

肥料类型及浓度对水肥一体化浑水滴灌滴头输沙能力的影响

官雅辉^{1,3,5}, 牛文全^{1,2}, 刘璐², 李学凯⁴, 张文倩⁴

(1. 中科院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 5. 中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100)

摘要:为研究浑水水肥一体化灌溉过程中,不同肥料对滴头输沙能力的影响,合理配置滴灌系统首部的过滤设备和设施,降低过滤设施的成本,提高滴灌系统工作效率,选取了常用的3种肥料(尿素、硫酸钾和水溶性复合肥)及其3种肥料质量分数(1%、2%和3%),在含沙量为1g/L的浑水条件下进行间歇灌水堵塞试验,分析了滴头累积泥沙输出量、出流含沙量和泥沙输出率。结果表明:浑水施肥可以增强滴头的输沙能力,肥料类型和浓度不同,对滴头输沙能力的影响也不同。滴头输沙能力随着尿素浓度的增大而增大,当尿素质量分数为3%时,滴头输沙能力比未施肥处理增加了11%($P < 0.05$)。滴头输沙能力随硫酸钾和复合肥浓度的增大而减小,当硫酸钾质量分数为1%时,滴头输沙能力大于未施肥处理,增大了25%;当复合肥质量分数>2%时,滴头输沙能力小于未施肥处理。标准化的累积泥沙输出量与标准化的累积灌水量的拟合直线斜率也可作为滴头输沙能力的判断依据,肥料质量浓度是影响滴头输沙能力的重要因素,应根据不同的肥料类型,确定适宜的施肥浓度。研究结果对确定滴头防堵塞策略提供一定的参考。

关键词:肥料;泥沙;灌溉;浑水;水肥一体化;滴头;输沙能力

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.01.011

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-01-0078-07

官雅辉,牛文全,刘璐,李学凯,张文倩.肥料类型及浓度对水肥一体化浑水滴灌滴头输沙能力的影响[J].农业工程学报,2018,34(1):78-84. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.01.011 http://www.tcsae.org

Guan Yahui, Niu Wenquan, Liu Lu, Li Xuekai, Zhang Wenqian. Effect of fertilizer type and concentration on sediment transport capacity of dripper in drip fertigation with muddy water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(1): 78 - 84. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.01.011 http://www.tcsae.org

0 引言

滴头堵塞一直是制约滴灌系统应用的重要因素。为了提高滴头的抗堵塞能力,滴灌系统首部均需配置多级过滤设备或设施。尤其在黄河水滴灌区域,如河套灌区,为了降低滴头堵塞和提高滴灌系统的使用效率,滴灌系统首部除了配置网式过滤器和砂石过滤器,或者碟片过滤器与砂石过滤器组合外,还需要修建规模较大的沉砂池等设施,极大地增加了建设成本,占用了大量的农用土地。因此,研究滴头输沙能力的影响因素,对于降低滴灌系统首部过滤设施的投入,减少管网系统的泥沙沉积,使更多的泥沙输送到田间等具有重要意义。

水肥一体化滴灌是经常采用的一种灌溉施肥方式,液体肥料随灌溉水一同进入毛管,对灌溉水质造成一定的影响,进而影响毛管中泥沙淤积和滴头输沙能力,并可能增加滴头堵塞的复杂性。滴灌系统的毛管底部泥沙淤积(泥床)受泥沙颗粒大小、密度和堵塞滴头数的影

响^[1-3]。吴泽广等^[4]研究表明,泥沙级配对毛管泥沙淤积量有一定的影响;Shannon等^[5]发现细小泥沙颗粒易被输送到毛管尾部,冲洗有利于减少泥沙在毛管中的淤积。肥料进入管网系统后,会影响水中悬浮颗粒的沉淀,进而影响悬浮颗粒进入滴头流道的含量、级配和滴头的输沙能力。Nabil等^[6]研究表明,管道中浑水泥浆的存在会使泥沙浓度分布、水流流速、压降产生变化,进而对毛管中泥沙的淤积和输出产生影响。国内外学者针对不同肥料对滴灌滴头堵塞的影响开展了许多的研究:刘璐等^[7]研究表明,不同肥料诱发滴头堵塞主要物质的形成机理不同,加速堵塞的风险存在差异;李康勇等^[8]发现,浑水中加入复合肥有加速滴头堵塞的作用;Bozkurt等^[9]发现同时包含 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的肥料易形成难溶硫酸钙沉淀,增强滴头堵塞风险。

综上,目前就肥料对滴头输沙能力与毛管泥沙沉积影响的研究较少。为此,本试验选择了3种不同肥料和3种不同的肥料浓度,分析肥料类型及其浓度对内镶片式滴头输沙能力的影响,为提高滴头输沙能力,指导引黄灌区高含沙水流水肥一体化滴灌提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验用毛管为内镶片式迷宫流道滴灌带(秦川节水

