

不同加气和粒径条件下浑水滴灌滴头堵塞特性研究

牛文全^{1,2} 张二信³ 吕畅³ 孙军³ 董爱红³ 邬梦龙³

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 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: 为探明浑水滴灌过程中水中加气对滴头堵塞的影响, 以齿形迷宫流道滴头为研究对象, 采用周期性间歇灌水测试方法, 用最大粒径小于 0.1 mm 的泥沙配置了 5 种不同的浑水, 运用激光粒度分析仪和场发射扫描电镜等方法研究了滴头堵塞状况。结果表明: 加气和泥沙颗粒级配对接滴头堵塞具有极显著影响 ($P < 0.01$); 加气提升了毛管内泥沙输移能力、促进大泥沙颗粒排出, 减小淤积泥沙中值粒径, 且泥沙最大粒径越小, 加气对泥沙运移的影响越小, 毛管淤积物质量、淤积泥沙中值粒径较未加气处理减少 8.75% ~ 31.92%、8.59% ~ 35.64%; 泥沙粒径为 0.075 ~ 0.100 mm 时, 滴头流量下降最快, 泥沙为粒径 0 ~ 0.100 mm 时, 滴头流量下降最慢; 加气增大了水流紊动程度, 促进浑水中大颗粒泥沙在流道内的输移; 加气加剧了浑水中小颗粒泥沙在流道入口处黏附, 加速了流道入口堵塞, 滴头 D_m 和 C_d 比未加气处理低 9.0 ~ 18.7 个百分点和 16.2 ~ 36.4 个百分点, 这是造成加气加速滴头堵塞的主要原因。建议进行毛管冲洗, 降低流道入口堵塞风险, 以提高加气滴灌滴头的抗堵塞性。

关键词: 滴灌; 迷宫流道; 加气; 泥沙粒径; 堵塞

中图分类号: 275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-4298(2021)11-0144-09

OSID:



Clogging Characteristics of Muddy Drip Irrigation Dripper under Different Aeration and Particle Size Conditions

NIU Wenquan^{1,2} ZHANG Erxin³ LÜ Chang³ SUN Jun³ DONG Aihong³ WU Menglong³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, 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: Underground drip irrigation is the best way of aerated irrigation, but the narrow channel of the dripper is easy to be clogged by particles in the water. It is of great significance to improve the operation efficiency of aerated drip irrigation system if the law of fine sediment transport and deposition under aerated conditions can be found out and reasonable control measures can be taken to alleviate dripper clogging. In order to explore the influence of aeration on the dripper clogging, five kinds of sediment graded muddy water (0 ~ 0.100 mm, 0.075 ~ 0.100 mm, 0.050 ~ 0.075 mm, 0.031 ~ 0.050 mm and 0 ~ 0.031 mm) with sediment concentration of 1 g/L were disposed and the effect of aeration in water on the toothed labyrinth channel dripper clogging was studied by periodic intermittent irrigation test. The deposited sediment was observed and analyzed by laser particle size analyzer and field emission scanning electron microscope. The results showed that aeration and sediment particle size had significant effect on dripper clogging ($P < 0.01$). Aeration improved the sediment transport capability in the laterals, promoted the discharge of large particle sediment, reduced the median particle size of depositing sediment and the effect of aeration on sediment transport was decreased with the decrease of the maximum particle size of sediment. The mass of depositing sediment and the median particle size of depositing sediment in the laterals were 8.75% ~ 31.92% and 8.59% ~ 35.64% lower than those without aerated treatment. When the particle size was 0.075 ~ 0.100 mm, the relative flow rate of the dripper was decreased the fastest and the relative flow rate of the dripper was decreased the slowest when the particle size was 0 ~

收稿日期: 2021-07-24 修回日期: 2021-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079112, 51679205)

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@vip.sina.com

0.100 mm. Aeration enhanced the degree of flow turbulence and promoted the transport of large-particle sediment in the flow channel. Aeration promoted the adhesion of small-particle sediment at the entrance of the flow channel and accelerated the clogging of the flow channel entrance. The D_{ra} and C_u of dripper were 9.0 ~ 18.7 percentage points and 16.2 ~ 36.4 percentage points lower than those without aerated treatment. The above were the main reasons for aeration aggravates the clogging of the dripper. It was suggested that lateral flushing should be carried out to reduce the risk of channel entrance clogging and improve the anti-clogging capability of aeration drip irrigation dripper.

