Vol.40 No.6 Nov. 2022

文章编号:1000-7601(2022)06-0124-08

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.06.14

压力补偿式灌水器水力性能 及抗堵塞性能试验研究

张桂林1,喻黎明1,李莎莎2,苏 倩2,周 赟2,崔宁博3,余兴娇1

(1.昆明理工大学现代农业工程学院,云南 昆明 650500;2.云南交投生态环境工程有限公司,云南 昆明 650500; 3.四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点试验室 水利水电学院,四川 成都 610065)

摘 要:为探究压力补偿灌水器水力性能和抗堵塞性能,以华维节水科技集团有限公司生产的压力补偿灌水器为试验件,测试并评价了11 种入口压力(50~350 kPa)下水力性能和 3 种不同浓度浑水(3、5 g·L⁻¹和 7 g·L⁻¹)下抗堵塞性能。结果表明:在压力补偿弹片结构和环形迷宫流道结构的共同作用下,灌水器均匀度高、压力补偿性强,流态指数 0.006,补偿区间 110~350 kPa,起调压力 50 kPa,其相对流量随着灌水次数的增加呈波动性减小;灌水器堵塞率随灌水次数的增加呈上升趋势。经过 40 次灌水后,3、5、7 g·L⁻¹浓度浑水条件下,灌水器的堵塞率分别达到 20.8%、29.2%和 52.1%,灌水器的抗堵塞性能随浑水浓度增加而逐渐降低,当泥沙浓度为 5 g·L⁻¹和 7 g·L⁻¹时,堵塞率显著上升,而在泥沙浓度 3 g·L⁻¹条件下,抗堵塞性能良好,且有效使用时间可延长 29.73%~41.89%。研究成果对压力补偿灌水器在实际工程中的应用具有指导意义。

关键词:压力补偿灌水器;水力性能;抗堵塞;泥沙粒径:灌水次数

中图分类号:S277.9 文献标志码:A

Study on hydraulic performance and anti-clogging performance of pressure compensating emitters

ZHANG Guilin¹, YU Liming¹, LI Shasha ², SU Qian², ZHOU Bin², CUI Ningbo³, YU Xingjiao¹

- (1. College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;
 - 2. YCIC Ecological Environment Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650500, China;
 - 3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: To explore the hydraulic performance and anti-clog performance of pressure compensating emitters, the hydraulic performance of 11 types of inlet pressures ($50 \sim 350 \text{ kPa}$) and the anti-clog performance of three different concentrations of muddy water (3, 5 g · L⁻¹ and 7 g · L⁻¹) were tested with the pressure compensated emitters produced by Huawei Water Saving Irrigation Corp., Ltd. The results showed that under the combined action of pressure compensation shrapnel structure and circular labyrinth runner structure, the uniformity was high pressure compensation, the flow rate index was 0.006, the compensation interval was $110 \sim 350 \text{ kPa}$, and the starting pressure was 50 kPa. The relative flow rate decreased with the increase of irrigation times. The clogging rate of the filler increased with the increase in the number of irrigations. After 40 irrigations, 3, 5, 7 g · L⁻¹ under the condition of muddy water, the blockage rate of the filler reached 20.8%, 29.2% and 52.1%, respectively. The anti-blocking performance of the filler gradually decreased with the increase of the muddy water concentration. When the sediment concentration was 5 g · L⁻¹ and 7 g · L⁻¹, the clogging rate increased significantly. When the sediment concentration was 3 g · L⁻¹, the anti-clogging performance was good, and the effective use time was extended by 29.73% to 41.89%. The research results provide a meaningful reference for application of pressure compensation fillers in prac-

收稿日期:2022-02-21

修回日期:2022-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52269011)

作者简介: 张桂林(1996-), 男, 云南曲靖人, 硕士研究生, 研究方向为节水灌溉理论与新技术。 E-mail: 1594598309@ qq. com

通信作者:周赟(1983-),男,云南昆明人,高级工程师,主要从事园林设计研究。E-mail:39864731@qq.com

tical engineering.

Keywords: pressure compensating emitter; hydraulic performance; anti-clogging; sediment particle size; irrigation times

灌水器是滴灌系统的重要部件,但由于流道狭窄且灌溉水源中含有的杂质容易碰撞、絮凝,导致灌水器发生堵塞,影响微灌系统的使用寿命、抗堵塞性能和灌水均匀度^[1-3]。在西南地区,现实作物灌溉中,坡度陡峭、地形严峻,使灌水均匀度变差,对作物生长造成了极大的影响。虽然综合利用各种物理、化学方法对灌溉水源进行处理,但灌水器仍面临不同程度的堵塞问题^[4]。在灌水器堵塞规律和作用、机理等方面,已广泛开展了大量研究。

