

正弦波动态水压提升迷宫流道滴头抗堵塞性能

喻黎明¹, 池晓清¹, 刘柯涵², 李娜^{1*}, 王丹³, 邵社刚³, 崔宁博⁴

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 4. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 水利水电学院, 成都 610065)

摘要:为明确浑水条件下正弦波动态压力各参数组合对梯形迷宫流道出流量的影响, 该研究以正弦波动态压力参数周期、波幅、基础水压为控制因素设计正交试验, 进行浑水灌溉试验, 对正常工作次数、排出泥沙中值粒径、淤积泥沙 D_{50} 值进行极差和方差分析。结果表明: 各参数中只有动态周期对正常工作次数、排出泥沙中值粒径和淤积泥沙中值粒径具有显著性; 相同基础水压 (4、6 和 8 m, 以水头计) 的正弦波动态压力的正常工作次数比同水头的恒压状态分别高 63.64%、12.50%、36.36%, 平均增幅达到 37.50%, 增幅非常明显; 正弦波动态压力对比恒定基础水压有利于不同粒径级别的泥沙通过, 上限粒径、中值粒径和下限粒径排出泥沙粒径均有增加, 而恒定工作压力下, 泥沙粒径越大, 越易沉积在流道内, 相比正弦波动态压力, 中值粒径和下限粒径分别提高了 13.41% 和 18.50%。正弦波动态压力下水流速度波动幅度大, 水流紊动强烈, 加强了大粒径泥沙的通过, 提高了滴头的抗堵塞能力, 延长了滴头使用寿命, 综合评分得到最优参数组合为周期 4 s、基础水压 8 m、波幅 2 m, 动态压力在现有工程基础上较易实现, 因而该项研究对滴灌系统的使用具有一定的指导意义。

关键词:灌溉; 压力; 泥沙; 滴头; 正弦波; 周期; 正常工作次数; 粒径

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.010

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-08-0079-09

喻黎明, 池晓清, 刘柯涵, 等. 正弦波动态水压提升迷宫流道滴头抗堵塞性能[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 79-87.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.010 <http://www.tcsae.org>

Yu Liming, Chi Xiaqing, Liu Kehan, et al. Anti-clogging performance of labyrinth emitters improved by sinusoidal wave dynamic water pressure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 79-87. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.010 <http://www.tcsae.org>

0 引言

滴灌技术是解决干旱半干旱地区灌溉水源匮乏的有效方法之一, 灌水器是滴灌系统的核心, 但灌水器的堵塞问题阻碍了滴灌技术的发展。灌水器堵塞包括物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞, 大多是由固体颗粒的沉积或藻类的产生而造成的^[1]。在各种灌水器流道结构中, 迷宫流道因能使水流成紊流状态, 并具有良好的消能能力而被公认为最好的流道形式^[2]。灌水器按产品结构形式可分圆形管上式滴头、片式内镶滴灌带、柱状内镶滴灌管三种形式, 大多数灌水器都采用了锯齿状的迷宫流道^[3]。迷宫流道的堵塞是由结构参数和灌水条件等因素综合作用导致的。牛文全等^[4]以不同转角的齿形迷宫流道为研究对象, 应用计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 流场速度数值分析、粒子图像测速技术 (Particle Image Velocimetry, PIV) 颗粒运动轨迹线和速度观测对比以及浑水抗堵塞测试相结合的方法, 研究了转角对灌水器水力性能和抗堵塞能力的影响。喻黎明^[5]将齿形、梯

形和矩形等由欧氏几何原理生成的迷宫流道统一成一种几何模型, 取其中关键的 5 个参数作为因素, 采用正交试验方法设计出 25 组灌水器流道结构, 应用 Fluent 软件对此 25 组灌水器流道结构进行数值模拟。灌水条件的选择对滴灌系统的运行成本具有较大影响, 因此工作水压的影响不可忽视。降低工作水压会有效控制运行成本, 但也会增大流道堵塞几率, 因此应该考虑应用动态压力。王聪等^[6]降低灌水器的工作水压, 使恒定的工作水压变为波动, 以改善系统和灌水器抗堵塞性能。为了缓解灌水器的物理堵塞状况, 还有学者采用了微灌技术进行研究。芦刚^[3]提出的动态压力滴灌系统能明显提高滴灌系统的抗堵塞能力。郑超等^[7]对动态水压下迷宫流道灌水器抗堵塞机理进行研究。王聪^[8]在清水条件下对 4 种波动水压下的 3 个波动参数进行研究。郑超等^[9]采用 PIV 技术分析三角函数波、三角波、台阶波、矩形波动态水压模式下流道内颗粒的运动情况, 结果表明: 三角函数波形动态水压下, 流道内水流流速大幅度波动, 水流紊动加剧, 强烈的水流波动效应极大地增大了水流对泥沙的输移能力, 进而增强流道的抗堵塞性能。芦刚^[3]研究了动态水压模式与振幅对灌水器流量和抗堵塞性能的影响, 认为由于动态水压水流紊动强烈, 携带堵塞物质能力增强, 因而灌水器的抗堵塞能力得以提高, 当振幅较大时, 工作水压的“压力滞后性”和较小的工作水压使得灌水器的堵塞程度加剧, 试验表明: 振幅在 4 m 水头左右时, 动态水

收稿日期: 2021-09-08 修订日期: 2022-01-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51769009)

作者简介: 喻黎明, 博士, 副教授, 研究方向为节水灌溉理论与设备。

Email: liming16900@163.com

*通信作者: 李娜, 实验师, 研究方向为节水灌溉理论与设备。

Email: kjclina@163.com

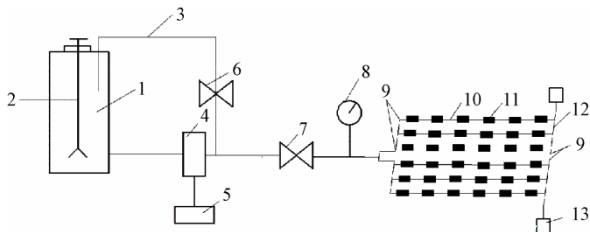
压拥有最强的抗堵塞效果。王聪^[8]在堵塞条件下分别对锯齿波、正弦波、梯形波、矩形波四种波动模式下的灌水器流量、均匀度和堵塞率进行研究,发现锯齿波和正弦波对提高灌水器的抗堵塞能力有明显作用,且当波幅为 2~3 m 时,波动效应效果最好。可见,正弦波动态压力模式能够提升灌水器抗堵塞性能,然而,浑水条件下正弦波动态压力模式对梯形迷宫流道的影响尚未见报道。

本文以内镶式锯齿状梯形迷宫流道结构为研究对象,借助细粒径泥沙浑水灌溉试验,分析正弦波动态压力 3 个参数对梯形迷宫流道的相对流量及排出泥沙和淤积泥沙中值粒径的影响,为既能达到良好波动效应又可以节能的波动参数组合的选取提供参考,对灌溉系统有一定的应用价值。