Key words: drip irrigation; labyrinth path; aeration; sediment particle size; clogging

0 引言

滴灌过程中,滴头附近作物根区土壤处于低氧状态,易造成植物根系缺氧,严重时会影响作物根系的正常生理活动。加气滴灌具有协同调节作物根区水、肥、气状况,改善根系生长环境,缓解作物根部缺氧问题,提高作物水肥利用效率、果实产量和品质等优点,被广泛应用于蔬菜、大田作物和果树种植上^[1-3]。地下滴灌是加气灌溉的最佳方法,但滴头狭窄的流道易被水中的颗粒、化学沉淀、溶解盐、微生物和其他杂质堵塞^[4],众多学者试图通过过滤设备配置、滴头流道优化及毛管冲洗等方法解决堵塞问题^[5-7],但该难题至今仍未得到很好解决。

灌溉水源的复杂性决定了滴头堵塞类型的多样性,一般有物理、化学和生物堵塞 3 种类型。灌溉水中细小泥沙颗粒(粒径小于 0.1 mm)易在流道内发生聚积、沉降、黏附等行为造成滴头发生物理堵塞^[8-9],文献[10]发现粒径为 0.031 ~ 0.038 mm 的泥沙在流道内易发生团聚行为形成团聚体,黏附于流道壁面不易随水流输出,文献[11]研究表明,毛管中粒径为 0.10 ~ 0.15 mm 的泥沙主要以推移质的形式进入灌水器,且易引发滴头发生突然完全堵塞。此外,水力特性的改变会影响悬浮颗粒运移过程中所受的黏滞阻力、摩擦力等,从而对滴头抗堵塞性产生影响。文献[12]研究发现,加气能够改变水流水力特性,增大水流流速,文献[13]发现,微气泡破碎时产生巨大的能量能够加速周围颗粒的运移,文献[14]研究表明,加气能够减小壁面的摩擦阻力,降低水流能量损失。目前,对于细小颗粒造成的滴头堵塞问题,多采用多级过滤器组合模式来减缓滴头堵塞,但这些措施极大增加了滴灌成本和能源损耗^[15]。明确细颗粒泥沙在加气条件下的输移、淤积规律,进而采取合理的管控措施来缓解滴头堵塞,减轻过滤系统负荷,对提高滴灌系统运行效率具有重要意义。

目前,针对加气条件下细小泥沙对滴头堵塞的影响研究较少,且加气对滴头堵塞机理的影响尚不明确。为此,本文通过研究加气对不同粒径浑水滴

灌滴头堵塞的影响,对比分析加气前后滴头堵塞物结构及毛管淤积泥沙粒径的变化,以探明加气滴灌堵塞机理,为提高加气滴灌系统滴头抗堵塞能力提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

据调查^[16],宁夏段黄河引水渠含沙量为 0.61 ~ 1.1 g/L,故试验配置浑水含沙量为 1 g/L,试验泥沙采自渭河漫滩,由于目前滴灌设备中多采用 150 目的过滤器,即通过过滤器的最大颗粒粒径为 0.1 mm^[17],所以本研究选取泥沙最大粒径为 0.1 mm,同时根据泥沙颗粒在水中的跟随性^[17]、泥沙颗粒对堵塞的危险性^[18]以及已有研究确定的滴头堵塞敏感粒径范围^[10,19]将采集的泥沙经自然风干后过筛,分为 5 种粒径范围,配置 5 种不同粒径级配的浑水,泥沙颗粒机械组成如表 1 所示。试验用水为杨凌自来水,pH 值为 7.83 ~ 8.03,悬浮物质量浓度为 106 ~ 152 mg/L,电导率为 217.3 ~ 372.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$,总硬度为 71 ~ 81 mg/L,细菌的菌体浓度小于 1 CFU/mL,符合灌水标准。

表 1 试验用浑水的泥沙机械组成

Tab. 1 Mechanical composition of sediment particle size of muddy water for experiment

浑水编号	粒径 D/mm	质量分数/%		
		沙粒	粉沙	黏粒
D1	0 ~ 0.100	48.49	47.36	4.15
D2	0.075 ~ 0.100	82.89	14.86	2.25
D3	0.050 ~ 0.075	39.88	55.39	4.73
D4	0.031 ~ 0.050	18.38	75.08	6.54
D5	0 ~ 0.031	4.92	86.25	8.83

