

含沙水磁化处理减缓滴头堵塞机理研究

牛文全^{1,2} 赵雪^{1,3} 王照熙^{1,3} 张文倩^{1,3} 吕畅^{1,3} 董爱红^{1,3}

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

摘要: 为探究含沙水磁化处理对悬浮泥沙在滴灌管网中沉降的影响,揭示含沙水磁化处理对滴头堵塞的减缓机理,以内镶贴片式迷宫流道滴头为研究对象,设置4种磁化强度(0、0.2、0.4、0.6 T)和4种粒径级配(0~0.100 mm、0.075~0.100 mm、0.038~0.075 mm、0~0.038 mm)的泥沙,泥沙质量浓度为1.0、3.0 g/L,进行短周期间歇性灌水试验和絮凝沉降试验,利用MS2000型激光粒度分析仪、水质测试仪和乌氏粘度计等对毛管淤积泥沙机械组成、含沙水的电导率和粘滞系数等进行多角度分析。结果表明:磁化处理极显著地减缓了滴头流量和灌水均匀度的下降趋势($p < 0.01$),细颗粒泥沙(粒径0~0.03 mm)含量较高时,磁化处理对滴头堵塞的减缓作用最大,灌水结束时,滴头平均相对流量和灌水均匀度较未磁化处理分别提高17.41%和47.27%;磁化处理加速了悬浮泥沙的絮凝沉降速度,细颗粒泥沙含量越高,加速作用越大,沉降2 h后含沙水浊度较未磁化处理最高降低29.44%;磁化处理后毛管前段滴头堵塞率平均提高17.71%,毛管前中段淤积泥沙中值粒径减小了11.49%,磁化处理促进了毛管中细颗粒泥沙的絮凝作用,加速了其在毛管前段的沉降。磁化强度为0.4 T时,磁化处理对滴头堵塞和悬浮泥沙絮凝沉降的影响最大。建议引用细颗粒泥沙含量较高的黄河水滴灌时,宜采用磁化处理措施(磁化强度为0.4 T),既可以减缓堵塞以提高毛管使用寿命,又可提高作物生长品质,并定期冲洗毛管,降低滴头堵塞风险。

关键词: 磁化处理; 滴头堵塞; 絮凝沉降; 泥沙粒径级配

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0346-11 OSID: 

Mechanism of Magnetization Treatment of Sandy Water to Relieve Clogging of Dripper

NIU Wenquan^{1,2} ZHAO Xue^{1,3} WANG Zhaoxi^{1,3} ZHANG Wenqian^{1,3} LÜ Chang^{1,3} DONG Aihong^{1,3}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the influence of the magnetization treatment of sediment laden water on the settlement of suspended sediment in drip irrigation pipe network, and reveal the mechanism of mitigating the clogging of the dripper by the magnetization of sandy water, taking the inner patch type labyrinth flow channel dripper as the research object, four kinds of magnetization (0 T, 0.2 T, 0.4 T, 0.6 T) and four kinds of sediment particle size gradation (0~0.100 mm, 0.075~0.100 mm, 0.038~0.075 mm and 0~0.038 mm) sediment were set, the sediment mass concentration was 1.0 g/L and 3.0 g/L, short-period intermittent irrigation test and flocculation sedimentation test were carried out, and the capillary siltation was detected by MS2000 laser particle size analyzer, water quality tester and Ubbelohde viscometer. The mechanical composition of the sediment, the conductivity and the viscosity coefficient of the test muddy water were analyzed from multiple angles. The results showed that magnetization treatment significantly slowed down the downward trend of emitter flow and irrigation uniformity ($p < 0.01$). When the content of fine sand (0~0.03 mm) was high, magnetization treatment had the greatest effect on reducing emitter clogging. At the end of irrigation, the average relative flow rate and irrigation uniformity

收稿日期: 2021-11-03 修回日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079112、51679205)和山东省重大创新工程项目(2020CXGC010808)

作者简介: 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研究,E-mail: nwq@nwfufu.edu.cn

of the dripper were increased by 17.41% and 47.27% respectively compared with the unmagnetized treatment; magnetization treatment accelerated the flocculation and sedimentation rate of suspended sediment. The higher the content of fine sediment was, the greater the acceleration was, and the sedimentation was 2 h. The turbidity of the back turbidity was reduced by 29.44% compared with the unmagnetized treatment; the clogging rate of the dripper in the front of the capillary was increased by an average of 17.71% after magnetization, and the median size of the sediment in the middle of the capillary was reduced by 11.49%. The magnetization treatment promoted the fineness of the capillary. The flocculation of the granular silt accelerated its settlement in the front of the capillary. When the magnetization intensity was 0.4 T, the magnetization had the greatest influence on the clogging of the dripper and suspended sediment flocculation and sedimentation. It was recommended to use magnetization treatment measures (the magnetization intensity was 0.4 T) when the Yellow River drip irrigation with high fine particle content was used, which can slow down the blockage and increase the service life of the capillary. It can also improve the growth quality of crops and flush the capillary regularly to reduce the risk of dripper clogging.

Key words: magnetization treatment; dripper clogging; flocculation settlement; sediment particle size gradation

0 引言

滴灌是最有效的一种节水灌溉方式,但滴头堵塞问题一直是制约滴灌应用的重要因素,特别是采用黄河水等劣质水源进行灌溉时^[1-4]。黄河水中细微粒泥沙含量高,中游地区粒径小于 0.05 mm 泥沙总量高达 70% 以上^[5]。细微粒泥沙特殊的电化性质,在水中易发生絮凝作用,形成絮团,而细微粒泥沙的絮凝沉降是造成滴头物理堵塞的根本原因。解决黄河水滴灌的滴头堵塞问题,对促进农业发展具有重要意义。

关于延缓滴头堵塞的措施,主要有过滤、酸液冲洗、压力疏通、定期维护管理等,此外,还出现了一些新型水处理技术,如利用磁化处理水技术软化水质来进行抗堵塞管理^[6]。但目前关于磁化处理水技术尚处于初级阶段,其减缓滴头堵塞的作用机理尚未明晰。研究表明,水以一定的速度(1.2~2.5 m/s)流经磁场形成磁化水,磁场给水提供能量,使水分子间氢键断裂,水分子由团簇状变成单个极性水分子^[7],水的性质发生改变,水中溶解氧含量提高 4~6 mg/L,溶解度提高 20%~70%,水的电导率至少提高 2%,澄清速度提高 20%~90%^[8],浑水 ξ -电位下降,水中悬浮颗粒碰撞概率增大,水流渗透能力和携沙能力增强,且水磁化后约 6 h 内,其效果基本保持稳定^[9]。磁化处理可加速全尾砂沉降、提高污水的澄清速度、溶解去除老垢等^[10-12],并广泛应用于煤泥浮选和水质净化等。因此,含沙水磁化处理后,会影响水中悬浮泥沙的运动沉降轨迹,进而影响滴头堵塞。此外,不同磁化强度对水流性质的影响程度也不同^[13-14]。

目前关于含沙水磁化处理对滴头堵塞影响的研

究较少,也尚未发现关于黄河水磁化处理对滴灌影响的研究报道。为此,本文拟探究 4 种磁化强度和 4 种粒径级配泥沙组合下滴头堵塞的变化情况,并从微观角度分析悬浮泥沙在滴灌管网中的运移沉降过程,以揭示磁化处理对滴头堵塞的减缓机理,并探明减缓滴头堵塞的最优磁化强度,为引黄水滴灌滴头堵塞防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

