溉水中最大含沙量 0.1 g/L 的 10,15,20 倍配置灌溉浑水的含沙量(ρ_s)为 1.0,1.5,和 2.0 g/L。依照生产实践,分别配置硫酸钾质量浓度(ρ_n)为 0(未施肥),10,20

和 30 g/L。采用完全组合试验,共 15 个处理(其中 3 个为清水施肥处理)。

采用固定周期的间歇浑水抗堵塞试验方法,测试压力为 70 kPa,每次灌水 30 min,灌水间隔 30 min,灌水结束后通过数据自动采集系统记录每个滴头的出水量,计算平均相对流量 q_r (%) 和灌水均匀度 C_u (%)。在试验前,先进行了清水滴灌试验,

确定工作压力为 70 kPa 时滴头的流量为 1.59 L/h。

1.3 评价指标与方法

1.3.1 平均相对流量和灌水均匀度 我国《微灌工程技术规范》认为,当滴头流量小于设计流量的 75% 时滴头发生严重堵塞^[13];国际微灌系统灌水器堵塞测试标准草案对滴灌堵塞的定义为:当滴头流量降幅达到 25%~30% 则认为发生严重堵塞^[12]。在本试验中,为适当延长试验中的灌水次数,设定当平均相对流量小于 70% 时停止试验,若灌水次数达到 20 次后,即使未达到相应的停止灌水标准也停止灌水。平均相对流量 q_r 和灌水均匀度 C_u 的计算公式分别为:

$$q_r = \frac{\bar{q}}{q_0} \quad (1)$$

$$C_u = 1 - \left(\sum_{i=1}^n |q_i - q_0| \right) / (n \cdot \bar{q}) \quad (2)$$

式中: q_r 为平均相对流量,%; q_0 为滴头额定流量,L/h; \bar{q} 为平均流量,L/h; C_u 为灌水均匀度; q_i 为第 i 个滴头的流量,L/h; n 代表滴头个数。

计算平均相对流量和灌水均匀度前,先利用流量-温度修正公式^[15]对滴头流量进行校正,以消除温度对滴头流量的影响。

1.3.2 堵塞位置 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流道与进水口完全被堵塞物填充,而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。

1.4 泥沙收集和堵塞物质分析

每次灌水结束后,将所有滴头的出水统一收集到水桶中静置,待水体变清澈形成水沙两层结构后,收集桶内泥沙,装入锡箔纸碗中,并放入烘箱(105℃)烘干。将烘干的土样装入自封袋,用天平测定其质量。灌水结束后,取下滴灌带,竖直悬挂,从顶部用水进行冲洗,底部用量杯盛装泥沙,待滴灌带内泥沙全部冲出后,静置、烘干并称取毛管淤积泥沙质量,获取毛管内泥沙淤积量并用于其他相关指标的分析。采用马尔文 2000 激光粒度仪测定毛管淤积泥沙与滴头输出泥沙的机械组成,分别计算黏粒、粉砂和砂粒比例,并参考文献^[16-17]计算淤积泥沙颗粒分形维数。将各处理的堵塞滴头在自然状态下风干,收集滴头流道内的泥沙颗粒堵塞物,并用场发射扫描电镜 S-4800 观测堵塞物质的结构。

2 结果与分析

2.1 浑水灌溉时硫酸钾质量浓度对滴头流量的影响

2.1.1 灌水过程中硫酸钾浓度对滴头平均相对流量和灌水均匀度的影响 图 2 反映了不含沙清水滴灌过程中不同质量浓度硫酸钾对滴头平均相对流量(q_r)和灌水均匀度(C_u)的影响。从图 2 可以看出,清水滴灌时,施加硫酸钾后滴头平均相对流量和灌水均匀度随灌水次数的增加下降幅度均较小,不同硫酸钾质量浓度处理之间差异不显著,灌水均匀度为 90.4%~97.0%。

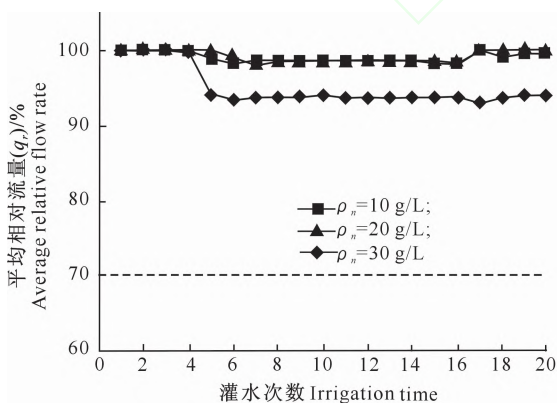


图 2 含沙量 $\rho_s = 0$ g/L 时硫酸钾质量浓度对平均相对流量与灌水均匀度的影响

Fig. 2 Sediment content $\rho_s = 0$ g/L and potassium sulfate mass concentration on average relative flow rate and coefficient of uniformity