依据文献[20]的研究,内镶贴片式滴头更适用于引黄灌区灌溉,故本试验选用内镶贴片式滴头(图 1)进行浑水测试,滴灌带参数为:额定流量 2.5 L/h,毛管外径 16 mm,壁厚 0.2 mm,流道深(Z) 0.63 mm,流道宽(W) 0.60 mm,流道长 18.71 mm,齿间距(L) 1.40 mm,齿间角 37° 。

1.2 试验装置

试验装置主要由抗堵塞测试平台和加气装置组

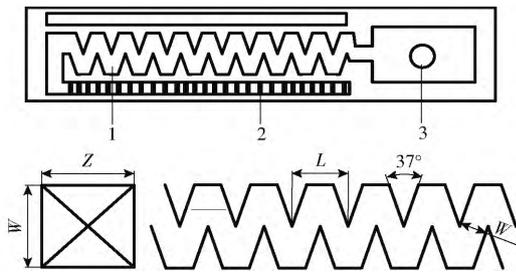


图1 迷宫流道滴头结构图

Fig. 1 Labyrinth flow channel dripper structure diagram

1. 迷宫流道 2. 入水口 3. 出水口

成如图2所示。抗堵塞测试平台由蓄水箱(长度、宽度、高度均为60 cm)、水泵(功率0.75 kW,扬程60 m)、过滤器(120目网式过滤器)、搅拌机(功率0.75 kW)、压力表(量程0.25 MPa,精度0.001 MPa)、控制阀门、支管以及待测试毛管等组成。毛管布置于测试架上(长度6 m、宽度0.5 m、高度1 m),共3个测试架,每个架子上铺设3根长6 m滴灌带,每根滴灌带有22个滴头,滴头间距为25 cm。加气装置为FRGW-10型水肥气耦合机(河南丰润环保科技有限公司生产)经前期测定,最优加气时长为5 min,加气压力0.45~0.46 MPa,加气后形成乳白色水气混合液(水中微小气泡粒径为15 μm,溶氧量为8.36~8.45 mg/L)。

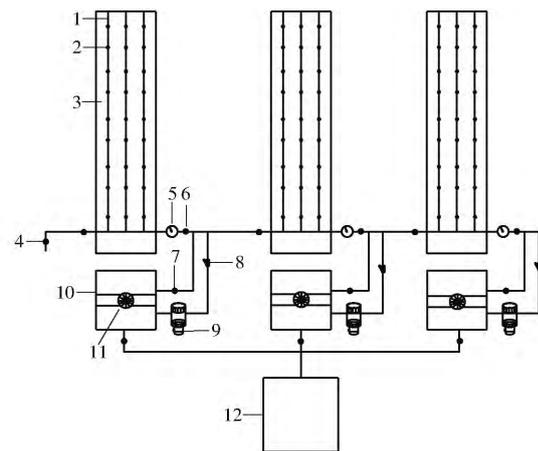


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test device

1. 毛管 2. 滴头 3. 回水槽 4. 冲洗阀 5. 压力表 6. 进水阀
7. 回水阀 8. 网式过滤器 9. 水泵 10. 蓄水箱 11. 搅拌机
12. 加气装置

1.3 试验方案和方法

试验分为清水试验和浑水试验两部分。

1.3.1 清水试验

清水试验包括加气和未加气清水测试,测试压力为0.02~0.12 MPa,压力间隔为0.02 MPa。测试前对测试平台进行冲洗,以保证试验数据的可靠性。测试方法:打开测试平台阀门,将压力表的示数调节至测定压力,待示数稳定后,将烧杯(1 000 mL)置于

毛管下方测定每个滴头的流量,测定时长为10 min,每组重复3次,取均值,清水流量计算公式为

$$q = k_d h^x \quad (1)$$

式中 q ——清水流量 L/h

h ——进口压力 kPa

k_d ——流量系数

x ——流态指数

1.3.2 浑水试验

选用了1种齿形迷宫流道滴头的滴灌带,分别在加气和不加气条件下进行短周期灌水试验,测试不同粒径浑水滴灌滴头堵塞状况,浑水泥沙粒径级配如表1所示,浑水试验共计10组。

