

尿素对浑水水肥一体化滴灌滴头堵塞的影响

官雅辉^{1,3,4}, 牛文全^{1,2}, 刘璐^{2,4}, 王亚琼^{1,3}

(1. 中科院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为确定水肥一体化灌溉过程中, 尿素对滴头堵塞的影响, 分别配置了3种泥沙浓度(1.0、1.5 g·L⁻¹和2.0 g·L⁻¹)、3种肥料质量浓度(1%、2%和3%), 进行了间歇灌水堵塞试验, 分析了滴头流量和排出泥流量。结果表明: 施加尿素对浑水滴灌具有缓解滴头堵塞的作用, 在一定的尿素浓度范围内, 施肥浓度越大, 减缓作用越明显; 施肥浓度对滴头的堵塞形式和主要堵塞物淤积位置的影响很小。滴头出流泥沙含量随灌水次数的增加呈现先快速增加, 后逐渐变缓并趋于下降的趋势。施加尿素提高了滴头泥沙输送能力, 施肥浓度越大, 滴头输送泥沙的能力越大, 泥沙排出率越大。浑水中施加尿素具有减缓滴头堵塞, 延长滴头有效灌水次数的作用, 当含沙量为2.0 g·L⁻¹时, 尿素浓度为1%、2%和3%的水肥一体化滴灌有效灌水次数比未添加尿素的分别提高11%、89%和100%。可尝试通过尿素水肥一体化滴灌, 缓解黄河水滴灌滴头堵塞危险, 提高滴灌系统使用效率。

关键词: 尿素; 浑水; 滴头堵塞; 水肥一体化; 滴头流量

中图分类号: S275.6 文献标志码: A

Influence of urea on emitter clogging with muddy water fertigation

GUAN Ya-hui^{1,3,4}, NIU Wen-quan^{1,2}, LIU Lu^{2,4}, WANG Ya-qiong^{1,3}

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

Abstract: Three kinds of sediment concentrations (1.0, 1.5 g·L⁻¹ and 2.0 g·L⁻¹) and three concentrations of the fertilizers (1%, 2% and 3%) were set up to determine the effect of urea on the clogging of the drip in the process of fertigation, and intermittent irrigation clogging test was conducted. The amount of discharge sediment and deposits sediment in the capillary was analyzed. The results showed that the application of urea to muddy water drip irrigation had the effect of relieving drip clogging. The effect of fertilization on the clogging of the emitter and the location of the main clogging was small. After apply urea to muddy water, the number of completely clogged emitters had declined, while the number of partially clogged drippers had increased. The sediment content in the drip flow increased with the increase of irrigation times, then gradually slows down and tends to decrease. Application of urea to muddy water improved the drip sediment transport capacity, the greater the concentration of fertilization, the greater the capacity of the drip sediment transport, the greater the discharge sediment rate. The application of urea in the water had the effect of slowing the clogging of the drip and prolonging the effective irrigation times of the dripper. When the sediment concentration was 2.0 g·L⁻¹, the number of effective irrigation with the urea concentration of 1%, 2%, and 3% was 11%, 89% and 100% higher than that of urea without adding urea. After application of urea to muddy water, changing the nature of the electrochemical properties and sediment particle surface of muddy water, muddy water stable aggregates sediment flocculation difficult to form, the ability to carry muddy sediment particles applied urea increased, thus play a role in slowing the emitter clogging. The current study can provide a way to alleviate the risk of drip clogging which using the Yellow River water and improve drip

收稿日期: 2017-06-28

修回日期: 2017-09-06

基金项目: 自然科学基金项目(51679205); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0400202)

作者简介: 官雅辉(1993—), 男, 硕士研究生, 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, 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: niwq@nwfau.edu.cn.

irrigation system efficiency.

Keywords: urea; muddy water; clogging of dripper; fertigation; dripper flow

近年来,河套引黄灌区水资源供需矛盾日益突出,黄河水滴灌需求越来越大,黄河水滴灌实践也越来越普及^[1-3]。但黄河水高含沙、高浊度的特点制约着滴灌的发展,建设过滤池和相应的首部过滤设备所需费用较大,增加了滴灌系统的投入,不便于滴灌技术的推广。黄河水即使经过滤后,仍有大量泥沙进入滴头流道,易造成滴头堵塞^[4-7]。