收稿日期: 2017-07-24 修订日期: 2017-11-10

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

作者简介: 官雅辉,主要从事水土资源高效利用研究。

Email: guanyahui15@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 牛文全,研究员,博导,主要从事灌溉理论与节水技术研究。

Email: nwq@nwafu.edu.cn. 中国农业工程学会会员: 牛文全(E041200504S)

灌溉设备工程有限公司)。滴头的流道宽为 0.8 mm, 齿高为 1.1 mm, 齿间距为 3 mm, 流道单元数为 14 个, 制造偏差为 1.76%。毛管管径为 16 mm。工作压力为 70 kPa 时, 滴头流量为 2.9 L/h。

选取 3 种引黄灌区常用肥料: 1) 尿素(陕西渭河重化工有限责任公司), 氮质量分数 46.6%, 可完全溶解; 2) 钾肥为农用硫酸钾(国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司), K_2O 质量分数 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; 3) 水溶复合肥(沃夫特复合肥有限公司), N 、 P_2O_5 和 K_2O 质量分数分别为 16%、6% 和 36%, 可完全溶解。

浑水配置: 试验用水为自来水。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、草等杂质剔除后, 用铁铲收集深度为 0~15 cm 表层淤泥, 带回实验室风干、研磨, 过 140 目(孔径 0.104 mm) 筛网, 用激光粒度仪(马尔文 2000, 英国)测定试验用泥沙级配为粒径 0.002 mm 的体积分数为 13.24%, 粒径 > 0.002~0.005 mm 的体积分数为 3.61%, 粒径 > 0.005~0.01 mm 的体积分数为 4.85%, 粒径 > 0.01~0.02 mm 的体积分数为 11.98%, 粒径 > 0.02~0.05 mm 的体积分数为 41.4%, 粒径 > 0.05~0.104 mm 的体积分数为 24.92%。

1.2 试验设计及方法

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^[4]。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。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。本试验旨在研究浑水滴灌条件下不同肥料类型和肥料浓度对滴头输沙能力的影响, 以揭示随浑水施肥对滴头堵塞规律及机理的影响。重点考察相同(或相近)泥沙含量, 入口压力条件下, 施肥对于滴头输沙能力的影响。因此, 对于大田滴灌系统中不同毛管位置滴头入口泥沙含量和压力存在一定差异等情况对滴头输沙能力的影响, 本文暂未考虑。笔者进行预试验发现, 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, 这与王心阳等^[10]的研究结果也基本一致, 故本试验设置工作压力 70 kPa。故按照规范^[11], 测试毛管长度为 1.5 m, 毛管上不同位置滴头的工作压力和含沙量等差异较小。

试验设计最大灌水次数为 20 次, 总灌水时间为 10 h, 以模拟大田实际灌水时间为几十小时以上的情况^[12-13]。本试验增大了灌溉水含沙量和肥料质量浓度, 便于在短期内获得随浑水施肥对滴头输沙能力的影响规律。根据文献^[14], 按照过滤后灌溉水中最大含沙量 0.1 g/L 的 10 倍配置浑水含沙量为 1.0 g/L。参照文献^[15], 分别配置肥料质量分数为 1%、2% 和 3%。根据 3 种肥料, 3 种肥料质量浓度, 设计完全随机组合试验, 以未施肥浑水滴灌处理为对照, 共 10 个处理。每个处理共 4 条毛管, 每条毛管为 1 个重复。采用固定周期的间歇浑水抗堵塞试验方法, 测试压力 70 kPa, 每次灌水 30 min, 灌水间隔 30 min,

每次灌水后通过质量传感器记录滴头出水量(g), 计算平均相对流量。为了减少测试过程中过滤设备截沙量, 影响测试结果, 且本文主要研究输沙能力, 故测试系统未配置过滤装置。

每次灌水后, 将每条毛管滴头的出水统一收集, 于水桶中静置, 待水体变清澈, 形成水沙 2 层结构后, 收集桶内泥沙, 装入锡箔纸碗中, 放入烘箱内, 经过 105 °C 烘干, 将烘干的土样装入自封袋用天平测定其质量, 即泥沙输出量, g。灌溉水黏滞系数用乌氏黏度计法测定^[16]。

1.3 评价指标与方法

《微灌工程技术规范》^[17]规定: 当滴头流量小于额定流量的 75% 时, 认为滴头发生严重堵塞。本试验为了适当增加灌水次数, 设定当平均相对流量 < 70% 时, 停止试验。灌水 20 次后, 相对流量即使还 > 70%, 也停止灌水。不同处理的实际灌水次数不同, 最多的为 20 次, 最少的仅 6 次, 在计算滴头输沙能力时选取 6 次灌水数据。

平均相对流量(q_r)为 20 个试验滴头的平均流量(\bar{q})占滴头额定流量(q_0)的百分比, %。第 i 次灌水后的累积泥沙输出量(Q_i)为第 i 次灌水后 20 个滴头泥沙输出量(p_i)之和, g。