1.3.3 试验过程

试验在西北农林科技大学水力学大厅内进行,试验开展时间为2021年4—6月,试验测试时,先按照1.3.1节进行清水试验,后进行短周期间歇性浑水试验。灌水压力控制在0.1 MPa,单次灌水持续时间为1.5 h,相邻灌水间歇时间为0.5 h。每次灌水结束前10 min压力表的示数稳定在0.1 MPa后测定毛管各滴头流量,重复3次取平均值,当累计灌水44次后结束测试。取下毛管置于通风处晾干,剖开毛管收集毛管淤积物和滴头堵塞物,并用S-4800型场发射扫描电镜和APA2000型激光粒度仪对滴头堵塞物结构、毛管淤积物粒径分别进行观测。为保证浑水的均匀性,灌水期间搅拌机持续工作。每个处理灌水结束后,更换新的毛管并对测试平台进行冲洗。

1.4 评价指标和方法

采用平均相对流量 D_{ra} 和灌水均匀度 C_u 来评价滴头整体的堵塞程度^[21],一般 D_{ra} 小于75%或 C_u 小于80%时判定滴头发生堵塞^[22-23]。堵塞率计算公式为

$$\eta = \frac{n_c}{n} \times 100\% \quad (2)$$

式中 n ——滴头总数,个

n_c ——发生堵塞的滴头数,个

1.5 数据处理

采用SPSS 25.0软件进行统计分析,采用主效应方差分析泥沙粒径和加气对滴头堵塞的影响,用LSD(最小显著差异)法检测各处理组间相对流量及堵塞物的差异性,利用Origin 2021和CAD 2014软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 加气对滴头水力性能的影响

将不同压力下测定的滴头流量代入式(1),通

过曲线拟合得到水力特性曲线如图 3 所示,可看出加气增大了滴头的流量系数,降低了流态指数。流量系数 k_d 越小说明流量波动越小,而流态指数 x 越小说明滴头流量对进口压力越不敏感^[24]。因此,本试验中加气增大了水流波动,降低了流量与压力之间的敏感度。对比同一压力下不同处理的滴头流量,可发现加气增大了滴头流量。

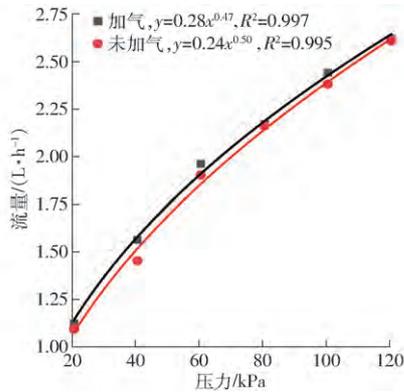


图 3 水力特性曲线

Fig. 3 Hydraulic characteristic curves

2.2 加气对滴头平均相对流量及灌水均匀度的影响

滴头 D_{ra} 和 C_u 随灌水次数的变化曲线如图 4 所示。不同粒径浑水加气处理的滴头 D_{ra} 和 C_u 下降速率大于未加气处理,其中, D2 浑水 D_{ra} 下降速率最快,易造成滴头堵塞, D1 浑水 D_{ra} 下降速率最慢,不易造成滴头堵塞。试验结束时,加气处理的滴头 D_{ra}