另外,水肥一体化滴灌面积越来越大,是未来灌溉施肥的重要发展趋势。水肥一体化滴灌过程中,由于水中溶入了化学肥料,增加了滴头堵塞的复杂性,提高了滴头堵塞防治的难度。简单过滤未经长期沉淀处理的黄河水与可溶性化学肥料一起可能会造成更为复杂的滴灌滴头堵塞形式^[8-9]。李康勇^[10]等研究认为浑水施肥滴灌具有加速滴头堵塞的作用,刘璐^[11-12]等研究发现施肥对滴头堵塞的作用受泥沙级配和灌水温度影响,肥料特性是决定堵塞类型和诱发风险的重要因素,在清水中施加尿素后有加速滴头堵塞的风险;杜立鹏^[13]等也认为在清水中施加尿素对滴头堵塞有加速作用。Bozkurt^[14]等发现同时包含 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 肥料的施肥方式易导致灌水器堵塞,刘燕芳^[15]等认为 CaCO_3 沉淀是导致硬水滴灌滴头堵塞的主要原因。总之,浑水滴灌与施肥一体化过程中增加了滴头堵塞发生发展过程的复杂性。但施肥对滴头堵塞影响的机理还不是非常清楚,施肥对滴头堵塞的影响是否与肥料类型和肥料浓度有关有待进一步研究。

为了探明施肥对浑水滴灌滴头堵塞的影响过程,考虑到氮肥是使用范围最广,使用量最大的化学

肥料,而尿素为最主要的氮肥,本试验选择了 3 种不同尿素浓度和 3 种不同的泥沙浓度,分析了内镶片式滴头堵塞过程对于泥沙和尿素浓度组合的响应,为浑水水肥一体化滴灌技术使用提供依据。

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。工作压力 70 kPa 时,流量为 $2.9 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。滴头流道宽 0.8 mm,齿高 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%。毛管管径为 16 mm。通过开展前期试验发现,工作压力对滴头堵塞影响较小,工作压力在 60~120 kPa 范围内时,滴头堵塞情况基本一致,故本试验采用工作压力 70 kPa。

试验用尿素(陕西渭河重化工有限责任公司),含氮量 $\geq 46.6\%$ 。试验用水为杨凌自来水。试验泥沙取自渭河陕西杨凌段河漫滩地河床淤泥。将河床淤泥表面的树枝、草等杂质剔除之后,用铁铲收集深度为 0~15 cm 表层淤泥,将所有采回的样品混合均匀后,带回实验室风干研磨,最后过 140 目筛网,收集小于 0.1 mm 的泥沙(泥沙粒径级配见表 1)。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浑水情况。有研究表明黄河水泥沙颗粒表面有生物膜的存在,并会对滴头堵塞造成一定的影响^[16-17],但由于试验条件有限且本试验主要通过室内模拟引黄滴灌研究施肥对浑水滴灌堵塞的影响,因而对生物因素考虑较少。

表 1 试验用泥沙粒径级配

Table 1 Sediment particle size

粒径范围/mm Particle size range	<0.002	0.002~0.005	0.005~0.01	0.01~0.02	0.02~0.05	0.05~0.1
所占百分比 Percentage/%	13.24	3.61	4.85	11.98	41.4	24.92

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 10 kPa; 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, 水沙混合设备由水桶、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 个滴头^[10]。本试验目的是探究浑水中施用尿素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, 提高试验结果可靠性。

1.2 试验方法

根据我国滴头水力性能测试规范结合相关文献^[18]的研究成果, 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的泥沙浓度 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 10、15、20 倍配置浑水含沙量(ρ_s) 为 1.0 、 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 三种泥沙浓度。依照

生产实践的施肥浓度,分别配置质量浓度(ρ_n)为1%、2%和3%尿素浓液。设计完全组合试验(9个处理),未施肥和施肥各3个处理作为对照组,共15个处理,每次铺设4条毛管,每条毛管有5个滴头,每次灌水结束后,将滴头流量进行称重。

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,灌水结束后通过称量传感器记录每个滴头的流量,计算每根毛管的浑水平均流量与清水流量之比,即平均相对流量 q_r ,并计算灌水均匀度 C_u 。每次灌水结束后,将量杯中的水进行统一收集,放置于水桶中静置,待水体变清澈后形成水沙两层结构,收集桶内泥沙,装入锡箔纸碗中,并放入烘箱内,105℃烘干,将烘干的土样装入自封袋称重。

1.3 评价指标与方法

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%时滴头已经发生严重堵塞;国际微灌系统关于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;目前,我国现行《微灌工程技术规范》要求滴灌系统设计灌水均匀度不能小于85%,实测灌水均匀度不能小于80%^[19]。在本试验中,为了适当延长试验中的灌水次数,设定当灌水均匀度小于70%时,停止试验,若灌水次数达到20次后,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:

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

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

其中 q_r 为平均相对流量,%; C_u 为灌水均匀度; q_i 为第*i*个滴头的流量 $L \cdot h^{-1}$; q_0 为滴头设计流量 $L \cdot h^{-1}$; \bar{q} 为平均流量 $L \cdot h^{-1}$ 。

堵塞形式定义^[10]:在结束灌水时,当滴头流量为0时,为完全堵塞;当滴头相对流量介于0~70%之间时为部分堵塞,70%~100%为轻微堵塞。

堵塞位置定义^[20]: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,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。

滴头出流泥沙含量:滴头单位体积出流量所含泥沙质量(单位: $g \cdot L^{-1}$)

泥沙输送能力:实际排出泥沙总量与理论排出泥沙量的比值。

2 结果与分析

2.1 施尿素浓度对滴头流量变化的影响

不同的施肥浓度和泥沙浓度的组合对平均相对流量 q_r 和灌水均匀度 C_u 的影响不一样(图1)。

从图1可以看出,在含有非常少量固体悬浮物的清水中加入尿素后,滴头流量易随灌水次数的增加出现波动下降现象,尿素浓度越大,流量波动幅度越大,尿素具有一定加速滴头堵塞的风险。但在清水中添加尿素,对流量的影响非常小,灌水均匀度一直保持在较高的水平。灌水20次后,3种施肥浓度的滴头平均相对流量在0.97~1.00之间波动变化,灌水均匀度在0.94~0.98之间波动变化(图1a)。清水施加尿素有加速滴头堵塞的风险,这与刘璐^[12]和王心阳^[21]等研究结果相一致,且随着施肥浓度的增大,流量波动幅度越大,这主要是尿素分子缔合析出物容易捕捉团聚流道内悬浮颗粒并粘附在流道壁面,使得滴头流量减小,而流道内形成的紊流又能够使粘附在流道壁面的物质发生一定的冲洗,导致流量的波动幅度比较大。

当泥沙浓度为 $1.0 g \cdot L^{-1}$ 时,灌水8次后,所有处理的流量均出现不同程度的下降,未施加尿素的流量下降较大,灌水均匀度也相对较低。灌水20次后,未施加尿素处理的灌水均匀度低于70%,而施加尿素处理的流量变化相对平缓(图1b)。当泥沙浓度为 $1.5 g \cdot L^{-1}$ 时,灌水1~4次,施加尿素的滴头流量出现下降趋势,未施加尿素的滴头在灌水7次后才出现明显的流量下降趋势。但是未施加尿素滴头流量下降速度较大,灌水13次后,灌水均匀度小于70%,施加尿素滴头下降平缓,尿素浓度越大,流量下降越平缓。另外,施加尿素滴头流量随灌水次数的增加存在流量下降-恢复的波动现象,但波动幅度明显小于泥沙浓度为 $1.0 g \cdot L^{-1}$ 。分别在灌水14、19和19次后,尿素浓度为1%、2%和3%滴头的灌水均匀度下降到70%线以下(图1c)。当泥沙浓度为 $2.0 g \cdot L^{-1}$ 时,灌水6次后,未施加尿素的滴头流量直线下降,灌水9次后灌水均匀度已小于70%。尿素浓度为1%的滴头流量变化与未施加尿素的类似,灌水2次滴头流量直线下降,但下降速度小于未施加尿素的处理。浓度为2%和3%的施加尿素处理的滴头流量下降比较缓慢,分别在灌水17次和18次后,灌水均匀度下降到70%线以下(图1d)。本试验研究结果与李康勇^[10]等研究结果不同,主要是因为李康勇等试验中所选取的过磷酸钙复合肥易产生大量的细小悬浮颗粒造成滴头堵塞。