本试验采用广泛应用于西北地区的内镶贴片式迷宫流道滴灌带(杨凌锦川管业科技有限公司),毛管为 PE 材料,壁厚 0.16 mm、管径为 16 mm。滴头结构为:流道宽度 0.60 mm、齿高 1.20 mm、齿间距 1.50 mm、流道深 1.10 mm、流道单元数为 6 个、滴头间距为 30 cm。工作压力为 60 kPa 时,滴头流量为 1.4 L/h。滴头水力性能曲线如图 1 所示,滴头流态指数 x 为 0.430 6,流态指数 x 越小说明滴头流量对进口压力越不敏感^[15]。

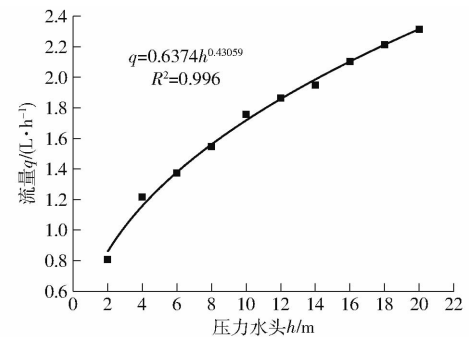


图 1 水力性能曲线

Fig. 1 Hydraulic performance curve

试验用浑水配制:试验用水为杨凌区自来水,水质参数如表 1 所示,符合灌水标准。

表 1 试验用自来水水质参数

参数	数值
化学需氧量 (COD)/(mg·L ⁻¹)	1.2~2.3
pH 值	7.86~8.01
溶解性总固体 (TDS) 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	106~152
电导率 (EC)/(μS·cm ⁻¹)	217.1~372.5
铁 (Fe) 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	<0.05
锰 (Mn) 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	<0.05
硫酸盐质量浓度/(mg·L ⁻¹)	10~21
总硬度/(mg·L ⁻¹)	70~81
细菌数/(CFU·mL ⁻¹)	<1

泥沙取自渭河陕西杨凌段河漫滩地河床泥沙,经自然烘干,剔除树枝、杂草等较大杂质后进行研磨,结合前期对比调查结果^[16],本试验泥沙可基本模拟引黄灌区实际泥沙。泥沙粒径是引起迷宫灌水器堵塞的主要原因^[17-18],不同河段、不同季节黄河泥沙含量不同,机械组成不同,诱发滴头堵塞风险的机理不同。研究指出,粒径 D 为 0.075~0.100 mm 和 0.030~0.038 mm 的泥沙易引起堵塞^[19],为了揭示不同粒径组成的相互作用,确定影响滴头堵塞的主导泥沙粒径范围,将渭河泥沙颗粒进行研磨过筛处理,以过滤后最大粒径为 0.100 mm 表征全颗粒级配泥沙(记为 D1),将过筛后小于 0.100 mm 的泥沙分为 3 组,其粒径范围分别为 0.075~0.100 mm、0.038~0.075 mm 和小于 0.038 mm,分别记为 D2、D3、D4,并用 MS2000 型激光粒度分析仪 (APA2000 型,马尔文公司)测定试验用泥沙机械组成,当大于 0.05 mm 的泥沙颗粒含量较高时,非常容易造成滴头堵塞,而一般天然沙,泥沙粒径大于 0.03 mm 或小于 0.01 mm 时絮凝作用不明显^[20],故为便于后续滴头堵塞及絮凝沉降的结果探讨,泥沙机械组成划分如表 2 所示,下文中粗颗粒泥沙指粒径大于 0.05 mm 的泥沙,细颗粒泥沙指粒径小于 0.03 mm 的泥沙。

表 2 试验用泥沙机械组成

含沙水 编号	质量分数/%			
	0~	0.01~	0.03~	0.05~
	0.01 mm	0.03 mm	0.05 mm	0.10 mm
D1	39.31	25.99	15.17	19.53
D2	0	0	0	100
D3	0	22.15	44.30	33.55
D4	15.85	44.33	39.82	0

试验用磁化器为永久性磁体(包头鑫达磁性材料厂生产),采用烧结汝铁硼制成,磁体呈方形,对称式布置,保证水流能够垂直通过磁感线,参考农业其他方面关于磁化强度的影响及永磁体的成本,磁

化强度选用 0.2、0.4、0.6 T,并经数字特斯拉计 (HT20 型,东莞市泰仕电子有限公司)进行校准。

抗堵塞测试平台参照 SL/T 67.1—1994《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和试验方法》^[21]搭建而成,如图 2 所示。试验平台并联设置 6 条毛管,每条毛管前端设置控制阀,平台左侧布设储水桶,储水桶容积为 140.5 L,通过水泵将储水桶中含沙水抽出进行抗堵塞试验,设置压力表监测试验水压。需对含沙水进行磁化处理时,关闭毛管进口端阀门阻止水流流入毛管,将磁化器固定于输水管路,确保水流从储水桶流出流经磁场返回储水桶中,以此进行磁化循环处理。

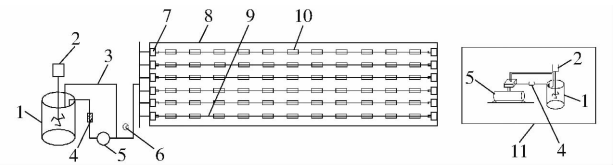


图 2 抗堵塞测试平台

Fig. 2 Anti-blocking test platform

1. 储水桶 2. 搅拌机 3. 输水管路 4. 磁化器 5. 水泵 6. 压力表 7. 阀门 8. 回水槽 9. 滴灌带 10. 滴头 11. 磁化循环装置

絮凝沉降试验所用含沙水通过磁化循环装置进行配置(图 2)。磁化循环装置右侧布设储水桶,其容积为 10 L,储水桶上配置小型搅拌机(额定转速 500 r/min),左侧布设自吸式水泵(额定流量 4 m³/h),水泵连接 PVC 输水管路(外径 32 mm,内径 26 mm),磁化装置布设在回水管外侧,保证水流垂直穿过磁场,未磁化时,将磁化器移除后重复上述操作。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 抗堵塞试验

设置 4 种磁化强度 0 (M0)、0.2 (M1)、0.4 (M2)、0.6 T (M3) 与 4 种粒径级配的含沙水(表 2)全组合处理共计 16 组,为突出物理堵塞并减小生物堵塞在堵塞中占比,本试验采用短周期间歇性灌水试验,每组处理共计 6 条毛管即 6 次重复。以宁夏黄河水引水渠口泥沙质量浓度 0.6~1.1 g/L 之间为依据^[22],为加速滴头堵塞缩短试验进程,设置泥沙质量浓度 3.0 g/L。为增加试验结果的普适性,选取全颗粒级配泥沙(泥沙编号 D1),泥沙质量浓度设置 1.0 g/L,磁化强度为 M0 和 M2 进行验证试验。据研究,当压力在 40~100 kPa 变化时,压力对于灌水均匀度的影响不显著,其变化范围在 1% 以内,生产实际中可以适当降低毛管的工作压力以达到降低造价的目的^[23],故本试验设置工作压力为 60 kPa,控制精度为 2%。毛管全长 6 m,每条毛管含

20 个滴头,测试时间为 1 h,灌水间隔 30 min,在每次灌水持续 30 min 时,以相邻两个滴头为一组,采用电子秤(质量误差为 0.1 g)采集 60 个滴头的流量,采集时间为 10 min,采集结束后用温度计测量每次灌水时的灌溉水温以进行温度修正。磁化处理组在每次灌水间隔期时,关闭毛管前端阀门,将灌溉水源通过磁化器循环 30 min,循环结束后,打开阀门,开始灌水,每组处理共计 20 次灌水^[24]。待灌水结束后,将每条毛管平均分成前部、中部、后部 3 组,每组长 2 m,剖开毛管,收集毛管中淤积泥沙,装入锡纸碗,并置于 105℃ 干燥箱(上海森信实验仪器有限公司)干燥,将相同处理的土样混合,平均分成 3 份,即 3 次重复,用 MS2000 型激光粒度分析仪(APA2000 型,马尔文公司)测量其机械组成。