1 材料与方 法

1.1 试验装置与土壤

试验在昆明理工大学现代农业工程学院实验室内进行,试验装置主要由蓄水桶、搅拌机、远传压力表、调压阀、滴灌带毛管、动态压力变频器、三相异步电动机、浑水收集桶等组成。其中蓄水桶为 100 L,上端固定搅拌机,额定转速为 750 r/min,远传压力表量程和精度分别为 0~0.4 MPa 和 25%,动态压力变频器控制三相异步电动机(电压 380 V,转速 2 890 r/min,功率 1.5 kW)的速度和转矩,产生相应参数的正弦波动态压力,铺设滴灌带毛管 6 条,每条毛管上有 6 个滴头,总共 36 个滴头,每 3 条为一组,两组毛管均由主管道供水,用 PVC 弯管分为两组,转角处与末端设置堵头。即为两组重复试验,浑水通过迷宫流道流入浑水收集桶(容积为 50 L),不重复使用。试验装置平台设计如图 1 所示。



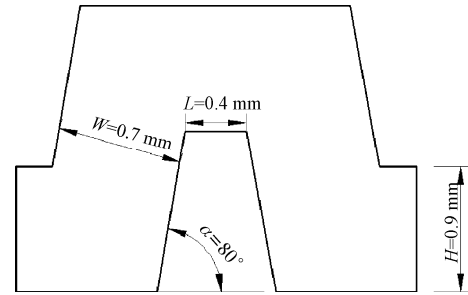
1.蓄水桶 2.搅拌机 3.回水管 4.三相异步电动机 5.动态压力变频器 6.调压阀 7.主阀门 8.远传压力表 9.PVC 螺纹堵头 10.毛管 11.灌水器 12.PVC 管 13.浑水收集桶
1. Water storage bucket 2. Mixer 3. Return pipe 4. Three-phase asynchronous motor 5. Dynamic pressure converter 6. Pressure regulating valve 7. Main valve 8. Remote pressure gauge 9. PVC thread plug 10. Capillary tube 11. Irrigation device 12. PVC tube 13. Muddy water collection bucket

图 1 试验装置平台设计图

Fig.1 Design drawing of test device platform

采用甘肃大禹节水集团股份有限公司(中国甘肃酒泉肃州区解放路 290 号)生产的内镶式锯齿状梯形迷宫流道(图 2),滴灌带基本参数如下:外径 16 mm、壁厚 0.4 mm、壁面出口直径 2 mm、流道宽度 0.7 mm、流道深度 0.8 mm、齿高 0.9 mm、流道转角 80°,流道单元 8 个,清水试验测得流量系数 0.60,流态指数 0.52。

供试土壤:配制浑水所用土为昆明理工大学呈贡校区试验用地的红壤土,经自然风干研磨,高频振荡过 125 μm (120 目)筛网,装入密封袋,备用。



注: W 为流道宽度, mm; L 为壁厚, mm; α 为流道转角, ($^\circ$); H 为齿高, mm。

Note: W is flow channel width, mm; L is wall thickness, mm; α is flow channel angle, ($^\circ$); H is tooth height, mm.

图 2 流道结构参数

Fig.2 Flow channel structure parameters

1.2 试验设计与过程

本试验分为清水试验和浑水试验两部分,其中清水试验结果为之后的浑水试验参数设置提供参考,固定调压阀,调节动态压力变频器得到不同基础水压所对应的频率,在之后的试验中设定相应参数组合的正弦波形,开展正交浑水试验。

1.2.1 清水试验

在清水条件下测试基础水压为 1~11 m 压力水头下每个滴头的出水量,每次持续时间为 5 min。用称量法称出 18 个滴头的出流量取其平均值,最后取两组试验平均值为该基础水压下滴头的额定流量值。

1.2.2 浑水试验设计及过程

1) 浑水含沙量设计:为了加快试验进度,适当缩短试验时间,采用高于农田灌溉水质标准^[10](悬浮物浓度小于 0.1 g/L)对悬浮物浓度要求的 50 倍,预试验时设定质量浓度大于 50 倍,恒定水压下的滴头灌水一次就发生堵塞,因此设定浑水含沙量为 5 g/L。灌溉水源的泥沙级配上限粒径(D_{10})为 2.81 μm ,中值粒径(D_{50})为 22.26 μm ,下限粒径(D_{90})为 43.22 μm 。

2) 正交试验设计

正弦波对提高灌水器抗堵塞能力有明显的作 用,在前人研究^[6-9]的基础上,本文选取正弦波模式下的主要影响因素基础水压、波幅、周期为变量因素,且每种变量因素选取 3 种水平,参考文献^[8],为使水压既符合低压灌溉理念,又不出现负压,对参数综合考虑,基础水压取 4、6、8 m(以水头计,下同)3 个水平,波幅水平为 2、4、6 m 3 个水平,周期取 1、2、4 s 3 个水平。依据 $L_9(3^3)$ 设计的正交表如表 1 所示。空列表示误差列,如果空列的极差比其他因素的极差还要大,说明因素之间可能存在不可忽略的交互作用。正弦波下压力随时间的变化过程如图 3 所示。正弦波压力变化下滴头流量的变化过程难以得到,在实际试验过程中,采取周期性间歇灌水测试方法,测试的持续时间需要几个循环来完成,运行完毕,测定滴灌带的出流量,因此只能得出一次测试结束后的相对流量,从而绘制灌水器相对流量随正常工作次数的变化过程。

3) 浑水试验过程

浑水试验选用周期性间歇灌水测试方法^[11],蓄水桶

提前配置好 100 L 浑水，开启电源，搅拌机持续运转保证浑水灌溉的均匀性，设置正弦波参数，待压力稳定，开始计时为 0，从 25 min 开始测试各滴头出水量直到运行 30 min。当桶内浑水体积消耗至 40 L 左右加入预先配置好的浑水，加入浑水均为单独预先配制，保证浑水水源的均匀性。两组试验灌溉条件（进口压力及泥沙浓度）均相同，相当于做 2 次重复试验（每次重复试验均由主管道供水，并联 3 根毛管，每根毛管有 6 个尺寸一致的迷宫流道滴头，1 个滴头即为 1 个独立的试验结果，每组重复试验为 18 个滴头的重复试验结果，设置 2 次重复试验即为 2 组 18 个滴头的重复结果），灌水间隔为 30 min，共进行 20 次浑水试验，滴头达到堵塞即停止。每组试验结束后，用电子秤对滴头排出浑水进行称量，其精度为 0.01 g，混合均匀，用烧杯取样，将每根毛管排出浑水取样 1 份，每组试验 3 份样本，每个样本重复测 3 次，每个重复试验滴头出流取样 9 份（3×3）。将拆取下来的滴灌带剖开滴头，自然风干，然后收集淤积在滴头内的泥沙，充分混合取样，测定滴头淤积泥沙粒径，取样方法与滴头出流时的方法一致。更换新的滴灌带，冲洗蓄水桶和各管道配件，保证后续试验浑水浓度不受影响。