标准化方法为

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中 x 为原始数据; x^* 为标准化后数据; x_{\min} 为最小值; x_{\max} 为最大值。

泥沙输出率为

$$\eta_i = \frac{p_i}{v_i \rho_s - Q_{i-1}} \times 100 \quad (2)$$

式中 η_i 为第 i 次灌水的泥沙输出率, %; v_i 为累积灌水量, 即第 1 到第 i 次所有滴头的累积出水量, L; ρ_s 为配置的灌溉水含沙量, 1 g/L。

滴头输沙能力为

$$\lambda = \frac{1}{3n} \left(\frac{Q_n}{Q_0} + \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i}{\rho_0} + \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i}{\eta_0} \right) \quad (3)$$

式中 λ 为滴头输沙能力值; Q_0 为未施肥处理的平均滴头泥沙输出量, g; ρ_i 为第 i 次灌水的出流含沙量, g/L; ρ_0 和 η_0 分别为未施肥处理的平均滴头出流含沙量(g/L)和平均滴头泥沙输出率; n 为有效灌水次数。

1.4 数据分析方法

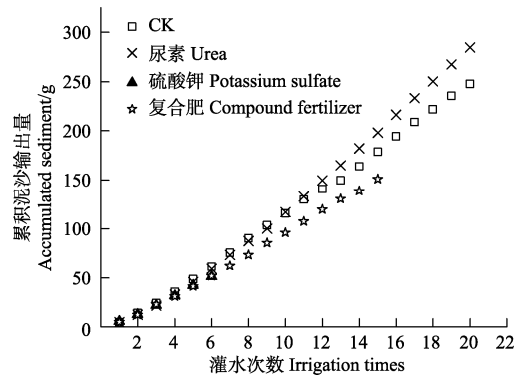
每次灌水结束后, 分别称量 20 个滴头的出水量, 计算累积泥沙输出量(g), 滴头出流含沙量(g/L), 泥沙输出率。先将各处理的滴头泥沙输出量、滴头出流含沙量、滴头泥沙输出率、滴头输沙能力、灌溉水黏滞系数进行正态分布检验, 再通过 SPSS 软件, 利用多重比较分析方法(least significant difference test, LSD)分析不同处理之间的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 肥料类型和浓度对滴头累积泥沙输出量的影响

肥料类型和浓度对滴头累积泥沙输出量的影响趋势基本相同,以肥料质量分数为3%时3种肥料对累积泥沙输出量的影响为例(图1),随灌水次数增加,累积泥沙输出量呈增加趋势。采用线性回归模型拟合二者之间的关系,结果见表1。滴头累积泥沙输出量与灌水次数均呈显著线性增加趋势,决定系数 R^2 均大于0.99($P<0.05$)。未施加肥料处理的滴头累积泥沙输出量与灌水次数拟合直线斜率为13.0,单位时间泥沙输出量为24.78 g/h,施加尿素后,斜率增大,施加硫酸钾和复合肥后,斜率减小。随着肥料浓度的增加,尿素处理斜率呈增大趋势,复合肥和硫酸钾处理的斜率则呈变小趋势。当硫酸钾质量分数分别为1%、2%和3%时,滴头累积泥沙输出量与灌水次数拟合直线斜率分别为12.6、9.7、9.4。尿素质量分数为3%时,斜率与单位时间泥沙输出量最大,分别为15.1和28.46 g/h。硫酸钾质量分数为3%时,斜率与单位时

间泥沙输出量最小,分别为9.4和17.10 g/h。滴头累积泥沙输出量与灌水次数拟合直线斜率越大,说明单位时间内滴头泥沙输出量越大,滴头的输沙能力越强。



注:CK为未施肥处理,下同。

Note: CK is muddy water without fertilizer, the same below.

图1 肥料质量浓度为3%时不同肥料对累积泥沙输出量的影响
Fig.1 Effect of different fertilizers at concentration of 3% on accumulated sediment

表1 不同处理灌水时长、累积泥沙总量及累积泥沙输出量与灌水次数的线性拟合结果

Table 1 Irrigation duration, total sediment and linear regression results of accumulated sediment and irrigation times for different treatments

肥料质量分数 Fertilizer concentration/%	尿素 Urea				硫酸钾 Potassium sulfate				复合肥 Compound fertilizer			
	灌水时长 Irrigation duration/h	泥沙总量 Total sediment/g	斜率 Slope	R^2	灌水时长 Irrigation duration/h	泥沙总量 Total sediment/g	斜率 Slope	R^2	灌水时长 Irrigation duration/h	泥沙总量 Total sediment/g	斜率 Slope	R^2
0	10	247.8b	13.0	0.99*	10	247.8a	13.0	0.99*	10	247.8a	13.0	0.99*
1	10	255.4b	13.6	0.99*	4	95.0b	12.6	0.99*	10	227.5b	11.9	0.99*
2	10	255.9b	13.7	0.99*	3	52.8c	9.7	0.99*	9	190.5b	11.0	0.99*
3	10	284.6a	15.1	0.99*	3	51.3c	9.4	0.99*	7.5	150.8c	10.7	0.99*

注: *代表 $P<0.05$, 同列不同小写字母表示0.05水平下的差异, 下同。

Note: * represents $P<0.05$ and different letters at same column indicate significant differences at 0.05 level, the same below.