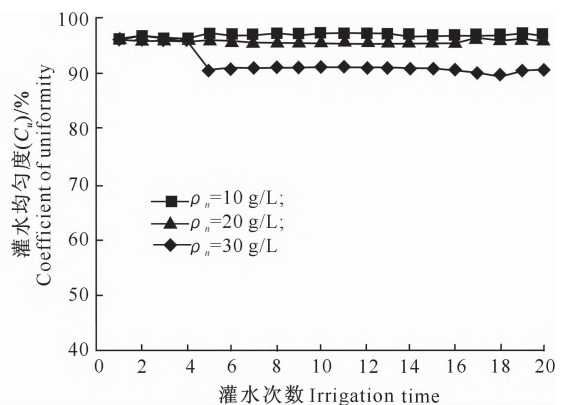


图 3~5 为滴灌过程中不同硫酸钾质量浓度与含沙量组合对滴头平均相对流量和灌水均匀度的影响情况。图 3~5 表明,在浑水滴灌时,硫酸钾质量浓度越大,随灌水次数增加滴头平均相对流量的下

降幅度越大,有效灌水次数减少。如当含沙量为 1.0 g/L 时,未施肥和为 10 g/L 硫酸钾处理的平均相对流量、灌水均匀度分别保持在 97% 和 95% 以上,随灌水次数的增加二者的下降幅度均较小;当硫酸钾

质量浓度为 20 和 30 g/L 时,平均相对流量随灌水次数的增加大幅度下降,有效灌水次数仅为 16 次。当含沙量为 1.5 g/L 时,未施肥和 10 g/L 硫酸钾处理的滴头平均相对流量随灌水次数的增加下降趋势比较缓慢;当硫酸钾质量浓度为 20 和 30 g/L 时,滴

头平均相对流量随灌水次数的增加下降幅度较大,有效灌水次数分别较未施肥处理减少了 7 次(35%)和 9 次(45%)。当含沙量为 2.0 g/L 时,硫酸钾质量浓度对滴头平均相对流量和灌水均匀度的影响与含沙量 1.5 g/L 处理基本类似。

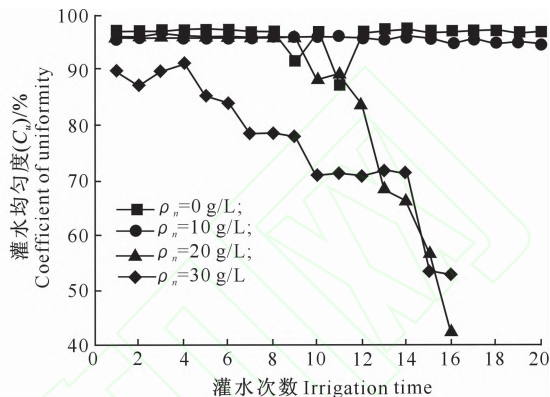
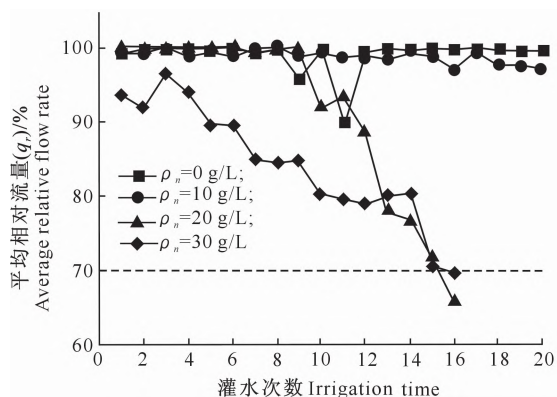


图 3 含沙量 $\rho_s = 1.0$ g/L 时硫酸钾质量浓度对平均相对流量与灌水均匀度的影响

Fig. 3 Sediment content $\rho_s = 1.0$ g/L and potassium sulfate mass concentration on average relative flow rate and coefficient of uniformity

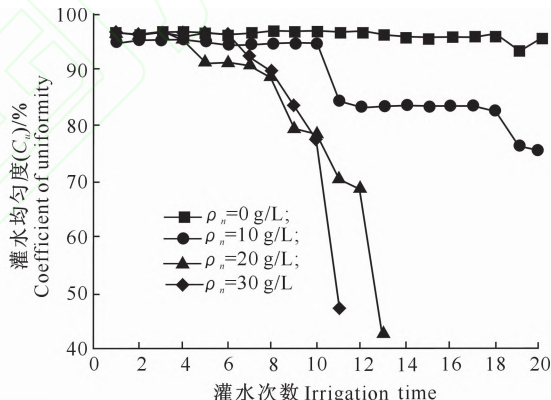
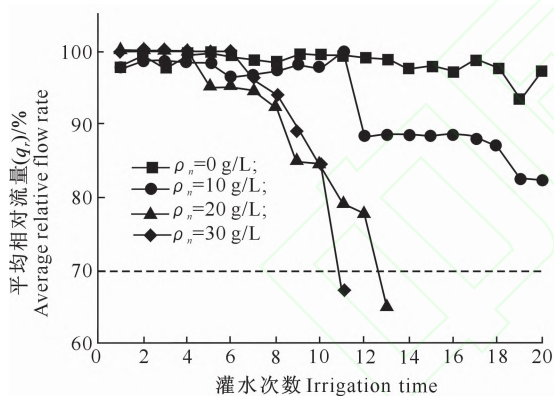