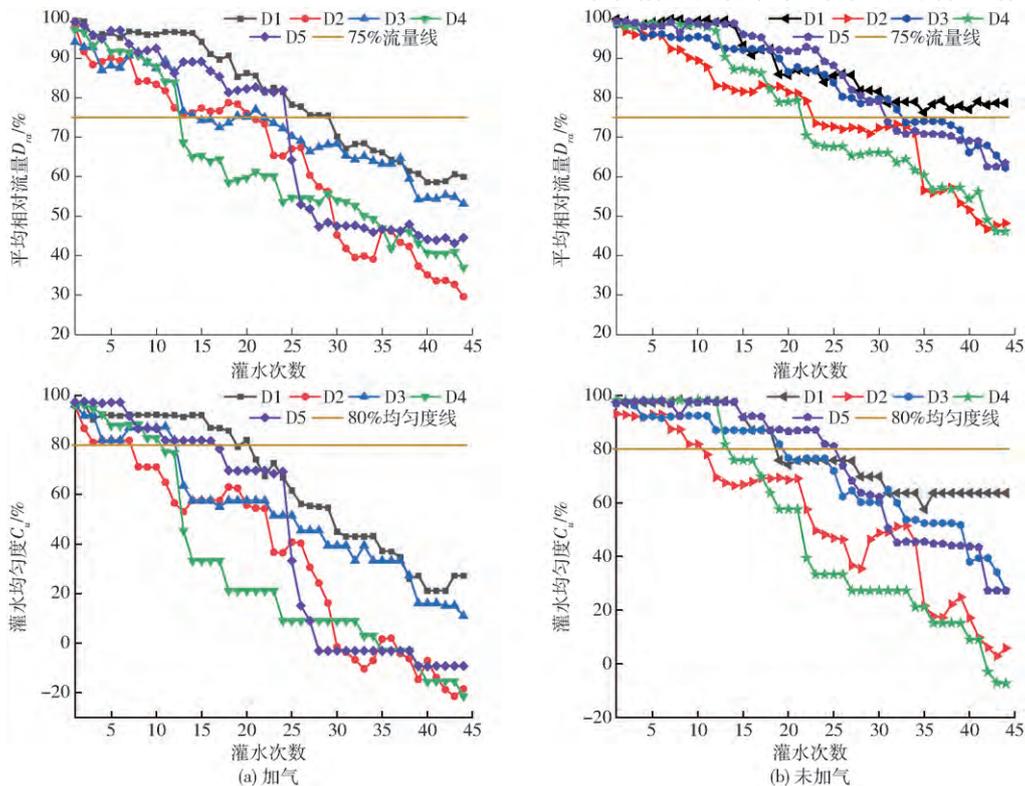


图 4 滴头平均相对流量及灌水均匀度变化曲线

Fig. 4 Flow rate and uniformity changing curves of dripper

和 C_u 比未加气处理低 9 ~ 18.7 个百分点和 16.2 ~ 36.4 个百分点。

灌水初期,加气处理的滴头 D_{ra} 和 C_u 随时间增长呈缓慢下降趋势,而未加气的滴头 D_{ra} 和 C_u 在 95% 附近波动。当灌水 15 次时,加气处理的 D3、D4 浑水最先引发滴头堵塞,流量比未加气处理分别低 17.4、22.0 个百分点,加气处理的滴头 D_{ra} 和 C_u 下降速度大于未加气处理。灌水 30 次后,5 种浑水加气处理的滴头 D_{ra} 均小于 75%,滴头发生严重堵塞,而未加气处理中只有 D2 和 D4 浑水的滴头发生了堵塞。5 种浑水加气处理的滴头 D_{ra} 分别比未加气处理低 11.3、27.0、11.3、11.9、31.4 个百分点, D5 浑水加气与未加气处理的差异性最大。灌水结束时, D1、D2、D3、D4 和 D5 浑水加气处理的滴头 D_{ra} 分别比未加气处理低 18.6、18.4、9、8.9、18.7 个百分点, C_u 分别低 36.3、26.8、16.2、28.5、36.4 个百分点。

灌水结束时,滴头流量方差和显著性分析结果表明(表 2、3),泥沙粒径和加气对滴头堵塞具有极显著性影响 ($P < 0.01$),且交互作用也极显著,表明加气加剧了滴头堵塞,且与泥沙级配密切相关(表 2)。D1 浑水加气处理的滴头 D_{ra} 、 C_u 与 D3、D4、D5 浑水处理差异性显著(表 3),整个灌水过程中该浑水处理的滴头 D_{ra} 、 C_u 均保持在最高的水平,表明 D1 浑水相比其他粒径浑水造成滴头堵塞的程度较

表2 泥沙粒径、加气对滴头流量影响的方差分析
Tab.2 Variance analysis of influence of sediment particle size and aeration on flow rate of dripper

方差来源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F
泥沙粒径	3 682. 777	4	920. 694	219. 370 **
加气	1 613. 333	1	1 613. 333	384. 402 **
泥沙粒径×加气	165. 530	4	41. 382	9. 860 **
误差	83. 940	20	4. 197	

注: **表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著。

表3 不同处理的滴头平均相对流量和灌水均匀度显著性分析

Tab.3 Significance analysis of relative flow rate and irrigation uniformity of drippers with different treatments %

