

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.030

施肥滴灌加速滴头堵塞风险与诱发机制研究

刘璐¹ 牛文全^{1,2} 武志广² 官雅辉³ 李元¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;
3. 中科院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要:以2种内镶片式迷宫流道滴头为研究对象,采用数学分析方法、扫描电镜/能谱分析技术(SEM-EDS)和X射线衍射技术(XRD)对不同水溶性肥料滴灌后滴头流量、堵塞物表面微形貌及其化学组分进行多角度分析,研究肥料特性和流道结构对滴头堵塞过程的影响效应。结果表明:肥料特性是决定堵塞类型和诱发风险的重要因素($P < 0.01$),流道结构对堵塞的影响需双重考虑结构尺寸及结构类型;当施肥质量分数小于等于0.5%时,施肥加速滴头堵塞的效果较小且与肥料类型关系不大,当施肥质量分数在0.5%~2.0%之间时,各肥料滴灌适用性由大到小依次为:磷肥、尿素、钾肥、复合肥,当施肥质量分数在2.0%~3.0%之间时,尿素滴灌滴头流量降幅为10.26%,显著高于施加磷肥(7.85%)、钾肥(4.07%)和复合肥(2.74%);施加尿素滴灌诱发滴头堵塞主要物质的形成机理为分子态尿素析出物与水中悬浮颗粒物形成团聚体在较差流体的运动粘度下造成的物理堵塞,磷肥主要为吸附作用加速肥料杂质团聚沉淀的物理、化学堵塞,硫酸钾施肥滴灌主要为离子交换形成的钙、镁沉淀导致流道壁面糙度升高、过水断面减小的化学堵塞过程,复合肥诱发滴头堵塞风险最低。施肥滴灌存在诱发或者加速滴头堵塞的风险,但不同肥料诱发滴头堵塞主要物质的形成机理不同,加速堵塞的风险也不同,故对于不同的肥料类型宜采用不同的抗堵塞管理策略。

关键词: 滴灌施肥; 滴头; 堵塞; 风险; 机理

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0228-09

Risk and Inducing Mechanism of Acceleration Emitter Clogging with Fertilization through Drip Irrigation Systems

LIU Lu¹ NIU Wenquan^{1,2} WU Zhiguang² GUAN Yahui³ LI Yuan¹

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*
2. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*
3. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: The inducing mechanism of emitters clogging with fertilization was explored. A laboratory experiment was conducted to investigate the influence of three factors (fertilizer types, fertilizer concentration and flow path structure) on anti-clogging performance of drip emitters. The intermittent drip irrigation experiment was studied by using two flow path types of non-pressure compensating emitters (arc-shaped saw-tooth and cup-shaped saw-tooth), four levels of fertilization concentration (0.5%, 1.0%, 2.0% and 3.0%) and four types of fertilizer (urea, calcium superphosphate, potassium sulfate and water soluble compound fertilizer) and the system was allowed to run for 20 h. The mathematical analysis methods in combination with field scanning electron microscope (FESM), energy dispersive spectrometer (EDS) and X-ray diffraction (XRD) technology were then used to quantitatively and qualitatively analyze the variations of the emitter's average relative flow rate, surface topographical characteristics and components of the clogging materials internal emitters. Results showed that fertilizer characteristic was an important factor in deciding the emitter clogging type and degree ($P < 0.01$), and the influence of the two flow path structures on the accelerating effect of emitter clogging performance

收稿日期: 2016-09-04 修回日期: 2016-11-04

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

作者简介: 刘璐(1986—),女,博士生,主要从事灌溉理论与节水技术研究,E-mail: wzx130807@163.com

通信作者: 牛文全(1971—),男,研究员,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

needed to consider the path structural size and style. The accelerating effect of fertilizer application on emitter was not obvious when the concentration of fertilizer solution was less than 0.5%. When the concentration was increased to 0.5% ~ 2.0%, there were obvious changes in the quantities of outflow discharge occurred in phosphate-fertigation, which made it clog easily, followed with urea-fertigation, the applicability of potassium-fertigation and compound-fertigation was better than that of the former. When the concentration was risen to 2.0% ~ 3.0% or higher, the clogging degree was so serious with urea-fertigation, the flow rate was decreased by 10.26%, which was significantly higher than those of phosphate-fertigation (7.85%), potassium-fertigation (4.07%) and compound-fertigation (2.74%). Fertilization can promote the clogging of the emitters. These fertilizer types had different water quality, hence resulting into different emitter clogging risk and inducing mechanism. Emitters clogging with urea fertigation were caused by the role of aggregation and adhesion with both crystallization of the molecular urea state and suspended particles in the water. The adsorption function that particulate impurities to phosphorus promoted flocculation while precipitation among solid particles was as a result of inducing mechanism of emitter clogging with phosphate fertigation. The main inducing mechanism for emitter clogging with potassium-fertigation was chemical precipitation because of the ion-exchange action, while emitter clogging with compound-fertigation had the lowest risk. Therefore, fertigation with different fertilizer types should adopt different emitter clogging controlling management strategy.

Key words: fertigation; emitter; clogging; risk; mechanism

引言

滴灌施肥是定量供给作物水分和养分并维持土壤适宜水肥浓度的有效方法,其精量性可改善旱地农业水肥资源利用现状、缓解水资源危机、促进作物生长^[1],也是旱地农业技术未来发展的研究重点。水中大量矿物微粒、肥料离子和细小固体悬浮颗粒大大提高了滴头堵塞风险,而滴头堵塞又直接决定了滴灌系统的使用寿命及经济效益^[2-3]。已有研究表明,水体中高浓度的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等无机离子组分以及相对较高的 pH 值,是造成滴头流道淤积的重要因素^[4]。然而,施肥滴灌改变水源中营养物质的种类、浓度、水中悬浮颗粒数量、水温、pH 值、电导率等参数,导致各类溶质在流道内水流紊动作用下相互碰撞、吸附、团聚、沉淀形成的堵塞淤积规律改变,由此诱发堵塞风险更高,堵塞机制更为复杂且与施肥浓度呈正相关^[5-13],滴头有效率仅为 50% ~ 75%^[14]。其中,小流量滴头高浓度施肥条件滴头堵塞程度最高,且含有 P、Ca、Mg、Fe、S 的肥料类型可显著提高诱发滴头堵塞的风险^[15-16]。因此,研究施肥滴灌过程中,滴头堵塞过程及形成机理对于防治水肥一体化过程中滴头堵塞,提高滴灌系统运行效率具有重要意义。但以往研究仅针对单一