1.2.2 絮凝沉降试验

试验因素同抗堵塞试验,每组处理重复 4 次,试验温度(25±1)℃。在 10 L 储水桶内配置相应浓度的含沙水,采用磁化循环装置,将试验用含沙水循环磁化 15 min,循环过程中用搅拌机对含沙水进行搅拌以使水沙混合均匀,为了避免循环流动过程中温度及絮凝的影响,非磁化处理组也循环流动 15 min。循环结束后取上层水样,置于 1 000 mL 玻璃量筒(高 30 cm,内径 6.5 cm)内静置,分别在静置 0、5、10、15、30、45、60、90、120 min 时,采用移液管法在距量筒底 1/3 处取 10 mL 水样,置于浊度仪(AQ3700 型,Orion 公司)中,测量含沙水浊度。同时,从搅拌桶中取适量水样,置于乌氏粘度计(合肥申谊玻璃制品有限公司)中测量含沙水的运动粘滞系数(μ),并用水质测试仪(HI5522 型,意大利哈纳公司)测量水样温度和电导率(EC)等。

1.3 评价指标

为消除温度对滴头流量的影响,采用流量-温度公式^[1]修正,用相对流量评价滴头堵塞及灌水质量情况,平均相对流量计算式为

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

式中 D_{ra} ——平均相对流量, %
 n ——滴头总数
 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

灌水均匀度采用克里斯琴森均匀系数 C_u 表示,计算公式为

$$C_u = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}|}{\sum_{i=1}^n q_i} \right) \times 100\%$$
 (2)

式中 q_i ——第 i 个滴头流量, L/h
 $\bar{q}$ ——所有滴头的平均流量, L/h

采用中值沉速来反映泥沙沉降速度^[25],即根据各水深 h' 处浊度降至初始浊度的 50% 时所需时间的平均值 $t_{0.5}$ 得到的沉速 ω_{50} ,可表示为

$$\omega_{50} = h' / t_{0.5}$$
 (3)

1.4 数据处理

采用 SPSS 23.0 软件进行显著性分析及方差分析,不同处理间比较采用最小显著性差异法进行检验,多重比较采用 LSD 法,Matlab 软件进行曲线拟合,Origin 2020 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 磁化处理对滴头平均相对流量及灌水均匀度的影响

图 3 为磁化处理前后,不同粒径级配含沙水滴灌滴头 D_{ra} 和 C_u 随灌水次数的变化趋势,其标准误差为 0.37%~4.02%。磁化处理减缓了滴头 D_{ra} 和 C_u 的下降趋势,提高了中后期灌水(灌水 4~14 次后)滴头 D_{ra} 和 C_u ($p<0.01$)。

磁化处理对含沙水 D1 滴灌时滴头堵塞的减缓作用最大($p<0.01$),当以含沙水 D1 滴灌时,未磁化组在灌水 20 次后滴头 D_{ra} 和 C_u 分别降至 73.10% 和 50.67%,而磁化组在灌水 20 次后,滴头 D_{ra} 和 C_u 仅降至 85.83% 和 74.62%,比未磁化处理分别提高了 17.41% 和 47.27%。含沙水 D2 和 D3 分别在灌水 6 次和 12 次后,磁化处理与未磁化处理间呈现出极显著差异($p<0.01$),灌水结束时,含沙水 D2 和 D3 磁化处理后滴头 D_{ra} 和 C_u 比未磁化处理时分别平均增加 9.26%、11.15% 和 4.92%、4.26%。灌水前中阶段(灌水 14 次内),含沙水 D4 磁化处理后滴头 D_{ra} 和 C_u 小于未磁化处理,随后未磁化组的滴头 D_{ra} 和 C_u 快速下降,磁化组则下降缓慢,灌水结束时,磁化处理的滴头 D_{ra} 和 C_u 分别比未磁化处理平均提高 4.80% 和 10.60%。

除含沙水 D4 外,M2 处理的磁化效果显著高于 M1 和 M3 处理($p<0.05$),且 M1 和 M3 处理间差异不显著。

2.2 磁化处理对不同毛管位置滴头堵塞率的影响

为识别不同毛管位置滴头堵塞率,将测试毛管等距离分成前、中、后 3 段,不同毛管位置堵塞滴头的数量占整条毛管堵塞滴头数量百分比即为滴头堵塞率(N),不同处理下 N 的变化情况如图 4(图中不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$))所示。其标准误差为 1.50%~13.6%。