从表1可以看出,尿素和复合肥质量分数为3%处理的滴头累积泥沙总量与未施肥处理之间有显著性差异($P<0.05$)。滴头累积泥沙总量随硫酸钾的添加或复合肥浓度的增大而减小。施加硫酸钾处理的滴头累积泥沙总量与未施肥处理之间有显著性差异($P<0.05$)。施加硫酸钾和复合肥处理的灌水时长(平均相对流量 $<70%$ 的灌水时间)明显下降,且施加1%硫酸钾可使灌水时长和累积泥沙总量显著地降低,说明施加复合肥和硫酸钾后,毛管中泥沙淤积加剧,施加硫酸钾导致的堵塞风险更高。

标准化的累积灌水量与标准化的累积泥沙输出量拟合曲线斜率约为1,可作为滴头输沙能力的判断指标之一,标准化的累积灌水量与标准化的累积泥沙输出量拟合曲线斜率越小,说明随着灌水量增大,滴头泥沙输出量越来越低,滴头的输沙能力较低,滴头越易发生堵塞。分别将累积灌水量和累积泥沙输出量按照式(1)进行标准化处理,以标准化的累积灌水量为横坐标、标准化的累积泥沙输出量为纵坐标进行线性拟合,结果见图2。从图2可以看出,不同肥料类型的累积灌水量与累积泥沙输出量之间存在极强的线性关系, R^2 均大于0.9。未施肥的标准化的累积灌水量与标准化的累积泥沙输出量关系曲线斜率为1.02,施加尿素、硫酸钾和复合肥后的标准

化累积灌水量与标准化的累积泥沙输出量关系曲线斜率分别为0.99、0.92和0.99,小于对照处理。硫酸钾的斜率明显小于其他处理,易造成滴头堵塞。

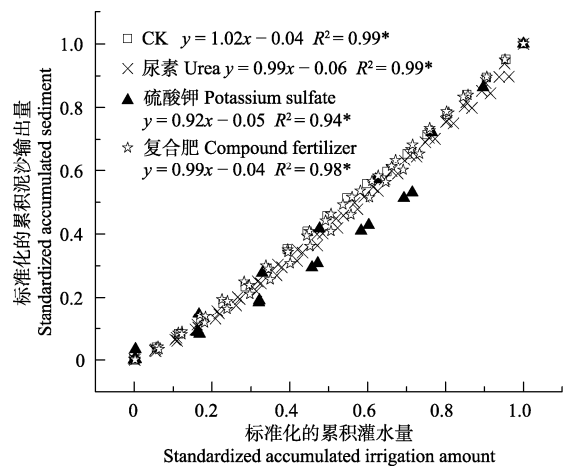


图2 不同处理标准化的累积泥沙输出量与标准化的累积灌水量之间的关系

Fig.2 Relationship between standardized accumulated sediment and standardized accumulated irrigation amount for different treatments

2.2 施肥对滴头出流含沙量的影响

滴头出流泥沙含量随灌水次数增加呈增大趋势 (图 3), 灌水后期, 增长变缓。施肥增大了滴头出流含沙量的最大值, 未施肥的最大滴头出流含沙量为 0.58 g/L, 尿素质量分数为 1%、2% 和 3% 时的最大滴头出流含沙量分别为 0.60、0.61 和 0.66 g/L。施加硫酸钾肥处理的有效灌水次数仅为 6~8 次, 远远小于未施肥处理。通过多重比较分析可知, 硫酸钾质量分数为 3% 的滴头出流含沙量与未施肥处理之间有显著差异 ($P < 0.05$)。复合肥料质量分数为 1%、2% 和 3% 时的最大出流含沙量分别为 0.71、0.70 和 0.60 g/L。由于所有处理的最小值均基本接近 0, 说明施肥增大了滴头出流含沙量的分布范围, 可导致施肥后滴头出流含沙量增大。

2.3 施肥对滴头泥沙输出率的影响

根据式 (2) 计算的泥沙输出率绘制了图 4。从图 4

可以看出, 随着灌水次数增加, 滴头泥沙输出率逐渐减小, 滴头泥沙输出率小于 100%。施加尿素后, 滴头泥沙输出率随灌水次数增加而减小, 且其减小幅度与未施肥处理差异小。施加 1% 的硫酸钾后, 滴头泥沙输出率随灌水次数增加下降幅度比未施肥处理的大。硫酸钾和复合肥料质量分数为 2% 和 3% 时, 滴头泥沙输出率较未施肥小。施加硫酸钾处理的滴头泥沙输出率与未施肥处理之间有显著性差异 ($P < 0.05$)。本试验中, 灌溉水源的含沙量为 1.0 g/L 时, 最大滴头泥沙输出率不大于 20%, 说明水中较大部分泥沙沉积在输水管网系统中。