图 4 含沙量 $\rho_s = 1.5$ g/L 时硫酸钾质量浓度对平均相对流量与灌水均匀度的影响

Fig. 4 Sediment content $\rho_s = 1.5$ g/L and potassium sulfate mass concentration on average relative flow rate and coefficient of uniformity

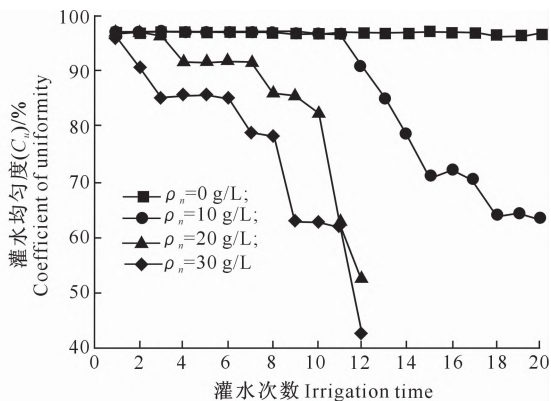
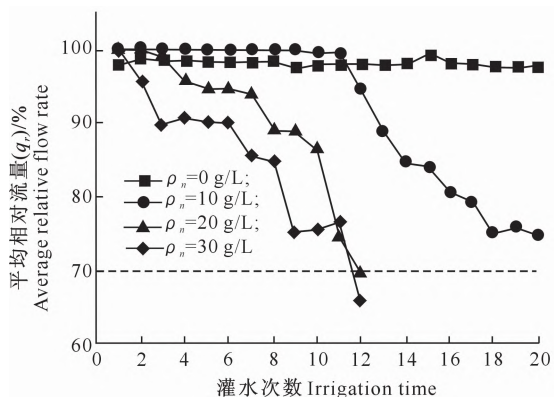


图 5 含沙量 $\rho_s = 2.0$ g/L 时硫酸钾质量浓度对平均相对流量与灌水均匀度的影响

Fig. 5 Sediment content $\rho_s = 2.0$ g/L and potassium sulfate mass concentration on average relative flow rate and coefficient of uniformity

综上可知,不同含沙量下,未施肥时滴头平均相对流量随灌水次数的增加变化非常小,而随着硫酸钾质量浓度的增加,滴头平均相对流量下降幅度增大。表明施加硫酸钾具有加速滴头堵塞的效果,且硫酸钾质量浓度越大加速堵塞的作用越明显,在硫

酸钾质量浓度较高时(20 和 30 g/L),浑水滴灌滴头更易发生堵塞。

2.1.2 灌水结束时硫酸钾质量浓度对滴头平均相对流量的影响 对灌水结束时不同处理的平均相对流量进行统计与分析,结果见表 1。

表 1 灌水结束时含沙量与硫酸钾质量浓度对滴头平均相对流量的影响

Table 1 Effect of the average relative flow under different sediment content and potassium sulfate mass concentration at the finish of dipper

硫酸钾质量浓度/(g·L ⁻¹) Potassium sulfate mass concentration	含沙量/(g·L ⁻¹) Sediment content		
	1.0	1.5	2.0
0	99.8 cd	97.3 cd	97.9 d
10.0	97.3 cd	82.4 cd	74.7 ab
20.0	69.6 a	65.0 bc	69.5 a
30.0	65.6 a	67.3 a	65.9 a

注:同列数据后标不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters indicate significant difference after the column data ($P<0.05$).

由表 1 可知,灌水结束时,不同含沙量和硫酸钾质量浓度组合处理对滴头平均相对流量均有一定程度的影响。与未施肥处理相比,施加硫酸钾处理的滴头平均相对流量均有所减小,且硫酸钾质量浓度越大,滴头平均相对流量越小。在含沙量为 1.0 g/L,硫酸钾质量浓度为 10,20 和 30 g/L 时,滴头平均相对流量分别较未施肥处理降低 2.5%,30.2% 和 34.2%;当含沙量为 2.0 g/L,硫酸钾质量浓度为 10,20 和 30 g/L 时,滴头平均相对流量分别较未施肥处理降低 23.2%,28.4% 和 32.0%。总体来看,与未施肥处理相比,不同含沙量下当硫酸钾质量浓度为 20 和 30 g/L 时,滴头平均相对流量均显著降低,而 10 g/L 硫酸钾处理的降低程度均不明显。