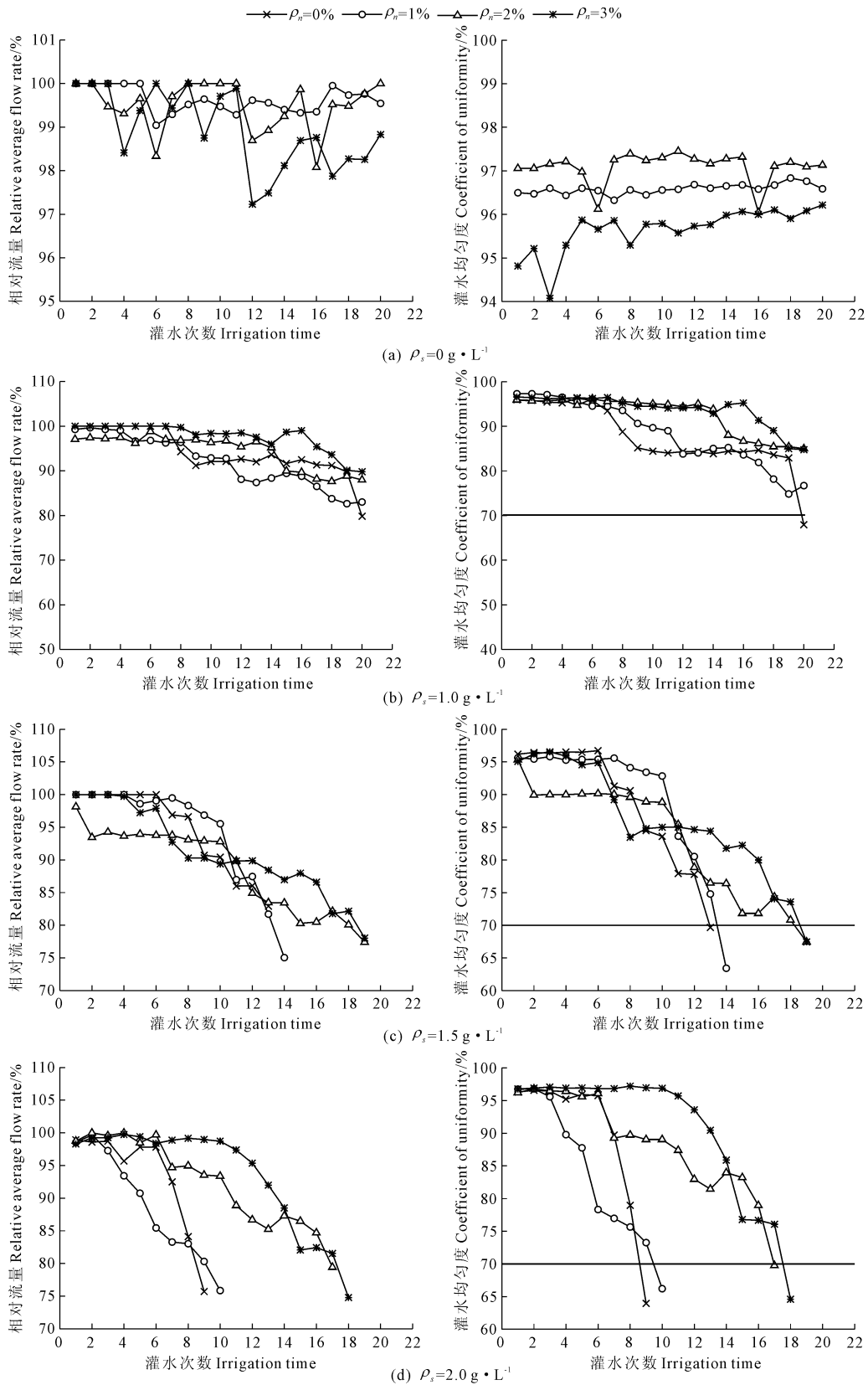


图 1 泥沙浓度和施肥浓度对相对流量和灌水均匀度的影响

Fig. 1 Influence of sediment concentration and fertilizer concentration on coefficient of uniformity and relative flow rate

而浑水中施加尿素后, 尿素破坏水结构, 生成部分尿
化单体而使其有序度下降, 胶团变小, 溶液粘度降

低, 泥沙颗粒间相互吸附团聚的能力减弱; 加入尿素
后, 提高了浑水的介电常数, 由于泥沙颗粒表面带有

负电荷,泥沙颗粒不容易形成团聚体;另外,由于疏水作用的存在,在形成疏水键的过程中使得部分水分子呈无序状态,且疏水基团发生收缩从而导致泥沙颗粒间不易团聚和淤积而随水排出^[22-25]。此外,尿素是水结构的破坏者,通过改变水的网状结构而间接影响溶质在水溶液中的热力学行为,施加尿素的浑水携带泥沙颗粒的能力增强^[26-29]。综合以上,浑水中施加尿素后,改变了浑水的性质和泥沙颗粒表面的电学性质,浑水中稳定的泥沙颗粒团聚体较难形成,施加尿素的浑水携带泥沙颗粒的能力增强,因而起到了减缓滴头堵塞的作用。

在一定尿素浓度条件下,滴头流量比未施加尿素的更早出现流量下降现象(图 1a,图 1c),施加尿素存在加快滴头堵塞的风险。当灌溉水中泥沙浓度较大时,施加尿素可以延长有效灌水次数,减缓滴头流量下降速度,施加尿素存在缓解滴头堵塞的作用(图 1c,图 1d)。按照平均相对流量大于额定流量 75% 为有效灌水计算,当泥沙浓度为 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,尿素浓度为 1%、2% 和 3% 处理的有效灌水次数比

