

动态水压对迷宫流道滴头抗堵塞性能影响与机理分析

喻黎明¹ 余兴娇¹ 郭欢欢¹ 王田田¹ 崔宁博² 李娜¹

(1. 昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 为缓解浑水灌溉中滴头堵塞的问题, 评估了3种水压模式(恒定水压、台阶波形水压、三角函数波形水压)对滴头堵塞的控制效果, 并对不同水压模式下滴头内堵塞物质、滴头排出物质的级配和粒径进行分析。结果表明: 动态水压处理滴头使用寿命延长了79.06%, 滴头抗堵塞性能优于恒定水压处理; 波形对滴头抗堵塞性能影响较小, 两种不同波形动态水压处理滴头的使用寿命仅相差2.77%。动态水压处理流道内水流紊动剧烈, 能更好地移除沉积、附着在迷宫流道内的堵塞物质, 与恒压处理相比, 滴头内黏粒、粉粒堵塞物质分别减少了22.19%~36.75%和13.22%~25.06%。动态水压处理下滴头排出泥沙的粒径增大, 最大粒径比恒定水压处理增大了44.34%, 动态水压处理迷宫流道内水流流线时刻发生变化, 水流的挟沙能力增强, 大颗粒泥沙更容易从滴头排出。

关键词: 滴头; 动态水压; 恒定水压; 堵塞物质; 粒径级配

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)05-0342-08 OSID: 

Mechanism and Anti-clogging of Labyrinth-channel Emitters under Fluctuated Water Pressure

YU Liming¹ YU Xingjiao¹ GUO Huanhuan¹ WANG Tiantian¹ CUI Ningbo² LI Na¹

(1. Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China
2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The clogging of emitter is one of the bottlenecks restricting the application and popularization of drip irrigation technology. Fluctuated water pressure was adopted to alleviate the problem of emitter clogging in water with high sediment load. The control effect of three water pressure patterns (constant water pressure, step wave water pressure, trigonometric function wave water pressure) on the clogging of the emitter was evaluated, and the particle size characteristics of clogging substance in emitters and particle size gradation of the substance discharged from emitters under different pressure patterns were analyzed. The results showed that the anti-clogging performance of emitters under fluctuated water pressure treatment was better than that under constant water pressure, and the service life of emitters under fluctuated water pressure emitter was extended by 79.06%, while the waveform change of fluctuated water pressure had little effect on the anti-clogging performance of emitters, and the effective irrigation times provided by emitters under two different waveform of fluctuated water pressure were only 2.77% separated, under fluctuated water pressure treatment, the water flow in the labyrinth channel was violently turbulent, and the sand-carrying capacity of the water flow was enhanced, so that clogging substances deposited and attached to the labyrinth channel can be better removed, compared with the constant water pressure, the content of clay and silt in the emitter clogging substance was decreased by 22.19%~36.75% and 13.22%~25.06%, respectively. In addition, the particle size of emitter under fluctuated pressure was greater than that under constant pressure, and the maximum particle size of the sediment discharged from the emitter under the fluctuated pressure was 54.24 μm, which was increased by 44.34% compared with that under constant water pressure.

Key words: emitter; fluctuated water pressure; constant water pressure; clogging substance; particle size gradation

收稿日期: 2021-06-26 修回日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769009)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019CDPZH-10)

作者简介: 喻黎明(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事水动力学和水利机械、节水灌溉理论研究, E-mail: liming16900@sina.com

通信作者: 李娜(1978—)女,实验师,主要从事节水灌溉理论与设备研究, E-mail: kjelina@163.com

0 引言

我国干旱、半干旱地区灌溉用水日趋紧张,采用含沙率较高的地表水源作为滴灌水源,是缓解这一问题的有效途径之一^[1]。但由于滴灌滴头流道狭窄(仅0.5~1.2 mm)和复杂的几何结构,水中多种沉积物容易导致滴头堵塞,灌水质量降低,进而对作物的生长和产量产生较大的影响^[2-3]。滴头堵塞会造成植物之间水分分配不均,亏缺灌溉会限制作物的生长,甚至造成作物枯萎。相反,过量灌溉会影响作物根系呼吸,导致作物减产。

近年来,国内外许多学者在滴头堵塞方面已经做了大量的探索^[4-8],为解决滴头化学堵塞,提出了对灌溉水源进行磁化处理^[9],或者在灌溉水源中添加酸性物质降低 pH 值从而防止化学沉淀造成堵塞^[10]。对于生物堵塞,ZHOU 等^[11]建议使用曝气生物滤池(BAF)处理。农业灌溉中,物理堵塞是最普遍、最常见造成滴头堵塞的直接原因。为解决物理堵塞,大量学者进行了广泛的研究,如 ADIN 等^[12]的鳞片层过滤器、JOSEP 等^[6]的网式过滤器及陶洪飞等^[7]的重力沉沙过滤器,试图通过控制水源泥沙含量来减缓堵塞。YU 等^[13]、PUIGBARGUÉS 等^[14]采用优化灌溉运行方式来维持滴灌系统长期安全运行。此外,一些研究人员认为除了改进滴灌系统过滤装置,优化滴灌系统运行模式外,改变滴头流道结构也是解决滴头堵塞的有效途径,TAYLOR 等^[15]分析了造成滴头堵塞的原因,指出滴头结构设计是造成堵塞的重要因素。仵峰等^[16]对地下滴灌系统进行了研究,将滴头堵塞归因于泥沙颗粒的絮凝、固结,并建议通过优化流道结构来减缓堵塞。ADIN 等^[17]利用污水灌溉进行了大田试验,指出滴头流道结构对堵塞有重要影响,建议加宽和缩短流道、修整凸齿上的直边等措施来改进、设计流道。魏正英等^[18]、喻黎明等^[19]采用数值模拟和粒子图像测速(PIV)技术,分析了迷宫流道的速度场、压力场与滴头抗堵塞性能之间的内在联系,以此来优化流道结构。尽管对滴头堵塞的研究越来越深入,但目前滴头堵塞问题仍然没有完全解决。