参数	类别	0 ~ 0. 100 mm	0. 075 ~ 0. 100 mm	0. 050 ~ 0. 075 mm	0. 031 ~ 0. 050 mm	0 ~ 0. 031 mm
平均相对流量	加气	(60. 0 ± 1. 8) ^{Ab}	(29. 7 ± 0. 6) ^{Eb}	(53. 2 ± 1. 0) ^{Bb}	(37. 1 ± 0. 7) ^{Db}	(44. 6 ± 0. 6) ^{Cb}
	未加气	(78. 6 ± 0. 9) ^{Aa}	(48. 1 ± 0. 9) ^{Ca}	(62. 2 ± 1. 4) ^{Ba}	(46. 0 ± 1. 1) ^{Da}	(63. 3 ± 0. 6) ^{Ba}
灌水均匀度	加气	(27. 3 ± 0. 1) ^{Ab}	(- 20. 9 ± 0. 5) ^{Bb}	(11. 1 ± 0. 5) ^{Bb}	(- 21. 2 ± 0. 5) ^{Db}	(- 9. 1 ± 0. 1) ^{Cb}
	未加气	(63. 6 ± 0. 1) ^{Aa}	(5. 9 ± 0. 1) ^{Ca}	(27. 3 ± 0. 1) ^{Ba}	(- 7. 3 ± 0. 1) ^{Da}	(27. 3 ± 0. 1) ^{Ba}

注: 不同大写字母表示同行差异显著, 不同小写字母表示同列差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

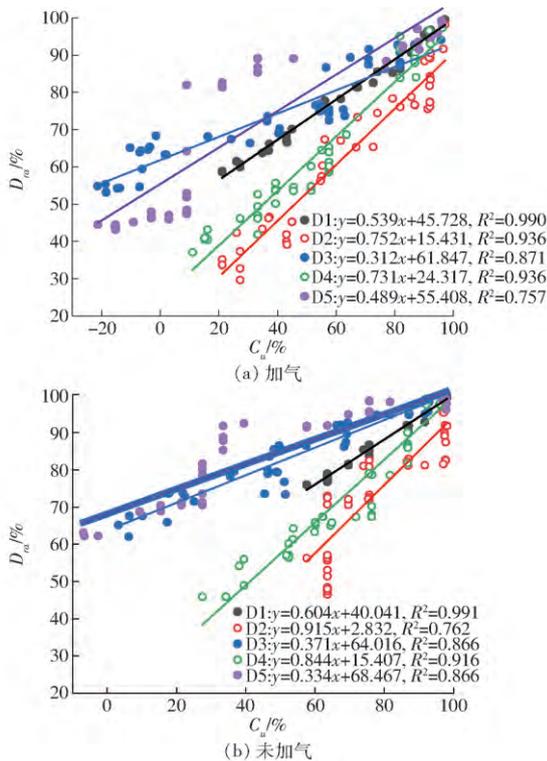


图5 不同粒径条件下滴头灌水均匀度和平均相对流量的协同变化曲线

Fig.5 Synergistic variation curves of dripper uniformity and relative flow under different particle size conditions

D1 ~ D4 浑水滴灌滴头突然堵塞的发生, 减缓了 D5 浑水滴灌滴头突然堵塞的发生。加气与未加气处理斜率的差异性随泥沙最大粒径的减小而增大(D2 ~ D5 浑水加气处理的拟合斜率分别是未加气处理的 0. 822、0. 84、0. 87、1. 46 倍)。这是由于滴头流道尺寸较小, 无论加气与否, 易发生沉降的大颗粒泥沙均易引发滴头发生突然堵塞, 而对于小颗粒而言, 未加气时流道内沉积的泥沙易随水流冲出, 滴头 D_{ra} 和

轻, 且各滴头堵塞程度差异性较小。

2.3 滴头相对流量和灌水均匀度的动态变化

从滴头 C_u 和 D_{ra} 拟合结果(图5)可以看出, 滴头 D_{ra} 和 C_u 具有明显的协同性, 两者均随着灌水次数的增加而同步减小, D1 ~ D4 浑水加气处理的 C_u 和 D_{ra} 拟合斜率为 0. 312 ~ 0. 752, 明显小于未加气处理的 0. 371 ~ 0. 915, 而 D5 浑水则相反。斜率越小表明该滴头越易发生突然堵塞, 因此, 加气加剧了

C_u 下降速率缓慢, 而加气时泥沙黏附加剧造成滴头 D_{ra} 和 C_u 下降较快(图4), 因此, 泥沙最大粒径越小, 加气处理的滴头 D_{ra} 和 C_u 协同性较未加气处理差异性越大。