度条件下对于不同结构形式流道加速滴头堵塞的风险是否一致,诱发堵塞的机理是否相同,这些问题都还有待于进一步研究和确认。

本文选用 2 种结构形式流道滴头,在 4 种不同肥料类型及 4 种肥料浓度梯度条件下,在对施肥滴灌滴头流量变化过程测试基础上,讨论施肥滴灌滴头堵塞的发生规律,并借助装有能谱仪(EDS)的场发射扫描电镜(FESEM,S-4800 型,日立)对堵塞物质表面形貌进行显微分析和元素分析,同时配合采用 X 射线衍射仪(XRD,D8 Advance,Bruker)确定不同肥料类型滴灌诱发滴头堵塞主要物质的化学组分,揭示滴头堵塞的诱发机制,评估和预测滴头堵塞风险,旨在为水肥滴灌影响下合理防治滴头堵塞管理策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料制备

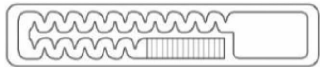
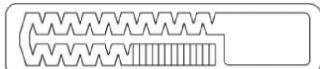
试验用水为陕西杨凌示范区居民自来水,通过环境保护局 2015—2016 年最新监测数据来看,符合我国农田灌溉用水水质标准^[17](表 1),细菌数小于 1 CFU/mL,短周期滴灌可忽略生物堵塞的影响,故该水质条件下研究水肥特性对滴头堵塞影响的试验结果具有一定的代表性。试验选用滴头参数如表 2 所示。

表 1 试验期间自来水水质参数特征
Tab.1 Quality characteristics of irrigation water during experiment

参数	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH 值	TDS/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TSS/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Fe/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Mn/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	硫酸盐/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总硬度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	细菌数/ ($\text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$)
测试值	1.2 ~ 2.3	7.86 ~ 8.01	106 ~ 152	0.95 ~ 1.30	217.1 ~ 372.5	<0.05	<0.05	10 ~ 21	70 ~ 81	<1

注:COD 为化学需氧量;TDS 为可溶性总悬浮物;TSS 为总悬浮颗粒;EC 为电导率。

表 2 试验用滴头特征参数
Tab. 2 Parameters of emitters used in experiment

滴头编号	流道类型	流道尺寸(长×宽×深)/ (mm×mm×mm)	额定流量/ (L·h ⁻¹)	流量系数	流态指数	滴头结构
E1	圆弧齿形	56.8×1.1×0.88	2.3	0.747	0.492	
E2	尖角齿形	54.3×1.08×0.82	2.5	0.983	0.472	

试验选用 4 种可溶性肥料,分别为氮肥、磷肥、钾肥和复合肥。氮肥为尿素(云南三环化工股份有限公司),分子式 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$,粒径 1~2 mm 的半透明粒子。尿素极易溶于水且无任何杂质,溶液呈透明状。试验用磷肥为过磷酸钙(河北省矾山磷矿有限公司),含磷组分为磷酸二氢钙的水合物 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\cdot\text{H}_2\text{O}$,杂质为硫酸钙、二氧化硅和少量游离的磷酸和硫酸,常温下是灰白色粉末。过磷酸钙含有效 P_2O_5 质量分数 14%~20% (其中 80%~95% 溶于水),属于水溶性速效磷肥。制备磷肥水溶液时,搅拌后溶液浑浊,溶液底部存在大量灰色粉末状沉淀,待过磷酸钙颗粒在玻璃烧杯中充分溶解、静置后,取上清液透明液体,经浓度检测后作为试验材料。试验用钾肥为硫酸钾(山东鲁丰钾肥有限公司),硫酸钾含 K_2O 质量分数 50%~54%,淡灰色微晶体粉末状。制备硫酸钾溶液过程中,经充分搅拌溶解后溶液底层沉积灰白色沉淀同时肥液表层悬浮白色包膜材料,待静置分层经过滤后取上清液,经浓度检测后作试验材料。复合肥采用临沂沃夫特复合肥料有限公司生产的全水溶高钾型螯合态化肥,主要成分为尿素、磷酸二氢钾、硝酸钾,其中氮、磷和钾质量比为 16:6:28。该肥料极易溶于水,溶液呈淡蓝色透明状。

抗堵塞测试平台参照 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》、SL/T 67.1—94《微灌灌水器——滴头》以及国际抗堵塞研究标准草案^[18] 关于室内滴灌滴头堵塞敏感性测试试验搭建而成,平台由水泵、过滤装置、搅拌装置、压力表、控制阀门、支管以及待测试滴灌带组成。滴灌管布设于测试系统架上(长 6 m、宽 0.5 m、高 1.2 m),共 4 台测试架,每个架子布设 4 条滴灌带,其间距为 12 cm,每条滴灌带有 20 个滴头,滴头间距为 30 cm,一台测试架共 80 个滴头(图 1)。首部采用 1 个 120 目筛网过滤器串联,利用分流原理控制系统的工作压力。