特别是在我国北方,例如黄河、宁夏灌区等取水含沙量非常高(平均含沙量达1.20~35.0 kg/cm³),且90%以上的泥沙粒径小于50 μm,即使经过沉淀、多级过滤,仍有大量的细小颗粒泥沙进入滴灌系统,最终造成滴头堵塞。基于这种情况,WEI 等^[20]指出动态水压能够大幅降低滴头堵塞风险。王聪等^[21]通过正交试验,分析了动态水压处理下不同参数对滴头流量、抗堵塞性能的影响,指出动压灌溉能够显著

提高滴灌系统的灌水均匀度和灌水质量。曹蒙等^[22]通过对滴头内部流场进行 CFD 模拟,得到动态水压处理迷宫流道滴头内水流紊动剧烈,挟沙能力增强,从微观角度揭示了动态水压的抗堵塞机理。ZHANG 等^[23]发现动态水压下滴头流道内的湍流高于恒定水压,且流道内的湍流强度为20~30 kPa时滴头的抗堵塞性能最强。然而,利用动态水压研究滴头抗堵塞性能及堵塞机理的较少。

为此,本文在昆明理工大学实验室内进行现场加沙的浑水滴灌试验,评估3种不同水压模式对滴头抗堵塞性能的影响,并对不同水压模式造成滴头堵塞差异的原因进行机理分析,为改进迷宫流道滴头工作压力设计提供理论参考。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验在昆明理工大学实验室进行,滴灌系统的布置如图1所示。试验设置3个处理组,其中2个动态水压处理组(三角函数波形动态水压处理3条毛管分别表示为M1、M2和M3;台阶波形动态水压处理3条毛管为M4、M5、M6),恒定水压处理3条毛管分别表示为M7、M8、M9。恒压处理通过控制球阀将工作压力维持在50 kPa,动压处理的台阶波形水压和三角函数波形水压通过可编程控制器(PLC)和变频器控制。所有毛管均取自同一卷滴灌带,每条毛管长为10 m,毛管间距为40 cm,每条毛管装配30个滴头,毛管的前、后两端均装有蝶阀,为确保试验的准确性,第一轮浑水灌溉试验结束,待水箱、干管、支管冲洗干净后,更换新的滴灌带,设置滴灌带的滴头朝向毛管顶部。

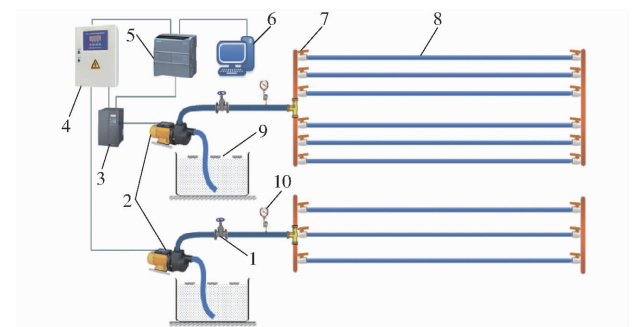


图1 滴灌系统试验平台

Fig. 1 Drip irrigation system testing platform

1. 球阀 2. 水泵 3. 配电箱 4. 变频器 5. PLC 控制器 6. 计算机 7. 蝶阀 8. 毛管 9. 水箱 10. 压力计

1.2 试验方法

试验选用大禹节水集团股份有限公司生产的内嵌式齿形迷宫流道滴头滴灌带。滴灌带的结构参数为:外径16 mm,壁厚0.36 mm,流道深0.61 mm,流

道宽 1.02 mm, 迷宫流道齿高 0.86 mm, 齿宽 1.25 mm, 齿间角 38.5°, 经清水试验测试得到工作压力为 50 kPa 时, 流态指数为 1.12, 流量系数为 0.49, 清水流量为 1.52 L/h。