灌水器是目前滴灌产业发展的瓶颈问题。姜 珊等[5]和喻黎明等[6]认为定期对滴灌系统进行冲 洗可以有效缓解堵塞。为解决灌水器物理、化学、 生物堵塞颇多问题,学者进行了广泛的研究,如吴 泽广等[7]研究发现泥沙级配是影响滴头堵塞的主 要因素:董爱红等[8]认为泥沙沉积是导致灌水器物 理堵塞的主要原因:对于化学堵塞,杜立鹏等[9]认 为溶解在水中的化学肥料结晶析出是主要因素。 张晓晶等[10]指出造成灌水器生物堵塞可归因于细 小颗粒物和微生物形成的絮状结构。此外,泥沙粒 径、浑水泥沙浓度也是造成灌水器堵塞的重要因 素。孙宝胜等[11]研究表明能够通过灌水器的最大 泥沙粒径为 0.28 mm, 在生产中应用时, 建议采用 120目过滤网。徐路全等[12]采用周期性间歇灌水 试验观测滴头流量得出,0.025 MPa 压力下,组合滴 灌管能使堵塞部位分布更集中,含沙量为 1.25 g· L-1时, 组合滴灌管的抗堵塞性能较明显。部分学 者[13-14]在研究滴头堵塞机理时,选择的浑水泥沙浓 度为 2~3 g·L⁻¹;侯鹏等^[15]在研究灌水器堵塞及泥 沙运行分布机理时,选择的泥沙含量为 0.88~2.3 kg ·m⁻³。这些研究为灌水器设计提供了经验,尽管对 灌水器堵塞的研究越来越深入,但目前为止,灌水

器堵塞问题仍然没有完全解决,且大多数试验均为低浓度泥沙(<3 g·L⁻¹)试验。有研究表明在探究灌水器堵塞规律和机理的试验中,适当增大灌溉水源的泥沙含量,也有利于揭示灌水器堵塞机理。基于此,本文通过不同浓度浑水(3、5 g·L⁻¹和7 g·L⁻¹)试验探究压力补偿灌水器抗堵塞性能,以期为压力补偿灌水器的设计与性能优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 物理模型与试验装置

1.1.1 物理模型 本研究中使用的物理模型是华维节水科技集团有限公司生产的 1828 型压力补偿灌水器(流量 2 L·h⁻¹)。毛管使用华维蓝源生产的LDPE 管(外径 16 mm, 壁厚 1 mm, 常规工作压力 0~0.6M Pa),压力补偿灌水器结构如图 1 所示。

1.1.2 试验装置 试验装置如图 2 所示,包含两个 150 L 水箱,即清水水箱和浑水水箱,分别用于储存 清水和浑水。试验用水为云南省昆明市呈贡区自 来水,pH 值为 7.08±0.07, 总硬度 75.42±2.02 mg· L⁻¹, 电导率 317.32±23.61 μS・cm⁻¹。 浑水配置试 验用土为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,其网眼直径为 0.125 mm^[16],因此本试验用土风干后通过电动振筛 机(型号 8411型,转速 400 r·min⁻¹,电压 220 V,直 径 300 mm, 功率 180 W) 过 120 目筛网而得。水箱 内置单相潜水泵提供工作压力,潜水泵产自上海昭 升机电有限公司,型号 QDX1.5-28-1.1,额定扬程 26 m,绝缘等级 E 级,配管内径 25 mm,同步转速 3 000 r·min⁻¹。置于浑水水箱内单相潜水泵相连 的干管设置回水管,目的是利用回水压力在回水管 内产生的射流将水箱内底部泥沙搅拌均匀,防止试 验过程中沉沙。进水口处装有杭州鹤山仪表有限公



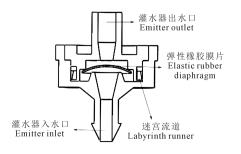
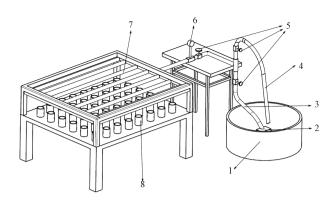


图 1 压力补偿灌水器结构

Fig.1 Structure of pressure compensating emitter



1.水箱;2.潜水泵;3.进水管;4.回流管; 5.球阀;6.压力表;7.滴灌管和灌水器;8.量筒

- 1. Water tank; 2. Submersible pump; 3. Inlet pipe;
- 4. Return pipe; 5. Ball valve; 6. Pressure gauge;
- 7. Drip pipe and water filler; 8. Measuring cylinder

图 2 试验测试装置

Fig.2 Test device

司生产的量程 0.4 MPa 和精度 0.25 级的耐震压力表。压力补偿灌水器系统平台长 2.7 m、宽 2.1 m、高 1 m 的试验平台用于支撑毛管和 1828 型压力补偿灌水器。试验平台共布置 6 条毛管,每条毛管管上含间距为 0.3 m 的压力补偿灌水器 8 个,毛管前后端均安装有控制球阀。