12 个浑水滴灌处理总共 240 个滴头)剖开,观察滴头内堵塞物所处的位置,统计并计算滴头堵塞率,结果见表 2。从表 2 可以看出,随着硫酸钾质量浓度的增加,进水口堵塞和流道堵塞滴头的数量均呈增加趋势,且流道堵塞滴头数较进水口堵塞滴头数多,增加趋势更为明显。未施肥条件下,滴头堵塞个数为 0;硫酸钾质量浓度为 10,20 和 30 g/L 时,流道堵塞滴头数分别较未施肥处理增加 7,18 和 17 个,堵塞滴头总数分别为 8,19 和 20 个,硫酸钾质量浓度越大,堵塞滴头数的增加趋势越明显。当硫酸钾质量浓度为 20 和 30 g/L 时,滴头总堵塞率大致相等,均为 30%~35%。由此可见,浑水中施加硫酸钾肥料加速了滴头的堵塞,且当硫酸钾质量浓度超过 20 g/L 时,堵塞率均超过了 30%。

2.2 浑水施肥灌溉对滴头堵塞的影响

将各试验处理的堵塞滴头(每处理 20 个滴头,

表 2 浑水含沙量和硫酸钾质量浓度对滴头堵塞位置与堵塞率的影响

Table 2 Effect of sediment content and potassium sulfate mass concentration on dipper clogging location and the rate of clogged drippers

硫酸钾质量浓度/(g·L ⁻¹) Potassium sulfate mass concentration	进水口堵塞/个 Blocked Inlet			流道堵塞/个 Blocked Flow			堵塞率/% Rate of clogged drippers		
	1.0 g/L	1.5 g/L	2.0 g/L	1.0 g/L	1.5 g/L	2.0 g/L	1.0 g/L	1.5 g/L	2.0 g/L
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	0	0	2	5	0	15	25
20	0	0	1	6	7	5	30	35	30
30	1	2	0	6	4	7	35	30	35

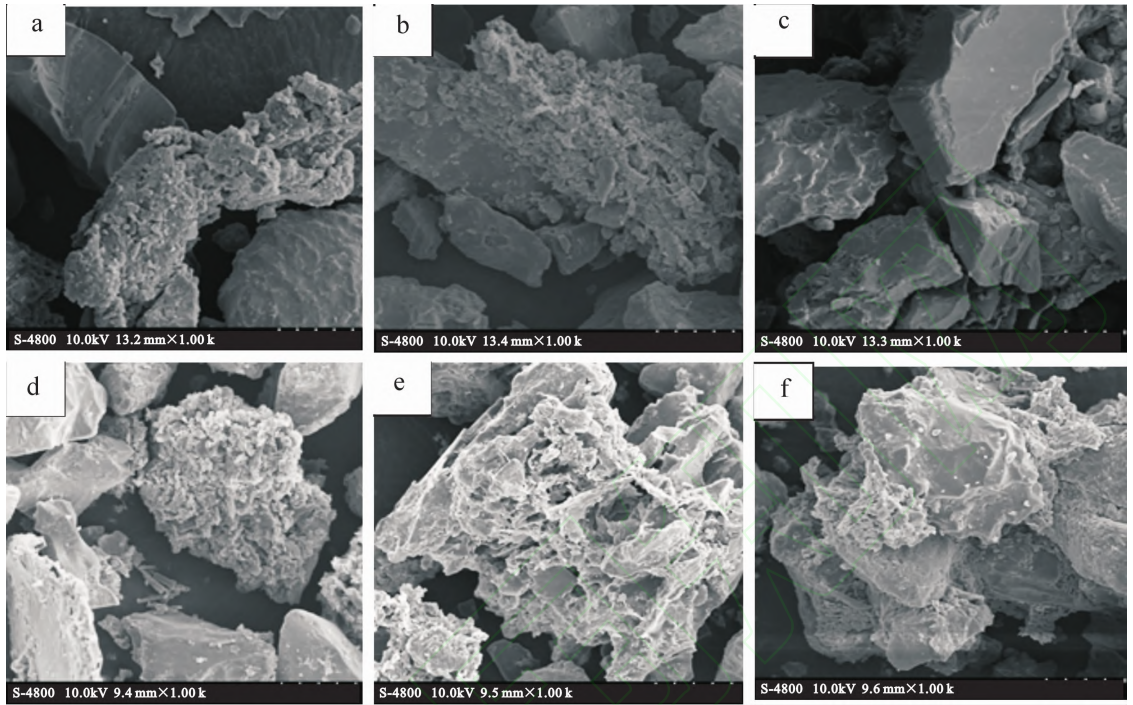
2.3 浑水灌溉时硫酸钾质量浓度对滴头堵塞物结构的影响

含沙量和硫酸钾质量浓度不同时,滴头流道内堵塞物质的结构并不相同,含沙量 1.0,1.5 和 2.0 g/L 时,未施肥及 20 g/L 硫酸钾处理条件下滴头堵塞物微观结构的扫描电镜观察结果($\times 1000$)见图

6。从图 6 可以看出,未施肥处理的滴头内较难形成大的稳定堆积体,所形成堆积体的泥沙颗粒相对较小,且主要以分散的形式存在,为悬浮颗粒碎片^[18]。当含沙量为 1.0 g/L,硫酸钾质量浓度为 20 g/L 时,堵塞物结构基本与未施肥处理相似。当含沙量为 1.5 和 2.0 g/L 时,20 g/L 硫酸钾处理的滴头堵塞

