doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.037

Y 型网式过滤器堵塞过程对有机肥浓度的响应研究

朱德兰[1,2]　王　蓉[1,2]　阮汉钺[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.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:为研究水肥一体化设备中用于过滤有机肥的 Y 型网式过滤器的堵塞规律,对 Y 型网式过滤器在初始流量 500 L/h、水源压力 117.6 kPa 下,设置 25、30、40、50 g/L 共 4 种黄腐酸钾有机肥肥液质量浓度,进行了过滤器堵塞试验,分析了 Y 型网式过滤器的局部水头损失与单个滤孔滤网清洁度(单个滤孔有效过水断面面积与孔隙总面积比值)S/S_0的关系,并利用 XRD 分析了过滤器内堵塞物质的成分。结果表明:肥液质量浓度对过滤器滤网清洁度影响显著,建议肥液质量浓度不超过 40 g/L;过滤器局部水头损失在 S/S_0 减小到 10% 后才逐渐开始增大,过滤器局部水头损失与滤网清洁度、肥液质量浓度有关,利用多项式拟合给出了过滤器滤网清洁度与肥液质量浓度、施肥持续时间的关系式及局部水头损失与肥液质量浓度、滤网清洁度的关系式;滤网堵塞物质主要成分为硫酸钙、草酸钙。本研究结果可为水肥一体化设备中过滤器的选择提供理论参考。

关键词:水肥一体化;过滤器;有机肥;局部水头损失;滤网清洁度;堵塞物成分

中图分类号:S224.21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)07-0332-06　　**OSID**:

Response of Process of Y-net Filter Clogging to Organic Fertilizer Concentration

ZHU Delan[1,2]　WANG Rong[1,2]　RUAN Hancheng[1,2]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas*, *Ministry of Education*, *Northeast A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In order to study the blockage law of Y mesh filter used to filter organic fertilizer in water and fertilizer integrated equipment, the clogging test of Y type mesh filter was carried out at the initial flow rate of 500 L/h and the water source pressure of 117.6 kPa, and the concentration levels of four kinds of potassium fulvic acid organic fertilizer solution, 25 g/L, 30 g/L, 40 g/L and 50 g/L were set up. The relationship between the local head loss coefficient of Y type mesh filter and the effective cross section area of single filter, the proportion of single filter effective cross section area and total area S/S_0 was analyzed, and the composition of blockage material in the filter was analyzed by XRD. The results showed that the concentration of fertilizer solution had a significant effect on the screen cleanness of the filter. It was suggested that when the concentration of fertilizer solution was not more than 40 g/L; the flow rate of 4 m head loss in the filter was decreased by 17% ~20%. The local head loss of filter was increased gradually when the screen cleanness was reduced to 10%. Correlation analyses displayed the local head loss coefficient of filter was only related to S/S_0 and independent of fertilizer concentration. Furthermore, the formula for calculating the local head loss coefficient of filter under potassium fulvic acid organic fertilizer was put forward by using multinomial fitting; filter-element blocking substances mainly included calcium sulfate and calcium oxalate. The research results can provide some theoretical reference for the selection of filter in water and fertilizer integrated machine.

Key words: water and fertilizer integration; filter; organic fertilizer; local head loss; screen cleanness; blockage composition

收稿日期:2019-11-05　修回日期:2019-12-02

基金项目:杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2017XCY-09)、"十二五"国家科技支撑计划项目(2015BAD22b01-02)和国家外国专家局"111"计划项目(B12007)