表 1 正弦波浑水试验因素水平组合

Table 1 Test combinations of test factors with sine wave

试验号 Test No.	因素 Factors				结果 Results		
	波幅 (A) Amplitude /m	周期 (B) Period /s	空列 (C) Blank	基础水压 (D) Basic water pressure/m	正常工作次数 Normal operating times	排出泥沙中值粒径 Median size of discharged sediment / μm	淤积泥沙中值粒径 Median size of sediments / μm
T1	2	1	1	4	15	7.32	24.16
T2	2	2	2	6	6	8.11	22.04
T3	2	4	3	8	16	8.85	20.31
T4	4	1	2	8	9	7.51	22.73
T5	4	2	3	4	6	7.93	22.31
T6	4	4	1	6	13	8.74	20.69
T7	6	1	3	6	7	7.06	22.83
T8	6	2	1	8	8	8.37	21.56
T9	6	4	2	4	13	8.65	21.04

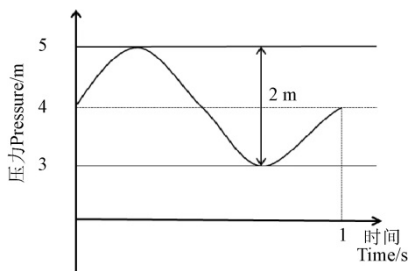


图 3 正弦波压力图（以 T1 为例）

Fig. 3 Sinusoidal pressure diagram (T1 as an example)

1.3 指标计算和测定方法

1.3.1 相对流量和灌水均匀度

灌水器浑水流量与相同工作压力下的清水流量的比值称为相对流量 (q_r)， q_r 越小，说明灌水器的抗堵性能越差；当 $q_r < 75\%$ ，则认为灌水器发生堵塞^[12]。相对流量计算公式如下：

$$q_r = \frac{q_i}{q_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 q_i 为灌水器浑水流量，L/h； i 为浑水试验次数，共 20 次； q_0 为相同工作压力下灌水器清水流量，L/h。

灌水均匀度用克里斯琴森均匀系数 C_u 表征，微灌工程技术规范^[13]规定 $C_u > 80\%$ 。

1.3.2 正常工作次数

定义当某次浑水试验未发生堵塞 ($q_r > 75\%$)，即灌水器正常工作时的的工作次数为正常工作次数。

1.3.3 泥沙级配分析方法

从密封袋随机取备用土壤 3 份，利用马尔文激光粒度测试仪 2000 (Mastersizer 2000; Malvern Instruments Ltd, Enigma Business Park Malvern Worcestershire, WR141XZ, UK) 对所取样本进行粒径级配分析，该设备测量范围为 0.02~2 000 μm ，且精度高，在与仪器相连的电脑中设置每份样品测试 3 次，取平均值。

将各区间泥沙颗粒从小到大排列，用累积频率曲线表示粒径从无限小到某代表粒径之间的所有颗粒份量占总份量的百分比，当颗粒累积分布取值 $x\%$ 时对应的粒径为 D_x ，如 D_{10} 表示颗粒累积体积为 10% 时，测得的最大粒径。选用 D_{10} 、 D_{90} 分别表示泥沙颗粒的上限粒径、下限粒径， D_{50} 为中值粒径，也可称为平均粒径^[14]。

1.3.4 综合评分法

采用客观赋权法对指标权重进行选取，熵权法是客观赋权法的一种，本文参考文献^[15]，采用熵权法选取权重，并直接加权进行综合评分，基于 3 个指标（正常工作次数、排出泥沙 D_{50} 与淤积泥沙 D_{50} ）选择抗堵塞性能最优的正弦波参数组合。

假设有 n 个样本， m 个指标（本文为 $m=3$ ），获得了第 i 个样本第 j 个指标的试验值 y_{ij} ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$)，基于此采用下列方法计算综合得分：

1) 采用式 (2) 对各试验值进行标准化处理，获得试验值对应的标准化值 x_{ij} 。

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min\{y_{1j}, \dots, y_{nj}\}}{\max\{y_{1j}, \dots, y_{nj}\} - \min\{y_{1j}, \dots, y_{nj}\}} \quad (2)$$

2) 采用式 (3) 计算第 j 项指标的熵值 e_j 。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (3)$$

式中 $p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$, $k = \frac{1}{\ln(n)} > 0$ ，满足 $e_j \geq 0$ 。由于 $p_{ij}=0$

时， $\ln p_{ij}$ 无意义，因此对其进行修正为

$$p_{ij} = \frac{1 + x_{ij}}{\sum_{i=1}^n (1 + x_{ij})} \quad (4)$$

3) 采用式 (5) 计算各项指标的权重 w_j 。

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (5)$$

式中 $d_j = 1 - e_j$ 。

4) 采用式 (6) 计算综合得分 S_i 。

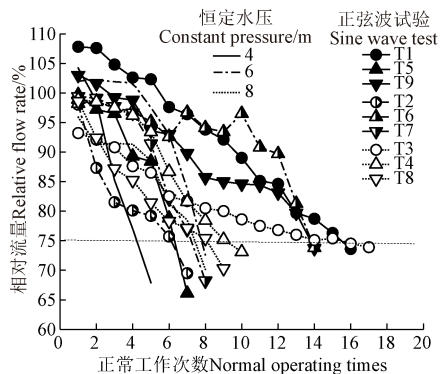
$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j x_{ij} \quad (6)$$

S_i 值越大表明综合评分越高, 表明结果越优。

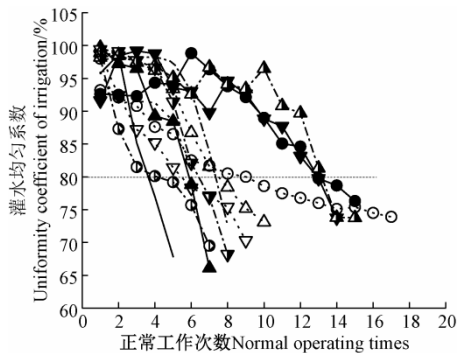
2 结果与分析

2.1 各阶段相对流量及均匀系数变化

为了直观地分析灌水器的堵塞规律, 选取 12 种压力状态 (9 组正交试验+3 组恒定水压) 下灌水器的相对流量和灌水均匀度进行分析, 如图 4 所示。



a. 相对流量变化
a. Change of relative flow rate



b. 灌水均匀系数变化
b. Uniformity coefficient change of irrigation

图 4 浑水试验灌水器相对流量及灌水均匀度的变化过程

Fig.4 The change processes of relative flow rate and uniformity coefficient of irrigation in test with muddy water

图 4 表明, 恒压状态下 (4、6、8 m 压力水头) 的流量下降较明显, 单次流量下降均幅比相同基础水压的正弦波动态压力分别多 53.52%、11.89%、29.10%, 三种恒压压力水头下平均降幅达到 31.50%, 降幅非常明显; 将 9 个正弦波动态压力组合按照基础水压划分为 3 组 (组 1: T1、T5、T9; 组 2: T2、T6、T7; 组 3: T3、T4、T8), 基础水压升高, 各组正弦波动态压力的正常工作次数增加非常明显, 3 组正弦波动态压力的正常工作次数比同水头的恒压状态分别多 63.64%、12.50%、36.36%, 3 组正弦波动态压力下正常工作次数平均增幅达到 37.50%, 增幅显著。正弦波动态压力下的相对流量变化趋势相对平缓, T9 第 4 次灌水后流量骤降, 降幅为 5.26%, 第 8 次灌水后的流量趋于平稳, 单次下降均幅为 2.45%, 基础水压相同的 4 m 水头恒压下流量的单次下降均幅为 10.10%, 骤降幅度仍比 4 m 水头下降幅度小 4.84%。T6 第 6 次灌水时流量下降 2.6%, 发生了随机性堵塞, 第 7