由图 4 可知,磁化处理显著增加了毛管前段堵

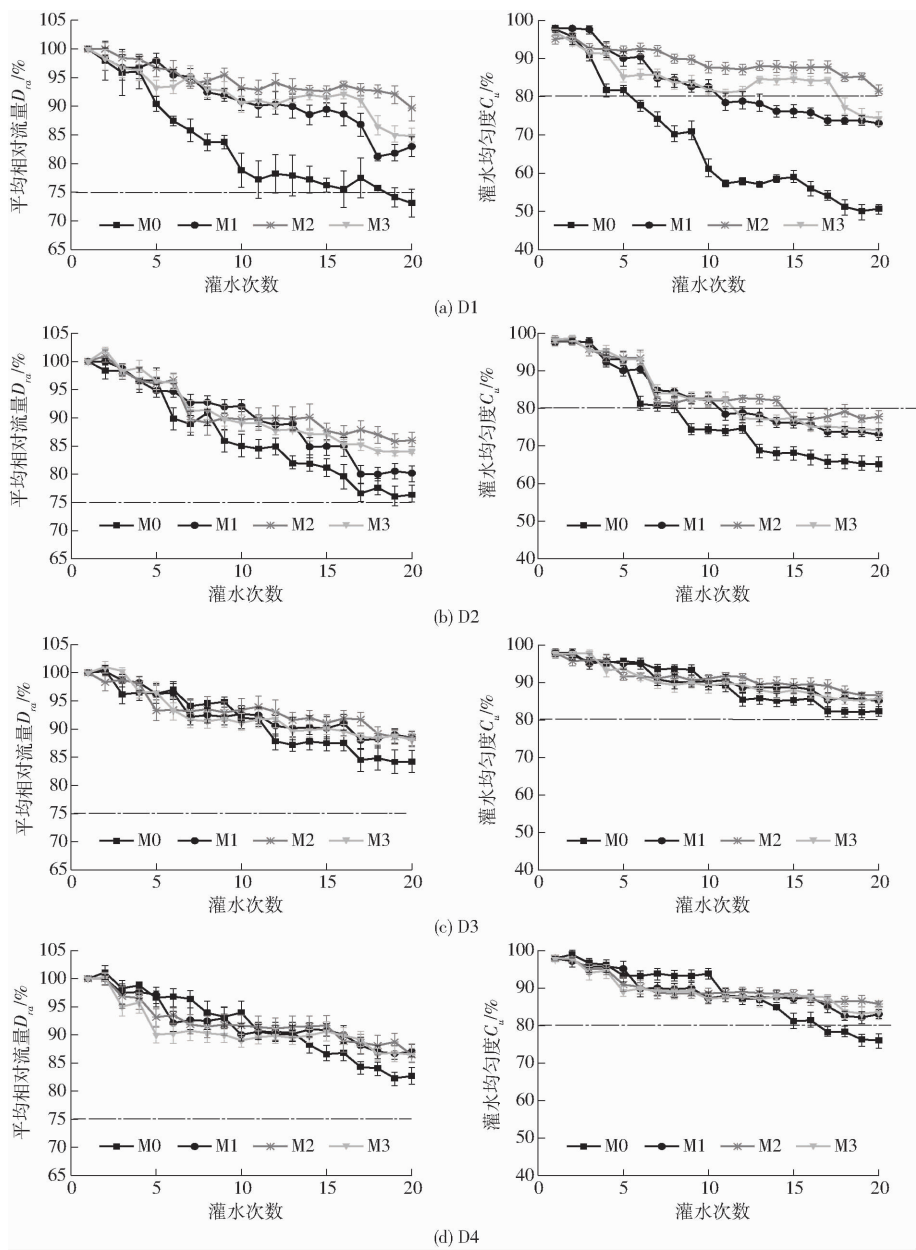


图 3 磁化处理下滴头平均相对流量和灌水均匀度变化曲线

Fig.3 Variation curves of average relative flow rate and irrigation uniformity of dripper under magnetization treatments

塞滴头的数量,减少了毛管中后段堵塞滴头的数量。未磁化时,含沙水中细颗粒或粗颗粒泥沙含量越多时,毛管前中段 N 越大,这是由细颗粒泥沙的絮凝作用与粗颗粒泥沙较易靠重力作用在毛管中沉积所致;磁化处理后堵塞滴头在毛管中的分布位置提前,含沙水 D1、D2、D3 和 D4 处理下毛管前段 N 平均值分别提高了 11.77%、20.37%、15.56% 和 23.15%。不同含沙水处理下,毛管前段(含沙水 D2、D3、D4)或前中段(含沙水 D1)的 N 均在 M2 时最大。

2.3 磁化处理对毛管淤积泥沙中值粒径的影响

表 3 为磁化处理后前后毛管淤积泥沙的中值粒径,中值粒径反映了泥沙粒径的一般水平。由于含

沙水 D2 中泥沙均为粗颗粒泥沙,采用 MS2000 型激光粒度分析仪进行测试时,泥沙粒径分布在同一范围内,区分度过低,无法计算其中值粒径。

由表 3 可知,磁化处理减小了毛管前中段淤积泥沙的中值粒径,增大了毛管后段淤积泥沙的中值粒径,说明磁化处理加剧了细颗粒泥沙在毛管前段的沉降,即磁化后细颗粒泥沙的絮凝作用增强。磁化处理对毛管前中段淤积泥沙粒径的影响随磁化强度的增加呈先增加后减小的趋势,M2 处理下,毛管前中段淤积泥沙的中值粒径平均变幅最大,为 16.58%,M1 和 M3 处理下,其平均变幅分别为 9.99% 和 7.90%。含沙水 D1、D4 条件下磁化处理对毛管前中段淤积泥沙中值粒径的影响达到极显著

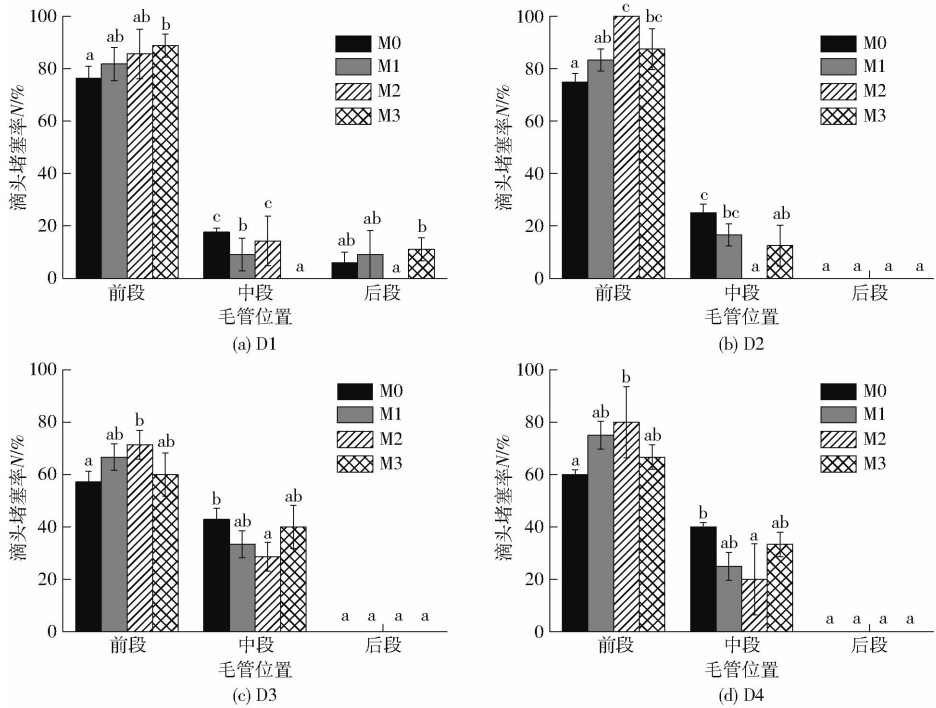


图4 磁化处理下不同毛管位置滴头堵塞率

Fig.4 Clogging rate of dripper at different capillary positions under magnetization treatment

表3 磁化处理下不同毛管位置淤积泥沙中值粒径

Tab.3 Median particle size of sediment deposited at different capillary positions under magnetization treatment

含沙水 编号	磁化 强度/T	中值粒径/ μm		
		毛管前段	毛管中段	毛管后段
D1	0	(49.84 $\pm$ 0.49) ^c	(49.80 $\pm$ 0.01) ^b	(6.80 $\pm$ 0.25) ^a
	0.2	(47.51 $\pm$ 0.29) ^b	(46.56 $\pm$ 0.10) ^a	(8.25 $\pm$ 0.28) ^b
	0.4	(44.41 $\pm$ 0.17) ^a	(49.65 $\pm$ 0.17) ^b	(7.90 $\pm$ 0.01) ^b
	0.6	(45.39 $\pm$ 0.34) ^a	(49.55 $\pm$ 0.13) ^b	(7.42 $\pm$ 0.13) ^{ab}
D3	0	(29.71 $\pm$ 0.12) ^a	(28.69 $\pm$ 0.08) ^b	(28.99 $\pm$ 0.18) ^a
	0.2	(29.12 $\pm$ 0.30) ^a	(28.29 $\pm$ 0.03) ^b	(29.12 $\pm$ 0.09) ^a
	0.4	(28.75 $\pm$ 0.40) ^a	(27.32 $\pm$ 0.04) ^a	(29.22 $\pm$ 0.04) ^a
	0.6	(29.48 $\pm$ 0.01) ^a	(28.35 $\pm$ 0.07) ^b	(29.96 $\pm$ 0.01) ^b
D4	0	(13.22 $\pm$ 0.28) ^b	(16.58 $\pm$ 0.14) ^c	(12.60 $\pm$ 0.11) ^a
	0.2	(7.90 $\pm$ 0.02) ^a	(16.16 $\pm$ 0.03) ^{bc}	(14.88 $\pm$ 0.01) ^b
	0.4	(6.70 $\pm$ 0.10) ^a	(15.61 $\pm$ 0.08) ^b	(19.56 $\pm$ 0.09) ^d
	0.6	(12.81 $\pm$ 1.31) ^b	(13.38 $\pm$ 0.07) ^a	(15.78 $\pm$ 0.01) ^c