1.2 试验设计与方法

本试验由清水试验和浑水试验两部分组成,在 昆明理工大学现代农业工程学院实验室进行。为 模拟压力补偿灌水器实际运行状况,清水试验参照 GB/T 19812.2-2017 标准进行[17]。将 48 个压力补 偿灌水器水平悬吊在试验装置上,每个压力补偿灌 水器下放置一个 1 000 mL 量筒用来收集灌水器滴 出的水;向试验组件中充水,排尽空气,进行1h试 验调节。将进水口压力调节到最小工作压力并保 持 3 min:将进水口压力调节到最大工作压力并保持 3 min, 反复 3 次, 将进水口压力调节到压力补偿调 节范围的中间值,保持 42 min 至整个试验调节过程 结束,用精度为 0.01 g 的数字天平称量压力补偿灌 水器在 4 min 内的流量。重复进行上述试验,使得 连续两次所测流量之差≤2%,并取其平均值。分别 计算压力补偿灌水器平均流量、流量标准偏差、变 异系数(≤5%)、平均流量相对于额定流量的偏差 率(±7%内):

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} q_i \tag{1}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (q_i - \bar{q})^2}$$
 (2)

$$C_v = \frac{s}{q} \times 100\% \tag{3}$$

$$D = \frac{q - q}{q} \times 100\% \tag{4}$$

式中, \bar{q} 为压力补偿灌水器平均流量($L \cdot h^{-1}$);n 为压力补偿灌水器个数(个); q_i 为第 i 个压力补偿灌水器流量($L \cdot h^{-1}$);S 为压力补偿灌水器流量标准偏差; C_v 为压力补偿灌水器流量变异系数;D 为平均流量 \bar{q} 相对于额定流量 q 的偏差率;q 为额定流量($L \cdot h^{-1}$)。

完成以上试验后,以每次 40 kPa 的幅度增压, 将压力从 0 增加到所需的最大工作压力。称量 48 个压力补偿灌水器在每一个压力点的出水量,滴水 时间 4 min;而后再将压力以每阶段降低 40 kPa 的 幅度从所需的最大工作压力降至 0(压力分布点与 升压时压力点相同),称量 48 个压力补偿灌水器的 出水量,滴水时间与升压时相同,并换算成流量,取 其平均值。连续两次所测流量之差应 <2%,当试样 在某个压力点下两次所测流量之差 >2%时,重新称 量此压力下的流量。完成以上试验,以压力为横坐 标,两次称量的各个压力点对应的平均流量为纵坐 标,绘制流量与进水口压力关系曲线,从而确定流 态指数和相关系数。

压力补偿灌水器压力与流量的关系一般用下式表示:

$$q = kh^x \tag{5}$$

式中, \bar{q} 为压力补偿灌水器平均流量($L \cdot h^{-1}$);k 为压力补偿灌水器流量系数;h 为工作压力(kPa);x 为流态指数。

浑水堵塞试验室内平均温度为 20.3℃±2.37℃。 试验配置浑水浓度分别为3、5g·L-1和7g·L-1,灌 水时工作压力为 100 kPa,灌水时长 30 min,间歇 2 h. 浑水箱内浑水的初始体积为 100 L. 并保证试验 过程中浑水箱内水体积在 50~100 L 之间, 当浑水 体积消耗至约 50 L 时添加事先配置好的浑水,为保 证其泥沙的均匀性,每次添加的浑水均单独配置。 试验过程中为使浑水箱中的泥沙分布均匀,防止沉 沙辅以人工搅拌。提前用电子天平称其 48 个 1 000 mL 量筒的重量并记录且置于每个压力补偿灌水器 下,灌水结束后,称量每一个量筒以及所盛水的重 量。每个浓度试验结束后取下所有毛管放在通风 处晾干,取下每个压力补偿灌水器并剖开洗出其灌 水器内的含沙量,并经过激光粒度仪分析其粒径。 每个浑水浓度试验结束后,更换新的毛管和压力补 偿灌水器,并对水箱、水泵进行清洗,以便后续试验。

1.3 试验验证

由图 3 可以看出,压力补偿灌水器在一定的工 作压力下,其出流量基本保持稳定,出水均匀度高; 压力补偿灌水器的压力补偿区间定义为压力-流量 曲线上曲率半径最小点的横坐标之间的范围[18-20]. 目前一般用压力-流量关系曲线法确定压力补偿区 间,找出压力-流量关系曲线上曲率半径最小点所 对应的横坐标(压力坐标)所得到的压力范围即为 压力补偿灌水器的补偿区间^[20],因此运用 UG(Unigraphics NX) 曲线分析得出曲率半径最小和最大的 点分别为 36.41 和 903.63,据此确定压力补偿区间 为 110~350 kPa, 符合 GB/T19812.2-2017 国家标 准。灌水器的压力补偿特性由流量指数x表示,当 x < 0.4 时,灌水器为压力补偿灌水器,当 x 趋近于 0 时,说明灌水器的补偿性能强[21]。由表1可以看 出,压力补偿灌水器的流态指数为0.006,说明补偿 效果极强,这与李永光[22]的研究相符合。