2.4 施肥对滴头输沙能力的影响

不同肥料类型和肥料浓度处理的有效灌水次数不同, 施加尿素、硫酸钾和复合肥料处理的最小有效灌水次数分别为 20、6 和 15 次。根据式 (3) 分别计算了尿素、硫酸钾和复合肥的滴头输沙能力, 结果见表 2。

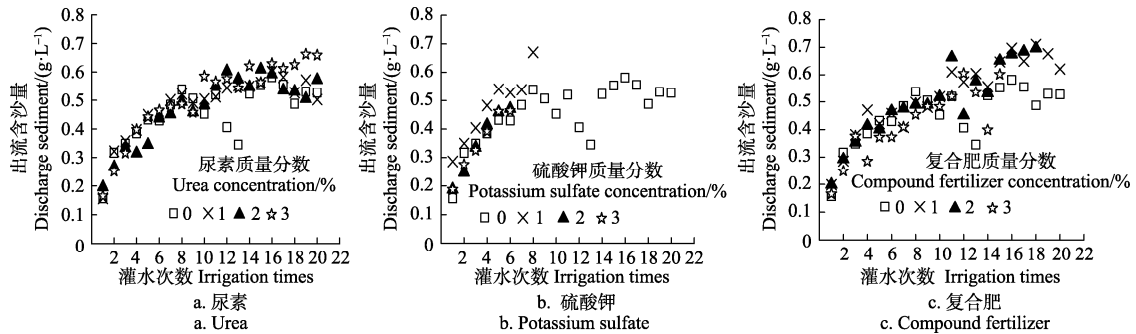


图 3 不同肥料类型及浓度对滴头出流含沙量的影响

Fig.3 Effect of fertilizer type and concentration on content of discharge sediment for drippers

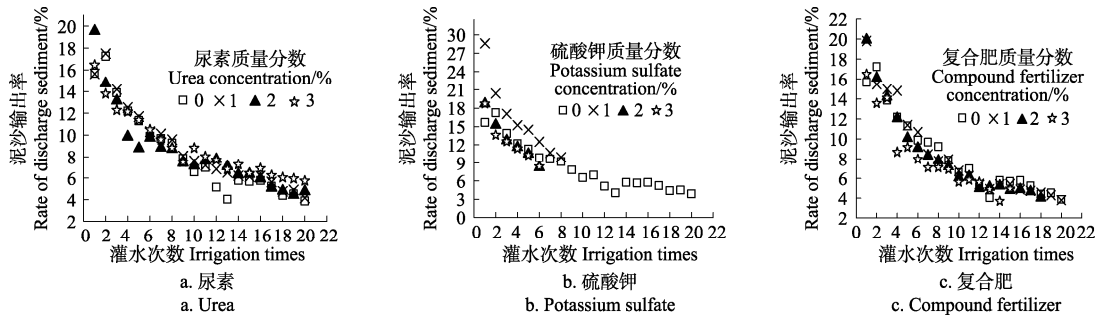


图 4 不同肥料类型及浓度对滴头泥沙输出率的影响

Fig.4 Effect of fertilizer type and concentration on rate of discharge sediment for dippers

表 2 不同处理对滴头输沙能力的影响

Table 2 Effect of different treatments on sediment transport capacity of dippers

肥料质量分数 Fertilizer concentration/%	尿素 Urea	硫酸钾 Potassium sulfate	复合肥料 Compound fertilizer
0	1.00b	1.00b	1.00a
1	1.02b	1.25a	1.03a
2	1.03b	0.95c	0.98a
3	1.11a	0.93c	0.90b

从表 2 中可以看出, 肥料类型和浓度对滴头输沙能力有较大的影响, 肥料类型和浓度不同对滴头输出能力的影响也不同。浑水中施加 3% 尿素后, 增大了滴头的输

沙能力, 比未施肥增大了 11%。滴头输沙能力随硫酸钾浓度的增大而减小, 当肥料质量分数为 1% 时, 滴头输沙能力大于未施肥处理, 增大了 25% ($P < 0.05$); 当复合肥料浓度大于 2% 时, 滴头输沙能力则小于未施肥处理。

3 讨论

当肥料类型和浓度不同时, 滴头的累积泥沙输出量、出流含沙量和泥沙输出率之间存在较大的差异。滴头泥沙输出量和出流含沙量受灌溉水含沙量、滴头流量和有效灌水次数等因素的影响, 不能单独作为评价滴头输沙能力大小的指标, 而滴头泥沙输出率反映了滴头实际输出泥沙量与应输出泥沙量的比值, 因此能较好地反应滴

头的输沙能力,滴头泥沙输出率越大,持续时间越长,滴头的输沙能力越强。滴头标准化的累积泥沙输出量与标准化的灌水量的拟合直线斜率越大,说明单位时间内滴头泥沙输出量越大,滴头输沙能力越强。