注：同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

水平 ($p < 0.01$), 其中含沙水 D4 磁化处理后平均变幅最大, 为 24.07%。

2.4 磁化处理对不同粒径级配泥沙沉降过程的影响

图5为磁化处理对不同粒径级配的泥沙颗粒絮凝沉降过程的影响。不同沉降时间浊度测试值的标准误差为0.04%~3.34%。

由图5可以看出,磁化处理后悬液相对浊度的下降速度增加,即磁化处理加剧了泥沙沉降 ($p < 0.01$)。磁化处理对细颗粒含量高的含沙水 (D1、D4) 沉降的加剧趋势明显高于其他含沙水,沉降前中期 (30~60 min),磁化处理对含沙水 D4 沉降过程

的加剧作用最大,这是因为含沙水 D4 中泥沙粒径均为 0.05 mm 以下,无粗颗粒泥沙,磁化处理对其加速作用较大,随着沉降时间增长,磁化处理对含沙水 D1 沉降过程的加剧作用逐渐变大,因为前期含沙水 D1 中存在部分对絮凝作用敏感性小的粗颗粒泥沙,随着沉降时间的延长粗颗粒泥沙逐渐沉降完全,而含沙水 D1 中细颗粒泥沙 (粒径小于 0.03 mm) 含量最高,故沉降 120 min 时其降幅最大为 29.44%;磁化处理对细颗粒含量少的含沙水 (D2) 沉降的加剧作用最小,沉降 120 min 时浊度降幅为 8.85%;含沙水 D3 和 D4 静置结束时 (120 min),悬液相对浊度降幅分别为 17.20% 和 14.96%。除含沙水 D3 外,M2 处理时加剧沉降的效果显著大于 M1 和 M3 处理时 ($p < 0.05$),且 M1 与 M3 处理间之间差异不显著。

表4为磁化处理对不同粒径级配泥沙中值沉速的影响。磁化处理极显著地增加了泥沙沉降的中值沉速 ($p < 0.01$)。细颗粒泥沙含量较多的含沙水 D4 磁化处理后中值沉速的增幅最大,平均为 30.06%;细颗粒泥沙含量最少的含沙水 D2 磁化处理后中值沉速的增幅最小,平均为 5.85%;含沙水 D1 和 D3 磁化处理后泥沙中值沉速平均增幅分别为 16.51% 和 21.60%。除含沙水 D1 外,泥沙沉降的中值沉速平均值均在 M2 处理时最大;含沙水 D1 的中值沉速在 M1 处理时达到最大,这可能是因为含沙水 D1 中同时包含粗颗粒和细颗粒 2 种粒径泥沙,沉降前期,磁化处理对含沙水 D1 中 2 种粒径泥沙的影响途径

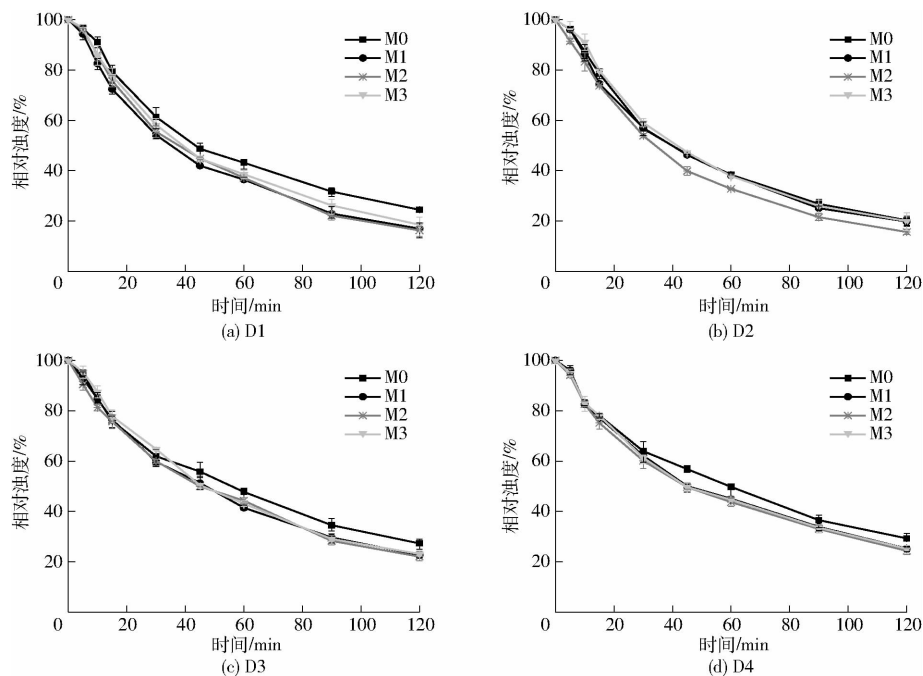


图5 磁化处理下不同粒径级配泥沙相对浊度变化曲线

Fig.5 Variation curves of relative turbidity of sediment with different particle size gradations under magnetization treatment

表4 磁化处理下不同粒径级配泥沙中值沉速

Tab.4 Median settling velocity of sediment with different particle size gradations under magnetization treatment				
cm/h				
含沙水编号	M0	M1	M2	M3
D1	(30.35 ± 2.29) ^{aB}	(37.52 ± 2.31) ^{bB}	(34.90 ± 1.39) ^{abB}	(33.68 ± 1.38) ^{abB}
D2	(33.09 ± 2.32) ^{aB}	(33.11 ± 0.31) ^{aB}	(38.62 ± 0.98) ^{bC}	(33.34 ± 0.62) ^{aB}
D3	(23.65 ± 1.39) ^{aA}	(28.12 ± 1.98) ^{bA}	(29.38 ± 1.28) ^{bA}	(28.77 ± 0.41) ^{bA}
D4	(22.20 ± 1.38) ^{aA}	(29.29 ± 0.10) ^{bA}	(29.68 ± 0.21) ^{bA}	(29.63 ± 0.16) ^{bA}

注:同行数字后不同小写字母表示磁化强度处理间差异极显著($p < 0.01$);同列数字后不同大写字母表示粒径级配处理间差异显著($p < 0.05$)。

不同,磁化处理通过影响含沙水中离子浓度等因素影响细颗粒泥沙的絮凝作用而通过影响水的粘滞系数和密度等影响粗颗粒泥沙的沉降,不同的作用机制下,最优磁化强度有所不同。实际中,磁化处理对不同粒径段泥沙絮凝沉降的影响机制更为复杂,且随时间的变化其最优磁化强度也会存在偏差。

对各组中值沉速计算值进行方差分析,结果如表5所示。磁化强度、粒径级配及两者间的交互作用对中值沉速的影响均达到极显著水平($p <$

0.01)。且磁化强度与粒径级配对泥沙沉降中值沉速的影响存在一定的交互作用。

2.5 磁化处理对水的电导率和粘滞系数的影响

表6为磁化处理对水的电导率及粘滞系数的影响。磁化后,含沙水的电导率和粘滞系数增加,增幅分别为0.03%~8.05%和0.09%~5.87%,其中磁化处理对电导率的影响达到极显著水平($p < 0.01$)。细颗粒泥沙含量较高的含沙水D4磁化处理后电导率的增幅显著高于其他含沙水,平均增幅为4.67%;磁化处理对不同含沙水间粘滞系数的影响差别不大。4种含沙水的电导率和粘滞系数均在磁化强度为0.4 T时增幅最大,最大值分别出现在含沙水D4和D3中,变化率分别为8.05%和5.87%。