物为致密堆积体,呈团块状结构,且在泥沙颗粒表面粘附有针状物,形成的团聚体结构较密实。总体上而言,与未施肥相比,施加硫酸钾后,堵塞物较为致

密,表面结构复杂,且随着硫酸钾质量浓度的增加,堵塞物结构的致密性和稳定性增强,加速滴头堵塞的风险更大。



a. $\rho_s = 1.0 \text{ g/L}, \rho_n = 0 \text{ g/L}$; b. $\rho_s = 1.5 \text{ g/L}, \rho_n = 0 \text{ g/L}$; c. $\rho_s = 2.0 \text{ g/L}, \rho_n = 0 \text{ g/L}$;
d. $\rho_s = 1.0 \text{ g/L}, \rho_n = 20 \text{ g/L}$; e. $\rho_s = 1.5 \text{ g/L}, \rho_n = 20 \text{ g/L}$; f. $\rho_s = 2.0 \text{ g/L}, \rho_n = 20 \text{ g/L}$

图 6 不同硫酸钾质量浓度与不同含沙量滴头流道堵塞物的电镜扫描观测

Fig. 6 Blockage structure observed by FESEM under different sediment content and potassium sulfate mass concentration

2.4 施加硫酸钾对毛管淤积泥沙和滴头输出泥沙机械组成的影响

表 3 表明,与初始泥沙的机械组成相比,毛管淤积泥沙中的黏粒和粉砂比例减小,砂粒比例增大。毛管淤积泥沙的黏粒比例最小,砂粒比例最大。含

沙量为 1.0 g/L,硫酸钾质量浓度为 30 g/L 时,毛管淤积泥沙的砂粒比例最大,为 87%;含沙量为 2.0 g/L 时,随硫酸钾质量浓度的增大,毛管淤积泥沙中的黏粒和粉砂比例增大,砂粒比例减小,砂粒比例最大为 85%。

表 3 含沙量和硫酸钾质量浓度对毛管淤积泥沙机械组成的影响

Table 3 Effect of different sediment content and potassium sulfate mass concentration on the mechanical composition of deposition sediment in capillary

硫酸钾 质量浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) Potassium sulfate mass concentration	黏粒 Clay			粉砂 Silt			砂粒 Sand		
	1.0 g/L	1.5 g/L	2.0 g/L	1.0 g/L	1.5 g/L	2.0 g/L	1.0 g/L	1.5 g/L	2.0 g/L
	%								
0	3	4	4	7	11	12	90	84	84
10	5	4	5	13	13	10	82	83	85
20	7	6	6	15	17	17	78	77	77
30	3	7	6	10	16	19	87	78	75

根据各试验处理的总灌水次数,分析了首次、第 10 次和末次灌水过程中滴头输出泥沙的机械组成,结果见表 4。由表 4 可知,当含沙量为 1.0 g/L,在首次和第 10 次灌水后,施肥处理与未施肥处理相比,输出泥沙中黏粒、粉砂和砂粒比例的最大差值分

别为 7%,12%;5%,5%和 12%,13%;含沙量为 1.5 g/L,在首次和第 10 次灌水后,施肥处理与未施肥处理相比,输出泥沙中黏粒、粉砂和砂粒比例的最大差值分别为 7%,7%;7%,4%和 4%,11%;含沙量为 2.0 g/L,在首次和第 10 次灌水后,施肥处理与

未施肥处理相比,输出泥沙黏粒、粉砂和砂粒比例的最大差值分别为 9%, 8%; 3%, 10% 和 9%, 11%。该结果说明,施加硫酸钾肥对滴头输出泥沙中砂粒比例影响最大。另外还可以看出,浑水中施加硫酸

钾肥后,输出泥沙中的粉砂和黏粒比例较毛管淤积泥沙大,砂粒比例则较毛管淤积泥沙小,总体上与毛管淤积泥沙的机械组成差异较大。

表 4 含沙量和硫酸钾质量浓度对滴头输出泥沙机械组成的影响

Table 4 Effect of different sediment content and potassium sulfate mass concentration on the mechanical composition of the dipper output sediment

含沙量/ (g · L ⁻¹) Sediment content	硫酸钾质量浓度/ (g · L ⁻¹) Potassium sulfate mass concentration	黏粒 Clay			粉砂 Silt			砂粒 Sand		
		首次 First	第 10 次 10 th	末次 Last	首次 First	第 10 次 10 th	末次 Last	首次 First	第 10 次 10 th	末次 Last
1.0	0	31	15	19	44	38	33	25	47	48
	10	36	27	14	45	39	30	19	34	56
	20	26	22	19	42	33	31	32	45	50
	30	24	18	8	39	35	26	37	47	66
1.5	0	27	24	14	45	35	31	28	41	55
	10	28	24	23	46	38	35	26	38	42
	20	34	27	27	42	37	41	24	36	32
	30	30	31	26	38	39	38	32	30	36
2.0	0	40	27	22	43	35	32	17	38	46
	10	38	35	22	46	45	36	16	30	42
	20	36	33	28	41	40	36	23	27	36
	30	31	31	25	43	38	40	26	31	35