未添加尿素处理的分别增加 11%、89% 和 100%。说明灌溉水中施加尿素后加速和缓解滴头堵塞的作用同时存在,当灌溉水中泥沙浓度较大($1.5 \sim 2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 时,总体表现为尿素缓解滴头堵塞,延长滴头有效灌水次数。由于泥沙颗粒是造成堵塞的主要因素,为提高滴灌带的使用寿命,应该将浑水中的泥沙浓度降低到 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,可放宽至 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$;当泥沙浓度大于 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,应该将施肥浓度提高到 2% 及以上,以减缓滴头堵塞。在利用浑水进行灌溉时,灌水后应该定期利用清水对滴灌带进行冲洗,以减少滴灌带内的泥沙淤积和增强泥沙颗粒的排出能力,达到减缓堵塞,提高滴灌系统利用效率的目的^[30]。而对于不同温度和流道结构等因素对随浑水施尿素对滴灌滴头堵塞的影响及其相关机理还有待进一步研究。

2.2 尿素浓度对滴头堵塞位置与堵塞形式的影响

灌水结束后,统计了不同处理滴头堵塞泥沙的主要聚集位置和滴头堵塞的主要形式,结果分别见表 2 和表 3。

表 2 滴头堵塞位置统计表

Table 2 Position of emitter clogging

化肥浓度 / % Fertilizer concentration	进水口堵塞滴头数 / 个 Number of inlet clogging emitters / unit			流道堵塞滴头数 / 个 Number of flow clogging emitters / unit		
	$\rho_s = 1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
	0	1	1	2	3	3
1	0	1	1	2	3	3
2	1	1	2	2	2	2
3	1	1	0	2	2	4

表 3 滴头堵塞形式统计表

Table 3 Type of emitter clogging

化肥浓度 / % Fertilizer concentration	完全堵塞滴头数 / 个 Number of completely clogging emitters / unit			部分堵塞滴头数 / 个 Number of partially clogging emitters / unit		
	$\rho_s = 1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
	0	4	4	5	1	0
1	2	4	4	0	1	1
2	3	3	4	0	2	0
3	3	3	4	1	1	2

每个处理共 20 个滴头,总共 240 个滴头。从表 2 可以看出,随着泥沙浓度增大,堵塞滴头的数量逐渐增加。施加尿素后,堵塞滴头的数量略有下降。未施加尿素时进口堵塞和流道堵塞滴头的比例为 4: 9,施加尿素后,变为 4: 11,说明施加尿素后,浑水滴灌流道堵塞的滴头数为增加趋势,进口堵塞的滴头数为下降趋势。当尿素浓度分别为 1%、2% 和

3% 时,浑水滴灌堵塞滴头总数均为 10 个,低于未添加尿素的情况(13 个)。从堵塞滴头的数量考虑,施加尿素具有一定缓解滴头堵塞的作用。

从表 3 可以看出,施加尿素后,浑水滴灌完全堵塞滴头数量有所下降,部分堵塞滴头数量有所上升,尿素使滴头流量减小-恢复波动的能力增强,滴头发生完全堵塞的几率下降。为了进一步比较说明,

施加尿素对滴头堵塞位置与形式的影响,表 4 列出了有关文献的相关统计结果。浑水中施加尿素后,堵塞滴头的总数相对于未施肥呈下降的变化趋势,且流道堵塞滴头个数增加,进口堵塞的滴头个数下降。一方面是由于施加尿素后,与水相融合后浑水粘度降低,含尿素浑水改变了水分子的结构,使得浑

水输送泥沙的能力增强^[26-27];另一方面,尿素的加入,破坏了形成泥沙颗粒稳定团聚体的条件,使得泥沙颗粒较难在流道进口处形成较大的稳定的团聚体,泥沙颗粒被更远的输送到流道内并在狭小的流道空间内发生絮凝团聚,并逐渐造成流道的部分或完全堵塞,因而流道和部分堵塞所占比重更大。

表 4 滴头堵塞类型与位置对比

Table 4 Comparison of emitter clogging type and location

测试人 Tester	完全堵塞滴头的比例/% Ratio of completely clogging emitters			部分堵塞的比例/% Ratio of partially clogging emitters	总和/% Sum
	进水口 Inlet	流道 Channel	出口 Outlet		
本试验 This test	4.44	12.22	0	4.44	21.10
吴泽广 ^[18] WU Ze-guang ^[18]	19.72	25.22	3.61	8.06	56.94
李康勇 ^[10] LI Kang-yong ^[10]	38.18	18.18	0	9.09	65.45