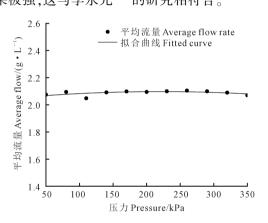


图 3 压力补偿灌水器压力与流量关系

Fig.3 Relationship between pressure and flow of pressure compensating emitter

表 1 压力补偿灌水器主要特征参数

Table 1 Main characteristic parameters of pressure compensating emitters

特征参数 Feature parameter	压力补偿灌水器/滴灌管 Pressure compensated filler /drip irrigation tube
额定流量 Rated flow/(L・h ⁻¹)	2
额定工作压力 Rated working pressure/kPa	100
外径 Outside diameter/mm	16
壁厚 Wall thickness/mm	1
灌水器间距 Filler spacing/mm	300
流量系数 Flow coefficient	2.05
流态指数 Flow index	0.006
压力补偿 Pressure compensation/kPa	110~350
平均流量 Average flow rate of variation/(L·h ⁻¹)	2.115
变异系数 Coefficient	0.07
流量标准偏差 Flow standard deviation	0.16
偏差率 Deviation rate	0.06
拟合回归方程 Fitted regression equation	$q = 2.05h^{0.006}$
相关系数 Correlation coefficient	0.91

1.4 评价指标与数据处理

1.4.1 评价指标

(1) 压力补偿灌水器的抗堵塞性采用相对流量 Q_r (即实测平均流量与灌水器额定流量之比) 进行评定。按照国际抗堵塞性标准,当 Q_r < 75% 时,认为压力补偿灌水器发生堵塞^[23]。

$$Q_r = \frac{q_i}{nq_0} \times 100\% \tag{6}$$

式中, q_i 为第 i 次试验灌水器实测流量平均值(L·h⁻¹); q_0 为 100 kPa 下灌水器清水流量(L·h⁻¹);n 为压力补偿灌水器个数。

- (2)压力补偿灌水器流量系数、流态指数是其 衡量其优劣的两个重要指标,流态指数应在±0.2 范 围内。
- 1.4.2 数据处理 数据采用 SPSS 20.0 软件对数据 进行统计分析,利用 Origin 8.5 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 浑水浓度对压力补偿灌水器流量的影响

图 4 显示了压力补偿式灌水器在 3 种不同浓度 浑水与 0.1 MPa 压力条件试验下的灌水器各毛管实 测平均流量随灌水次数的变化过程。随着灌水次 数的增加,所有灌水器流量均呈波动下降趋势。在 前20次灌水期间,不同浓度浑水实测平均流量虽有 一定程度降低,3、5 g·L⁻¹和 7 g·L⁻¹处理降幅分别 为 0~19.20%、0~18.31%和 0~20.10%,灌水器个数 堵塞率分别为 12.5%、16.6%和 25%;灌水 20~40次 时,不同浓度浑水实测平均流量的降幅分别为 14.17% ~ 24.74% \ 10.24% ~ 26.35% \ 13.50% ~ 37.14%, 灌水器个数堵塞率分别为 20.8%、29.2%和 52.1%, 浑水浓度为3g·L-1时灌水器堵塞率比5g · L⁻¹和 7 g · L⁻¹处理分别下降了 8.4%和 31.3%;灌 水 40 次后,不同浓度浑水相对流量达到相应额定流 量的75%以下甚至更小,所有灌水器发生不同程度 的堵塞,滴灌系统失效。3种不同浑水浓度下有效 灌水次数分别为74、52次和43次, 浑水浓度为3g ·L-1时灌水器的使用时间比5g·L-1和7g·L-1处 理分别延长 29.73%和 41.89%。表明灌水器抗堵塞 随浑水中泥沙含量的增加显著降低。

2.2 压力补偿灌水器抗堵塞性能分析

由图 5 可以看出, Q, 随灌水次数的增加逐渐减小, 浑水浓度为 7 g·L⁻¹时, Q, 下降速率较大, 经历20 次灌水后灌水器发生堵塞, 与浓度 3 g·L⁻¹和 5 g·L⁻¹相比, 灌水次数分别减少了 36 次和 23 次。灌水

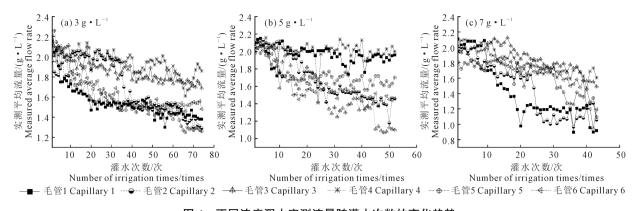


图 4 不同浓度浑水实测流量随灌水次数的变化趋势

Fig.4 Variation trend of measured discharge of muddy water with different concentrations with irrigation times