1.2 室内试验设计

试验选用 4 种肥料,质量分数分别为 0.5%、1.0%、2.0%、3.0% (CF1、CF2、CF3、CF4) 进行滴灌

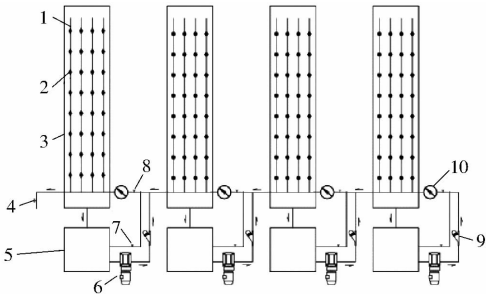


图 1 滴头抗堵塞测试平台
Fig. 1 Experimental setup

1. 毛管 2. 滴头 3. 回水槽 4. 冲洗阀 5. 水箱 6. 水泵
7. 回水阀 8. 进水阀 9. 筛网过滤器 10. 压力表

抗堵塞测试,不加肥作为对照(CF0),进行完全随机试验,共 34 个处理。为加速试验进程,试验参照国际滴灌滴头抗堵塞性能测试标准草案,将灌水周期等比例缩短,测试时间为 1 h,每隔 2 h 灌水 1 次,1 d 灌水 5 次,连续 4 d 作为一个测试周期,每个处理累计灌水 20 h,每组 4 个重复。每次灌水结束后均采用电导率仪监测滴灌水温、pH 值以及电导率动态变化情况。每组处理结束后,将换下毛管置于遮阴通风位置晾晒风干,称量灌水前后毛管质量的变化,定量分析毛管及滴头堵塞物质淤积量及成分。

1.3 滴头堵塞测定及评价方法

在每条滴灌带上等间距布置 10 个采样点,待系统运行 30 min 滴头保持稳定出流后,将量杯按 2 s 间隔依次放置在滴头正下方,测量 10 min 后再依次按 2 s 间隔将量杯挪出,用电子天平(精度 0.1 g)称量量杯和水的总质量,然后换算成滴头流量。为消除温度对滴头流量的影响,采用美国农业工程师协会关于微灌系统田间评价标准进行流量-温度修正,最后采用相对流量评价滴头堵塞及灌水质量情况,计算公式为

$$D_{ra} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n q_i' / q_{i(20)}^0}{n} \right) \times 100\%$$

其中 $q_i' = q_{i(T)}^t - q_{i(T)}^{t'}$

$$q_{i(T)}^{t'} = q_{i(20)}^0 \left[1 + \frac{(57.35x - 28.24)(T - 20)}{100 \times 20} \right]$$

式中 D_{ra} ——相对流量,%
 i ——滴头序号 n ——滴头总数

α ——流态指数 T ——测试水温,℃
 $q'_{i(T)}$ ——第 i 个滴头在温度 T 下的修正流量,
L/h
 q_i^t ——第 i 个滴头的修正流量,L/h
 $q_{i(20)}^0$ ——滴头在 20℃ 下的初始流量,L/h
 $q_{i(T)}^t$ ——第 i 个滴头在温度 T 下的实测流量,
L/h

1.4 堵塞物表面形貌及组分分析方法

用高精度电子天平称量灌水前毛管质量,滴灌施肥测试结束后,再称量风干后毛管质量,两者质量之差即为所求灌水前后毛管内的淤积物质的量。解剖不同处理下采样点滴头,观察堵塞物在流道中的分布特征,并收集流道内的淤积物质,根据试验编号将各处理一分为二。对进行固定、脱水、干燥、喷金等处理的样品,采用装有能谱仪的场发射扫描电镜(FESEM,S-4800 型,日立)分析堵塞物的表面形貌及元素组成。其余样品按照编号研磨过筛(300 目)后制成表面平整试片,使用 X 射线衍射仪获取其多晶衍射图谱,再使用 MDI Jade 5.0 软件对其化学组分进行定性分析,以进一步确认堵塞物质化学组分。

2 结果与分析

2.1 迷宫结构对滴头堵塞的影响

迷宫结构包含结构尺寸和结构类型。首先采用周博等^[19]提出的片式滴头抗堵塞能力快速评估方法,比较 2 种滴头结构尺寸参数与其抗堵塞性能,采用片式滴头抗堵塞性能评估指数 I_a ,其计算式为

$$I_a = \frac{LW^{0.5}D^{0.5}}{Q} \left(\frac{-10.753W}{D} + 15.086 \right)$$

式中 Q ——滴头额定流量,m³/s
 L ——滴头流道长度,m
 W ——滴头流道宽度,m
 D ——滴头流道深度,m

由表 2 提供的参数计算可知,E1、E2 滴头 I_a 分别为 8.17 和 3.69,由此确定 E1 流道结构尺寸的滴头自身抗堵塞性能相对结构尺寸 E2 滴头而言较优。除自身尺寸条件外,进一步考虑流道结构形式及滴灌施肥水质参数。经试验测定,采用 SPSS 22.0 软件对 34 个处理末次灌水结束滴头相对流量数据进行方差分析,检验结果如表 3 所示,2 种迷宫结构滴头对施肥滴灌堵塞的发生并无显著性影响($P > 0.05$),说明在一定施肥浓度范围内,施肥加速滴头堵塞的风险受所选滴头流道结构尺寸影响,另外,流道结构形式的影响也不容忽视,两者存在交互作用,综合考虑不同肥料特性滴灌条件,尖角齿形结构比圆弧齿形结构抗堵塞性能更优。

表 3 试验结果方差分析

Tab.3 Analysis of variance for total test data				
方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值
肥料类型	0.007	3	0.002	11.400**
施肥浓度	0.050	4	0.012	61.127**
滴头类型	0.001	1	0.001	2.543 ^{ns}
肥料类型×肥料浓度	0.023	12	0.002	9.223**
肥料类型×滴头类型	0.001	3	0.001	1.615 ^{ns}
施肥浓度×滴头类型	0.001	4	0.001	0.834 ^{ns}
施肥类型×施肥浓度×滴头类型	0.002	12	0.001	0.998 ^{ns}
误差	0.030	149	0.001	

注:**表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著,ns 表示差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 施肥特性对滴头堵塞的影响

施肥特性包括肥料类型和施肥浓度,方差分析结果表明两者对滴头堵塞的影响极显著(表 3),是加速滴头堵塞发生的关键性因子。以 E1 滴头为例,4 种肥料类型在不同施肥浓度条件下对滴头相对流量变化的影响如图 2 所示,各处理组选用 Duncan 多重比较模型对滴头相对流量进行单因素多变量方差分析显著性检验,结果如表 4 所示。