2.4 泥沙粒径对滴头堵塞率的影响

不同处理的滴头堵塞率统计结果如图6(图中不同大写字母表示不同粒径之间差异显著, 不同小写字母表示加气与未加气处理之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同)所示。加气处理的滴头堵塞率显著高于未加气处理 ($P < 0.05$), D1 ~ D5 浑水未加气处理的堵塞率为 23. 9% ~ 46. 3%, 加气处理的堵塞率为 37. 3% ~ 61. 2%, 比未加气处理增大 13. 4 ~ 14. 9 个百分点。无论是否加气, 5 种浑水灌溉滴头堵塞率从大到小均依次为 D2、D4、D5、D3、D1, 表明滴头堵塞的程度主要由泥沙机械组成所决定。加气处理下 D1 浑水的堵塞率与 D2 ~ D4 浑水的堵塞率差异性显著 ($P < 0.05$), 且其堵塞率最低, 表明 D1 浑水加气灌溉条件下, 滴头经过长时间的灌溉后仍具有较强的流出能力, 这与图4中 D1 浑水加气处理的滴头 D_{ra} 和 C_u 随时间变化表现出的规律一致。

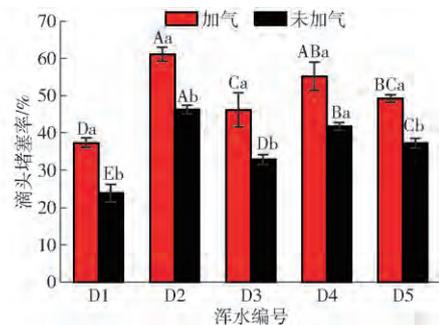


图6 不同处理的滴头堵塞率

Fig.6 Dripper clogging rate of different treatments

2.5 加气对毛管泥沙淤积量的影响

不同处理的毛管淤积泥沙参数如表 4、5 所示。加气显著降低了毛管淤积物质量、减小了淤积泥沙中值粒径、增大了淤积物比表面积,且各处理间差异性显著 ($P < 0.05$)。加气处理的毛管淤积物质量随着泥沙最大粒径的减小而增大,未加气处理无明显规律,加气处理的毛管淤积物质量较未加气降低 8.75% ~ 31.92%。泥沙中值粒径随着泥沙最大粒径的减小而减小,比表面积则相反,D1 ~ D5 浑水加

气处理的中值粒径为未加气处理的 0.64、0.88、0.89、0.91、0.93 倍,较未加气减小 8.59% ~ 35.64%,比表面积为未加气处理的 1.59、2.33、1.23、1.19、1.01 倍,较未加气增大 6.01% ~ 132.81%。泥沙中值粒径越大,表明沉积的大颗粒泥沙越多,比表面积越大表明沉积的细颗粒泥沙越多。因此,加气促进了毛管内泥沙运移和大颗粒的排出,且其对泥沙运移的影响作用随泥沙最大粒径的减小而减弱。

表 4 不同处理毛管淤积物状况

Tab. 4 Status of capillary deposits in different treatments

浑水编号	毛管淤积物质量/g		比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)		泥沙中值粒径/ μm	
	加气	未加气	加气	未加气	加气	未加气
D1	(414.50 ± 7.11) ^{Ba}	(594.23 ± 7.57) ^{Aa}	(0.291 ± 0.001) ^{Ac}	(0.182 ± 0.001) ^{Bd}	(46.77 ± 0.17) ^{Bc}	(72.67 ± 0.25) ^{Ab}
D2	(251.00 ± 10.51) ^{Be}	(349.10 ± 2.70) ^{Ae}	(0.149 ± 0.001) ^{Ae}	(0.064 ± 0.001) ^{Be}	(98.96 ± 0.13) ^{Ba}	(112.38 ± 1.83) ^{Aa}
D3	(290.00 ± 6.15) ^{Bd}	(426.00 ± 4.76) ^{Ae}	(0.281 ± 0.001) ^{Ad}	(0.228 ± 0.001) ^{Bc}	(49.66 ± 0.02) ^{Bb}	(56.07 ± 0.04) ^{Ac}
D4	(364.60 ± 4.98) ^{Bc}	(399.57 ± 6.67) ^{Ad}	(0.382 ± 0.001) ^{Ab}	(0.319 ± 0.001) ^{Bb}	(36.08 ± 0.18) ^{Bd}	(39.47 ± 0.17) ^{Ad}
D5	(385.27 ± 9.83) ^{Bb}	(496.52 ± 7.84) ^{Ab}	(0.502 ± 0.001) ^{Aa}	(0.499 ± 0.001) ^{Ba}	(24.17 ± 0.01) ^{Be}	(26.02 ± 0.02) ^{Ae}