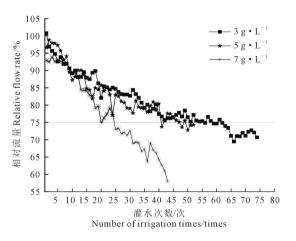


图 5 灌水器相对流量随灌水次数的变化过程

Fig.5 Variation process of relative flow of emitters with irrigation times

前期,Q,随灌水次数的增加而呈缓慢波动下降趋势,均未降到 75% 额定流量以下,随着浑水浓度的增加,Q,呈现波动变化,这是由于压力补偿灌水器的补偿区域和迷宫流道结构的作用。当浑水泥沙含量为 3 g·L⁻¹时,灌水 50 次前,Q, \geq 75%,说明灌水器未发生严重堵塞;当浑水泥沙含量为 5 g·L⁻¹时,灌水 41 次后,Q,开始在堵塞的临界值波动;当浑水泥沙含量为 7 g·L⁻¹时,灌水 20 次时,Q,突然下降到 75%,灌水 25 次后,灌水器发生严重堵塞。从Q,的变化趋势看,不同浓度浑水对灌水器的抗堵塞性能存在较大差异,表现为泥沙含量越高则堵塞率越高。

2.3 压力补偿灌水器相对流量与灌水均匀度的动态变化

将灌水器的灌水均匀度(C_u)和 Q_r 进行拟合分析,如图 6 和表 2 所示,所有毛管 C_u 和 Q_r 变化趋势所示,整体表现出先增加至 100%临界值再降低趋势,说明有颗粒进入到灌水器流道造成突然堵塞现象,随灌水次数增加,细小颗粒絮凝成大颗粒泥沙缓慢

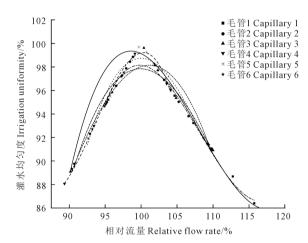


图 6 压力补偿灌水器相对流量与灌水均匀度多项式拟合曲线

Fig. 6 Polynomial fitting curve of relative flow (Q_r) and irrigation uniformity of pressure compensating emitters

表 2 灌水器滴灌过程中灌水器相对流量 与灌水均匀度之间的关系

Table 2 Relationship between emitter relative flow Q_r and irrigation uniformity C_n during emitter drip irrigation

毛管 Capillary	Q_r 与 C_u 关系式 Relationship between Q_r and C_u	R^2
1	$C_u = 0.0048 \ Q_r^3 - 1.5611 \ Q_r^2 + 167.9 \ Q_r - 5889.8$	0.9931
2	$C_u = 0.0015 \ Q_r^3 - 0.5335 \ Q_r^2 + 61.797 \ Q_r - 2243.1$	0.9629
3	$C_u = 0.0039 \ Q_r^3 - 1.2647 \ Q_r^2 + 135.66 \ Q_r - 4719.1$	
4	$C_u = -0.0028 \ Q_r^3 + 0.7201 \ Q_r^2 - 59.999 \ Q_r + 1696$	
5	$C_u = 0.0026 Q_r^3 - 0.8998 Q_r^2 + 101.36 Q_r - 3659.3$	
6	$C_u = -0.0011 Q_r^3 + 0.259 Q_r^2 - 17.127 Q_r + 369.76$	0.9902

累积进而造成灌水器堵塞。对 C_u 和 Q_r 进行拟合发现,二者符合三次函数关系($R^2 > 0.9$),各曲线残差分别为 $0.81 \ 2.71 \ 0.88 \ 2.34 \ 3.50 \ 0.67$ 。

2.4 毛管与灌水器滞留泥沙粒径分析

图 7 显示了 3 种不同浓度浑水试验中毛管与灌水器滞留泥沙 D10(累计粒度分布百分数达到 10%时所对应的粒径。其余类似)、D25、D50、D75、D90均值。由图 7a 可知,在不同浑水浓度下毛管内沉积

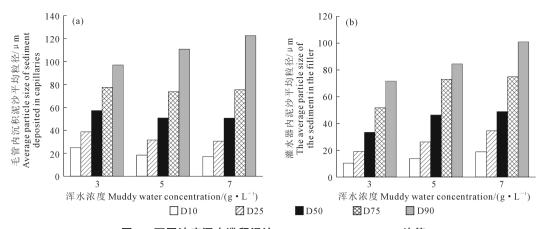


图 7 不同浓度浑水滞留泥沙 D10、D25、D50、D75、D90 均值

Fig.7 average value of sediment D10, D25, D50, D75 and D90 retained by muddy water with different concentrations