配制浑水试验用土取自云南省昆明市呈贡区的砂壤土, 由于滴灌系统中通常采用 120 目网式过滤器进行过滤, 其网孔直径为 0.125 mm^[24], 因此本试验的底泥经自然风干研磨后过 120 目筛网。黄河流域、内蒙古等地区的农业灌溉中, 浑水灌溉的含沙量为 2~7 g/L^[25], 本试验设置浑水质量浓度为 5.0 g/L。打开搅拌机进行搅拌, 使泥沙均匀分布在水箱中, 开启变频器设置运行参数, 调节完毕, 待压力稳定后, 进行灌溉试验, 每次灌水时, 随机收集每条毛管上 3 个滴头排出的浑水样本, 利用称重法测量滴头的流量(每次测量时间持续 30 min, 测量 3 次), 将测量后的浑水样本倒入浑水收集箱中, 充分混合后取样, 利用激光粒度仪进行分析, 以获得所有灌溉次数滴头排出泥沙的级配和粒径分布。滴灌的工作压力在 50~400 kPa 之间^[26], 为减少能源损耗, 试验选定恒定水压为 50 kPa, 2 种动态水压的最大值为 80 kPa, 最小值为 20 kPa, 波动周期为 30 s, 水压变化示意图如图 2 所示。

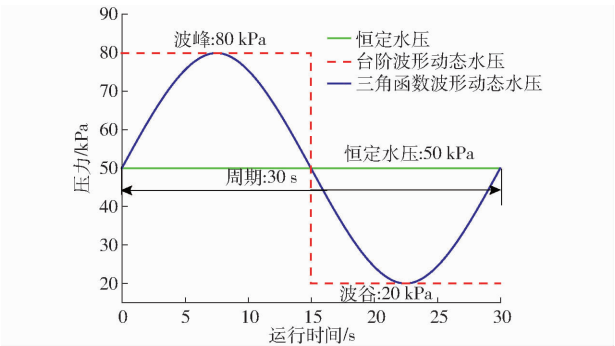


图 2 水压示意图
Fig.2 Schematic of water pressure

1.3 滴头堵塞物质的粒径分布

不同水压模式的浑水灌溉中, 分别在滴灌系统运行 6、12、18、24、30、36、45 次灌水时采集滴头样本, 从滴灌带的首端、尾端各采集 1 个滴头样本, 将采集的滴头样本放入不同的密封袋中, 冷藏。用精度为 1.0 × 10⁻⁴ g 的电子天平称量。通过超声波处理去除滴头内壁上的堵塞物质, 然后将其放入温度为 50℃ 的真空干燥箱中干燥, 质量之间的差值为沉积在滴头内堵塞物质量, 每种水压模式下, 测量 6 个样本, 取其平均值为最终结果, 整个灌水过程中共测量 126 (2 × 3 × 3 × 7) 个滴头样本。然后将滴头内的堵塞物质加水充分混合, 加入分散剂, 搅拌均匀, 利用激光粒度仪 (Mastersizer 2000 型, Malven

Instruments Ltd., 英国) 对滴头内堵塞物质进行级配和粒径分析, 根据黏粒 (粒径 $d < 2 \mu\text{m}$)、粉粒 ($2 \mu\text{m} \leq d \leq 50 \mu\text{m}$) 和砂粒 ($d > 50 \mu\text{m}$) 的比例, 计算获得滴头内堵塞物质黏粒、粉粒、砂粒的质量。

2 结果与分析

2.1 不同水压模式对灌水均匀度的影响

图 3 为不同水压模式下滴头流量与灌水次数的关系, 水平直线代表滴头初始流量的 75%, 一般认为滴头流量下降至 75% 初始流量时, 滴头发生堵塞。清水试验获得不同水压模式下滴头的初始流量, 2 种动态水压处理下滴头的初始流量低于恒定水压处理下滴头的流量, 但两者相对偏差较小, 分别为 1.32%、0.97%, 表明动压灌溉不会影响滴灌系统的供水能力。由图 3 可知, 随着灌水次数的增加, 恒压处理滴头平均流量的下降幅度大于动压处理, 且滴头仅经过 14.33 次灌水后平均流量下降至初始流量的 75% 以下, 滴头出现堵塞, 滴灌系统的使用寿命终止。2 种动态水压处理滴头的平均流量下降相对缓慢, 三角函数波形动态水压下, 滴头的使用寿命最长, 经历 26.01 次灌水后滴头出现堵塞。台阶波形动态水压下, 滴头经历 25.31 次灌水后出现堵塞, 三角函数波形动态水压滴头的使用寿命仅比台阶波形动态水压滴头的使用寿命增加 2.77%, 2 种动态水压处理下滴头的平均使用寿命比恒压处理下延长了 79.06%。结果表明动态水压下滴头的抗堵塞性能显著优于恒压, 但动态水压的波形变化对滴头抗堵塞性能影响较小。其原因是动态水压模式下, 压力水头不断发生变化, 流道内水流紊动剧烈, 形成的水波效应使得流道内的颗粒不断运动, 提高了水流的挟沙能力, 进而提高了滴头的抗堵塞性能。

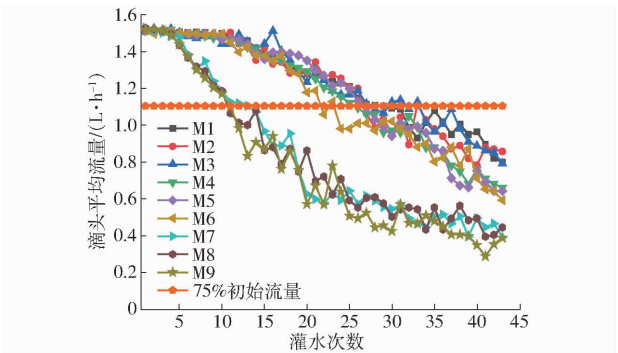


图 3 不同水压模式下滴头平均流量与灌水次数的关系
Fig.3 Relationship between average emitter discharge and irrigation time for different pressure patterns