表3为灌溉水黏滞系数,从表中可以看出浑水中施加尿素后,灌溉水黏滞系数随肥料浓度的增大而减小,而随复合肥肥料浓度的增大而增大。浑水中施加硫酸钾后,灌溉水黏滞系数较未施肥大。

表3 施加不同肥料后的黏滞系数
Table 3 Water viscosity coefficient after application of different fertilizers

肥料质量分数 Fertilizer concentration/%	尿素 Urea/ 10^{-3} Pa·s	硫酸钾 Potassium sulfate/ 10^{-3} Pa·s	复合肥 Compound fertilizer/ 10^{-3} Pa·s
0	1.51a	1.51c	1.51b
1	1.31b	1.76b	1.59b
2	1.23c	1.88a	1.64a
3	1.14d	1.81a	1.67a

浑水中施用尿素后,滴头的出流含沙量提高(图3),由于尿素的疏水作用,泥沙颗粒间不易团聚,减小了泥沙在流道内的淤积^[18-21]。试验发现浑水中泥沙颗粒不易吸附在流道壁面(剖开滴头后流道壁面较其他处理干净),随水流出性较好。由表3可知,浑水中施加尿素后,灌溉水的黏滞系数较未施肥小,滴头的输沙能力提高,且随着肥料浓度的增大而增大。另外,浑水中紊流和水流剪切力的存在会使形成的泥沙团聚体分散破碎,不利于形成大的团聚体,泥沙颗粒易随水出流^[22]。因此,施加尿素后,滴头累积泥沙输出量和出流含沙量较未施肥大,提高了滴头输沙能力。

硫酸钾肥料中的 K^+ 和 SO_4^{2-} 的存在会形成大的泥沙颗粒团聚体以及硫酸盐等沉淀,加速了流道内堵塞淤积物的形成^[23-27]。施加硫酸钾肥料后形成的部分较大的团聚体颗粒降低了水流拖曳运动能力,这部分大团聚体易沉积在毛管内,影响泥沙颗粒的运移。毛管中大的泥沙颗粒团聚体的存在会使水流的紊动程度显著降低,导致泥沙沉积和泥床的形成,降低泥沙颗粒的输送能力^[28-29]。施加硫酸钾增大了水体的黏滞系数,滴头输沙能力随肥料浓度的增大而减小,泥沙颗粒易在毛管和流道内发生淤积(表3)。刘璐等^[7]和王心阳等^[30]研究发现施加钾肥会形成硫酸盐或碳酸盐沉淀,使得泥沙颗粒更容易在毛管中发生淤积,这与本研究结果基本相同。因此,当肥料质量分数较大时($>2\%$),滴头输沙能力减小。浑水中施加硫酸钾后可以形成复杂的絮凝结构和比表面积较大的小团聚体,它们易进入迷宫流道,增加了滴头泥沙输出率(图4,硫酸钾质量分数为1%)。这些小团聚体进入滴头流道后淤积在流道内会减小流道的过水断面,导致灌水后期滴头泥沙输出量减小,有效灌水次数减小。

浑水中施加螯合态复合肥后,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,随水输出滴头的能力变强。另外,由于螯合剂与重金属

配位作用强,络合了肥液中的重金属等离子,并在泥沙颗粒间形成胶团,导致泥沙的团聚,形成较为稳定的聚合物结构,容易在毛管内产生淤积^[31-32]。这与表2和表3所得结果相同,施加复合肥后,灌溉水的黏滞系数增大,肥料质量分数大于2%时,滴头输沙能力较未施肥小。管道中长时间浑水流动的存在会导致毛管底部淤积形成一层较厚的泥沙,改变管道不同部位的泥沙颗粒浓度分布,影响滴头的输沙能力^[33]。

本文只对滴头输沙能力做了初步的研究,由于试验条件等方面的限制,不同滴头流量和较低泥沙含量、较低肥料浓度等条件下的滴头输沙能力,以及不同肥料类型和浓度条件,水的黏滞系数、滴头输出能力与滴头抗堵塞能力之间的关系等尚需进一步研究。

4 结论

1) 浑水中施加尿素后滴头输沙能力增大。且随着肥料浓度的增大而增大,肥料质量浓度为3%时,滴头输沙能力较未施肥增大了11% ($P < 0.05$)。

2) 施加硫酸钾和复合肥后,滴头输沙能力随肥料浓度增大而减小。硫酸钾质量分数为1%时,滴头输沙能力较未施肥大,增大了25%;复合肥质量分数 $>2\%$ 时,滴头输沙能力较未施肥小。

3) 标准化的累积泥沙输出量与标准化的灌水量的拟合直线斜率可作为滴头输沙能力的判断依据。浑水中施肥后,标准化的累积泥沙输出量与标准化的灌水量的拟合直线斜率值从大到小分别为尿素、复合肥和硫酸钾处理。说明施加尿素后滴头的泥沙输出量增加最快。