2.5 硫酸钾对毛管淤积泥沙特性的影响

表 5 反映了不同含沙量和硫酸钾处理对毛管泥沙淤积量、表面阳离子量(CEC)和泥沙分形维数的影响。施加硫酸钾肥后,淤积泥沙表面阳离子量(CEC)越大,说明泥沙颗粒表面吸附的 K⁺ 量越多。淤积泥沙质量分形维数越大,说明泥沙颗粒表面吸附的黏粒等细小颗粒较多,形成的泥沙颗粒团聚体结构越复杂,反之,淤积泥沙颗粒表面吸附的细小颗

粒较少,淤积泥沙颗粒团聚体结构比较松散,易被水流冲刷而随水流出。由表 5 可知,当含沙量为 1.0 和 1.5 g/L 时,施加硫酸钾处理的毛管泥沙淤积量和 CEC 均小于未施肥处理,且 CEC 随硫酸钾质量浓度的增大而增大。当含沙量为 1.5 和 2.0 g/L 时,施加硫酸钾处理的淤积泥沙分形维数较未施肥大,且均随硫酸钾质量浓度的增大而增大。

表 5 含沙量和硫酸钾质量浓度对毛管淤积泥沙特性的影响

Table 5 Effect of different sediment content and potassium sulfate mass concentration on siltation sedimentation characteristics

硫酸钾质量浓度/(g · L ⁻¹) Potassium sulfate mass concentration	淤积量/g Sedimentation volume			CEC/(cmol · kg ⁻¹)			分形维数 Fractal dimension		
	1.0 g/L	1.5 g/L	2.0 g/L	1.0 g/L	1.5 g/L	2.0 g/L	1.0 g/L	1.5 g/L	2.0 g/L
0	206.43	165.14	172.97	75.51	92.10	94.34	2.03	2.07	2.11
10	95.81	139.00	195.20	67.52	78.02	83.34	2.15	2.08	2.13
20	90.02	85.01	78.80	69.23	81.65	89.99	2.24	2.22	2.20
30	102.67	77.29	88.00	74.42	82.28	95.26	2.02	2.23	2.22

经测定,未施肥处理灌溉用水的 pH 值为 8.63, 施加硫酸钾后灌溉用水的 pH 值为 7.8~8.2, 不同处理之间 pH 值差异较小。表 6 显示,不同含沙量

灌溉用水的电导率均随着硫酸钾质量浓度的增加而变大。

表 6 硫酸钾质量浓度对灌溉水电导率的影响

Table 6 Effect of potassium sulfate mass concentration on the conductivity of water in different sediment content

硫酸钾质量浓度/(g · L ⁻¹) Potassium sulfate mass concentration	电导率/(ms · cm ⁻¹) Conductivity		
	1.0 g/L	1.5 g/L	2.0 g/L
0	0.17	0.16	0.16
10	9.86	8.52	8.82
20	17.65	16.73	17.75
30	24.89	24.51	25.19

3 讨论

3.1 硫酸钾肥加速滴头堵塞的机理

本试验发现,浑水中加入硫酸钾后,随硫酸钾质量浓度增大,滴头堵塞风险增大。本试验用泥沙颗粒的黏土矿物主要为 2:1 型黏土矿物^[19],2:1 型黏土矿物的八面体孔隙的 2/3 被 Al^{3+} 或 Fe^{3+} 占据, Fe^{3+} 易被还原成 Fe^{2+} ,致使层间阳离子的固定能力得到增强^[20-21]。另外, K^+ 挤入层间易造成层间塌陷,阻止层间其他阳离子的释放^[22],导致泥沙颗粒间易形成致密团聚结构。本试验在浑水中施加硫酸钾后, K^+ 含量显著增大, K^+ 被泥沙颗粒吸附后, SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 结合产生硫酸钙和硫酸镁沉淀,会加剧滴头的堵塞^[23-24]。加入硫酸钾肥后,灌溉用水的 pH 值为 7.8~8.2,电导率为 8.52~25.19 ms/cm,也属于易造成滴灌滴头堵塞的水质^[25-27]。故本试验表明,硫酸钾质量浓度越大,滴头堵塞的风险越大。

Tarchitzky 等^[28] 研究发现,滴头堵塞物中存在丝状或网状细菌,而本试验并未发现这些细菌的存在,说明生物堵塞并不是施加硫酸钾后滴头堵塞风险增大的主要原因,物理和化学堵塞仍是其主因。本试验中发现,随硫酸钾质量浓度的增加,滴头流量和有效灌水次数快速下降,故在施加硫酸钾的水肥一体化滴灌过程中,应控制硫酸钾的质量浓度,并通过毛管冲洗等措施,降低滴头堵塞的发生和发展^[29]。