由图 2 可知,施肥滴灌与清水滴灌(CF0)比较,未施肥处理组的滴头流量曲线整体表现平直,没有出现随灌水次数增加而下降的趋势,两者存在极显著差异(表 4, $P < 0.01$),且施肥滴灌滴头相对流量在整个灌水期间均随着灌水次数的增加而逐渐降低,呈波动变化。各处理滴头平均相对流量都在 87.61% 以上,总体处于轻微堵塞水平,但不同肥料类型影响滴头相对流量下降幅度仍存在一定差异,灌水 20 次后,尿素滴灌降为 12.39%,显著高于磷肥、钾肥及复合肥,其中钾肥与复合肥滴灌相对流量差异较小(幅度在 3.13% 以内)。说明施肥滴灌存在加速滴头堵塞的风险,不同肥料类型之间存在一定差异。

另外,不同施肥处理组滴头相对流量差异受施肥浓度的影响较大,当施肥质量分数在 0~0.5% 之间时,浓度对滴头堵塞性能的影响均较微弱,并无显著差异($P > 0.05$),滴头均保持较高的相对流量(变幅在 2.76% 以内)。当施肥质量分数在 0.5%~2.0% 之间时,滴头相对流量随浓度变化明显,高低波动现象突出,说明该浓度范围段流道内堵塞物质“碰撞-团聚-沉淀-破碎-再团聚-再沉淀”的动态过程较为频繁,磷肥在该浓度范围滴灌对堵塞较为敏感,显著高于其他 3 种肥料($P < 0.05$)。当施肥质量分数在 2.0%~3.0% 之间时,不同肥料类型之间滴头流量变幅差异较大,尿素滴灌相对流量降幅显

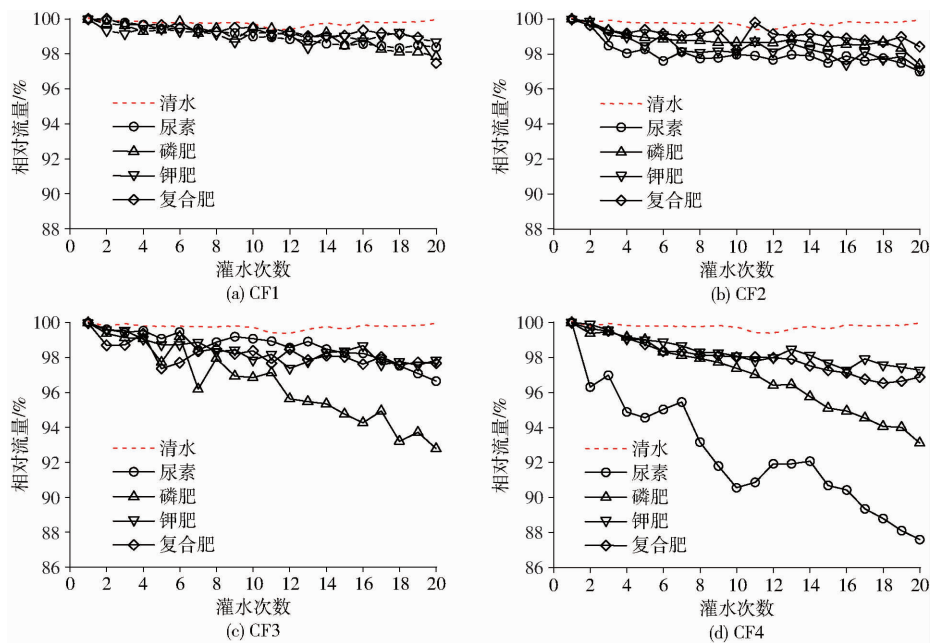


图 2 肥料类型对滴头堵塞程度的影响

Fig. 2 Effect of fertilizer types on dynamic emitter clogging characteristics with irrigation intervals

表 4 不同处理的滴头相对流量显著性分析结果

肥料类型	E1					E2					%
	CF0	CF1	CF2	CF3	CF4	CF0	CF1	CF2	CF3	CF4	
尿素	99.9 ^a	98.4 ^{bcd}	97.0 ^{gh}	96.7 ^{ghi}	87.6 ^m	99.9 ^a	97.2 ^{ghi}	96.5 ^{hij}	96.9 ^{ij}	89.7 ^l	
磷肥	99.9 ^a	97.9 ^{bcd}	97.4 ^{cde}	92.8 ^k	93.1 ^k	99.9 ^a	98.5 ^{bcd}	92.9 ^k	92.2 ^k	92.2 ^k	
钾肥	99.9 ^a	98.7 ^b	97.2 ^{cfg}	97.8 ^{bed}	97.3 ^{cde}	99.9 ^a	98.2 ^{bed}	98.5 ^{bed}	96.3 ^{ij}	95.9 ^j	
复合肥	99.9 ^a	97.5 ^{bcd}	98.4 ^{cd}	97.7 ^{bed}	96.9 ^{ghi}	99.9 ^a	97.8 ^{bc}	97.2 ^{fg}	97.8 ^{bcd}	97.3 ^{def}	

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

著增高,磷肥有所回升,钾肥平缓降低,复合肥变化不大,堵塞由大到小表现为:尿素、磷肥、钾肥、复合肥。整体来看,复合肥和钾肥表现出较好的滴灌适用性,而尿素和磷肥滴灌易诱发或加速滴头堵塞。

2.3 堵塞物质化学组分分析

借助场发射扫描电镜及 X 射线衍射仪对采样点滴头内淤积物质进行观察和分析,同种肥料不同浓度梯度施肥滴灌后,诱发滴头堵塞的主要化学物质元素组成并无明显变化,故以施肥质量分数 3.0% 滴灌后流道内淤积物质的电镜扫描微结构(图 3)、表面能谱分析(表 5)和 XRD 检测图谱(图 4)为例来看:堵塞物质表面形貌较原状肥料而言,形貌更复杂且颗粒间连接更为紧密,由排列不均一的晶体颗粒相互咬合镶嵌形成。