表 4 可以看出,本试验总堵塞滴头比例为 21.10%,显著小于未施肥浑水滴灌的滴头堵塞比例(56.94%),也小于文献[10]施肥滴灌滴头堵塞比例(65.45%),由于文献[10]添加的肥料为过磷酸钙,易在水中产生大量的细小悬浮颗粒造成滴头进口堵塞。与文献[10]、[18]比较,本试验添加尿素后,显著降低了进口堵塞与流道堵塞滴头的比例,总体上减小了部分堵塞滴头的比例,缓解了滴头堵塞趋势。

2.3 施肥对排出泥沙能力的影响

为进一步比较各处理对排出泥沙能力的影响,计算了泥沙输送能力(实际排出泥沙总量与理论排出泥沙量的比值,表 5)、滴头泥沙相对排出率(表 6)、滴头排出泥沙含量(图 2)。

表 5 不同施肥浓度的泥沙输送能力

Table 5 Sediment transport capacity of different fertilization concentration and sediment concentration

化肥浓度/% Fertilizer concentration	泥沙输送能力/% Sediment transport capacity		
	$\rho_s = 1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
0	37.31	38.22	36.88
1	44.03	38.38	38.14
2	44.12	43.92	45.10
3	49.08	46.30	48.42

从表 5 可以看出,与未施肥相比,施加尿素后,滴头的泥沙输送能力均有所提高,当泥沙浓度为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,尿素浓度为 3% 时,滴头泥沙输送能力最大,比未施加尿素处理提高了 31.5%。滴头泥沙输送能力随施肥浓度的增大而增大。由于泥沙输送能力不同,不同处理滴头的输出泥沙质量也不同。考

虑到不同处理实际灌水次数不同,由于滴头堵塞,每次滴头实际流量也不同,为了便于比较,根据不同处理实测滴头排出泥沙量,计算平均泥沙排出量,再计算与未施肥处理平均排出泥沙质量的比值,得到滴头泥沙相对排出率(表 6)。表 6 中,施肥较未施肥的滴头泥沙排出率大,且随着施肥浓度的增加,滴头泥沙排出率越大,施肥浓度为 3% 时,滴头泥沙排出率最大。进一步说明施肥起到了减缓滴头堵塞的效果。浑水中施加尿素后,改变了浑水的性质和泥沙颗粒表面的电学性质,且尿素分子黏滞力小于对泥沙颗粒表面结构的改善作用,较难形成稳定的泥沙颗粒团聚体,泥沙颗粒能较好的随水输移和排出^[31],因此泥沙输送能力和相对泥沙排出率较未施肥大,且随着施肥浓度的增大而变大。

表 6 相对泥沙排出率

Table 6 Average emitter discharge rate

化肥浓度/% Fertilizer concentration	滴头泥沙排出率/% Emitter discharge rate		
	$\rho_s = 1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
0	1	1	1
1	1.180	1.004	1.034
2	1.182	1.149	1.223
3	1.315	1.211	1.313

人工配制浑水滴灌试验,当浑水流经输水管道,进入毛管,再经流道流出滴头的整个过程中,泥沙将会在各级管道,滴头流道内淤积,流出滴头的含沙量与配制的初始泥沙浓度不同。图 2 为不同尿素浓度在不同泥沙浓度浑水滴灌过程中,滴头出流泥沙含量。