作者简介:朱德兰(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail:dlzhu@126.com

0　引言

水肥一体化可显著提高农作物产量，目前已广泛应用于我国农业灌溉领域。为了减少肥料对土壤和地下水的污染，黄腐酸钾有机肥在农业中得到大面积使用。过滤设备是水肥一体化技术设备的重要组成部分，不同浓度含有肥料的灌溉水影响整个系统的效率及使用寿命。若滤网不能有效拦截粒径较小的颗粒物质，则灌溉出口易发生堵塞，因此，许多学者研究了过滤器目数、类型、过滤级数和灌溉水泥沙含量、泥沙颗粒级，以及无机肥料类型、肥液浓度等因素对过滤器堵塞的影响[1-11]。文献[1-5]对网式过滤器进行了堵塞试验，发现滤网堵塞经历介质堵塞和滤饼堵塞 2 个过程，形成的滤饼内层泥沙颗粒粒径较大、外层颗粒粒径分布较均匀，滤网内外压降随水流流量和滤饼层厚度的增大而增大，滤网孔径越小，滤饼孔隙率越小，滤网两侧压降越大。阿不都沙拉木[12]探讨了 120 目以上的网式和叠片式过滤器对含藻类地表水的过滤效果，结果表明，叠片式过滤器过滤效率是网式的 2 倍多，表面附着物是网式过滤器的 2 倍多，堵塞时间是网式过滤器的 4 倍。李楠等[13]研究了含沙量对 2 种叠片式过滤器水头损失的影响，结果表明，含沙量达到一定量时，水头损失会出现激增。秦天云等[14]以网式和叠片式过滤器为研究对象，进行了 3 种质量浓度浑水工况下的水头损失和过滤性能试验，结果表明，随流量、含沙量的增大，过滤器初始水头损失增大，过滤周期变短。王睿[15]研究了不同浓度磷酸二胺条件下网式和叠片式过滤器的水头损失、总过水流量，结果表明，网式过滤器肥液平均质量分数在 0.117% 以下、叠片式过滤器肥液平均质量分数在 0.067% 以下的过滤器不易发生堵塞。王睿等[16-17]对一级过滤器（网式 80 目、叠片 80 目、叠片 40 目）和二级过滤器（网式 120 目、叠片 120 目）相互组合下的过滤系统的堵塞程度进行了比较，结果表明，采用一级网式 80 目、二级叠片式 120 目过滤器的过滤效果及肥液利用率较高。然而，对于有机肥灌溉下 Y 型网式过滤器的堵塞规律却鲜有研究报道。

本文以 DN63 80 目 Y 型网式过滤器为试验对象，研究不同质量浓度黄腐酸钾有机肥肥液下过滤器的堵塞过程及正常使用时间，分析过滤器局部水头损失与有效过水断面面积、滤网清洁度（滤网有效过水断面面积与滤网总面积之比）的关系，研究过滤器局部水头损失的计算方法，以直接判断过滤器在不同肥液质量浓度下的堵塞程度，并对过滤器堵塞物质进行成分分析，为肥料成分决策提出建议。

1　材料与方法

1.1　试验装置

试验在西北农林科技大学旱区节水农业研究院灌溉水力学实验大厅进行，试验装置如图 1 所示，整个试验过程为闭合回路。肥料罐后吸肥泵（自吸泵，粤禾机电有限公司）额定扬程 15 m，额定流量 2 m^3/h，吸肥泵后分两支管路，一支管路注入肥料罐，用于调节流量，降低对吸肥泵的损害，另一支管路进入主管道。主管道中安装于过滤器前后的压力传感器（上海隆旅电子科技有限公司）量程为 -100 ~ 60 000 kPa，安装于过滤器进口前的涡轮流量计（上海帆扬机电公司）设计流量 1 ~ 10 m^3/h，入口直径 25 mm，用来观测实时压力及流量。主管道肥液最后回到肥料罐中，该装置为循环试验装置。