2.2 不同水压模式对滴头堵塞数量和堵塞位置的影响

短周期间歇性灌溉试验中, 滴头流量下降至初

始流量的 75% 以下时,视为滴头发生堵塞,3 种不同水压模式下,滴头堵塞数量随灌水次数的变化如图 4 所示,恒压处理下,灌水 10 次后滴头出现堵塞,滴头堵塞数量为 2 个。台阶波形动态水压下,灌水 13 次后滴头堵塞数量为 1 个。灌水 45 次后,恒压处理滴头堵塞数量达到 18 个,2 种动态水压处理滴头堵塞数量分别为 8、7 个,与恒压灌溉相比,滴头发生堵塞的数量分别减少了 55.56%、61.11%。恒压灌溉时,堵塞滴头数量随灌水次数的增加呈规律的上升趋势,而 2 种动态水压处理滴头堵塞数量呈循环往复的变化。结果表明动态水压处理滴头堵塞数量明显少于恒压处理,动压灌溉能够降低滴头发生堵塞的风险。



图 5 恒定水压滴头的堵塞情况



Fig. 5 Degree of emitter clogging at constant pressure patterns



图 6 动态水压滴头的堵塞情况

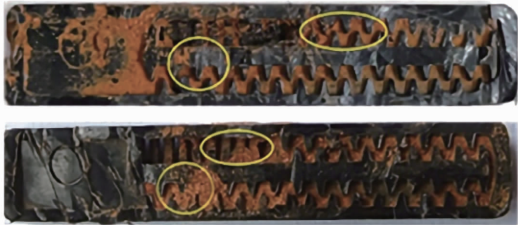


Fig. 6 Degree of emitter clogging at fluctuated pressure patterns

表 1 滴头堵塞位置统计

Tab. 1 Statistics of emitters clogged position

压力模式	总数	入口和流道 前半段堵塞		入口和流道 完全堵塞		流道随机 堵塞	
		个数	占比/ %	个数	占比/ %	个数	占比/ %
恒定水压	19	13	68.42	4	21.05	2	10.53
台阶波形动态水压	8	1	12.50	2	25.00	5	62.50
三角函数波动态水压	7	1	14.28	1	14.28	5	71.44

全堵塞。③流道随机堵塞。从表 1 可以看出,恒定水压处理滴头发生第 1 类堵塞的数量达 13 个,占滴头堵塞总量的 68.42%,发生第 3 类堵塞的数量占 10.53%。这与仵峰等^[16]、牛文全等^[27]的研究结果一致。

台阶波形动态水压和三角函数波动态水压下,滴头发生第 1 类堵塞的数量仅占 12.50%、14.28%,而发生第 3 类堵塞的数量高达 62.50% 和 71.44%。原因可能是动态水压下,滴头流道内水流流速时刻变化,水流扰动剧烈,浑水中的泥沙不易在迷宫流道滴头入口位置停留。此外,动态水压处理

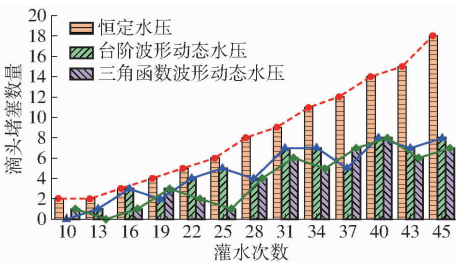


图 4 不同水压模式下滴头堵塞数量与灌水次数的关系

Fig. 4 Relationship between number of clogged emitters and irrigation time with different pressure patterns

灌水试验结束,待所有滴灌带干燥后剖开,滴头堵塞位置见图 5、6,不同水压模式下迷宫流道滴头内泥沙沉积的位置统计见表 1。滴头堵塞分为 3 种类型:①入口及流道前半段堵塞。②入口和流道完

下,水流剪切变化快,泥沙容易随水进入流道,在灌水间歇期,泥沙容易和水中的杂质絮凝、固结流道内壁,造成迷宫流道的随机堵塞。

2.3 不同水压模式对滴头内堵塞物质量的影响

不同水压模式下滴头内堵塞物质的总质量及线性回归曲线如图 7 所示。滴头内堵塞物质的质量随灌水次数的增加均呈现上升趋势,灌水结束时,恒定水压处理滴头内堵塞物质的总质量达到 29.48 mg,2 种动态水压处理滴头内堵塞物质的总质量分别比恒定水压处理减少了 10.71%、14.23%。说明动压处理能够减少泥沙沉积在滴头内,从而降低滴头发生过早堵塞的风险,提高滴头的抗堵塞性能。

图 8 为恒定水压和 2 种动态水压模式下滴头内黏粒、粉粒、砂粒堵塞物质量及线性关系。灌水前期,不同水压模式下,滴头内黏粒、粉粒、砂粒堵塞物质量相差甚微。3 种不同水压处理下,滴头内黏粒、粉粒、砂粒堵塞物质量随灌水次数的增加而增加。灌水结束时,与恒压处理相比,台阶波形动态水压和三角函数波动态水压下,滴头内黏粒堵塞物质量分别减少了 22.19%、36.75%,粉粒堵塞物质量分