进一步分析表面能谱和 XRD 检测结果,可看到:尿素灌水后流道淤积物 C、N 元素含量与滴灌前尿素无明显差异(表 5),O 元素有 7.01% 的消耗,新增元素 Mg、S 比例为 1:1,可能为硫酸镁盐沉淀。由 XRD 物相分析图谱可知(图 4),灌水后堵塞物质除尿素外,分别在角度 20.157°、22.926°、30.857° 出现

新峰值,物质为六水合亚硫酸镁($\text{MgSO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$),与能谱分析结果一致。说明尿素滴灌滴头堵塞的淤积物主要成分是尿素分子,含极少量亚硫酸盐沉淀。

磷肥滴灌后淤积物表面形貌为薄片状晶体结构(图 3b),从 XRD 结果看,磷肥中 CaSO_4 为主项,磷酸二氢钙水合物为次项,含磷量不高。灌水后从 XRD 峰值看来(图 4), CaSO_4 和少量 SiO_2 依然存在且含量并无明显变化,磷酸二氢钙水合物几乎完全消失,有新峰值出现,为微溶无水磷酸氢钙(CaHPO_4)。EDS 结果显示,堵塞物 P 元素含量是磷肥的 2.05 倍,S 元素含量降低了 6.15%,其余元素含量变化不大(表 4)。说明流道内淤积物为 CaSO_4 、 CaHPO_4 和 SiO_2 ,硅铝酸盐杂质与磷产生吸附作用,P 元素含量明显升高。

钾肥滴灌后流道内淤积物在电镜下清晰可见许多细小晶粒以面面接触的方式附着于较大斜方结晶物表面(图 3c),C、O、Ca、Mg 元素含量增加,K、S 元素含量相对减少(表 4),其原子数比例为 2:1 (24.79%:12.57%),说明淤积物仍以硫酸钾斜方结晶析出物为主,附着的细小晶粒可能是由于离子

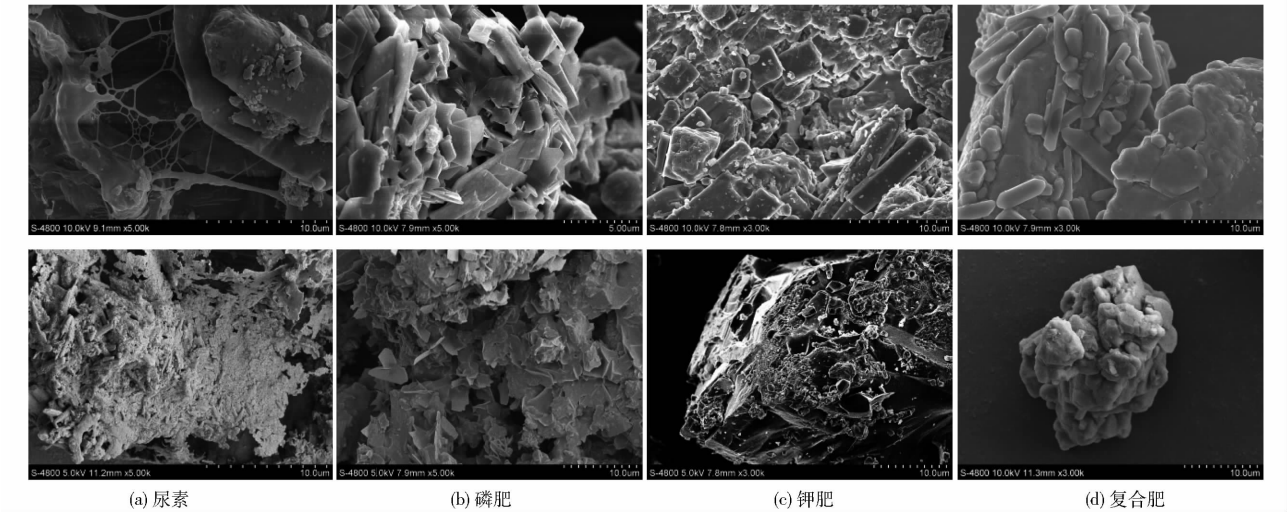


图 3 不同肥料类型在施肥质量分数为 3.0% 下滴灌后流道内淤积物电镜扫描结构图

Fig.3 FESEM micrographs of sediment with different fertilizer types of 3.0% fertilization concentration

表 5 不同肥料及其施肥滴灌后滴头流道内淤积物元素相对含量(质量分数)

Tab.5 Composition mass percentage of sediment after irrigation												%
检测对象	C	N	O	P	K	Ca	S	Mg	Fe	Si	Al	
尿素	18.57	39.72	41.04	0	0	0	0	0	0.67	0	0	
尿素滴灌残留物	21.84	40.59	34.03	0	0	0	0.42	0.42	0.95	0	0	
磷肥	6.76	6.26	51.46	10.97	0	14.40	9.52	0	0	0.43	0.22	
磷肥滴灌残留物	9.34	0.16	50.21	22.51	0	11.86	3.73	0	0.47	0.73	0.99	
钾肥	7.80	1.64	40.69	0	32.88	0	16.06	0.12	0	0	0	
钾肥滴灌残留物	8.57	0	53.14	0	24.79	0.22	12.57	0.35	0	0	0	
复合肥	14.59	12.10	37.46	25.44	9.07	0.88	0	0.52	0.48	0	0	
复合肥滴灌残留物	3.87	18.17	55.64	3.26	19.06	0	0	0	0	0.54	0	