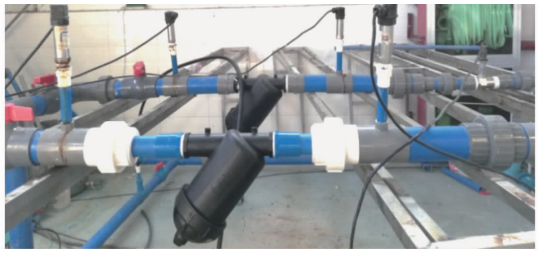

图 1　试验装置

Fig. 1　Test device

1.2　试验材料

试验所用 80 目 Y 型网式过滤器（顺绿有限公司）进口直径 63 mm，设计流量 0.5 ~ 25 m^3/h，滤孔骨架为圆柱形不锈钢钢丝。试验中所用水为杨凌地区自来水，水质参数见表 1。肥料为黄腐酸钾有机肥（济南顺阳化工科技有限公司，有机质质量分数 65% ~71%，有机钾质量分数 7% ~11%，有机磷质量分数 0.99%，可用于植物滴灌、喷施等），黄腐酸是一种天然低分子有机酸的混合物，主要从褐煤、泥炭中提取，其中主要化学物质是苯羧酸、甲基苯羧酸、醌酸、羟基苯羧酸、黄酮类等生理活性化合物，其他从煤中带来的少量物质包括 Ca、Mg、Fe、Al、Si、S、P、Zn、Mn、Cu 等。

表 1　杨凌地区自来水部分水质参数

Tab. 1　Parameters of tap water quality in Yangling

参数	pH 值	CaO 质量浓度/（mg·L^{-1}）	Ca^{2+} 质量浓度/（mg·L^{-1}）
数值	7.92	27.96	28.80

1.3　试验设计

本研究在各浓度有机肥条件下对过滤器进行堵塞试验，以 80 目 Y 型网式过滤器为测试对象，大田水肥一体设备常用吸肥量 500 L/h 作为初始流量，

黄腐酸钾有机肥作为试验材料,已知实际运用中黄腐酸钾有机肥用量为 150 kg/hm^2,且黄腐酸钾有机肥在喷灌和滴灌中常按 1 000 ~ 2 000 倍稀释,而水肥一体化机中灌水、施肥同时进行,综合考虑灌水流量、灌溉时间、吸肥量、黄腐酸钾有机肥的稀释程度,配置 25、30、40、50 g/L 4 种肥液质量浓度,水源压力为 117.6 kPa。

试验数据的获取:首先通过调节阀门控制主管道流量、压力至试验设计值;然后启动吸肥泵,待吸肥稳定后,通过连接压力传感器和涡轮流量计的计算机、显示屏观测过滤器前后压力和流量,每隔 2 h 记录一次数据,试验系统不间歇工作直至过滤器局部水头损失达到 4 m 或连续工作 120 h,关闭吸肥泵,每种工况下两组重复。将运行结束的过滤器滤网干燥,取出堵塞物质保存,最后对堵塞物通过 X 射线衍射仪进行成分检测并用 Jade 软件进行成分分析。

1.4 测试指标

过滤器堵塞以过滤器局部水头损失为指标。滤网过流均分到网格过流,如图 2 所示。局部水头损失计算公式为

$$h_j = \zeta \frac{v^2}{2g} \tag{1}$$

其中

$$\zeta = 2.42 \left(\frac{D-d}{d} \right)^{\frac{4}{3}} \tag{2}$$

式中 h_j——局部水头损失,m

ζ——局部水头损失系数[18]

v——流速,m/s

g——重力加速度,取 9.8 m/s^2

D——单个滤孔边长,mm

d——单个滤孔有效孔隙边长,mm

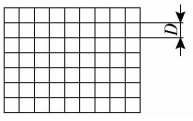

图 2 滤网过流示意图

Fig. 2 Schematic of filter screen flow

2 结果与分析

2.1 过滤器水头损失随施肥时间的变化

图 3 是不同质量浓度黄腐酸钾肥液下 80 目 Y 型网式过滤器水头损失随时间的变化曲线,可以发现,随着运行时间的增加,水头损失均增大,增大幅度随着黄腐酸钾肥液质量浓度的增大而增大。当肥液质量浓度为 25 g/L 时,过滤器在试验结束时水头损失未达到 4 m,仅为 2 m,而当肥液质量浓度为 30、40、50 g/L 时,过滤器分别在 136、61、31 h 水头损失达到 4 m。