次灌水相对流量又增加 4.2%, 第 9 次流量下降 3.4%, 流道存在堵塞-冲洗-堵塞的反复过程。随着正常工作次数的增加, 相对流量虽有波动, 但不影响整体呈线性下降趋势^[16], 即迷宫流道在不同压力条件下均存在不同程度的泥沙沉积。T3 从第 5 次灌水后流量明显下降, 第 17 次相对流量小于 75%, 发生堵塞, 增加了灌水器的使用次数, 延缓使用寿命。从灌水均匀系数 C_u 来看, T3 (周期 4 s、基础水压 8 m、波幅 2 m) 的灌水均匀系数随正常工作次数变化相对较平缓, 最大下降幅度为 4%。压力影响下, 相对流量变化大的试验组合灌水均匀度变化幅度较大, 说明滴头发生了相对严重的堵塞。

2.2 滴头排出泥沙和滴头内淤积泥沙粒径分析

表 2 为恒定压力水头和不同正弦波参数组合状态下滴头排出泥沙的 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 的平均值。由表可知, 恒压和正弦波状态下 D_{10} 的平均值分别为 1.20、2.67 μm ; D_{50} 的平均值分别为 6.04、8.06 μm ; D_{90} 的平均值分别为 11.99、15.30 μm ; 整体均小于 20 μm 。说明粒径小于 0.02 mm 的泥沙不易造成堵塞, 抗堵性能良好。而相对于恒压状态, 正弦波状态下的 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 平均值分别高 55.06%、25.06%、21.63%。说明正弦波动态压力更有利于泥沙排出流道。其中 D_{10} 均值在正弦波压力和恒压两种压力状态下差距更为明显, 说明粒径范围在 20 μm 以内时, 粒径接近 20 μm 的泥沙在正弦波动态压力状态下不易发生沉积, 对滴灌系统危害较小。

表 2 滴头排出和淤积泥沙上限粒径 (D_{10})、中值粒径 (D_{50})、下限粒径 (D_{90}) 均值

Table 2 Mean of upper, median and lower particle sizes (D_{10} , D_{50} and D_{90}) of the sediment discharged and deposited by the dropper mm

试验 Tests	排出泥沙 Discharged sediments			淤积泥沙 Sediments		
	D_{10}	D_{50}	D_{90}	D_{10}	D_{50}	D_{90}
恒定压力 试验 Constant pressure test	4 m	1.03	5.84	11.32	7.50	25.68
	6 m	1.26	6.03	12.06	7.58	25.12
	8 m	1.32	6.24	12.58	7.61	24.34
正弦波 试验 Sine wave test	T1	2.01	7.32	14.52	8.53	24.16
	T2	2.65	8.11	15.23	7.94	22.04
	T3	3.62	8.85	16.25	7.62	20.31
	T4	2.13	7.51	14.79	8.24	22.73
	T5	2.51	7.93	15.07	8.2	22.31
	T6	3.23	8.74	16.03	7.54	20.69
	T7	2.05	7.06	14.28	8.06	22.83
	T8	2.85	8.37	15.62	7.86	21.56
	T9	3.01	8.65	15.87	7.71	21.04

灌水试验结束后, 风干滴灌带, 剖开滴头, 用激光粒度仪测定淤积在迷宫流道内泥沙颗粒的泥沙级配, 分析 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 均值, 如表 2 所示。恒压和正弦波状态下 D_{10} 的平均值分别为 7.56、7.97 μm ; D_{50} 的平均值分别为 25.05、21.69 μm ; D_{90} 的平均值分别为 52.80、43.03 μm ; 两种压力状态下的 D_{10} 均值均在 10 μm 以下, 且二者相差不大, 小颗粒泥沙发生沉积可能源于大颗粒泥沙的遮蔽作用。当泥沙累计体积从 50%到 90%, 两种压力状态下

的淤积泥沙平均粒径差距增加了 51.23%，相对于恒压状态，正弦波动态压力下的 D_{50} 和 D_{90} 值分别减小 13.41% 和 18.50%。分析原因，20~50 μm 的泥沙在不同压力状态下均发生沉积，说明存在易堵塞的敏感粒径范围。平均粒径大于 50 μm 的颗粒由于自重作用沉积在流道里，正弦波动压状态下进口压力随周期不断发生变化，使小颗粒泥沙悬浮于水面，随水流迅速通过流道，并且达到部分大颗粒泥沙的起动力条件，增强了水流的挟沙能力，因水流紊动较剧烈，在颗粒絮凝成稳定的单粒结构之前，对其进行破坏，从而沉积泥沙最大粒径未超过 50 μm 。恒压状态下，细小颗粒由于颗粒间的粘结力和吸附力，容易形成团聚体，且水流对大粒径颗粒输移能力不强，因此恒压状态下平均粒径大于 50 μm 的颗粒物易淤积在流道内，对灌水器造成堵塞。

2.3 正弦波参数对正常工作次数、排出和淤积泥沙中值粒径的影响

2.3.1 对正常工作次数的影响

正常工作次数的多少反映了滴头使用寿命的长短，为了探究正常工作次数与正弦波 3 种参数之间的关系，对每个试验下的正常工作次数进行分析。结果如表 3 所示，表中极差 R 由 K 或 k 三个值中最大值与最小值作差所得，表示该因素的影响程度。 R 值越大，代表该因素的影响越大。由表 3 可知，正常工作次数极差 R 由大到小依次为周期、波幅、基础水压和空列。其中基础水压和空列的极差 R 值相等。表明周期对正常工作次数的影响最大，波幅次之，基础水压和因素间的交互作用（空列）影响最小。根据极差分析结果，最佳因素组合为 $A_1B_3D_1$ ，即波幅为 2 m、周期为 4 s、基础水压为 4 m 时，正常工作次数最大，滴头的堵塞过程最缓慢，流道的抗堵塞效果最强，能有效提升灌水器的使用寿命。为了分析各参数对正常工作次数影响的显著性，对其进行方差计算，得到各参数的 F 值，如表 4 所示。 F 值由大到小依次为周期、波幅、基础水压。其中周期对正常工作次数的影响在 0.05 水平下是显著的，波幅和基础水压在两种水平下均不显著，可能是由于工作压力随周期呈现出周期性变化，对灌水器的堵塞具有随机性，所以对正常工作次数影响显著。