3 讨论

3.1 磁化处理减缓滴头堵塞的机理

一般认为,灌溉水质与灌水器堵塞直接相关^[26],灌溉水磁化后,水分子平均间距增大,使一部

表5 不同磁化强度和粒径级配处理下泥沙沉降中值沉速方差分析

Tab.5 Variance analysis of sediment settlement median settlement velocity under treatment of different magnetization intensities and particle size gradations

方差来源	方差和	自由度	均方差	F
磁化强度	231.165	3	77.055	29.205 **
粒径级配	546.192	3	182.064	69.005 **
磁化强度 × 粒径级配	97.524	9	10.836	4.107 **
误差	84.430	48	2.638	

注: ** 表示差异极显著($p < 0.01$)。

表 6 磁化处理下水的电导率和粘滞系数

Tab. 6 Conductivity and viscosity of water treated with magnetization

磁化 处理	电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)				粘滞系数/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)			
	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4
M0	(609 ± 0.52) ^a	(601 ± 2.02) ^a	(613 ± 1.91) ^a	(612 ± 1.63) ^a	(0.81 ± 0.12) ^a	(0.82 ± 0.06) ^a	(0.80 ± 0.03) ^a	(0.83 ± 0.03) ^a
M1	(612 ± 1.01) ^a	(606 ± 1.84) ^b	(613 ± 1.53) ^a	(633 ± 1.82) ^a	(0.82 ± 0.14) ^a	(0.83 ± 0.01) ^b	(0.81 ± 0.02) ^b	(0.84 ± 0.03) ^b
M2	(619 ± 1.63) ^b	(621 ± 1.04) ^c	(620 ± 2.90) ^a	(662 ± 1.44) ^b	(0.84 ± 1.41) ^a	(0.83 ± 0.04) ^c	(0.85 ± 0.04) ^d	(0.86 ± 0.02) ^c
M3	(610 ± 1.92) ^a	(604 ± 2.43) ^{ab}	(615 ± 1.14) ^a	(628 ± 3.01) ^a	(0.83 ± 0.13) ^a	(0.83 ± 0.05) ^{ab}	(0.83 ± 0.01) ^c	(0.83 ± 0.01) ^a

注:同列数字后不同小写字母表示磁化强度处理间差异显著($p < 0.05$)。

分氢键的约束力降低,或者直接断裂,水中自由单体水分子数量增多,水分子的渗透性和流动性增强^[27]。磁场给水分子提供部分能量,使水分子热运动加剧^[8],水的扩散系数增大,宏观表现为滴头流量增加,滴头抗堵塞性能提高。此外,水磁化后水中离子间存在极化作用,致使离子间的水合外壳被磁场破坏,导致晶粒生成速度加快、体积变小、晶粒量增加,且水中盐类离子在磁场的作用下存在磁滞效应,盐类的溶解度发生改变^[28],减小了滴头化学堵塞的发生概率。

本试验为模拟引黄灌区高含沙流域,泥沙含量较高(3.0 g/L),细微粒含量高,颗粒间的絮凝沉降是造成滴头物理堵塞的根本原因。絮凝形成的直接原因是颗粒间的碰撞^[29-30],小粒径是泥沙形成絮凝的基本条件,阳离子是泥沙能够形成絮凝的根本动力,不同的离子浓度也决定了不同的絮凝程度以及絮团尺度^[31]。含沙水流经磁场后,磁场对粒子做功,增大了粒子内能^[32],增加了悬浮液中离子的流动性和扩散迁移率,使粒子更活跃,碰撞概率增加,同时磁化处理后水中盐类的溶解度增加,水体阳离子含量增加,泥沙颗粒絮凝作用增强。此外,磁场能够干扰胶体颗粒周围的双离子层及其 Zeta 电位^[33-35],降低颗粒表面的水化膜作用^[27],水化斥力降低,故磁化处理后颗粒絮凝作用增强。

李建军等^[36]研究表明,泥沙絮团在水中的沉降速度主要取决于絮团密度、含沙水密度和粘滞系数,磁化后絮团密度变大、水密度减小^[37],絮团沉速加快。本试验发现磁化处理后含沙水粘滞系数升高(表 6),一方面,粘滞系数升高会阻碍悬浮泥沙的沉降,但由于阻碍作用十分微小,还不足以改变絮凝沉降的加剧趋势,另一方面,粘滞系数升高增强了水流的拖曳能力,泥沙颗粒容易随水排出,不易在滴头流道内淤积造成堵塞。

3.2 磁化处理对不同粒径级配泥沙浑水的作用机理

滴头堵塞由泥沙沉降和泥沙输出共同决定,为了更好地分析含沙水磁化处理对滴头堵塞的减缓机理,本试验以不同粒径级配的泥沙为研究对

象,探究磁化后其滴头堵塞及絮凝沉降等的变化规律。

本试验发现富含不同粒径级配的含沙水磁化后,滴头堵塞的减缓情况不同,浑水中细颗粒泥沙含量越多,磁化处理对滴头堵塞的减缓作用及絮凝沉降的加剧作用越大。这是因为磁化处理后泥沙颗粒表面电位下降,泥沙颗粒趋向凝聚,形成絮团,特别是对细颗粒泥沙。研究表明,泥沙表面电荷数量随着泥沙粒径的减小明显增加^[38],故磁化处理对细颗粒泥沙絮凝作用的影响更大。此外,细颗粒泥沙表面张力较大,灌水期时,易在水流紊动作用下形成絮团结构,灌水停止时,滞留在流道中的絮团结构在重力作用下沉降并依附在流道壁面造成滴头堵塞^[24],而粗颗粒泥沙的絮凝作用较弱,主要依靠重力作用沉积在流道内造成滴头堵塞。磁化处理后,含沙水 D1、D4 絮凝沉降明显加剧,这是因为其粒径小于 0.03 mm 的泥沙颗粒占比均达到 60% 以上,细颗粒泥沙表面带有更多的负电荷,磁化处理后对其絮凝沉降的影响更大,但此粒径泥沙受水的布朗运动作用明显,很难依靠自身重力自然沉降,易随水流走^[39],故灌水前期,含沙水 D4 滴头流量下降缓慢;但含沙水 D1 中不仅含有 65.3% 的细颗粒泥沙且含有 20% 左右粒径大于 0.05 mm 的粗颗粒泥沙,一方面,粗颗粒泥沙易在迷宫流道内沉降淤积造成滴头堵塞,故含沙水 D1 在灌水初期,滴头平均相对流量和灌水均匀度下降较为明显,另一方面,含沙水 D1 中同时包含粗颗粒泥沙和细颗粒泥沙,这种粒径级配的泥沙颗粒在随水流运动中易形成以大颗粒为骨架、小颗粒填充的稳定堵塞物且这种堵塞物间重叠紧密,孔隙小,稳定性强^[40]。此外,由于磁化处理后泥沙絮凝作用增强,浑水 D1 中形成了较多大尺径的絮团结构,改变了原有泥沙粒径级配,泥沙粒径趋向单一,不易形成稳定的堵塞结构,且泥沙絮团结构较为松散,稳定性差,下次灌水时易被水流冲散,难以造成严重堵塞,故含沙水 D1 磁化处理后滴头堵塞情况减缓最明显。而含沙水 D4 中无粗颗粒泥沙,泥沙颗粒难以在毛管中沉降,易随水流走,磁化

处理后,泥沙颗粒的絮凝作用增强,故在灌水前期,磁化处理加剧了滴头堵塞,但随着灌水时间的延长,沉降在毛管前端的絮团结构逐渐增多堆积成泥沙床,阻碍泥沙运动,且磁化处理后水流的拖曳能力增强,促使部分泥沙颗粒随水排出滴头,进而减缓滴头堵塞。