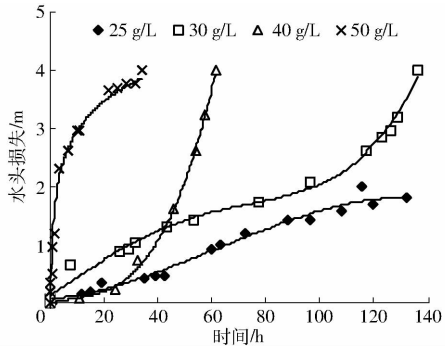

图 3 水头损失变化曲线

Fig. 3 Changing curves of head loss

2.2 肥液质量浓度对过滤器滤网清洁度的影响

通过式(1)、(2)计算得到有效孔隙边长 d,进行计算得到过滤器堵塞过程中单个滤孔有效过水断面面积 S(初始有效过水断面面积为滤孔孔隙总面积 S_0),发现有效过水断面面积减小到一定程度前水头损失只增长 0.01 m,故只将水头损失从 0.01 m 开始所对应 S 绘制到图 4 中。由图 4 可以看出,各肥液质量浓度下当水头损失为 0.01 m 时,S/S_0 小于 0.1,说明滤网在开始运行后短时间内迅速拦截堵塞物质造成滤孔孔隙大部分覆盖,有效过水断面面积减小迅速。当滤孔有效过水断面面积减小到一定程度后,滤网表面已形成一层滤饼,可拦截更小的颗粒物质,而此后较长一段时间内 S 变化幅度趋于平缓,说明这段时间内堵塞物质逐渐叠加覆盖在滤饼表面,仅少量覆盖在孔隙表面,肥液质量浓度越小该阶段历时越长。在 50 g/L 肥液质量浓度下过滤器 S 下降迅速,有效过水断面在 28 h 处接近于 0,说明滤网几乎完全被覆盖,该肥液质量浓度下过滤器很容易发生严重堵塞。

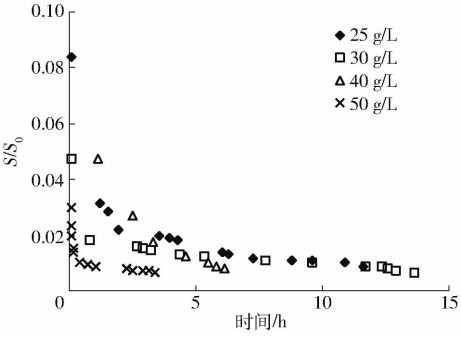

图 4 滤网清洁度变化过程

Fig. 4 Change process of screen cleanness

由于黄腐酸钾是一种极易溶于水的有机肥,一般不容易造成堵塞。本试验中,肥液质量浓度超过 40 g/L时滤网快速堵塞,有效过水断面面积快速减小,因此建议水肥一体化机中黄腐酸钾肥液质量浓度不超过 40 g/L。

为进一步确定滤网清洁度与肥液质量浓度、施

肥持续时间的关系，通过 Origin 软件拟合公式，得到滤网清洁度与肥液质量浓度、施肥持续时间之间的关系式为

$$S/S_0 = (2.424 + 0.1025c - 0.00175c^2) \cdot t^{-0.6459 + 0.01809c - 2.78 \times 10^{-4}c^2} \quad (3)$$

式中　c——肥液质量浓度，g/L

t——施肥持续时间，h

根据式(3)可以直接计算得到不同质量浓度黄腐酸钾肥液条件时 Y 型网式过滤器在不同时刻的滤网清洁度。

2.3　局部水头损失与滤网清洁度关系分析

通过式(2)计算得到各肥液质量浓度下过滤器的局部水头损失系数 ζ，其与滤网清洁度 S/S_0 的关系如图 5 所示。

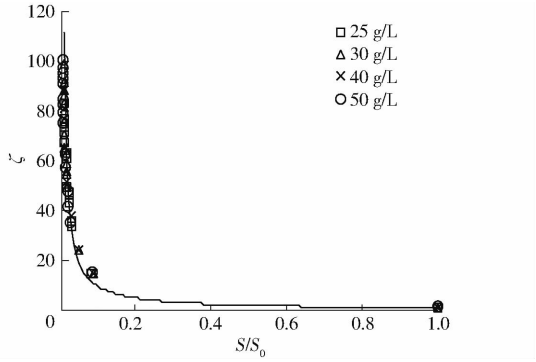

图 5　ζ 与 S/S_0 的关系

Fig. 5　Relationship between local head loss coefficient and S/S_0

由图 5 可以看出，S/S_0 减小到 0.1 以下局部水头损失系数才快速增大，说明水头损失通常是在 S/S_0 减小到 0.1 后才逐渐增大，4 种肥液质量浓度下，局部水头损失系数均随 S/S_0 减小而增大，通过拟合曲线发现 4 种肥液质量浓度下局部水头损失系数与 S/S_0 均存在一定的关系。