2.3.2 对中值粒径的影响

对于泥沙级配而言，泥沙级配组合中不同粒径段颗粒含量不同对堵塞存在较大的影响^[17]，分析正弦波 3 种参数对排出泥沙 D_{50} 值的影响，如表 3 所示。从表中可看出排出泥沙 D_{50} 值极差 R 由大到小为周期、基础水压、空列、波幅。其中影响最大的是周期，波幅的影响最小。随着周期的增加，排出泥沙的 D_{50} 值增加幅度较大，可能是由于泥沙的起动力增大，中径及偏大粒径的泥沙随水流剧烈运动并能够随水流快速排出流道。随着基础水压的增大， D_{50} 值增加，说明工作压力增大，水流紊动剧烈，水流不断冲击流道，使得流道中的中径泥沙离底悬浮并通过流道，增加了水流的输移能力，增强了流道的抗堵塞效果。随着波幅的增加， D_{50} 值逐渐减小，说明波幅越大，中径泥沙更不易通过流道，需要适

当减小波幅才能使流道达到较好的抗堵塞效果。通过上述分析，最佳因素组合为 $A_1B_3D_3$ ，即波幅为 2 m、周期为 4 s、基础水压为 8 m 时，流道排出泥沙 D_{50} 值达到最大，如表 1 所示为 8.85 μm ，更有利于中径颗粒泥沙通过流道。排出泥沙的 D_{50} 值方差分析结果见表 4。从表 4 可看出，排出泥沙 D_{50} 值的 F 值由大到小依次为周期、基础水压、波幅。其中周期的影响达到极显著水平而基础水压和波幅影响均不显著，这表明周期对排出泥沙 D_{50} 值影响最大，基础水压和波幅影响不显著。

表 3 正弦波浑水正交试验极差分析
Table 3 Range analysis of muddy water test with sine wave

指标 Indexes	正常工作次数 Normal operating times				排出泥沙 D_{50} Discharged sediment $D_{50}/\mu\text{m}$				淤积泥沙 D_{50} Sediments $D_{50}/\mu\text{m}$			
	A/m	B/s	C	D/m	A/m	B/s	C	D/m	A/m	B/s	C	D/m
	K_1	37	31	36	34	24.28	21.89	24.43	23.90	66.51	69.72	66.41
K_2	28	20	28	26	24.18	24.41	24.27	23.91	65.73	65.91	65.81	65.56
K_3	28	42	29	33	24.08	26.24	23.84	24.73	65.43	62.04	65.45	64.60
k_1	12.33	10.33	12.00	11.33	8.09	7.30	8.14	7.97	22.17	23.24	22.14	22.50
k_2	9.33	6.67	9.33	8.67	8.06	8.14	8.09	7.97	21.91	21.97	21.94	21.85
k_3	9.33	14.00	9.67	11.00	8.03	8.75	7.95	8.25	21.81	20.68	21.82	21.53
R	3.00	7.33	2.67	2.66	0.07	1.45	0.20	0.28	0.36	2.56	0.32	0.97

注： K 为满足要求的单元格求和； k 为 K 的算术平均值； R 为极差。下同。
Note: K is the sum of the cells that meet the requirements; k is the arithmetic mean value of K ; R is range. Same as below.

表 4 方差分析结果

Table 4 Variance analysis results

指标 Indexes	方差源 Sources of variance	离差平方和 Sum of squares of deviation	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F 值 F value
正常工作次数 Normal operating times	A	18	2	9.00	1.42
	B	80.67	2	40.33	6.37*
	C	12.67	2	6.33	
	D	12.67	2	6.33	1.00
排出泥沙 D_{50} Sediment discharge D_{50}	A	0.01	2	0.00	0.11
	B	3.18	2	1.59	51.24**
	C	0.06	2	0.03	
	D	0.15	2	0.08	2.44
淤积泥沙 D_{50} Sediments D_{50}	A	0.21	2	0.10	1.32
	B	9.83	2	4.92	62.70**
	C	0.16	2	0.08	
	D	1.47	2	0.73	9.35*

注： $F_{0.05}=5.14$ ； $F_{0.01}=10.9$ ；*表示在 0.05 水平时影响显著；**表示在 0.01 水平时影响显著。

Note: $F_{0.05} = 5.14$; $F_{0.01} = 10.9$; * indicates significant influence at the level of 0.05; ** indicates significant influence at the level of 0.01.

从表 3 可以看出，淤积泥沙 D_{50} 值的极差 R 大小依次为周期、基础水压、波幅和空列。随着周期的增加，淤积泥沙 D_{50} 值逐渐减小，且变化幅度较大，基础水压和波幅的变化趋势与周期一致。说明正弦波动态压力状态下，波动参数增大，水流波动效应增强，冲击滞留区的泥沙，将其带到主流区，并可以将中径及偏大粒径泥沙排出流道。淤积泥沙 D_{50} 值越小，滞留在流道内的泥沙颗粒粒径越小，水流易使大粒径泥沙通过流道。所以 K 值越小，流道内大颗粒泥沙堵塞程度越小，滴头堵塞越轻微， K 值越小对抗堵塞效果越优，因此得到最佳因素组合为 $A_3B_3D_3$ ，即波幅为 6 m、周期为 4 s、基础水压为 8 m 时，淤积泥沙 D_{50} 值最小，即中径泥沙及偏大颗粒泥沙在此因素组合下最大限度地排出流道，降低了

堵塞程度,减轻了对滴灌系统造成的危害。淤积泥沙的 D_{50} 值的方差分析结果如表 4 所示。由表可知,淤积泥沙 D_{50} 值的 F 值由大到小为周期、基础水压、波幅。其中周期在 0.01 和 0.05 水平下均显著。基础水压在 0.05 水平下显著,波幅在两水平下均不显著。表明周期对淤积泥沙 D_{50} 值影响最大,基础水压次之,波幅影响不显著。

2.4 正弦波动态水压提升滴头抗堵塞综合性能分析

正弦波动态水压作为一种波动水压,既要便于实际工程的操作实施,也要保证改善滴头的堵塞状况。对正常工作次数、排出泥沙 D_{50} 值、淤积泥沙 D_{50} 值 3 个指标进行综合评分,用综合评分值来衡量滴头使用寿命及抗堵塞的性能,使得正弦波动态压力能最大程度改善滴头的堵塞,增加出流量,排出淤积泥沙,有利于正弦波动态水压的推广使用。根据熵权法对各个指标加以权重,得到各试验的综合评分值,如表 5 所示。可以看出 T3 的综合评分值最高为 1.08,为所有试验中的最优。对综合评分值进行极差分析,如表 6 所示,得出的最优组合为 $A_1B_3D_3$ 即 T3,即周期 4 s、基础水压 8 m、波幅 2 m。由表 1 可知,正常工作次数为 16 次,使用寿命相比其他正弦波动态压力参数组合增加了 43.75%。

表 5 试验指标综合评分结果

试验编号 Test No.	标准化值 Normalized value			综合评分值 Comprehensive score
	正常工作次数 Normal operating times	排出泥沙 D_{50} Discharged sediment D_{50}	淤积泥沙 D_{50} Sediments D_{50}	
1	0.9	0.15	1.0	0.80
2	0	0.59	0.45	0.03
3	1	1.00	0	1.08
4	0.3	0.25	0.63	0.27
5	0	0.49	0.52	0.02
6	0.7	0.94	0.10	0.78
7	0.1	0	0.65	0.04
8	0.2	0.73	0.32	0.25
9	0.7	0.89	0.19	0.76