上述试验结果是在泥沙质量浓度为 3.0 g/L 条件下取得的,但实际滴灌工程中泥沙浓度较低。在泥沙质量浓度为 1.0 g/L、磁化强度为 0.4 T 条件下,也发现磁化处理后在灌溉 30 次后,滴头的平均相对流量依然大于 75%,而未磁化处理后在灌水 24 次后,平均相对流量则小于 75% (图 6)。

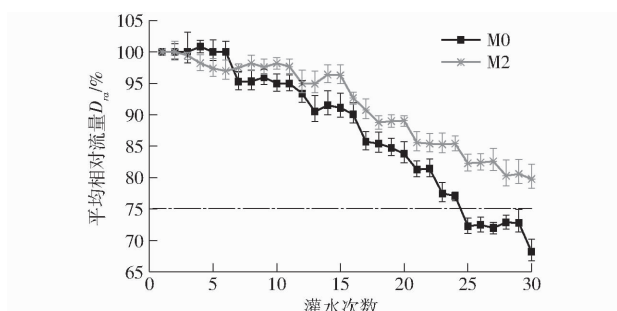


图 6 磁化处理后滴头平均相对流量

Fig. 6 Average relative flow of dripper under magnetization

由图 6 可知,磁化处理显著减缓了滴头平均相对流量的下降趋势,抑制了滴头堵塞的发展速度。泥沙质量浓度为 1.0 g/L 的试验结果与较高泥沙含量 (3.0 g/L) 的基本一致,说明本试验结果能够反映磁化对于滴头堵塞的影响趋势。

3.3 不同磁化强度对滴头堵塞的减缓机理

本试验结果表明,磁化强度为 M2 时,对滴头堵塞的减缓作用最大,但 M1 和 M3 处理时差别不显著,说明随着磁化强度的增加,其作用效果存在一个峰值,而峰值约在 0.4 T。这是因为磁化处理后,水的结构发生改变,但其变化程度并非随磁化强度的增加而增加,而是随磁场强度的增加,呈周期性的变

化,这一现象可用拉摩定律来解释^[41]。刘芳玲等^[13]通过探究磁化强度与水表面张力系数的关系指出,溶液表面张力系数并不是随磁化强度的增加呈直线变化,而是存在多个谷值,说明磁化处理的效果随磁化强度的增加呈波动变化。王全九等^[14]研究了磁化强度为 0.1、0.2、0.4、0.8 T 对土壤水盐运移的影响,发现磁化强度为 0.4 T 时土壤累积入渗量最大、入渗用时最短,磁电一体活化水的含水率、脱盐率、盐分淋洗效率达到最大,含盐量和土壤滞留盐分浓度最低。徐莉等^[42]发现,不同对象的最佳磁感应强度不同,与磁化强度也不呈正相关关系,且不同试验对象最适宜的最佳磁化强度不同,今后还需要进行进一步深入探究。

综上,建议采用黄河水等细颗粒泥沙含量高的水源滴灌时,采用磁化强度为 0.4 T 的磁体进行磁化处理,并定期进行毛管冲洗,以减缓滴头的堵塞。

4 结论

(1) 磁化处理减缓了滴头平均相对流量和灌水均匀度的下降趋势,且其减缓作用随磁化强度的增加呈先增后减的趋势,磁化强度为 0.4 T 时,减缓滴头堵塞的效果最大。

(2) 磁化处理对不同粒径级配泥沙浑水的影响不同,对细颗粒泥沙含量较多的含沙水滴灌的影响最显著。磁化处理后毛管前中段淤积泥沙中值粒径减小,沉降过程加剧,泥沙粒径越小,效果越大。磁化强度为 0.4 T 时,磁化处理后泥沙沉降速度的增幅最大。

(3) 磁化处理增加了毛管前段堵塞滴头的数量,不同含沙水处理下毛管前段滴头堵塞率分别提高了 11.77%、20.37%、15.56% 和 23.15%,且磁化强度为 0.4 T 时,毛管前中段滴头堵塞率最大。建议采用磁化水进行滴灌,并定期冲洗毛管,以减缓滴头堵塞的风险。

参 考 文 献

- [1] PEI Y, LI Y, LIU Y, et al. Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation[J]. Irrigation Science, 2014, 32(2): 141–157.
- [2] 张钟莉莉. 微咸水滴灌系统灌水器化学堵塞机理及控制方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
ZHANG Zhonglili. Mechanism of the emitters chemical-clogging under drip irrigation with saline water and its prevention methods[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [3] 冯吉. 引黄滴灌系统泥沙逐级调控机制及方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
FENG Ji. Step regulation mechanism and method of sediment in drip irrigation system with the Yellow River water[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [4] CAPRA A, SCICOLONE B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 70(4): 355–365.
- [5] 于健, 史吉刚, 李玮, 等. 引黄灌区规模化发展滴灌投资与效益[J]. 节水灌溉, 2020(9): 12–15.
YU Jian, SHI Jigang, LI Wei, et al. Investment and benefits of scale development of drip irrigation in Yellow River irrigation