进一步分析滤网清洁度对局部水头损失的影响，结果如图 6 所示，可以看出，不同肥液质量浓度时局部水头损失与滤网清洁度的关系有所差异，同一滤网清洁度，肥液质量浓度大的过滤器局部水头损失大。因此，进一步通过 SPSS 软件对过滤器局部水头损失与滤网清洁度、肥液质量浓度的相关性进行分析(表 2)。结果表明，局部水头损失与滤网清洁度、肥液质量浓度均显著相关，因此为直接判断过滤器在不同肥液质量浓度时滤网清洁度对应的局部水头损失，通过 Origin 拟合公式，得到黄腐酸钾肥液下 80 目 Y 型网式过滤器局部水头损失与滤网清洁度、肥液质量浓度的关系式为

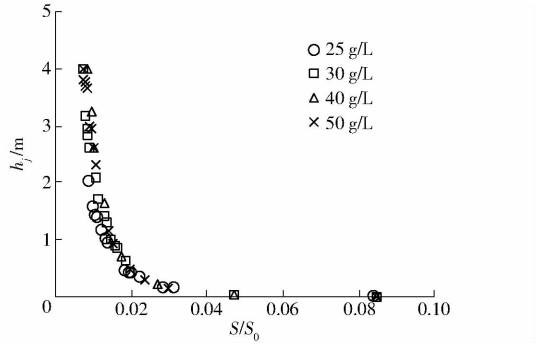

图 6　h_j 与 S/S_0 的关系

Fig. 6　Relationship between local head loss and S/S_0

$$h_j = (-5.48 + 0.0.397c - 0.0048c^2) \cdot \left(\frac{S}{S_0}\right)^{5.61 - 0.396c + 0.005c^2} \quad (4)$$

表 2　h_j、c、S/S_0 的相关系数

Tab. 2　Correlation coefficient of h_j, c and S/S_0

	h_j	c	S/S_0
h_j	1	−0.312*	−0.356**
c	−0.233	1	0.004
S/S_0	−0.356**	0.004*	1

注：** 表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)显著，* 表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)显著。