泥沙 D10、D25、D50 和 D75 均值均随浑水浓度的增 加而下降,D90 均值随浑水浓度的增加而上升。浓 度为 3 g·L⁻¹时, D10、D50、D90 分别为 24.89、 57.08、96.95μm, 比浓度为7g·L⁻¹ D10、D50 分别降 低了30.90%、11.28%,较D90上升了26.34%,表明 在浑水灌溉中,泥沙颗粒不停地做无规则运动,不 断地随机撞击悬浮颗粒,浓度增加使得毛管内泥沙 颗粒碰撞絮凝的概率增加,致使泥沙大颗粒物质随 着液体的运动和停止而堆积在管道内。由图 7b 可 知,在不同浑水浓度下灌水器内泥沙 D10、D25、 D50、D75 和 D90 的平均值分别为 14.34、26.63、 42.80、66.51 μm 和 85.65 μm, 进入灌水器的细小泥 沙少部分絮凝形成大颗粒泥沙不易随水流排出灌水 器,随灌水次数和浓度的增加,灌水器内滞留泥沙含 量上升,使得高浓度浑水灌溉中灌水器提前发生堵 塞,使用寿命缩短。

3 讨论

3.1 不同浑水浓度对压力补偿灌水器堵塞的影响

压力补偿灌水器抗堵塞性能随浑水浓度的升高而降低,浑水浓度升高导致其堵塞进程变快,灌水器使用寿命缩短。本试验适当增大灌溉水源的泥沙含量来作为滴灌水源,评估了3种泥沙浓度对灌水器抗堵塞性能的影响,发现浑水浓度为7g·L⁻¹时灌水器的堵塞率较3g·L⁻¹处理提高了58.10%。刘璐等^[24]对8种粒径小于0.1 mm的泥沙颗粒进行浑水测试,发现浑水浓度和泥沙粒径是造成灌水器堵塞的主要原因。牛文全等^[25]对含沙水磁化处理减缓滴头堵塞机理进行研究,发现细颗粒泥沙浑水浓度越高,灌水器堵塞进程加快,且磁化处理加速作用越大,这与本研究结果一致。说明高

浓度浑水里细小悬浮颗粒随水流进入灌水器,细小 悬浮颗粒在不断冲击下,使彼此互相粘结形成大颗 粒堵塞灌水器。李治勤等[26]通过浑水滴灌试验表 明灌水器堵塞是一个很快的过程,浑水含沙量对灌 水器堵塞没有产生明显影响,只是在堵塞发生后, 会影响灌水器被堵死的速度。这与本研究结果略 有差异,分析原因认为这是由选用流道结构差异所 致,本试验使用的流道是环状齿形迷宫流道压力补 偿灌水器,而李治勤使用的是单侧压边薄壁滴灌带 迷宫灌水器,其流道结构单一,泥沙能够快速通过 灌水器:而环状齿形迷宫流道结构复杂,水流携泥 沙得经过橡胶膜片的调压,再经过流道流出流道进 入橡胶膜片背面,从而流出灌水器。因此,随着灌 水次数的增加以及灌水间歇 2 h 时, 浑水中的泥沙 随水流的停止而附着在灌水器内,再次灌水时停留 在灌水器内的泥沙与再次灌水的泥沙发生絮凝,循 环往复,最终造成灌水器堵塞。

3.2 压力补偿灌水器相对流量与灌水均匀度的动态变化

本研究发现毛管相对流量和灌水均匀度的降幅缓慢,在灌水 20 次后灌水初期下降速度加快,灌水结束后,所有灌水器的相对流量和灌水均匀度均下降到 75%以下。Feng 等[27] 研究发现在灌水前期相对流量变化不大,随后相对流量显著减少,最后缓慢下降,这一变化过程与本研究的表现一致。

试验中对灌水器的相对流量和灌水均匀度进行拟合分析,可知相对流量与灌水均匀度之间呈较好的非线性关系,相对流量和灌水均匀度呈现正态分布曲线关系表明压力补偿式灌水器的平均堵塞程度随灌溉时间的延长呈非线性减小。Li 等[28]将再生水和地下水作为滴灌水源研究了六种类型的

灌水器,发现相对流量和灌水均匀度随灌水器的堵塞程度呈线性下降且使用再生水的滴灌系统对灌水均匀度的影响比使用地下水的滴灌系统更为明显,即堵塞的程度越严重,相对流量和灌水均匀度之间线性关系越显著。温圣林等[13]利用两种不同浓度的浑水进行间歇性的灌溉试验,发现滴头相对流量与灌水均匀度动态变化具有协同性,且二者变化呈一定的线性关系,这与本研究的结果不同。这可能是本试验中使用的灌水器为压力补偿式灌水器,压力补偿式灌水器对灌水均匀度的调节能力较强,使得灌水器在整个灌溉周期中保持较高的灌溉均匀度。