3.2 硫酸钾对滴头堵塞物结构及堵塞位置的影响

本研究发现,未施肥处理的堵塞物团聚体比较松散,颗粒间空隙较大,絮状物质较少,易被冲散。施加硫酸钾后,水中大量的 K^+ 易吸附在泥沙颗粒表面,填充团聚体的孔隙,易使堵塞物形成更复杂、更大块的团粒结构^[30]。此外,淤积泥沙的 CEC 和质量分形维数随硫酸钾质量浓度的变化进一步证明施硫酸钾肥更易形成结构复杂的泥沙颗粒团聚体。因此,施加硫酸钾处理的堵塞物更加致密、稳定。

本试验中,清水中施加硫酸钾处理的滴头未出现堵塞现象,这与刘璐等^[5] 的研究结果相同。浑水中施加硫酸钾后,流道堵塞的滴头数量增加。滴头的进口、迷宫流道内低流速区和强紊流区都是泥沙颗粒易沉积并造成滴头堵塞的位置^[31-32],施加硫酸钾易形成大而稳定的团聚体,增加了滴头进水口和流道内缓水区淤积的机率。进水口处的淤积物易被水流带进流道内,而流道内淤积的致密泥沙团聚体

不易被水流带走。因此,流道内发生堵塞的滴头数更多。

3.3 硫酸钾对滴头输出泥沙和毛管淤积泥沙机械组成的影响

浑水中施加硫酸钾肥后,对滴头输出泥沙中的砂粒比例影响最大,说明浑水中的砂粒是滴头堵塞的主要组分。毛管淤积泥沙中的砂粒所占比例越大,越易造成滴头堵塞;随着含沙量的增加,滴头输出泥沙的砂粒比例下降,毛管内淤积泥沙的砂粒比例增多。因此浑水中施加硫酸钾肥时,含沙量越高越易造成滴头堵塞。

毛管内泥沙淤积量受灌水时间和施肥等因素的综合影响。未施肥时,滴头不易堵塞,有效灌水次数较多,毛管内淤积的泥沙量较大。施加硫酸钾后,滴头易堵塞,总灌水量减少,毛管内泥沙淤积量减少。

4 结论

1) 浑水中施加硫酸钾肥后,滴灌滴头堵塞加速,且硫酸钾质量浓度越大,加速堵塞作用越明显。当硫酸钾质量浓度小于 10 g/L 时,硫酸钾对浑水滴灌滴头堵塞的影响较小。

2) 随着硫酸钾质量浓度的增大,一方面,浑水中的 K^+ 含量增加,水的电导率增大,滴头堵塞物表面结构的复杂程度明显增强,泥沙团聚体变大,致密性和稳定性增强;另一方面,浑水中容易产生硫酸盐沉淀,滴头堵塞风险明显增大。

3) 砂粒是造成滴头堵塞的主要组分,黏粒和粉砂则相对容易随水流流出。

[参考文献]

- [1] 许生原. 引黄灌区灌溉事业可持续发展问题研究: 以位山灌区为例 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2010.
Xu S Y. Studies on irrigation projects sustainable development in Yellow River irrigation area: for example Weishan Irrigation [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2010.
- [2] 乔晓宇. 不同钾肥施用量对桃树营养状况及果实品质的影响 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Qiao X Y. Research on effects of potassium on tree nutrient and quality of *Prunus persica* L. Batsch [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.
- [3] 黄绍文, 金继运, 王泽良, 等. 北方主要土壤钾形态及其植物有效性研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 156-164.
Huang S W, Jin J Y, Wang Z L, et al. Native potassium forms and plant availability in selected soils from Northern China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(2): 156-164.