因此不同质量浓度黄腐酸钾肥液下 80 目过滤器在不同时间的局部水头损失均可由式(3)、(4)计算。

2.4　堵塞物质分析

图 7 为过滤器滤网内堵塞物质的 X 射线衍射图谱，将该图谱用配套软件 Jade 6.5 进行定性分析。从图 7 可以看到，衍射峰比较多且杂乱，说明过

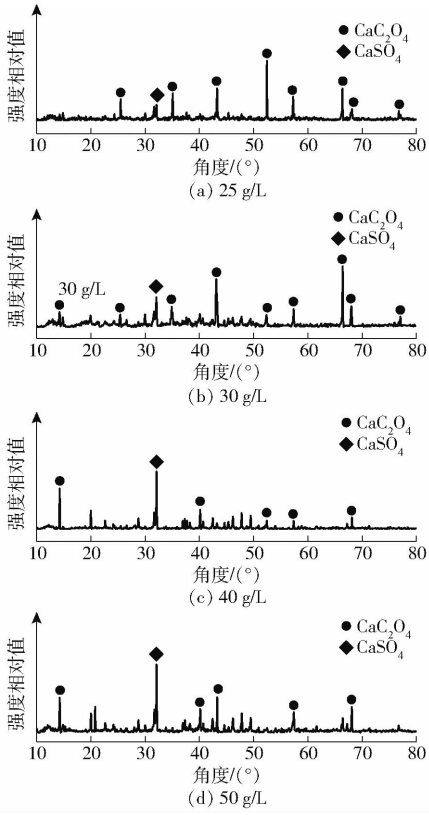

图 7　X 射线衍射图谱

Fig. 7　XRD patterns

滤器堵塞物质的化学组成成分比较复杂,软件分析结果显示主要成分为硫酸钙、草酸钙。肥液质量浓度25 g/L 下堵塞物质主要为草酸钙,存在一定量硫酸钙。肥液质量浓度 30 g/L 下堵塞物质主要为草酸钙,硫酸钙的峰值有所增加。肥液质量浓度 40、50 g/L 下草酸钙为主要堵塞物质,硫酸钙峰值最为突出。这说明黄腐酸钾有机肥下最主要堵塞物质为草酸钙,次要物质为硫酸钙,且随肥液质量浓度增加,硫酸钙含量增加。由于黄腐酸钾有机肥中含有草酸和硫酸根离子,试验所用水为含有大量 Ca^{2+} 的微咸水,发生化学反应生成草酸钙和硫酸钙,所以化学堵塞是诱发堵塞的原因之一。

3 讨论

3.1 不同质量浓度肥液下过滤器的水头损失

肥液质量浓度不影响过滤器水头损失与堵塞程度的关系。网式过滤器适用于肥液平均质量分数在 0.117% 以下,随着肥液浓度的增大,滤网表面附着物质量差异不显著[16],在水不溶物质量分数为 2% 以上时 43 min 内均可使过滤器两端的压力差达到 0.05 MPa,并最终使过滤器完全堵塞,在水不溶物含量相同的情况下,施肥流量越大,过滤器越容易被堵塞,建议滴灌专用水溶性肥料的水不溶物质量分数标准定为 1% ~2%[19]。本试验中所用黄腐酸钾肥液质量浓度 25 ~50 g/L,正常工作时间与肥液质量浓度相关性显著,肥液质量浓度越大,堵塞越快,而不同肥液质量浓度下同一局部水头损失系数的滤网有效过水断面面积相同,说明不同质量浓度肥液时水头损失与滤网堵塞程度存在一定关系,因此建立了不同肥液质量浓度下不同时刻滤网清洁度计算公式,又进一步建立了过滤器局部水头损失与滤网清洁度、施肥持续时间的关系式,据此可判断过滤器滤网堵塞情况及水头损失。

3.2 堵塞物成分分析

黄腐酸钾主要包括黄腐酸和钾元素,黄腐酸中的胡敏酸不溶于水,与 Ca、Mg、Fe、Al 等多价盐基离子形成的盐类溶解度低。腐殖酸能溶解在酸、碱、盐、水和一些有机溶剂中,因此可用这些物质作为腐殖酸的抽提剂。这些抽提剂一般分为碱性物质(如 KOH、NH_4OH、Na_2CO_3、$Na_4P_2O_7$等)、中性盐(如 NaF、$Na_2C_2O_4$等)、弱酸性物质(如草酸、柠檬酸、苯甲酸等)、有机溶剂(如乙醇、酮类、吡啶等)和混合溶液(NaOH 和 $Na_2P_2O_7$)5 类[20-22]。黄腐酸钾有机肥中的 S、Ca 在碱性环境下与水中 Ca^{2+} 发生反应生成了硫酸钙,说明发生了化学堵塞,随着黄腐酸钾肥液质量浓度的增大,所含胡敏酸更多,与水中的 Ca^{2+} 等形成更多的难溶盐,因此浓度越大,越容易堵塞。配制黄腐酸钾有机肥的水是弱碱性的,且含大量 Ca^{2+},所以造成过滤器更容易堵塞。本试验中所用黄腐酸钾很大可能是由草酸抽提制成,因此残留草酸,与水中的 Ca^{2+} 发生化学反应生成草酸钙。因此建议在使用黄腐酸钾时,不宜用碱性水,若水中含有大量 Ca^{2+},应进行预处理降低 Ca^{2+} 后再进行施肥。配制腐殖酸时尽量不用草酸抽提,或降低草酸残留。