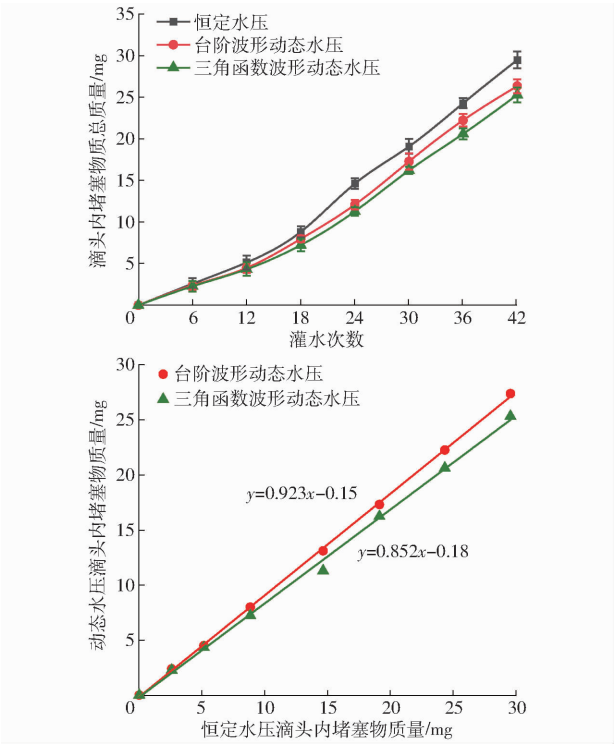


图 7 滴头内堵塞物质的总质量和线性回归曲线

Fig. 7 Total contents of clogging substances in emitter water and linear regression results among different pressure patterns

别减少了 13.22%、25.06%，砂粒堵塞物质量分别增加了 5.88%、15.62%。

2.4 不同水压模式对滴头排出泥沙粒径的影响

图 9 为 3 个不同灌水时段，滴头排出泥沙的粒径分布。灌水初期，2 种动态水压处理滴头排出泥沙最大粒径均为 54.24 μm，恒定水压处理为 30.19 μm，比动压处理减小了 44.34%。台阶波形

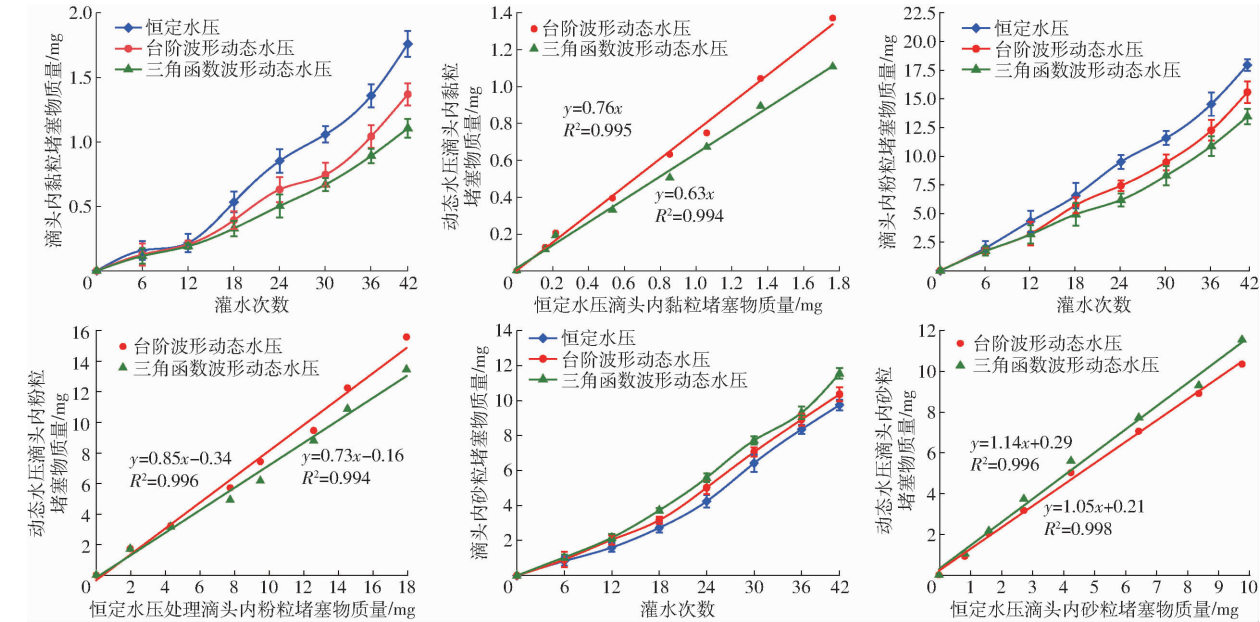


图 8 不同水压模式下滴头内黏粒、粉粒、砂粒堵塞物质量和线性回归曲线

Fig. 8 Contents of clay, powder and grit particles in emitter clogging substances and linear fitting results with different pressure patterns