表 6 综合评分值极差分析

指标 Indexes	A	B	C	D
K_1	1.92	1.11	1.83	1.58
K_2	1.06	0.31	1.07	0.85
K_3	1.06	2.62	1.14	1.60
k_1	0.64	0.37	0.61	0.53
k_2	0.35	0.10	0.36	0.28
k_3	0.35	0.87	0.38	0.53
R	0.28	0.77	0.26	0.25

3 讨论

3.1 动态压力对滴头流量的影响

图 4a 相对流量变化图中低基础水压的初始相对流量反而大,分析原因如下:在浑水条件下,恒压状态随着工作压力增大,相对流量反而减小。4、6、8 m 压力水头下的相对流量分别为 1.04、1.02、0.96,随着压力升高,浑水流量的增幅为 29.37、25.41 L/h,相同压力下的清水流量增幅为 30.81、35.05 L/h。根据相对流量的定义^[12],

在浑水条件下,随着工作压力的增大,灌水器出流量增大,相同工作压力下的清水流量相应增大,而清水流量的增加幅度远大于浑水流量的增加幅度,所以工作压力增大,整体相对流量会呈现出减小的趋势。随着正常工作次数增加,灌水器流道中泥沙沉积的累积效应导致其水力性能越来越差^[18]。流量作为灌水器重要的水力要素,可以直观地反映整个滴灌系统的供水能力,动态压力下的相对流量呈现出高低起伏的变化,且堵塞程度不明显^[19],说明流道中的泥沙在某个拐点发生堵塞,由于工作压力的变化,下次灌水又被冲开,相对流量又呈现出恢复状态,此种堵塞具有一定的随机性和偶然性^[20]。动态压力使水流紊动更加强烈,能有效提高流道的抗堵塞能力^[7],但根据迷宫流道主航道抗堵设计方法^[21],紊流在流道的弯角处产生涡流区,中心的速度近似为零,颗粒极易在此处沉积,层流反而更有利于泥沙物质排出流道^[22]。本文方差分析得出,正弦波 3 个参数中对正常工作次数、排出泥沙 D_{50} 、淤积泥沙 D_{50} 的影响均显著的是周期。在正弦波动态压力模式下,水压随周期变化,水流紊动,紊流多发生在边壁拐角处,流速的大小和方向不断发生变化,泥沙颗粒所受外力不能恒定,因此沙粒在沉降过程中会受到减速运动或加速运动,紊动降低了泥沙颗粒的沉速,而紊动程度取决于正弦波动态压力的 3 个参数设置。泥沙运动状态有悬移质和推移质,悬移质泥沙悬浮于水中,水流的紊动能维持泥沙悬浮的能量,推移质泥沙运动具有间歇性,有时运动,有时停滞。泥沙起动受到各种力的综合作用:重力、水流的拖曳力和上举力、颗粒之间的粘结力及渗透压力。而泥沙在水流作用下运动,速度增加的过程需要消耗水流的能量,正弦波周期调控进口压力变化,当水流加强到一定程度,泥沙脱离静止开始运动。由于泥沙处于不同位置,且不同大小、不同形态,所以起动具有随机性,满足大部分泥沙的起动条件还需对正弦波周期做进一步研究。

3.2 动态压力对滴头排出泥沙的影响

本文对排出泥沙 D_{50} 值进行极差计算:波幅越大,排出泥沙 D_{50} 值越小,即中径及偏大颗粒泥沙未排出流道,说明增大波幅会减小水流对流道的冲刷程度,降低水流的输移能力。王聪^[8]提出随着波幅逐渐增大,灌水器内流场流速降低,紊流程度减弱,携带堵塞介质能力下降。因此为达到流道的抗堵塞效果需要适当减小波幅,与前人研究结论一致。吴泽广^[17]对浑水滴灌后滴头输出的泥沙进行级配分析,得出天然泥沙中小于 0.03 mm 颗粒由于粒径较小,絮凝作用明显,且黏粒含量大,易形成体积较大的团聚体,但是在其凝聚紧实之前,会被水流冲散,从而冲出流道;王新坤等^[23]以迷宫流道灌水器为研究对象,利用射流三通产生的高频脉冲波,其参数与正弦波、三角波、梯形波、矩形波相同,应用 CFD 两相流含沙量数值分析,模拟高频脉冲条件下流量与压力水头关系、含沙量的瞬时分布,分析高频脉冲条件对颗粒物沉积区含沙量变化的影响,得出正弦波条件下不同颗粒直径对灌水器颗粒物沉积略有不同,粒径为 20 μm 时,流道内含沙量与入流含沙量相近。牛文全等^[12]认为对于

粒径小于 0.031 mm 的浑水, 在较低压力和含沙量条件下, 水流紊动与颗粒碰撞作用较小, 颗粒絮凝作用相对较强, 更易形成较大的团聚体且与流道壁面相黏结造成堵塞, 在较高压力和含沙量条件下, 水流紊动与颗粒间的碰撞作用强烈, 团聚体不易与流道壁面粘结, 易随水流出, 因此其堵塞程度并不严重。本文对流道内的泥沙粒径进行分析, 排出泥沙的粒径值均小于 20 μm , 产生差异的原因可能是试验用土的黏性作用不同, 红壤土^[24]中基质势对水分的运移起主要作用, 水分分布不均, 而黄砂土易造成水的深层渗漏。其次研究的滴灌带不同, 本文研究的是内镶式锯齿状梯形迷宫流道, 牛文全以内镶片式斜齿型迷宫滴灌带为研究对象, 吴泽广以齿形迷宫流道滴头为研究对象。以及研究的含沙量不同, 从而导致了本研究与前述前人研究的差异性。

3.3 动态压力对滴头淤积泥沙的影响

王新坤等^[23]认为粒径大于 50 μm 时, 随着颗粒物直径的增大, 灌水器内颗粒物累积量也在逐渐增大。吴泽广^[17]提出粒径大于 0.05 mm 的颗粒由于自身重力沉积在流道, 是造成滴头堵塞的主要原因。本文对流道内淤积泥沙进行粒径分析, 发现恒压状态下淤积泥沙粒径 D_{90} 值大于 50 μm , 可将泥沙粒径分为三个区段进行研究: 粒径小于 20 μm 、20~50 μm 、粒径大于 50 μm 。恒压状态下粒径大于 50 μm 的泥沙沉积在流道内不仅颗粒本身即为大颗粒泥沙, 还有可能是小颗粒泥沙因为絮凝作用, 恒压压力对流道的冲击作用较弱, 在其形成团聚体之前未对其造成破坏作用, 所以形成了粒径超过 50 μm 的颗粒物。正弦波动态压力模式对流道的冲击作用较强, 水流紊动动能较大, 能使部分大粒径颗粒达到起动力, 从而降低堵塞程度。随着粒径的增大, 沙粒发生沉积的概率增大, 大于 50 μm 的沙粒, 危险系数增加急剧^[25]。泥沙粒径越大, 需要的起动力就越大, 需要克服颗粒之间的隐暴作用^[26], 动态压力对水流的紊动作用较强, 相对于恒压能更有效挣脱颗粒间的附加作用力, 造成堵塞的几率较低。刘璐等^[19]提出造成堵塞的敏感粒径为 0.031~<0.038 mm, 研究结果与本文存在一定的差异, 可能原因是本文没有考虑泥沙级配的细砂、粉粒、黏粒占比情况, 只采用了现有比较易实现的技术手段, 试验用土过 125 μm 筛网处理, 泥沙粒径考虑范围为 ≤ 0.125 mm, 未对泥沙粒径进行分级确定试验水平, 且本文试验含沙量保持恒定 (5 g/L), 以正弦波参数组合为试验水平, 试验结果在一定程度上反映了正弦波动态压力对滴头内淤积泥沙的影响规律。