4 结论

(1)水肥一体化设备中使用黄腐酸钾有机水溶肥的质量浓度建议小于 40 g/L。

(2)过滤器的局部水头损失在滤网清洁度减小到 10% 后才逐渐开始增大。

(3)建立了过滤器滤网清洁度与局部水头损失的经验公式,可运用经验公式直接计算不同质量浓度黄腐酸钾有机肥肥液下的滤网清洁度和局部水头损失,从而确定滤网堵塞程度。

(4)黄腐酸钾有机肥发生的化学反应是过滤器堵塞原因之一,堵塞物主要化学成分是硫酸钙和草酸钙,在施肥前可对水中的 Ca^{2+} 进行预处理。

参 考 文 献

[1] ZONG Quanli, ZHENG Tiegang, LIU Huanfang, et al. Development of head loss equations for self-cleaning screen filters in drip irrigation systems using dimensional analysis [J]. Biosystems Engineering, 2015, 133: 116 - 127.

[2] 宗全利,刘飞,刘焕芳,等. 大田滴灌自清洗网式过滤器水头损失试验[J]. 农业工程学报,2012,28(16):86 - 92.
ZONG Quanli, LIU Fei, LIU Huanfang, et al. Experiments on water head loss of self-cleaning screen filter for drip irrigation infield [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 86 - 92. (in Chinese)

[3] 郑铁刚,刘焕芳,宗全利,等. 微灌用自吸自动网式过滤器水头损失的试验研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2008,26(6):772 - 775.
ZHENG Tiegang, LIU Huanfang, ZONG Quanli, et al. Experimental studies on head loss of self cleaning water screen filter in micro-irrigation [J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2008, 26(6): 772 - 775. (in Chinese)

[4] 刘焕芳,王军,胡九英,等. 微灌用网式过滤器局部水头损失的试验研究[J]. 中国农村水利水电,2006(6):57 - 60.
LIU Huanfang, WANG Jun, HU Jiuying, et al. The experimental study on local head loss of screen filter in micro-irrigation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(6):57 - 60. (in Chinese)

[5] 骆秀萍,刘焕芳,宗全利,等. 微灌自清洗网式过滤器水头损失的试验研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2011,

29(1):98 – 102.
LUO Xiuping, LIU Huanfang, ZONG Quanli, et al. Experiments and studies on the micro-irrigation self-cleaning screen filter [J]. Journal of Shihezi University(Natural Science),2011,29(1):98 – 102. (in Chinese)

[6] 郑铁刚,刘焕芳,宗全利.微灌用过滤器过滤性能分析及应用选型研究[J].水资源与水工程学报,2008,19(4):36 – 39,45.
ZHENG Tiegang, LIU Huanfang, ZONG Quanli. Analysis and research for the filtering quality and type-selecting of emitterin micro-irrigation [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008, 19(4): 36 – 39,45. (in Chinese)

[7] 骆秀萍.进水流速对自清洗网式过滤器排污系统内部流场影响数值分析[J].水利水电技术,2019,50(5):150 – 154.
LUO Xiuping. Numerical analysis of the influence of inlet velocity on the flow field in the sewerage system of self-cleaning net filter [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology,2019,50(5):150 – 154. (in Chinese)

[8] 陶洪飞,朱玲玲,马英杰,等.滤网孔径对网式过滤器内部流场的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(12):68 – 74.
TAO Hongfei, ZHU Lingling, MA Yingjie, et al. Effect of filter aperture on internal flow field of mesh filter [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(12): 68 – 74. (in Chinese)

[9] 张文正,翟国亮,吕谋超,等.微灌条件下三种过滤器过滤效果试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(4):88 – 93.
ZHANG Wenzheng, ZHAI Guoliang, LÜ Mouchao, et al. Experiment study on the efficacy of sand filter, screen filter and disc filter for removing silts from the yellow river water for micro-irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2017, 36(4): 88 – 93. (in Chinese)

[10] 刘晓初,谈世松,何铨鹏,等.Y 型筛网式过滤器水头损失研究[J].中国农村水利水电,2015(11):24 – 26,31.
LIU Xiaochu,TAN Shisong,HE Quanpeng, et al. Study on head loss of Y screen filter [J]. Chinese Rural Water Conservancy and Hydropower, 2015(11): 24 – 26,31. (in Chinese)