动态水压下，滴头排出粒径范围为 7.70 ~ 24.84 μm 的泥沙含量占比最多，达到 79.89%，三角函数动态水压下，滴头排出粒径范围为 9.36 ~ 30.19 μm 的泥沙含量占比最多，高达 82.67%，2 种动态水压下，排出泥沙粒径基本相似。恒定水压处理滴头排出泥沙粒径范围为 5.21 ~ 16.81 μm 的泥沙含量占比最多，高达 84.26%，恒压处理滴头排出小粒径的泥沙含量较多。结果表明动压处理有利于大粒径泥沙排出流道。

3 种不同水压模式下，滴头排出泥沙粒径均随灌水次数的增加而减小，灌水后期，2 种动态水压处理滴头排出泥沙最大粒径为 30.19 μm，与恒压处理相比，仅增加 9.76 μm。3 种水压处理滴头排出粒径范围为 5.21 ~ 16.81 μm 的泥沙含量最多。表明灌水末期，动态水压处理滴头排出的泥沙粒径与恒压处理相似，原因是灌水末期，不同水压模式下滴头均发生了不同程度的堵塞，滴头排出泥沙粒径减小。

3 讨论

3.1 不同水压模式对滴头堵塞风险及堵塞位置的影响

滴头流道狭窄，容易造成堵塞^[28]。一旦滴头发生堵塞，滴灌系统的灌水性能会显著下降，使用寿命也会大幅缩短。此外，滴头堵塞直接影响作物的产量和质量。为了降低滴灌工程滴头堵塞风险，一般采用多种过滤设备和沉沙设施，投资大，运行管理费用高。本试验发现动压处理滴头抗堵塞性能优于恒

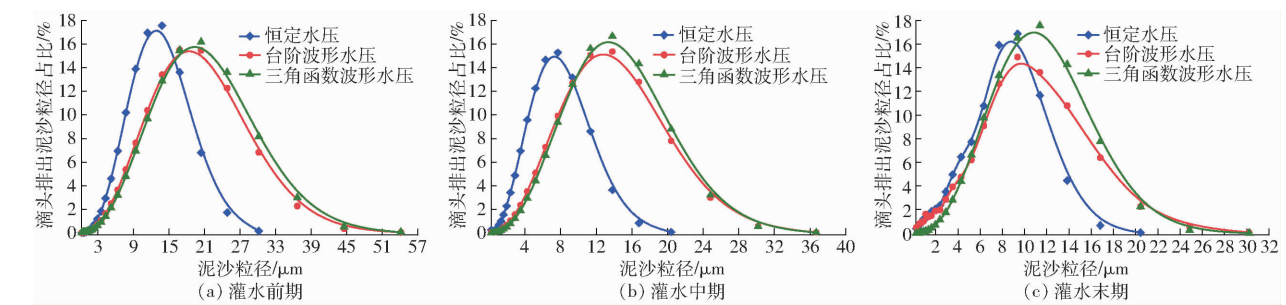


图9 不同水压模式下滴头排出泥沙粒径变化曲线

Fig.9 Changes of silt particle size gradation discharged from emitter during different irrigation periods with different pressure modes

压,使用寿命比恒压处理提高了 79.06%。ZHANG 等^[23]发现动态压力可以降低滴头堵塞风险、增加滴头排放的均匀性。郑超等^[29]试验发现动态水压诱导强烈湍流增加了泥沙的输送能力,减少了滴头堵塞风险,这与本研究的结果一致。

恒压处理滴头堵塞多为入口和流道前半段堵塞,堵塞率高达 68.42%,而动态水压处理滴头发生入口堵塞的情况较少,发生流道随机堵塞的情况较普遍,占堵塞滴头总量的 62.50% 以上,这与 LI 等^[30]的研究结果相同。原因可能是恒压处理下,进入滴头内的水流流速较低、流线保持不变,泥沙颗粒容易沉积,随着灌水次数的增加,入口及迷宫流道前半段滞留泥沙增多,最后造成滴头堵塞。动态水压处理下,压力时刻发生变化,水流紊动强烈,挟沙能力较强,细颗粒泥沙不容易沉积在入口。此外,动压处理流道内水流流线时刻改变,沉积的泥沙在水波效应下容易重新启动,随水流流经流道。

3.2 不同水压模式对滴头内堵塞物质的影响

本试验发现滴头内堵塞物质量与水压模式相关,动压处理滴头内堵塞物质的总量少于恒压。动压对黏粒、粉粒的运移、清除能力较强,能有效地去除 22.19% ~ 36.75% 的黏粒和 13.22% ~ 25.06% 的粉粒。原因可能是恒压处理滴头内水流速度恒定,且流速较低,泥沙容易沉积,这与葛令行等^[31]、DURANROS 等^[32]的研究结果相似。此外,沉积在流道入口位置的泥沙对水流的耗散作用较大,水流剪切力减小,使得大量的泥沙颗粒无法通过流道^[33],随灌水次数的增加,泥沙颗粒的沉积量稳步增加,进一步加快了滴头堵塞。