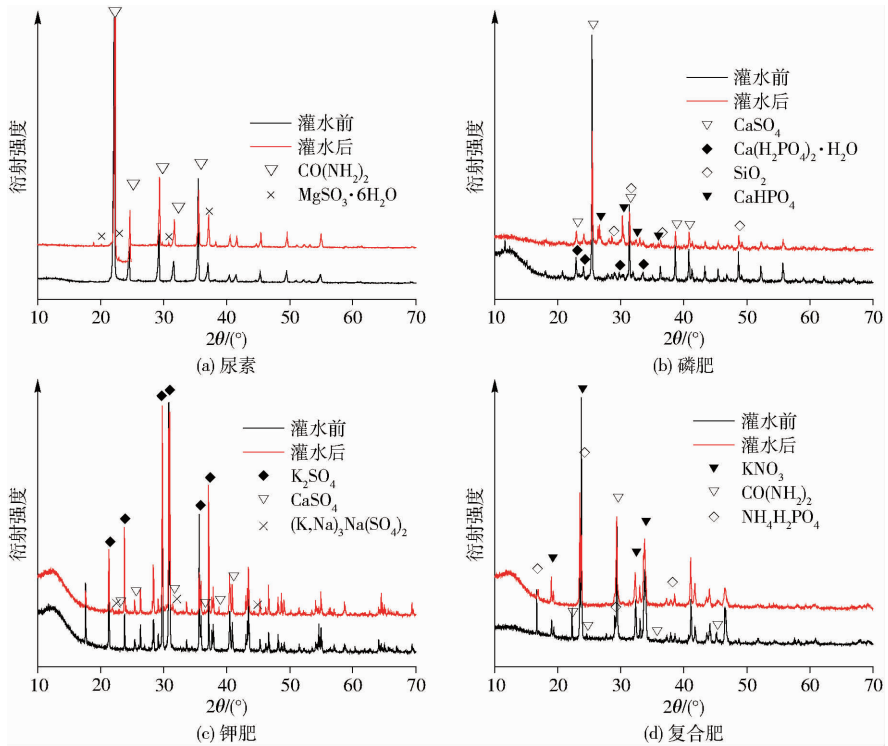


图 4 流道内淤积物化学组分 XRD 检测图谱

Fig.4 Surface XRD patterns of sediment in emitter-channel

置换产生的沉淀物。结合 XRD 衍射图谱(图4),再次证明钾肥滴灌流道内淤积物除硫酸钾结晶物外,含有少量硫酸钙和芒硝石($(\text{K}, \text{Na})_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$)。

复合肥滴灌后流道内淤积物表面形貌为斜方晶型结构的团聚结构(图3d),其Ca、Mg、Fe元素相对含量较灌水前降至0,N、O、K原子数百分比分别为18.17%、55.64%、19.06%(1:3:1)(表4),XRD结果显示,灌水前磷肥含有硝酸钾、尿素、磷酸二氢铵,灌水后尿素几近消失,其余峰值出现角度无明显变化(图4)。说明复合肥滴灌流道淤积物为硝酸钾和少量磷酸二氢铵的结晶析出物。

3 讨论

滴头堵塞主要有3种类型:物理堵塞、生物堵塞和化学堵塞,其表现为颗粒物质在流道壁面的附着与沉淀(砂粒、生物膜、难溶盐类或者三者的混合体)^[5-6]。决定滴头堵塞程度和堵塞类型的主要因素为流道结构和水质。当流道结构一定时,水质因素如悬浮物类型、悬浮物量、微生物数量、离子含量和类型、pH值和电导率等是影响滴头堵塞的主要因素。据研究^[6-8],非常规水源滴灌时,增加了悬浮颗粒浓度、盐离子浓度,促进了微生物的繁殖及化学沉淀的聚集。当灌溉水pH值小于7.0时,易引起轻度堵塞,pH值在7.0~8.0之间可引起中度堵塞,pH值大于8.0时易引起滴头重度堵塞。施肥滴灌过程中,一方面肥料等化学性物质的溶解和沉淀改变了流道内流体介质的动力学和热力学性质,另一方面加重了水源中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等离子化学沉淀的析出,从而形成稳定性更好的堵塞物质。本试验也发现施肥滴灌改变了水质参数(pH值、电导率、盐离子种类及含量、悬浮颗粒物浓度),且与滴灌滴头堵塞之间具有较高的相关性,成为诱发堵塞的重要因素。

迷宫流道结构是影响滴头堵塞发生规律及抗堵塞能力的主要因素,可以通过改变流道几何参数、流道类型、流道结构等提高滴头的抗堵塞能力^[20-21]。本试验发现选用的2种流道结构对加肥滴灌诱发或者加速滴头堵塞的影响并不显著,即施肥诱发或加速滴头堵塞受该流道结构尺寸和形式交互作用的影响较小。以滴头关键影响因素为核心,通过量纲分析法建立的堵塞评价指标 I_d 是目前较为有效地快速判定滴头堵塞性能的指标,从该评估指数计算结果来看,E1、E2滴头 I_d 分别为8.17和3.69,说明该尺寸条件下E2滴头自身抗堵塞能力相对较强。而试验结果显示,滴头结构对堵塞影响并不显著,是因为尖角齿形结构比圆弧齿形结构抗堵塞性能更优。有

研究表明,对于齿形流道滴头抗堵塞性能是随其转角的增加呈下降趋势,转角增大导致流道流场运动紊乱度增加,流体内固体颗粒越容易进入漩涡区,其相应的停留时间也越久,最终导致流道堵塞的可能性增加^[22]。故转角相对较大的圆弧齿形流道比转角较小的尖角齿形流道发生堵塞的可能性更高。

当滴灌肥料特性不同时,灌溉水中的悬浮颗粒物、盐分含量、pH值和细菌数等则不同,诱发滴头堵塞的过程和滴头堵塞程度也将不同。本试验发现不同肥料类型和浓度滴灌时,毛管内淤积物质量不同,流道内淤积物形貌特征及其主要元素组成相对含量也不同。

尿素一般以分子态溶于水,由于N原子电负性大,尿素分子间易形成氢键,故相同浓度尿素比其他肥料滴灌流体的电导率小且运动粘度系数大,分子间作用力及有效接触面积大^[23],分子缔合程度高,流动性差,与流道壁面的粘附力强^[23-25]。另外,由于尿素滴灌时pH值在7.28~7.78之间(图5),水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等离子易生成化学沉淀^[4],尿素分子与水中悬浮颗粒易发生物理吸附并附着于流道壁面。正是由于尿素分子缔合析出物对流道内悬浮颗粒的捕捉团聚以及其水体较差的流动性,形成了堵塞物絮状磨砂的多孔表面,且其间可见尿素分子晶体的四方锥单形结构^[26](图3a)。施肥浓度越高,水的粘度系数越大,尿素分子与流道壁面的粘附力越大,尿素分子析出量也越大,故尿素滴灌诱发滴头堵塞的风险在肥料质量分数为3.0%滴灌时最为显著。因此,尿素滴灌诱发滴头堵塞的机制可能为分子态尿素析出物与水中悬浮颗粒物形成团聚体造成的物理堵塞。