- [4] 王心阳,王文娥,胡笑涛.滴灌施肥对滴头抗堵塞性能及系统均匀度影响试验研究[J].中国农村水利水电,2015(11):1-5.
Wang X Y, Wang W E, Hu X T. Research on the emitter anti-clogging performance and system uniformity caused by fertigation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(11):1-5.
- [5] 刘璐,牛文全,武志广,等.施肥滴灌加速滴头堵塞风险与诱发机制研究[J].农业机械学报,2017,48(1):228-236.
Liu L, Niu W Q, Wu Z G, et al. Risk and inducing mechanism of acceleration emitter clogging with fertigation through drip irrigation systems [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(1):228-236.
- [6] Hills D J, Nawar F M, Waller P M. Effects of chemical clogging on drip-tape irrigation uniformity [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(4):1202-1206.
- [7] Bozkurt S, Ozekici B. The effects of fertigation managements on clogging of in-line emitters [J]. Journal of Applied Sciences, 2006, 6(15):3026-3034.
- [8] Bozkurt S, Ozekici B. The effects of fertigation management in the different type of in-line emitters on trickle irrigation system performance [J]. Journal of Applied Sciences, 2006, 6(5):1165-1171.
- [9] Kadam S A. Effect of fertigation on emission uniformity of drip irrigation system [J]. International Journal of Agricultural Engineering, 2009, 2(1):72-74.
- [10] Ansari Samani F, Boroomand Nasab S. Effect of fertigation on clogging of three types of emitters in Iran [J]. Nature and Science, 2012, 10(10):21-25.
- [11] 王心阳,王文娥,胡笑涛,等.泥沙粒径及压力对滴头抗堵塞性能的影响[J].节水灌溉,2014(10):18-21.
Wang X Y, Wang W E, Hu X T, et al. Influences of particle diameter and inlet pressure on emitter clogging [J]. Water Saving Irrigation, 2014(10):18-21.
- [12] International Organization for Standardization. ISO/TC 23/SC 18/WG5 N12 Clogging test methods for emitters [S]. Geneva, Switzerland; International Organization for Standardization, 2006.
- [13] 中华人民共和国水利部. GB/T 50485—009 微灌工程技术规范 [S]. 北京:中国计划出版社,2009.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50485—2009 Technical code for microirrigation engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [14] 李康勇,牛文全,张若婵,等.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.
Li K Y, Niu W Q, Zhang R C. Accelerative effect of fertigation on emitter clogging by muddy water irrigation [J]. Transactions of the Chinese society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17):81-90.
- [15] Pei Y T, Li Y K, Liu Y Z, et al. Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation [J]. Irrigation Science, 2014, 32(2):141-157.
- [16] 郭明明,王文龙,李建明,等.神府煤田土壤颗粒分形及降雨对径流产沙的影响[J].土壤学报,2014,51(5):983-992.
Guo M M, Wang W L, Li J M, et al. The influence of soil particles fractal and rainfall on runoff and sediment yield in Shenfu coal field [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5):983-992.
- [17] 刘森,吴媛媛,杨明义,等.次降雨过程中侵蚀泥沙分形维数的变化特征[J].中国水土保持科学,2015,13(2):37-43.
Liu M, Wu Y Y, Yang M Y, et al. Variation characteristics of fractal dimension of eroded sediment under different rainfall conditions [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(2):37-43.
- [18] Li Y K, Liu Y Z, Li G B, et al. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters [J]. Irrigation Science, 2012, 30(1):43-56.
- [19] 王兆印,王文龙,田世民.黄河流域泥沙矿物成分与分布规律[J].泥沙研究,2007(5):1-8.
Wang Z Y, Wang W L, Tian S M. Mineral composition and distribution of the sediment in the Yellow River basin [J]. Journal of Sediment Research, 2007(5):1-8.
- [20] 徐国华,鲍士旦,史瑞和.生物耗竭土壤的层间钾自然释放及固钾特性[J].土壤,1999,31(4):182-185.
Xu G H, Bao S D, Shi R H. Natural release and potassium fixation of potassium in bio-depleted soils [J]. Soil, 1999, 31(4):182-185.
- [21] Khaled E M, Stucki J W. Iron oxidation state effects on cation fixation in smectites [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55:550-554.
- [22] 丛日环,李小坤,鲁剑巍.土壤钾素转化的影响因素及其研究进展[J].华中农业大学学报,2007,26(6):907-913.
Cong R H, Li X K, Lu J W. Advances in research on influence factors of soil potassium transformation [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26(6):907-913.
- [23] 陈竹君,高佳佳,赵文艳,等.磷钾肥施用对日光温室土壤溶液离子组成的影响[J].农业工程学报,2011,27(2):261-266.
Chen Z J, Gao J J, Zhao W Y, et al. Effects of application of phosphorus and potassium fertilizers on compositions of soil solution in solar greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2):261-266.
- [24] 余海英,李廷轩,周健民.设施土壤盐分的累积、迁移及离子组成变化特征[J].植物营养与肥料学报,2007,13(4):642-650.
Yu H Y, Li T X, Zhou J M. Salt accumulation, translocation and ion composition in greenhouse soil profiles [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4):642-650.
- [25] Shinde D G, Patel K G. Clogging behaviour of drippers of different discharge rates as influenced by different fertigation and irrigation water salinity levels [J]. Journal of Environmental Research and Development, 2012, 7(2):917-922.
- [26] Zhang L L, Yang P L, Ren S M, et al. Chemical clogging of emitters and evaluation of their suitability for saline water drip irrigation [J]. Irrigation and Drainage, 2016, 65(4):439-450.
- [27] Liu H J, Huang G H. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent [J].

- Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 745-756.
- [28] Tarchitzky J, Rimon A, Kenig E, et al. Biological and chemical fouling in drip irrigation systems utilizing treated wastewater [J]. Irrigation Science, 2013, 31(6): 1277-1288.
- [29] Feng D, Kang Y H, Wan S Q, et al. Lateral flushing regime for managing emitter clogging under drip irrigation with saline groundwater [J]. Irrigation Science, 2017, 35(3): 217-225.
- [30] 陈 勇, 邵曼君, 陈慧萍. 水溶液中硫酸钾晶体生长动力学 [J]. 化工学报, 2003, 54(12): 1766-1769.
Chen Y, Shao M J, Chen H P. Crystal growth kinetics from aqueous solution of potassium sulfate [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(12): 1766-1769.
- [31] 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 Q L, Niu W Q, Li L Z. Influence of inlets on performance of labyrinth channels emitter [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2015, 43(1): 206-212.
- [32] Li Y K, Liu H S, Yang P L, 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.