动压处理压力在 20 ~ 80 kPa 之间波动变化,颗粒的运动方向发生变化,使先前沉积在流道内的泥沙重新流回主流区。此外,滴头中水流流速时刻变化,湍流动能较强,水流的剪切力容易破坏泥沙的絮凝结构,沉积在滴头内的泥沙更容易被冲走^[33]。然而,动压处理对滴头内砂粒堵塞物具有较差的效果,滴头内砂粒堵塞物质量比恒压处理增加了 5.88% ~ 15.62%。可能

是动态水压产生的低流速阶段,大颗粒泥沙(粒径大于 54.24 μm)更容易沉积,不易再次启动^[34]。

3.3 不同水压模式对滴头排出泥沙粒径的影响

动态水压处理滴头排出泥沙的最大粒径比恒压处理增加了 44.34%,且粒径为 9.36 ~ 30.19 μm 的泥沙占比高于恒压处理。灌水前期,恒压处理滴头排出泥沙的最大粒径为 30.19 μm,灌水结束后,滴头排出泥沙的最大粒径为 20.43 μm,恒压处理大于 20 μm 的泥沙易困于迷宫流道内(图 9)。动压处理能够提高大颗粒泥沙的通过率,降低大颗粒泥沙沉积在迷宫流道内的可能,提高迷宫流道滴头的抗堵塞性能。

牛文全等^[27]发现泥沙粒径小于 20 μm 很难造成滴头堵塞,吴泽广等^[35]也认为,细颗粒泥沙的流动性好于粗颗粒,颗粒直径越大,越容易造成堵塞。王心阳等^[36]发现动压能够提高大颗粒泥沙的排出几率,从而减小滴头发生堵塞的可能性,这与本研究的结果一致。郑超等^[37]采用数值模拟方法对动态水压下迷宫流道内水沙运动特性进行了研究,发现动态压力提高了粒径大于 100 μm 的颗粒通过率,这与本研究的结果存在差异,原因是郑超等^[37]只考虑了单个颗粒的运动情况,忽略了灌水过程中泥沙易碰撞和絮凝形成稳定絮团结构,影响泥沙排出。

4 结论

(1)动态水压模式下迷宫流道滴头的抗堵塞性能优于恒定水压,动压灌溉使滴头的使用寿命平均延长了 79.06%。动态水压波形变化对滴头抗堵塞性能的影响较小。

(2)恒定水压处理迷宫流道滴头堵塞多为入口及流道前半段堵塞,比率为 68.42%;动态水压处理滴头堵塞多为流道随机堵塞,占滴头堵塞总量的 62.50% 以上。

(3)动态水压处理大颗粒(粒径小于 54.24 μm)泥沙更容易从迷宫流道排出,滴头排出泥沙的最大粒径比恒压处理增大了 44.34%。

参 考 文 献

- [1] LI Y K, LIU Y Z, LI G B, et al. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters[J]. Irrigation Science, 2012, 30(1): 43 – 56.
- [2] LIU H, HUANG G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 745 – 756.
- [3] 温圣林, 牛文全, 邹梦龙, 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)
- [4] DURAN-ROS M, PUIG-BARGUÉS J, ARBAT G, et al. Performance and backwashing efficiency of disc and screen filters in microirrigation systems[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(1): 35 – 42.
- [5] 牛文全, 张二信, 吕畅, 等. 不同加气和粒径条件下浑水滴灌滴头堵塞特性研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 144 – 152.
NIU Wenquan, ZHANG Erxin, LÜ Chang, et al. Clogging characteristics of muddy drip irrigation dripper under different aeration and particle size conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 144 – 152. (in Chinese)
- [6] JOSEP B, JAUME P B, GERARD A, et al. Development of a new underdrain for improving the efficiency of microirrigation sand media filters[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 296 – 305.
- [7] 陶洪飞, 杨海华, 马英杰, 等. 流量对河水滴灌重力泥沙过滤池内流速分布的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 131 – 137.
TAO Hongfei, YANG Haihua, MA Yingjie, et al. Influence of flow rate on flow velocity distribution in gravity sinking and filter tank for drip irrigation with river water[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 131 – 137. (in Chinese)
- [8] 张俊, 赵万华, 栗晓玲, 等. 微灌长流道滴头结构特性的研究综述[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 182 – 185.
ZHANG Jun, ZHAO Wanhua, SU Xiaoling, et al. Review of structural characteristics analysis of the long-path emitters for microirrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 182 – 185. (in Chinese)
- [9] WANG Z, YANG X, LI J. Effect of phosphorus-coupled nitrogen fertigation on clogging in drip emitters when applying saline water[J]. Irrigation Science, 2020, 38(1): 1 – 15.
- [10] USTUN S, TALIP T, SEÇKİN E. Evaluation of CaCO_3 clogging in emitters with magnetized saline waters[J]. Desalination and Water Treatment, 2012, 40(1): 168 – 173.
- [11] ZHOU B, LI Y, SONG P, et al. Anti-clogging evaluation for drip irrigation emitters using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2017, 35(3): 181 – 192.
- [12] ADIN A, ALON G. Mechanisms and process parameters of filter screens[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1986, 112(4): 293 – 304.
- [13] YU L, LI N, LIU X, et al. Influence of flushing pressure, flushing frequency and flushing time on the service life of a labyrinth-channel emitter[J]. Biosystems Engineering, 2018, 172(4): 154 – 164.
- [14] PUIGBARGUÉS J, LAMM F R. Effect of flushing velocity and flushing duration on sediment transport in microirrigation driplines[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(5): 1821 – 1828.
- [15] TAYLOR H D, BASTOS R, PEARSON H W, et al. Drip irrigation with waste stabilisation pond effluents: solving the problem of emitter fouling[J]. Water Science and Technology, 1995, 31(12): 417 – 424.
- [16] 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 subsur-face drip irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 80 – 83. (in Chinese)
- [17] ADIN A, SACKS M. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(6): 813 – 827.
- [18] 魏正英, 唐一平, 温聚英, 等. 滴头微细流道水沙两相流分析和微 PIV 及抗堵实验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 1 – 9.
WEI Zhengying, TANG Yiping, WEN Juying, et al. Two-phase flow analysis and experimental investigation of micro-PIV and anti-clogging for micro-channels of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 1 – 9. (in Chinese)
- [19] 喻黎明, 梅其勇. 迷宫流道滴头抗堵塞设计与 PIV 试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 155 – 160.
YU Liming, MEI Qiyong. Anti-clogging design and experimental investigation of PIV for labyrinth-channel emitters of drip irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 155 – 160. (in Chinese)
- [20] WEI Q, SHI Y, DONG W, et al. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1 – 2): 130 – 136.
- [21] 王聪, 芦刚, 刘洁, 等. 波动水压滴灌系统设计与实验分析[J]. 中国农村水利水电, 2012, 1(6): 69 – 72.
WANG Cong, LU Gang, LIU Jie, et al. Design of dynamic pressure drip irrigation system and experimental analysis[J]. China Rural Water & Hydropower, 2012, 1(6): 69 – 72. (in Chinese)
- [22] 曹蒙, 魏正英, 葛令行, 等. 滴头壁面形貌对微颗粒与壁面黏附特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9):