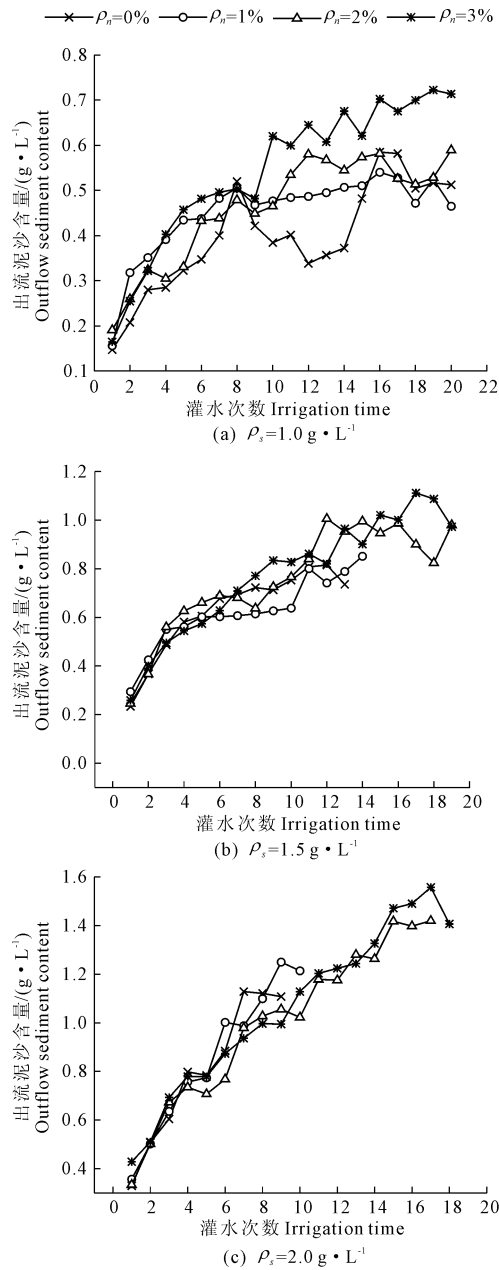


图 2 施肥浓度对滴头出流泥沙含量的影响

Fig. 2 Effect of fertilizer concentration on outflow sediment content

从图 2 可以看出,滴头出流泥沙含量随灌水次数的增加呈现先快速增加,后逐渐下降的趋势。泥沙浓度为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,施加尿素的滴头出流泥沙含量大于未施肥的滴头,且随着施肥浓度的增加而增大。泥沙浓度为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,未施肥滴头出流泥沙含量与施加尿素的基本一致,但是在随灌水次数增加过程中,未施肥处理滴头出流泥沙浓度最早从上升趋势转化为下降趋势。如泥沙浓度为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,灌水 11 次后,未施肥处理滴头出流泥沙含量转为下降趋势,施肥浓度为 2% 处理,灌水 16 次后才转为下降趋势;泥沙浓度为 2.0 g

$\cdot \text{L}^{-1}$ 时,未施肥处理滴头出流泥沙含量在灌水 7 次后转为下降趋势,而施肥浓度为 1%、2% 和 3% 处理分别在灌水 9、15、16 次后才转为下降趋势。施加尿素后,可以使滴头较长时间保持较高的泥沙输出能力,尿素浓度越大,滴头保持较高泥沙输出能力的时间越长。通过分析出流泥沙含量与平均相对流量的相关关系(表 7)可知,出流泥沙含量与平均相对流量存在显著负相关关系,随着出流泥沙含量的增大,平均相对流量减小。第一次灌水后,大量的泥沙淤积在毛管和首部系统内,而排出的泥沙量较少,因而出流泥沙含量小;随着灌水次数的增加,进入毛管内的泥沙总量增加,部分泥沙发生悬浮,可供出流泥沙量增多,滴头出流泥沙含量大,呈现加速增长形态,在灌水后期,系统中滴头发生部分或完全堵塞,排出泥沙量减少,导致滴头出流泥沙含量呈一定的减小趋势。出流泥沙含量与平均相对流量之间存在较强的相关性,因此可以通过滴头出流泥沙含量来判断滴头堵塞情况。

表 7 出流泥沙含量与平均相对流量的相关关系

Table 7 Correlation between outflow sediment and relative average flow

化肥浓度 / % Fertilizer concentration	相关系数 Correlation		
	$\rho_s = 1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho_s = 2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
0	-0.680 **	-0.691 **	-0.734 **
1	-0.648 **	-0.814 **	-0.974 **
2	-0.571 **	-0.836 **	-0.914 **
3	-0.658 **	-0.919 **	-0.665 **

注: ** 代表在 0.01 水平上显著相关。

Note: ** represents a significant correlation at the 0.01 level.

3 结 论

- 1) 浑水中施加尿素后改变了滴头堵塞的位置和形式,延长了有效灌水次数,起到了一定的缓解滴头堵塞的作用,
- 2) 施肥与未施肥相比,泥沙输送能力和相对泥沙排出率有显著的提升,且随着施肥浓度的增大而增大。
- 3) 应加强过滤和冲洗等措施减小进入毛管和滴头的泥沙量,提高滴灌系统使用效率。
- 4) 可尝试通过评价出流泥沙含量和排出泥沙能力判断滴头的抗堵塞性能。
- 5) 本试验未考虑生物因素对滴头堵塞的影响,在后续的研究中,我们将进一步综合考虑物理、化学和生物三种因素的耦合作用对滴头堵塞的影响。

参考文献:

- [1] 秦大庸,于福亮,裴源生. 宁夏引黄灌区耗水量及水均衡模拟[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 19-24.
- [2] 刘勤. 宁夏引黄灌区节水农业技术模式研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [3] 王战平. 宁夏引黄灌区水资源优化配置研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- [4] 张万宝,李聪敏,曹峰. 黄河水滴灌工程泥沙处理效果评估[J]. 农业工程, 2015, 5(4): 107-109.
- [5] 张杰武,冯吉,徐飞鹏,等. 引黄滴灌砂石过滤器滤料过滤性能[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(4): 357-361.
- [6] 孙贵芳,于健,杜斌,等. 过滤后黄河水对滴灌系统的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(10): 901-907.
- [7] 杜慧慧. 乌海市引黄滴灌水净化模式及净化系统水质变化规律研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [8] Bounoua Salim, Tomas Séverine, Labille Jérôme, et al. Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches[J]. Irrigation Science, 2016, 34(4): 327-342.
- [9] 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.
- [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.
- [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]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 98-104.
- [12] 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.
- [13] 杜立鹏,张新燕. 低压下加肥对迷宫滴头流量及灌水均匀度的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 142-145.
- [14] Bozkurt Sefer. The Effects of fertigation management in the different type of in-line emitters on trickle irrigation system[J]. Journal of Applied Sciences, 2006, 6(5): 1165-1171.
- [15] 刘燕芳,吴普特,朱德兰,等. 滴灌条件下水的硬度对滴头堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 95-100.
- [16] 王伟楠,徐飞鹏,周博,等. 引黄滴灌水源中泥沙表面附生生物膜的分形特征[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(10): 914-920.
- [17] 周博,李云开,宋鹏,等. 引黄滴灌系统灌水器堵塞的动态变化特征及诱发机制研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4/5): 123-128.
- [18] 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.
- [19] 中华人民共和国水利部. GB/T 50485-2009 微灌工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [20] 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.
- [21] 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, 4(11): 1-5.
- [22] Mukerjee P, Ray A. The effect of urea on micelle formation and hydrophobic bonding[J]. Journal of Physical Chemistry, 1963, 67(1): 190-192.
- [23] 王镜和. 含无机盐和尿素的直链烷基苯磺酸钠浓溶液的粘度性质[J]. 高等学校化学学报, 1995, 16(2): 287-289.
- [24] 张建合. 疏水凝胶及疏水相互作用研究进展[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2004, 17(2): 237-243.
- [25] Rupley J A. The effect of urea and amides upon water structure[J]. Journal of Physical Chemistry, 1964, 68(7): 269-284.
- [26] Grdadolnik J, Marechal Y. Urea and urea-water solutions-an infrared study[J]. Journal of Molecular Structure, 2002, 615(1-3): 177-189.
- [27] Soper A K, Castner E W. Impact of urea on water structure: a clue to its properties as a denaturant[J]. Biophysical Chemistry, 2003, 105(2-3): 649.
- [28] Adama R, Balyuzi H H M, Burge R E. X-ray diffraction studies of aqueous solutions of urea[J]. Journal of Applied Crystallography, 1977, 10(4): 256-261.
- [29] Keuleers R, Desseyn H O, Rousseau B, Alsenoy C V. Vibrational analysis of urea[J]. Journal of Physical Chemistry A, 1999, 103(24): 281-284.
- [30] 王家生,陈立,刘林,等. 阳离子浓度对泥沙沉降影响实验研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 169-173.
- [31] 武海霞,刘建军,赵启明. 尿素溶液浓度对一维垂直入渗特性影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2011, 4(6): 67-69.

(上接第 85 页)

- [14] 李明思,郑旭荣,贾宏伟,等. 棉花膜下滴灌灌溉制度试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2001, 4(11): 13-15.
- [15] 李明思,康绍忠,杨海梅. 地膜覆盖对滴灌土壤湿润区及棉花耗水与生长的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 49-54.
- [16] 申孝军. 棉花滴灌节水机理与优质高效灌溉模式[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [17] 崔永增. 西部戈壁葡萄膜下节水灌溉模式研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [18] 艾先涛,李雪源,孙国清,等. 新疆棉花膜下滴灌技术研究与存在问题[J]. 新疆农业大学学报, 2004, 27(S1): 69-71.
- [19] 蔡焕杰,邵光成,张振华. 棉花膜下滴灌毛管布置方式的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 45-49.
- [20] 韩权利,赵万华,丁玉成. 滴灌用灌水器的现状及分析[J]. 节水灌溉, 2003, 1(1): 17-18.
- [21] 石培泽,杨秀英. 春小麦适度亏缺灌溉的节水增产效应[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 6(2): 80-83.
- [22] 石培泽,马金珠. 干旱区节水灌溉理论与实践[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2004.