4) 肥料质量浓度是影响滴头输沙能力的重要因素,应根据不同的肥料类型,确定适宜的施肥浓度,并加强对滴灌系统的冲洗,减少毛管泥沙淤积量。

[参考文献]

- [1] Ling J, Skudarnov P V, Lin C X, et al. Numerical investigations of liquid-solid slurry flows in a fully developed turbulent flow region[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2003, 24(3): 389 - 398.
- [2] Messa G V, Malvasi S. Computational investigation of liquid-solid slurry flow through an expansion in a rectangular duct[J]. Journal of Hydrology & Hydromechanics, 2014, 62(3): 234 - 240.
- [3] James L G, King B A. Predicting sediment deposition patterns in pipes with diminishing flow[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1984, 27(6): 1758 - 1762.
- [4] 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 of labyrinth channels emitters and deposition in emitter-pipe[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2014, 42(5): 223 - 228. (in Chinese with English abstract)
- [5] Shannon W M, James L G, Bassett D L, et al. Sediment transport and deposition in trickle irrigation laterals[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1982, 25(1): 0160 - 0164.

- [6] Nabil Tamer, El-Sawaf Imam, et al. Sand-water slurry flow modelling in a horizontal pipeline by computational fluid dynamics technique[J]. International Water Technology Journal, 2014, 4(1): 1 - 17.
- [7] 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.
Lu Liu, Niu Wenquan, Wu Zhiguang, et al. Risk and inducing mechanism of acceleration emitter clogging with fertigation through drip irrigation systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 228 - 236. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 81 - 90. (in Chinese with English abstract)
- [9] Bozkurt S, Ozekici B. 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.
- [10] 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 Xinyang, Wang Wen'e, Hu Xiaotao, et al. Influences of particle diameter and inlet pressure on emitter clogging[J]. Water Saving Irrigation, 2014(10): 18 - 21. (in Chinese with English abstract)
- [11] 全国农业机械标准化技术委员会. 农业灌溉设备滴头和滴灌管技术规范和试验方法: GB/T17187-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 6.
- [12] 王茜, 杨建全. 宁夏引黄灌区滴灌冬小麦、玉米灌溉施肥制度研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(36): 17585 - 17588.
Wang Qian, Yang Jianquan. Study on drip irrigation program of winter wheat and crop in Ningxia yellow river irrigation district[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2012, 40(36): 17585 - 17588. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杜军, 沈振荣, 张达林. 宁夏引黄灌区滴灌水肥一体化冬小麦灌溉施肥技术研究[J]. 节水灌溉, 2011(12): 44 - 49.
Du Jun, Shen Zhenrong, Zhang Dalin. Study on drip fertigation technology for winter wheat in Ningxia Yellow River irrigation district[J]. Water Saving Irrigation, 2011(12): 44 - 49. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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)
- [15] 李真朴, 刘学军, 翟汝伟, 等. 宁夏半干旱区玉米滴灌灌溉制度试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 242 - 246.
Li Zhenpu, Liu Xuejun, Zhai Ruwei, et al. Experimental study on irrigation schedule of maize drip irrigation in semi-arid region of Ningxia Province[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(5): 242 - 246. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙义, 马沛生. 巴豆酸乙酯与乙醇混合液密度和粘度的测定及关联[J]. 高校化学工程学报, 2007, 21(3): 511 - 515.
Sun Yi, Ma Peisheng. Densities and viscosities for binary mixture of the ethyl crotonate with ethanol at different temperatures[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2007, 21(3): 511 - 515. (in Chinese with English abstract)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 微灌工程技术规范: GB/T 50485-2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009: 13.
- [18] 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.
Zhang Jianhe. Progress in hydrophobic hydrogel and hydrophobic interaction[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2004, 17(2): 237 - 243. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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.
Wang Jinghe. Viscosity behavior of sodium linear alkyl benzene sulfonate solution with high concentration containing inorganic salts and urea[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 1995, 16(2): 287 - 289. (in Chinese with English abstract)
- [20] Rupley J A. The effect of urea and amides upon water structure[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1964, 68(7): 2002 - 2003.
- [21] Pasupati Mukerjee, Ashoka Ray. The effect of urea on micelle formation and hydrophobic bonding[J]. Journal of Physical Chemistry, 1963, 67(1): 190 - 192.
- [22] Matoušek V. Concentration distribution in pipeline flow of sand-water mixtures[J]. Journal of Hydrology & Hydromechanics, 2000, 48(3): 180 - 196.
- [23] 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 Zhaoyin, Wang Wenlong, Tian Shimin. Mineral composition and distribution of the sediment in the Yellow River basin[J]. Journal of Sediment Research, 2007(5): 1 - 8. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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.
- [25] 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, 1995(4): 182 - 185.
- [26] 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 Zhujun, Gao Jiajia, Zhao Wenyan, et al. Effects of application of phosphorus and potassium fertilizers on ion compositions of soil solution in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 261 - 266. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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 Haiying, Li Tingxuan, Zhou Jianmin. Salt accumulation, translocation and ion composition in greenhouse soil profiles[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 642 - 650. (in Chinese with English abstract)
- [28] Vreman A W. Turbulence attenuation in particle-laden flow in smooth and rough channels[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 773: 103 - 136.
- [29] Pathak M, Khan M K. Inter-phase slip velocity and turbulence characteristics of micro particles in an obstructed two-phase flow[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2013, 13(4): 371 - 388.
- [30] 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, 10.