试验选用的磷肥含大量硫酸钙和少量硅石杂质,经沉淀过滤后,这些杂质的悬浮颗粒仍会进入系统,经长期灌水,除杂质外,磷酸二氢钙水合物转化成微溶的无水磷酸氢钙最终诱发滴头堵塞,该过程发生了化学反应且生成沉淀。一方面,当施肥浓度增大时,水中阳离子数量在增大,细小的不溶或者难溶物质颗粒也在增多,当阳离子增加到一定值时,双电层受静电引力压缩而变薄,Zeta电位降低,悬浮物絮凝强度及沉降强度显著增大^[27],易在流道进口处和拐角处淤积下来;另一方面,含磷的阴离子与悬浮杂质发生的吸附作用,增强了颗粒间絮凝团聚的可能,故磷肥诱发滴头流道堵塞风险较高^[28-29]。当施肥浓度继续增加,灌溉水pH值进一步降低至3.21时(图5b),有效抑制了碳酸钙等盐类沉淀及微生物生长引起的化学堵塞和生物堵塞,滴头流道将恢复通畅^[30-31],较低浓度滴灌反而降低了堵塞风险。因

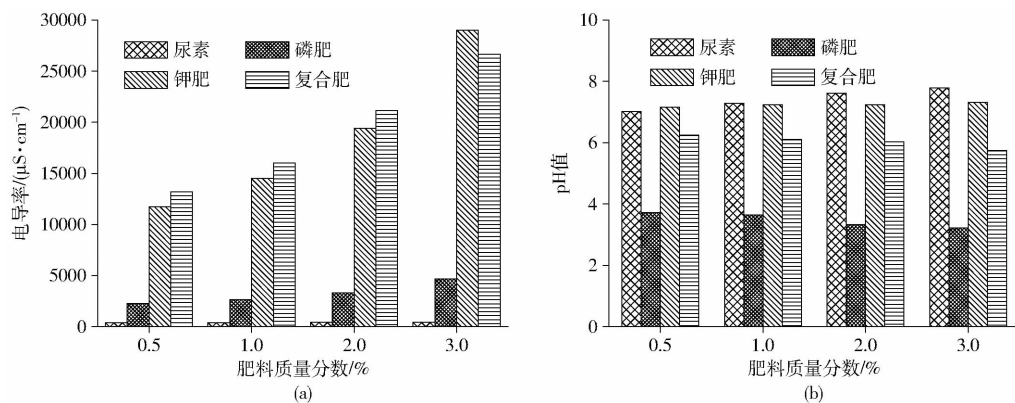


图 5 不同肥料类型和浓度滴灌的电导率和 pH 值

Fig. 5 Electric conductivity and pH value of irrigation water with different fertilizers and fertilization concentrations

此,可溶性磷肥滴灌诱发的滴头堵塞机制主要为磷肥的吸附作用加速杂质、离子置换形成的沉淀颗粒絮凝物的形成,其堵塞为物理、化学耦合堵塞。

硫酸钾是一种较强的电解质^[32],故不同浓度肥液的电导率均显著高于氮肥、磷肥和复合肥,为 11 910 ~ 27 860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (图 5a),水体运动粘度系数小,进入流道内的悬浮颗粒及可溶性盐离子跟随流动性好,悬浮物易随水流流出滴头流道^[21]。钾肥滴灌 pH 值在 7.23 ~ 7.33 之间(图 5b),属于中度堵塞范围,易加速水中钙、镁离子形成沉淀,经检测生成硫酸钙和芒硝石。在长期滴灌的干湿交替中,流道内壁化学沉淀附着层将逐渐加厚,壁面粘附力增大,进而悬浮颗粒更易被吸附粘结在壁面,导致流道过流能力逐渐下降。钾肥浓度越大,硫酸钾结晶物、化学沉淀物越多,滴头堵塞的风险越大,但总体小于尿素与磷肥,其堵塞主要为化学堵塞。

选用的复合肥滴灌适用性最优,一方面是由于其氨基酸螯合态 Ca、Mg、Fe 等中微量元素离子有效避免了与 PO_4^{3-} 、 CO_3^{2-} 生成沉淀^[33],完全随水流流出滴头;另一方面,由于其滴灌水质呈弱酸性(pH 值为 5.74 ~ 6.10),引起滴头堵塞程度轻微,由于钙、镁沉淀形成的壁面附着层几率较低,电导率为 13 210 ~ 26 660 $\mu\text{S}/\text{cm}$,明显高于尿素和磷肥,肥料离子与水中悬浮颗粒物通过性也较高。故该肥料滴灌过程不生成沉淀,原有悬浮颗粒物的通过性也良好。

但本试验未考虑长期滴灌过程中微生物滋生、营养物质输送及水流剪切力变化引起的滴头堵塞物质形成和生长动态变化过程,今后将综合考虑物理、化学、生物等多因素影响,确定不同施肥滴灌条件下,滴头的堵塞机理与过程,提出相应的预防和治理管理办法。

4 结论

(1)在没有或者仅有少量固体悬浮物参与的情况下,施肥滴灌具有诱发或加速滴头堵塞的风险。

(2)不同肥料特性诱发滴头堵塞的风险不同。肥料质量分数小于 2.0% 时,滴头堵塞风险由大到小表现为:磷肥、尿素、钾肥、复合肥,当肥料质量分数大于等于 3.0% 时,尿素诱发滴头堵塞的风险最高,磷肥次之,钾肥和复合肥较小。