在实际灌溉条件下, 按照水质因素诱发流道发生堵塞, 可将堵塞分为物理、化学和生物堵塞 3 种类型^[27], 物理堵塞通常是灌溉水源经过滤后的小粒径颗粒和有机悬浮物进入灌水器导致的, 颗粒物的粒径和浓度起主要影响作用, 一般情况下粒径越大、颗粒物浓度越高, 物理堵塞则会越严重^[28-29]; 化学堵塞一般是由溶解在灌溉水源中的化学物质在相应条件下形成了不溶性沉淀引起的, 通常情况下, 水质越硬、离子含量越高越容易诱发化学堵塞^[30-31]。本文仅研究了单一的物理堵塞, 若灌溉水中加入作物所需肥料, 对颗粒的絮凝

作用的影响, 在正弦波压力模式下和恒压状态下对滴头的堵塞的影响, 涉及到化学知识, 应在后续进行考虑。本文不同正弦波压力模式研究结果仅针对内镶式梯形迷宫流道结构尺寸, 是否受流道结构尺寸影响, 需综合进行研究。

3.4 极差分析最优组合的选取

根据极差分析可得, 对于正常工作次数最优的参数组合为 $A_1B_3D_1$, 对于排出泥沙 D_{50} 和淤积泥沙 D_{50} 最优的参数组合分别为 $A_1B_3D_3$ 和 $A_3B_3D_3$, 进一步根据综合评分法对指标进行综合分析, 可知最优组合为 $A_1B_3D_3$ 。极差分析得到的最优组合均为边界值, 可能原因有参数水平的取值和因素间的交互作用。在前人研究波动效应好的波幅范围内确定本研究的波幅水平, 一个正弦波压力由三个参数综合确定而成, 三者相辅相成, 为同时满足低压灌溉和避免负压两个条件, 综合考虑确定了基础水压与周期的取值水平上下限。正常工作次数下的极差分析结果显示空列的极差与基础水压的极差值一致, 排出泥沙 D_{50} 下空列的极差大于波幅的极差, 说明因素间的交互作用可能会对最优组合的选取有一定的影响。若空列的极差大于其他所有因素的极差, 则研究有不可忽略的因素间交互作用, 尽管本文未有证据表明存在不可忽略的因素间交互作用, 然而, 某些空列的极差大于某些因素的极差, 这可能说明因素间交互作用仍有一定影响。

4 结 论

该文以正弦波动态压力参数周期、波幅、基础水压为控制因素, 开展浑水灌溉正交试验, 研究浑水条件下正弦波动态压力参数对梯形迷宫流道出流量的影响, 结果表明:

1) 正弦波动态压力各参数中, 动态周期对正常工作次数、排出泥沙和淤积泥沙中值粒径影响显著, 但基础水压和波幅影响不显著, 最佳组合为 T3 (周期 4 s, 基础水压 8 m、波幅 2 m) 时, 正常灌溉 16 次, 使用寿命相比其他正弦波动态压力参数组合增加了 43.75%。此时, 正弦波动态压力能较好地提升滴头抗堵塞性能。

2) 正弦波动态水压下的单次流量降幅高于相同恒压状态下单次流量降幅, 且正弦波动态压力下滴头正常工作次数明显高于基础水压相同的恒压状态, 增幅平均达 37.50%。

3) 对比恒定压力与正弦波动态压力下滴头排出泥沙情况, 动态压力时排出泥沙上限粒径、中值粒径、下限粒径均增加, 有利于不同粒径级别的泥沙通过滴头, 而恒压状态更能促使大颗粒泥沙在流道内的沉淀。

动态压力是由动态压力变频器实现的, 动态压力包括但不限于正弦波动态压力, 现有的普通变频器增加数条指令即可变成动态压力变频器, 因此, 动态压力在现有工程基础上较易实现。在工程实践中操作简便, 开启电源, 动态压力变频器设定正弦波形, 参数设置成本文研究得到的最佳参数组合 (周期 4 s、基础水压 8 m、波幅 2 m), 即可生成相应的正弦波压力应用到实践中。

[参 考 文 献]

- [1] 赵万华. 滴灌系统关键技术研究[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(1): 21-25.
Zhao Wanhua. The key technology of drip irrigation system[J].