- area[J]. Water Saving Irrigation, 2020(9): 12–15. (in Chinese)
- [6] 李云开, 周博, 杨培岭. 滴灌系统灌水器堵塞机理与控制方法研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 103–114.
LI Yunkai, ZHOU Bo, YANG Peiling. Research advances in drip irrigation emitter clogging mechanism and controlling methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 103–114. (in Chinese)
- [7] 王洪波, 王成福, 吴旭, 等. 磁化水滴灌对土壤盐分及玉米产量品质的影响[J]. 土壤, 2018, 50(4): 762–768.
WANG Hongbo, WANG Chengfu, WU Xu, et al. Effects of drip irrigation with different magnetic water on soil salinity, maize yield and quality[J]. Soil, 2018, 50(4): 762–768. (in Chinese)
- [8] 周胜, 张瑞喜, 褚贵新, 等. 磁化水在农业上的应用[J]. 农业工程, 2012, 2(6): 44–48.
ZHOU Sheng, ZHANG Ruixi, CHU Guixin, et al. Effects of magnetized water in agriculture[J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(6): 44–48. (in Chinese)
- [9] 韩建伟, 李永明. 磁化水的物理化学性质及机理初探[J]. 才智, 2009(28): 1.
- [10] 王新民, 柯愈贤, 张钦礼, 等. 磁化处理全尾砂料浆沉降规律及其参数优化[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 803–808.
WANG Xinmin, KE Yuxian, ZHANG Qinli, et al. Rule and optimum magnetization parameters of sedimentation of premagnetized crude tailings slurry[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(4): 803–808. (in Chinese)
- [11] 李建军, 朋许杰, 谢蔚, 等. 强场预磁化对高浊度黏土污水混凝沉降的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2253–2259.
LI Jianjun, PENG Xujie, XIE Wei, et al. Effect of high magnetic field pre-magnetization on the flocculation sedimentation of high turbidity clay sewage[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2253–2259. (in Chinese)
- [12] 王宇斌, 王望泊, 王刚, 等. 基于正交试验的交变磁场除垢影响因素作用规律[J]. 工业水处理, 2019, 39(8): 28–31.
WANG Yubin, WANG Wangbo, WANG Gang, et al. Regular effect on influence factors of descaling by alternating magnetic field based on orthogonal experiment[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(8): 28–31. (in Chinese)
- [13] 刘芳玲, 蒋佩琳. 磁场处理条件与水的表面张力关系的研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 1997, 20(5): 5.
LIU Fangling, JIANG Peilin. Study on the relationship between surface tension of water and condition of magnetic field[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science Edition), 1997, 20(5): 5. (in Chinese)
- [14] 王全九, 李宗昱, 张继红, 等. 磁化强度对磁电一体活化土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 278–284.
WANG Quanjiu, LI Zongyu, ZHANG Jihong, et al. Effect of magnetization intensity on characteristics of soil water and salt transport in magnetization-de-electronic activation water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 278–284. (in Chinese)
- [15] 温圣林, 牛文全, 邬梦龙, 等. 浑水滴灌过程中不同类型滴头堵塞的动态变化特征[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 287–294.
WEN Shenglin, NIU Wenquan, WU Menglong, et al. Dynamic characteristics of different emitters clogging in drip irrigation with muddy water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 287–294. (in Chinese)
- [16] 官雅辉, 牛文全, 刘璐, 等. 硫酸钾对浑水滴灌滴头堵塞的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 137–146, 154.
GUAN Yahui, NIU Wenquan, LIU Lu, et al. Effect of potassium sulfate on clogging of dripper with muddy water[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2018, 46(10): 137–146, 154. (in Chinese)
- [17] 徐文礼, 李治勤. 迷宫灌水器堵塞与输沙能力实验研究[J]. 山西水利科技, 2008(2): 10–12, 20.
XU Wenli, LI Zhiqin. Experimental study on clogging and the capacity of sediment transportation about labyrinth emitter[J]. Shanxi Water Conservancy Science and Technology, 2008(2): 10–12, 20. (in Chinese)
- [18] 李治勤, 陈刚, 杨晓池. 浑水引起迷宫灌水器物理堵塞因素实验研究[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(4): 395–398.
LI Zhiqin, CHEN Gang, YANG Xiaochi. Experimental study of physical clogging factor of labyrinth emitter caused by muddy water[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(4): 395–398. (in Chinese)
- [19] 吴泽广. 泥沙粒径与含沙量对滴头堵塞的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
WU Zeguang. Influence of particle size, concentration and composition of sediment on clogging of labyrinth channels emitters[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [20] 张德茹, 梁志勇. 不均匀细颗粒泥沙粒径对絮凝的影响试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1994(增刊1): 11–17.
ZHANG Deru, LIANG Zhiyong. Experiment study of effect of nonuniform fine sediment on flocculation[J]. Science Research of Water Resources and Water Transport, 1994(Supp.1): 11–17. (in Chinese)
- [21] GB/T 17187—2009 农业灌溉设备滴头和滴灌管技术规范和试验方法[S]. 2009.
- [22] 张文倩, 牛文全, 李学凯, 等. 减缓滴头堵塞风险的毛管首次冲洗时间及周期的确定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 70–77.
ZHANG Wenqian, NIU Wenquan, LI Xuekai, et al. Determination of first lateral flushing time and period to mitigate risk of emitter clogging in drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 70–77. (in Chinese)
- [23] 罗春艳, 牛文全. 滴头堵塞率及堵塞位置对灌水均匀度的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 196–200.
LUO Chunyan, NIU Wenquan. Influence of emitter clogged ratio and clogged location to the irrigation uniformity[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2014, 32(2): 196–200. (in Chinese)

- [24] 牛文全, 刘璐. 浑水特性与水温对滴头抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 39–45.
NIU Wenquan, LIU Lu. Influences of sediment concentration and water temperature of muddy water on emitter clogging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 39–45. (in Chinese)
- [25] 陈洪松, 邵明安. NaCl 对细颗粒泥沙静水絮凝沉降动力学模式的影响[J]. 水利学报, 2002, 33(8): 63–67.
CHEN Hongsong, SHAO Ming'an. Effect of NaCl concentration on dynamic model of fine sediment flocculation and settling in still water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(8): 63–67. (in Chinese)
- [26] 王浩翔. 加肥条件下滴灌管抗堵塞水力特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
WANG Haoxiang. Study on hydraulic characteristics of anti-clogging of drip irrigation pipe under fertilization[D]. Yangling Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [27] 安立新. 活化水灌溉在农业生产中的应用研究进展[J]. 农业与技术, 2021, 41(7): 61–63.
- [28] 向军. 磁化处理对微细粒赤铁矿分选的影响及机理研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.
XIANG Jun. Study on the effect and mechanism of magnetization treatment on fine-grained hematite separation[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [29] 蒋国俊, 姚炎明, 唐子文. 长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 51–57.
JIANG Guojun, YAO Yanming, TANG Ziwen. The analysis for influencing factors of fine sediment flocculation in the Changjiang Estuary[J]. Journal of Oceanology, 2002, 24(4): 51–57. (in Chinese)
- [30] 金鹰, 王义刚, 李宇. 长江口粘性细颗粒泥沙絮凝试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(3): 61–63.
JIN Ying, WANG Yigang, LI Yu. Experimental study on the flocculation of viscous fine-grained sediment in the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2002, 30(3): 61–63. (in Chinese)
- [31] 常青, 傅金镒, 郇兆龙. 絮凝原理[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1993.
- [32] 谢蔚. 高浊度矿物污水的预磁化-磁絮凝沉降机理研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
XIE Wei. Pre-magnetization-magnetic flocculation sedimentation mechanism of high turbidity mineral wastewater[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [33] GAMAYUNOV N I. Coagulation of suspension after magnetic treatment[J]. Journal of Applied Chemistry, 1983, 56: 975–982.
- [34] HIGASHITANI K, OSHITANI J. Magnetic effects on thickness of adsorbed layer in aqueous solutions evaluated directly by atomic force microscope[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 1998, 204(2): 363.
- [35] PARSONS S, JUDD S J, STEPHENSON T, et al. Magnetically augmented water treatment[J]. Trans. Inst. Chem. Eng., 1997, 75(B): 98–104.
- [36] 李建军, 谢蔚, 余海洋, 等. 高岭土污水的磁絮凝沉降和影响因素研究[J]. 选煤技术, 2018(5): 26–31.
LI Jianjun, XIE Wei, YU Haiyang, et al. Sedimentation of waste kaolin water through magnetic flocculation and study of its influence factors[J]. Coal Preparation Technology, 2018(5): 26–31. (in Chinese)
- [37] 朱元保, 颜流水, 曹祉祥, 等. 磁化水的物理化学性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 1999, 26(1): 22–26, 33.
ZHU Yuanbao, YAN Liushui, CAO Zhixiang, et al. Physical and chemical properties of magnetized water[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 1999, 26(1): 22–26, 33. (in Chinese)
- [38] 王允菊. 长江口悬浮泥沙的电荷特征[J]. 东海海洋, 1983, 4(4): 23–29.
- [39] 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 (Natural Science Edition), 2014, 42(5): 223–228. (in Chinese)
- [40] ZHANG W Q, LV C, ZHAO X, et al. The influence mechanism of the main suspended particles of Yellow River sand on the emitter clogging—an attempt to improve the irrigation water utilization efficiency in Yellow River basin[J]. Agricultural Water Management, 2021, 258: 107202.
- [41] 杨明, 刘伟, 徐革联. 磁化对水的性质影响的研究[J]. 化工时刊, 2007, 4(6): 14–17.
YANG Ming, LIU Wei, XU Gelian. Study on the influence of magnetization to water's properties[J]. Chemical Industry Times, 2007, 4(6): 14–17. (in Chinese)
- [42] 徐莉, 唐金, 陈淑英. 不同磁化水处理下盐渍土壤脱盐效果研究[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 211–217.
XU Li, TANG Jin, CHEN Shuying. Effect of different magnetized-water treatments on soil desalinization[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 211–217. (in Chinese)