- 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, 10. (in Chinese with English abstract)
- [31] 彭丽华, 朱志锋, 张国林, 等. 马铃薯产业与现代可持续农业会议论文集·A集[C]. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2015.
- [32] 袁有宪. 螯合剂EDTA的性质及其在水生生物培养与育苗中的作用[J]. *水产学报*, 1991, 15(8): 260 - 271.
- Yuan Youxian. Properties and actions of chelator EDTA in hydrobiontculture[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1991, 15(8): 260 - 271. (in Chinese with English abstract)
- [33] Matousek V. Interaction of slurry pipe flow with a stationary bed[J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining & Metallurgy*, 2007, 107(6): 365 - 372.

Effect of fertilizer type and concentration on sediment transport capacity of dripper in drip fertigation with muddy water

Guan Yahui^{1,3,5}, Niu Wenquan^{1,2}, Liu Lu², Li Xuekai⁴, Zhang Wenqian⁴

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Yangling 712100, China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 4. *College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China*; 5. *Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Yangling 712100, China*)

Abstract: Emitter clogging has been an important factor restricting the application of drip irrigation system. In order to improve the anti-clogging ability of the dripper, the front part of the drip irrigation system needs to be equipped with multi-stage filtration equipment or facilities. This study investigated the effect of different fertilizers on the sediment transport capacity during the integrated irrigation of muddy water with fertilizer in order to make rational allocation of filtration equipment and facilities of the first drip irrigation system, to reduce the cost of filtration facilities and to improve the efficiency of drip irrigation system. A total of 3 kinds of fertilizers (urea, potassium sulfate and water-soluble compound fertilizer) as well as 3 different concentrations (1%, 2% and 3%) were chosen to carry out intermittent irrigation clogging test in muddy water with the sediment concentration of 1 g/L. The accumulated sediment, discharge sediment of drippers and rate of discharge sediment for drippers were analyzed. Tap water was applied as the test water. Experimental sediment was taken from river flood beach silts along Weihe River in Shaanxi Yangling. The working pressure of this test was set to 70 kPa based on the preliminary experiment results. In order to increase irrigation times of this experiment, the test stopped when the average relative flow rate was below 70%. The test also stopped after 20 times of irrigation even though the relative flow rate was still above 70%. The results showed that the application of muddy water could enhance the sediment transport capacity of dripper. Different types and concentrations of fertilizer had different effects on the sediment transport capacity of dripper. Sediment transport capacity of dripper increased with rising urea concentrations. Compared with no fertilization treatment, when the urea concentration was 3%, the capacity value increased by 11% ($P < 0.05$). Sediment transport capacity of dripper decreased with the rising concentrations of potassium sulfate and compound fertilizer. As the concentration of potassium sulfate was 1%, the sediment transport capacity of dripper was significantly higher than that without fertilization ($P < 0.05$) but as the concentration of compound fertilizer was above 2%, sediment transport capacity of dripper was lower than no fertilizer treatment. The slope of the fitted straight line between the standardized accumulated sediment and the standardized accumulated irrigation amount could be used as the evaluation index for sediment transport capacity of dripper. The smaller the slope indicated that as the irrigation volume increased, the output of sediment of the dripper was lower, and the sediment transport capacity of dripper was also lower. The dripper was more likely to be clogged. Discharge sediment for drippers increased with the increasing frequency of irrigation. At the later stage of irrigation, its growth slowed down. Fertilization increased the maximum value of discharge sediment for drippers. With the increase of irrigation times, the rate of discharge sediment for drippers gradually decreased. After applying urea, rate of discharge sediment for drippers decreased with increasing irrigation times. After applying urea in the muddy water, the viscosity coefficient of irrigation water decreased with the increase of fertilizer concentration, while it increased with the rising concentration of compound fertilizer. After applying potassium sulfate in muddy water, the coefficient of irrigation water viscosity was higher than that without fertilization. The fertilizer concentration was an important factor that affected drip sediment output capacity. Appropriate fertilization concentration should be determined according to different types of fertilizers. The results provide valuable information for determining the anti-clogging strategy of dripper and improving the sediment transport capacity of dripper to guide integrated drip irrigation of water and fertilizer with high sediment concentration in the Yellow River irrigated area.

Keywords: fertilizers; sediments; irrigation; muddy water; fertigation; dripper; sediment transport capacity