[11] 喻黎明,徐洲,杨具瑞,等.基于 CFD – DEM 耦合的网式过滤器水沙运动数值模拟[J/OL].农业机械学报,2018,49(3):303 – 308.
YU Liming, XU Zhou, YANG Jurui, et al. Numerical simulation of water and sediment movement in screen filter based on coupled CFD – DEM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(3):303 – 308. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180336&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.036. (in Chinese)

[12] 阿不都沙拉木. 微灌系统中叠式和网式过滤器对含藻类地表水过滤效果的分析[C]//中国水利学会第二届青年科技论坛论文集,2005:5.

[13] 李楠,翟国亮,张文正,等.微灌用叠片过滤器的过滤性能试验研究[J].灌溉排水学报,2016,35(11):52 – 56.
LI Nan, ZHAI Guoliang, ZHANG Wenzheng, et al. Filtration performance of disc filter for micoirrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(11): 52 – 56. (in Chinese)

[14] 秦天云,王文娥,胡笑涛.滴灌系统网式和叠片式过滤器水力性能试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(1):57 – 62.
QIN Tianyun, WANG Wene, HU Xiaotao. Experimental study on hydraulic performance of drip irrigation system mesh and laminated filter [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017,36(1):57 – 62. (in Chinese)

[15] 王睿. 石羊河流域滴灌系统施肥过滤设备配置模式研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
WANG Rui. Study on distribution mode of fertilizer and filtration equipment for drip irrigation system in Shiyang river basin [D]. Yangling:Northwest A&F University,2018. (in Chinese)

[16] 王睿,王文娥,胡笑涛.石羊河流域玉米膜下滴灌过滤器性能选型研究[J].节水灌溉,2017(11):10 – 15,20.
WANG Rui, WANG Wene, HU Xiaotao, et al. Performance selection of maize submembrane drip irrigation filter in Shiyang river basin[J]. Water Saving Irrigation, 2017(11):10 – 15,20. (in Chinese)

[17] 王睿,王文娥,胡笑涛,等.微灌用施肥泵施肥比例与肥水比对过滤器堵塞的影响[J].农业工程学报,2017,33(23):117 – 122.
WANG Rui, WANG Wene, HU Xiaotao, et al. Effect of fertilizer ratio of fertilizer pump and ratio of fertilizer to water on filter blockage for micro-irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 117 – 122. (in Chinese)

[18] 顾卫国. 循环式活性污泥法污水处理厂设计[D].杭州:浙江大学,2014.
GU Weiguo. Design of sewage treatment plant using cyclic activated sludge [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2014. (in Chinese)

[19] 涂攀峰,邓兰生,龚林,等.水溶肥中水不溶物含量对滴灌施肥系统过滤器堵塞的影响[J].磷肥与复肥,2012,27(1):72 – 73.
TU Panfeng, DENG Lansheng, GONG Lin, et al. Effects of water-insoluble substance content in water-soluble fertilizers on the filter clogging in fertigation system [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2012,27(1):72 – 73. (in Chinese)

[20] 姜鹏威,马志军,李志鹏.褐煤抽提腐殖酸技术及其应用研究现状[C]//中国选矿技术高峰论坛暨设备展示会论文集,2009:356 – 359.

[21] 何坤.腐殖酸对重茬烤烟土壤性状和产量质量的影响研究[J].种子科技,2019,37(6):151.
HE Kun. Effects of humic acid on soil properties and yield and quality of flue-cured tobacco [J]. Seed Science & Technology, 2019,37(6):151. (in Chinese)

[22] 肖瑶,蒋宇洲,李迪,等.腐殖酸对重茬烤烟土壤性状和产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2017,29(4):5 – 10.
XIAO Yao, JIANG Yuzhou, LI Di, et al. Effects of humic acid on the soil properties and yield of flue-cured tobacco [J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University,2017,29(4):5 – 10. (in Chinese)