- Journal of Agricultural Science and Technology, 2007, 9(1): 21-25. (in Chinese with English abstract)
- [2] 喻黎明. 迷宫流道灌水器 CFD 两相流数值模拟中固体颗粒参数的确定[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2011, 8(2): 51-55.
Yu Liming. Confirming parameters of solid particles in process of CFD two-phase flow numerical simulation in labyrinth emitter[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2011, 8(2): 51-55. (in Chinese with English abstract)
- [3] 芦刚. 工作水压对滴灌灌水器水力性能影响规律的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
Lu Gang. Research on Influence Laws of the Operating Water Pressure on Hydraulic Properties of Drip Emitters[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [4] 牛文全, 喻黎明, 吴普特, 等. 迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 51-55, 67.
Niu Wenquan, Yu Liming, Wu Pute, et al. Influence of angle of labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 51-55, 67. (in Chinese with English abstract)
- [5] 喻黎明. 灌水器流道结构参数与水力性能关系[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2011, 8(1): 30-35.
Yu Liming. Relations between the hydraulic performance and the structural parameters of emitter[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2011, 8(1): 30-35. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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, 77.
Wang Cong, Lu Gang, Liu Jie, et al. Design of dynamic pressure drip irrigation system and experimental analysis[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012, 1(6): 69-72, 77. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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 with English abstract)
- [8] 王聪. 波动水压对灌水器水力性能影响的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
Wang Cong. Research on Experiment of the Effect of Dynamic Pressure on the Hydraulic Properties of Drip Emitters[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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. Particles 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 with English abstract)
- [10] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB5084—2005 农田灌溉水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [11] 王新端, 白丹, 宋立勋, 等. 不同结构滴灌双向流道灌水器抗堵性能对比试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 78-85.
Wang Xinduan, Bai Dan, Song Lixun, et al. Contrast experiment on anti-clogging performance of bidirectional flow channel emitters with different structures in drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 78-85. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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)
- [13] 水利部农田灌溉研究所. 微灌工程技术规范: GB/T 50485—2009[S]. 北京: 水利水电出版社, 2009.
- [14] 李张妍. 毛管冲洗对迷宫流道灌水器抗堵塞性能的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
Li Zhangyan. Effect of Capillary Flushing on Anti-clogging Performance of Labyrinth Channel Irrigator[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [15] 信桂新, 杨朝现, 杨庆媛, 等. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 238-249.
Xin Guixin, Yang Chaoxian, Yang Qingyuan, et al. Post-evaluation of well-facilitated capital farmland construction based on entropy weight method and improved TOPSIS model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(1): 238-249. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王新端. 滴灌双向流道灌水器抗堵性能及结构参数优化研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
Wang Xinduan. Study on Anti-clogging Performance and Structural Parameters Optimization of Bidirectional Flow Channel Emitter in Drip Irrigation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 with English abstract)
- [18] 王新端, 白丹, 宋立勋, 等. 基于流量对泥沙沉积敏感度的滴灌灌水器水力性能动态评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 85-91.
Wang Xinduan, Bai Dan, Song Lixun, et al. Dynamic response evaluation of hydraulic performance based on sediment deposition sensitivity to flow rate of dripper emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(15): 85-91. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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.
Liu Lu, Niu Wenquan, Bob Zhou. Influence of sediment particle size on clogging performance of labyrinth path emitters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 87-93. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王亚林, 朱德兰, 张林, 等. 滴灌毛管泥沙分布与灌水器堵塞试验研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 177-182.
Wang Yalin, Zhu Delan, Zhang Lin, et al. Experiment on sediment distribution in lateral pipes and clogging of emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 177-182. (in Chinese with English abstract)
- [21] 魏正英, 赵万华, 唐一平, 等. 滴灌灌水器迷宫流道主航道抗堵设计方法研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 1-7.
Wei Zhengying, Zhao Wanhua, Tang Yiping, et al. Anti-clogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(6): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘璐, 牛文全. 滴灌灌水器流道堵塞及防治研究进展[J]. 农机化研究, 2012, 34(4): 13-18.
Liu Lu, Niu Wenquan. Progress in research on the clogging and prevention of flow path in drip irrigation emitter[J].

- Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 13-18. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王新坤, 靳彬彬, 樊二东, 等. 高频脉冲条件下灌水器水沙两相流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 277-283. Wang Xinkun, Jin Binbin, Fan Erdong, et al. Numerical simulation of water-sediment two-phase Flow in emitter under high frequency pulse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 277-283. (in Chinese with English abstract)
- [24] 余杨, 杨振杰, 张建生, 等. 不同根部微灌水器对云南红壤和黄沙土水分分布的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 84-90. Yu Yang, Yang Zhenjie, Zhang Jiansheng, et al. Impacts of different root microirrigation emitters on water distribution of red loam and yellow sand soils in Yunnan[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(19): 84-90. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 20-24. (in Chinese with English abstract)
- [26] 拾兵, 曹叔尤, 刘兴年. 非均匀沙隐暴作用的研究现状及其起动力式[J]. 青岛海洋大学学报 (自然科学版), 2000, 33(4): 723-728. Shi Bing, Cao Shuyou, Liu Xinnian. Present status of research and vectorial equation of incipient velocity on non-uniform sediment[J]. Periodical of Ocean University of China, 2000, 33(4): 723-728. (in Chinese with English abstract)
- [27] Bucks D A, Nakayama F S, Gilbert R G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance[J]. Agricultural Water Management, 1979, 2(2): 149-162.
- [28] Bounoua S, Molle B, Granier J, et al. Understanding physical clogging in drip irrigation: In situ, in-lab and numerical approaches[J]. Irrigation Science, 2016, 34(4): 327-342.
- [29] Niu W Q, Liu L, Chen X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4): 545-555.
- [30] 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. Zhangzhong Lili. Mechanism of the Emitters Chemical-clogging under Drip Irrigation with Saline Water and its Prevention Methods[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [31] Kang Y, Chen M, Wan S. Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zea mays* L. var. *ceratina* Kulesh) in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(9): 1303-1309.

Anti-clogging performance of labyrinth emitters improved by sinusoidal wave dynamic water pressure

Yu Liming¹, Chi Xiaoqing¹, Liu Kehan², Li Na^{1*}, Wang Dan³, Shao Shegang³, Cui Ningbo⁴

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 4. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Drip irrigation technology is one of the effective methods to solve the shortage of irrigation water source in arid and semi-arid areas. The emitter is the core of drip irrigation system, but the blockage of emitter hinders the development of drip irrigation technology. The sinusoidal dynamic pressure mode is expected to improve the anti-clogging performance of the emitters. This objective of this study was to clarify the influence of the combination of parameters of sinusoidal dynamic pressure on the outflow flow of trapezoidal labyrinth channel under muddy water condition. The sine wave dynamic pressure cycle parameters included amplitude, period and basic water pressure. The three factors with three levels each were designed by orthogonal design method. Based on previous studies and experience, the amplitude levels were designed including 2, 4 and 6 m considering the requirements of low pressure irrigation and avoiding negative pressure. The period levels were 1, 2, and 4 s. The three basic water pressures were 4, 6 and 8 m. A total of nine muddy water tests were carried out by using the method of periodic intermittent irrigation test. The muddy water concentration was 5 g/L. Meanwhile, tests with constant dynamic water pressures (4, 6 and 8 m) were also done in order to make a comparison with tests with the sine wave dynamic pressure mode. The measured and calculated indexes included the normal operating time, median size, low and upper particle sizes discharged from emitters and in the sediments of emitters. Range and variance analysis were used for data analysis. The results showed that the period was the only factor that could significantly affect the normal operating times, median size from discharged sediment and sediment deposition. The normal operating times of sinusoidal dynamic pressure under the water pressures (4, 6 and 8 m head) was 63.64%, 12.50% and 36.36%, more than that under the same constant pressure. The former had an average increase of 37.50%. Compared with the constant water pressure, the sinusoidal dynamic pressure was beneficial to the passage of sediments with different particle sizes. The upper limit, median, and low limit of particle sizes of discharged sediment were increased. Under the constant pressure, the large sediment particle size could easily deposit in the flow channel. When the sinusoidal wave period was 4 s, the amplitude was 2 m, and the basic water pressure was 8 m, the flow turbulence effect was the strongest, and the life of the emitter was the longest. Three different optimal results were obtained by range analysis for the three indexes. By a comprehensive score method with an entropy weight method, comprehensive score for each test was obtained. The range analysis of comprehensive scores showed that the optimal parameters were the combination with period 4 s, basic water pressure 8 m, and wave amplitude 2 m. Under the optimal conditions, the emitter could normally work for 16 times, which was 43.75% higher than the others. At this condition, the sinusoidal dynamic pressure can improve the anti-clogging performance of the emitter.

Keywords: irrigation; pressure; sediments; emitters; sine wave; period; normal operating times; particle size