120 – 124.

CAO Meng, WEI Zhengying, GE Lingxing, et al. Influence of emitter's channel wall topography on particle-wall adhesion[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9): 120 – 124. (in Chinese)

[23] ZHANG L, WU P, ZHU D, et al. Effect of pulsating pressure on labyrinth emitter clogging[J]. Irrigation Science, 2017, 35(4): 267 – 274.

[24] 喻黎明,徐霞,杨启良,等. 滴灌滴头迷宫流道结构对泥沙运动的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 255 – 261.
YU Liming, XU Xia, YANG Qiliang, et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth passage of drip irrigation emitter on sand movement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 255 – 261. (in Chinese)

[25] 赵彤. 引黄灌区泥沙处理研究[J]. 现代农业科技, 2013(4): 201 – 202.
ZHAO Tong. Study on sediment control in Yellow River irrigation district[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013(4): 201 – 202. (in Chinese)

[26] GOLDBERG D, GORNAT B, RIMON D. Drip irrigation: principles, design and agricultural practices[J]. Drip Irrigation Principles Design & Agricultural Practices, 1976, 296: 273 – 289.

[27] 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)

[28] ISO. Agricultural irrigation equipment-emitters and emitting pipe-specification and test methods: ISO 9261[S]. Geneva, Switzerland, 2004.

[29] 郑超,吴普特,张林,等. 不同动态水压模式下迷宫流道内颗粒物运动特性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 294 – 301.
ZHENG Chao, WU Pute, ZHANG Lin, et al. Particle movement characteristics in labyrinth channel under different dynamic water pressure modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 294 – 301. (in Chinese)

[30] LI Q, SONG P, ZHOU B, et al. Mechanism of intermittent fluctuated water pressure on emitter clogging substances formation in drip irrigation system utilizing high sediment water[J]. Agricultural Water Management, 2019, 215(9): 16 – 24.

[31] 葛令行, 魏正英, 曹蒙, 等. 微小迷宫流道中的沙粒沉积规律[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 20 – 24.
GE Lingxing, WEI Zhengying, CAO Meng, et al. Deposition law of sand in labyrinth-channel of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 20 – 24. (in Chinese)

[32] DURANROS M, PUIGBARGUÉS 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.

[33] LI N, KANG Y, LI X, et al. Lateral flushing with fresh water reduced emitter clogging in drip irrigation with treated effluent[J]. Irrigation Science, 2019, 37(5): 1 – 9.

[34] KOU B Q, CAO Y X, LI J D, et al. Granular materials flow like complex fluids[J]. Nature, 2017, 551: 360 – 363.

[35] 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.
WU Zeguang, ZHANG Zizhuo, ZHANG Kemeng, et al. Influence of particle size and concentration of sediment on clogging of labyrinth channels emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 99 – 108. (in Chinese)

[36] 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 Wene, HU Xiaotao, et al. Influences of particle diameter and inlet pressure on emitter clogging[J]. Water Saving Irrigation, 2014(10): 18 – 21. (in Chinese)

[37] 郑超, 吴普特, 张林, 等. 动态水压下迷宫流道水流运动特性研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 167 – 172.
ZHENG Chao, WU Pute, ZHANG Lin, et al. Flow characteristics in labyrinth channel under dynamic water pressure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 167 – 172. (in Chinese)