(3)不同肥料类型诱发滴头堵塞的主要物质形成机制不同。尿素滴灌主要考虑肥料分子改变水体流动性诱发的颗粒物质与壁面粘附的沉积堵塞;可溶磷肥滴灌主要考虑磷吸附行为下肥料杂质的团聚沉淀堵塞;硫酸钾滴灌主要考虑钙、镁沉淀诱发流道壁面糙度升高使过流断面减小造成的堵塞;可溶性复合肥诱发机理有待进一步研究。

(4)滴头结构对施肥诱发堵塞的影响存在流道结构尺寸和流道结构类型的交互作用。

参 考 文 献

- 1 李久生,张建君,薛克宗. 滴管施肥灌溉原理与应用[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2003.
- 2 ADIN A, SACKS M. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(6): 813 - 826.
- 3 仵峰,范永申,李辉,等. 地下滴灌滴头堵塞研究[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 CSAE, 2004, 20(1):80 - 83. (in Chinese)
- 4 HILLS D J, NAWARF M, WALLER P M. Effects of chemical clogging on drip-tape irrigation uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(4): 1202 - 1206.
- 5 BUCKS D A, NAKAYAMA F S, GILBERT R G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance[J]. Agricultural Water Management, 1979, 2(2):149 - 162.

- 6 NAKAYAMA F S, BUCKS D A. Water quality in drip/trickle irrigation: a review[J]. *Irrigation Science*, 1991, 12(4): 187–192.
- 7 刘璐, 牛文全, ZHOU Bob. 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, ZHOU Bob. Influence of sediment particle size on clogging performance of labyrinth path emitters[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(1): 87–93. (in Chinese)
- 8 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 CSAE*, 2011, 27(5): 19–24. (in Chinese)
- 9 李云开, 宋鹏, 周博. 再生水滴灌系统灌水器堵塞的微生物学机理及控制方法研究[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 98–107.
LI Yunkai, SONG Peng, ZHOU Bo. Microbiology mechanism and controlling methods for emitter clogging in the reclaimed water drip irrigation system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(15): 98–107. (in Chinese)
- 10 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 Kangyong, NIU Wenquan, ZHANG Ruochan, et al. Accelerative effect of fertigation on emitter clogging by muddy water irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(17): 81–90. (in Chinese)
- 11 刘璐, 李康勇, 牛文全, 等. 温度对施肥滴灌系统滴头堵塞的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 98–104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160214&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.014.
LIU Lu, LI Kangyong, NIU Wenquan, et al. Influence of temperature on emitter clogging with fertigation through drip irrigation system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 98–104. (in Chinese)
- 12 刘燕芳, 吴普特, 朱德兰, 等. 温室水肥滴灌系统迷宫式滴头堵塞试验研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(12): 50–55. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141208&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.008.
LIU Yanfang, WU Pute, ZHU Delan, et al. Clogging of labyrinth emitters in greenhouse fertigation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12): 50–55. (in Chinese)
- 13 闫大壮, 杨培岭, 任树梅. 滴头流道中颗粒物质运移动态分析与 CFD 模拟[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(6): 71–74.
YAN Dazhuang, YANG Peiling, REN Shumei. Study on dynamic analysis of particle movement in drip emitter based on CFD[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(6): 71–74. (in Chinese)
- 14 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 Xinyang, WANG Wen'e, HU Xiaotao. Research on the emitter anti-clogging performance and system uniformity caused by fertigation[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(11): 1–5. (in Chinese)
- 15 BOZHURT S, OZEKICI B. The effects of fertigation managements on clogging of in-line emitters[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2006, 6(15): 3026–3034.
- 16 SHINDE D G, PATEL K G, SOLIA B M, et al. 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(2A): 917–922.
- 17 GB 5084—2005 农田灌溉水质标准[S]. 2005.
- 18 ISO/TC 23/SC 18/WG5 N12–V3 Clogging test methods for emitters[S]. 2006.
- 19 周博. 滴灌系统灌水器生物堵塞特性、评估及机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
ZHOU Bo. Characteristics, evaluation and mechanism of bio-clogging process in drip irrigation emitters[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 20 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)
- 21 张俊. 迷宫流道灌水器水力与抗堵塞性能评价及结构优化研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2009.
ZHANG Jun. Evaluation of hydraulic and anti-clogging performances and structural optimization of labyrinth-channel emitters [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- 22 牛文全, 喻黎明, 吴普特, 等. 迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(9): 51–55.
NIU Wenquan, YU Liming, WU Pute, et al. Influence of angle of labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(9): 51–55. (in Chinese)
- 23 姚允斌, 朱志昂. 物理化学教程[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 1985.
- 24 [日] 镰仓武富. 尿素肥料详说[M]. 马复祥, 译. 北京: 农业出版社, 1959.
- 25 宋其圣. 无机化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- 26 魏明, 王希敏, 张克从. 尿素的结晶习性和晶体缺陷研究[J]. *人工晶体*, 1988(增刊1): 252.
WEI Ming, WANG Ximin, ZHANG Kecong. Study on the crystal habit and crystal defect of urea[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 1988(Supp. 1): 252. (in Chinese)
- 27 蒋国俊, 张志忠. 长江口阳离子浓度与细颗粒泥沙絮凝沉积[J]. *海洋学报*, 1995, 17(1): 76–82.
- 28 DURAN-ROS M, PUIG-BARGUÉS J, ARBAT G, et al. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(1): 67–79.
- 29 孙其诚, 厚美瑛, 金峰, 等. 颗粒物物理与力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- 30 PITTS D J, HAMAN D Z, SMAJSTRIA A G. Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems1 [J]. *Agricultural and Biological Engineering*, 1986, 40(1–2): 201–218.
- 31 FEIGIN A, RAVINA I, SHALHEVET J. Effect of irrigation with treated sewage effluent on soil, plant and environment[M] // FEIGIN A, RAVINA I, SHALHEVET J. *Irrigation with Treated Sewage Effluent*. Springer Berlin Heidelberg, 1991: 34–116.
- 32 [苏] 巴拉诺夫, [苏] 考列尼科夫. 钾肥及其施用[M]. 王统正, 译. 北京: 科学技术出版社, 1957.
- 33 李东光, 翟怀凤. 精细化学品配方(九)[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2008.