3.3 滞留泥沙粒径对灌水器的影响

本试验中毛管内和灌水器内滞留泥沙粒径最 大为 122.49 μm 和 100.87 μm, 灌水器排出粒径< 30.19 μm 的泥沙占 96.0%,说明造成灌水器堵塞的 原因有两点,即灌溉水中的泥沙含量和泥沙粒径, 滞留泥沙粒径>30.19 µm 可造成灌水器堵塞,以使 得水流携泥沙不能很好地通过灌水器流出,导致泥 沙颗粒在毛管内随水流不停运动并最终堆积在管 内。牛文全等[29]采用分段粒径浑水周期间歇滴灌 的试验方法,得出粒径<31 µm 时颗粒对堵塞最为 敏感。王静等[30]对一种管上式压力补偿灌水器综 合运用流固耦合与欧拉液固两相流的数值模拟方 法, 发现颗粒在环形流道人口处及流道外侧浓度增 大,容易产生沉积造成灌水器发生堵塞。仵峰 等[31]通过对地下滴灌灌水器堵塞问题调查表明,尽 管该地下滴灌系统采用生活用自来水并在首部加 上 120 目的网式过滤装置, 但由于水中仍有小微粒 和细小毛状物(自来水中的线状纤维),通过过滤 器进入滴灌系统,这些毛状物一旦附着在滴头流道 内,与流入系统的微小颗粒进一步发育长大,最终 将堵塞流道。除此之外,本试验经过刨开 1828 型灌 水器发现,一些毛状物附着在灌水器进口处,与进 入的微小颗粒混合一起,形成阻碍物,导致灌水器 堵塞。

4 结 论

- 1)压力补偿式灌水器堵塞率随浑水浓度的增加而上升,浓度大于5g·L⁻¹堵塞进程显著加快。
- 2)压力补偿式灌水器的相对流量随灌水次数增加呈波动性减小;相对流量和灌水均匀度在整个灌水期内呈非线性关系,二者近似于正态分布。
 - 3)压力补偿式灌水器内滞留泥沙粒径 D10、

D50、和 D90 的平均值分别为 14.34、42.80 μm 和 85.65 μm,与毛管滞留泥沙粒径相比减小了 18.95% ~28.87%,灌水器的堵塞主要是因为泥沙颗粒相互碰撞、絮凝。

参考文献:

- [1] PEI Y T, LI Y K, LIU Y Z, 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] DE KREIJ C, VAN DER BURGA MM, RUNIA W T. Drip irrigation emitter clogging in Dutch greenhouses as affected by methane and organic acids [J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(2): 73-85.
- [3] 杜敏,范兴科,吴普特.滴头堵塞研究现状及预防措施[J].农机化研究,2004,(2):110-111.

 DU M, FAN X K, WU P T. Research status and preventive measures of emitter blockage [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004,(2): 110-111.
- [4] 张俊,魏公际,赵万华,等.灌水器内圆弧形流道的液固两相流场分析[J].中国机械工程,2007,18(5);589-593.

 ZHANG J, WEI G J, ZHAO W H, et al. Analysis of liquid-solid two-phase flow field in circular channel in emitter[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(5); 589-593.
- [5] 姜珊,范兴科,叶成恒.含沙水滴灌条件下灌水器抗堵塞试验研究 [J].灌溉排水学报,2010,29(2):7-10. JIANG S, FAN X K, YE C H. Experimental study on anti clogging of emitters under sediment laden water drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(2): 7-10.
- [6] 喻黎明,余兴娇,李娜,等.不同冲洗措施下迷宫流道灌水器泥沙运行分布机理研究[J].农业机械学报,2021,52(7):304-312.
 YU L M, YU X J, LI N, et al. Sediment distribution mechanism of labyrinth-channel emitters under different flushing measures [J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 304-312.
- [7] 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 Z G, NIU W Q. 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):
- [8] 董爱红,张林,蔡耀辉,等.不同粘粒含量浑水对微孔陶瓷灌水器堵塞的影响[J].南方农机,2019,50(17):6, 1-2, 14.

 DONG A H, ZHANG L, CAI Y H, et al. Effects of muddy water with different sticky particle content on blockage of microporous ceramic filler[J]. South Agrichtural Machinery, 2019, 50(17): 6, 1-2, 14.

223-228.

- [9] 杜立鹏,张新燕.低压下加肥对迷宫滴头流量及灌水均匀度的影响 [J].干旱地区农业研究,2015,33(1):142-145. DU L P, ZHANG X Y. Effects of fertilization on flow rate and irrigation uniformity of labyrinth dripper under low pressure[J]. Agri-
- cultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 142-145.

 [10] 张晓晶,于健,马太玲,等.黄河水沉淀后水质对滴灌灌水器堵塞的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):258-264.

- ZHANG X J, YU J, MA T L, et al. Effect of water quality on drip irrigation and irrigation blockage after Yellow River water precipitation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(2): 258-264.
- [11] 孙宝胜,刘志杰,韩稳社.变隙式压力补偿灌水器抗堵塞性能试验研究[J].灌溉排水学报,2015,34(S1):92-96.

 SUN B S, LIU Z J, HAN W S. Experimental study on anti clogging performance of variable gap pressure compensated emitters [J].

 Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(S1): 92-96.
- [12] 徐路全,李援农,房云杰,等.组合滴灌管抗堵塞性能研究[J].灌溉排水学报,2019,38(1):77-82,89.

 XU L Q, LI Y N, FANG Y J, et al. Study on anti blocking performance of combined drip irrigation pipe[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 77-82, 89.
- [13] 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 S L, NIU W Q, WU M L, et al. Dynamic characteristics of different emitters clogging in drip irrigation with muddy water [J].
 Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 287-294.
- [14] 王文娥,牛文全,胡笑涛.新型微压侧翼迷宫滴灌带设计方法研究 [J].灌溉排水学报,2009,28(4):25-27,31. WANG W E, NIU W Q, HU X T. Study on the design method of a novel micro-pressure flank maze drip irrigation belt[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(4): 25-27, 31.
- [15] 侯鹏,肖洋,吴乃阳,等.黄河水滴灌系统灌水器结构-泥沙淤积-堵塞行为的相关关系研究[J].水利学报,2020,51(11):1372-1382. HOU P, XIAO Y, WU N Y, et al. Study on the correlation between structure of water filler in Yellow River drip irrigation system-silt accumulation-plugging behavior[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11): 1372-1382.
- [16] 喻黎明,徐霞,杨启良,等.滴灌灌水器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 L M, XU X, YANG Q L, 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.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.塑料节水灌溉器材 第 2 部分:压力补偿式滴头及滴灌管:GB/T 19812.2-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastic equipment for water saving irrigation-part 2: pressure compensating emitter and emitting pipe: GB/T 19812. 2-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [18] NAKAYAMA F S, BUCKS D A. Water quality in drip/trickle irrigation; a review[J]. Irrigation Science, 1991, 12(4): 187-192.
- [19] 中华人民共和国水利部. 微灌灌水器-滴头; SL/T 67.1-1994 [S],1994.

 Ministry of Water Resources of the People's Republic of China.

 Micro-irrigation emitters-drips; SL/T 67.1-1994[S], 1994.
- [20] 张珍珍,朱德兰,张林,等.压力补偿式灌水器制造偏差系数和抗堵性能研究[J].节水灌溉,2015,(11):33-36,43.

- ZHANG Z Z, ZHU D L, ZHANG L, et al. Study on manufacturing deviation coefficient and anti blocking performance of pressure compensated emitters [J]. Water Saving Irrigation, 2015, (11): 33-36, 43.
- [21] 王栋.内镶扁平紊流压力补偿式滴头的研制[J].节水灌溉,2007, (1):36-37.
 - WANG D. Development of built-in flat turbulent pressure compensation dripper[J]. Water Saving Irrigation, 2007, (1): 36-37.
- [22] 李光永.压力补偿灌水器的研究新进展与使用中应注意的几个问题[J].节水灌溉,2000,(3):19-21.
 LI G Y.Advances and problems to be cared in using for pressure equalizing emitters[J]. Water Saving Irrigation, 2000,(3): 19-21.
- 23] Anon. Agricultural irrigation equipment Emitters and emitting pipe -Specification and test methods: NF U51-513-2010[S], 2010.
- [24] 刘璐,牛文全,ZHOU B.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 L, NIU W Q, ZHOU B. Effect of fine sediment particle size on blockage of emitter in labyrinth channel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(1): 87-93.
- [25] 牛文全,赵雪,王照熙,等.含沙水磁化处理减缓滴头堵塞机理研究 [J].农业机械学报,2022,53(3):346-356.

 NIU W Q, ZHAO X, WANG Z X, et al. Study on mechanism of reducing emitter blockage by magnetization treatment of sediment laden water [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 346-356.
- [26] 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,(4):395-398.

 LI Z Q, CHEN G, YANG X C. Experimental study on physical blockage factors of labyrinth emitters caused by muddy water [J].

 Journal of Xi'an University of Technology, 2006,(4): 395-398.
- [27] FENG D, KANG Y H, WAN S Q, et al. Lateral flushing regime for managing emitter clogging under drip irrigation with saline groundwater[J]. Irrigation Science, 2017, 35(3): 217-225.
- [28] LI J, CHEN L, LI Y, etal. Effects of chlorination schemes on clogging in drip emitters during application of sewage effluent [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2010, 26(4): 565-578.
- [29] 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 W Q, LIU L. Effects of particle size and sand content of muddy cement sand on labyrinth channel blockage[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6): 547-552.
- [30] 王静,王文娥,胡笑涛.压力补偿滴头抗堵塞性的数值模拟研究 [J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(4):217-222. WANG J, WANG W E, HU X T. Numerical simulation of anti-clogging performance of pressure compensated emitter [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2012, 40(4): 217-222.
- [31] 仵峰,范永申,李辉,等.地下滴灌灌水器堵塞研究[J].农业工程学报,2004,(1):80-83.
 - WU F, FAN Y S, LI H, et al. Study on clogging of emitters for underground dripirrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, (1): 80-83.