表 5 毛管沉积泥沙粒径分布情况

Tab. 5 Particle size distribution of capillary sediments

浑水编号	处理	粒径/mm					
		>0.100	0.050 ~ 0.100	0.020 ~ 0.050	0.010 ~ 0.020	0.005 ~ 0.010	0 ~ 0.005
D1	加气	9.36	30.06	48.43	8.48	0.46	3.21
	未加气	28.57	33.88	28.44	4.62	0.31	4.18
D2	加气	48.05	30.51	12.47	4.95	1.14	2.88
	未加气	60.03	34.32	2.83	1.76	0.28	0.78
D3	加气	7.89	34.87	46.67	6.37	0.82	3.38
	未加气	11.85	39.57	42.24	3.22	0.48	2.64
D4	加气	0.12	19.73	60.35	14.2	0.81	4.79
	未加气	0.67	23.15	63.07	9.12	0.03	3.96
D5	加气	0	1.86	53.9	34.94	4.24	5.06
	未加气	0	2.74	59.59	30.58	1.54	5.55

注:表中数据为各处理不同粒径段泥沙所占的体积分数。

2.6 加气对滴头堵塞物和流道堵塞位置的影响

加气显著影响滴头堵塞物质量 ($P < 0.05$),减少了 D1、D2 和 D3 浑水处理的滴头堵塞物质量,增大了 D4 和 D5 浑水处理的滴头堵塞物质量,D1、D2 和 D3 浑水加气处理的滴头堵塞物质量较未加气处理低 8.92% ~ 51.00%,D4 和 D5 浑水则高 5% ~ 29.8% (图 7)。加气增大了流道入口堵塞风险,降低了流道完全堵塞的风险(表 6) 5 种浑水加气处理的流道完全堵塞占比分别比未加气处理低 0.6、7.6、6.7、5.0、4.4 个百分点,流道入口堵塞分别高 3.3、10.3、10.0、6.2、2.9 个百分点。加气增大了水流紊动性,促进了流道内大颗粒泥沙输移,小颗粒泥沙在气泡桥力作用下易发生黏结不易被水流冲出,因

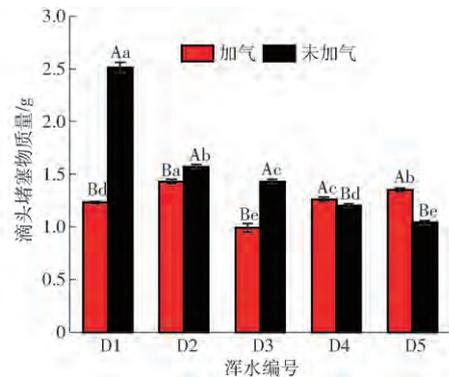


图 7 滴头堵塞物质量

Fig. 7 Quality of clogging of dripper

表 6 不同处理下滴头堵塞位置占比统计

Tab. 6 Statistics of proportion of position where dripper was blocked under different treatments %

浑水编号	流道完全堵塞		流道入口堵塞		流道中部堵塞		流道出口堵塞	
	加气	未加气	加气	未加气	加气	未加气	加气	未加气
D1	11.6	12.2	72.2	68.9	7.9	12.2	8.3	0
D2	14.8	22.4	78.2	67.9	4.6	3.3	2.4	6.4
D3	7.0	13.7	87.4	77.4	5.6	8.9	0	0
D4	9.8	14.8	73.0	67.0	17.2	18.2	0	0
D5	13.0	17.4	75.8	72.9	21.2	9.7	0	0

此加气降低了 D1 ~ D3 浑水处理的堵塞物质量,增大了 D4 ~ D5 处理的堵塞物质量。

为确定滴头堵塞参数之间的关系,计算了相对流量、灌水均匀度、堵塞率、毛管淤积物质量 (M)、滴头堵塞物质量 (m)、比表面积 (S_{SA})、泥沙中值粒径 (S_{MS})、滴头完全堵塞占比 (A_B)、滴头入口堵塞占比

(E_B)、滴头中部堵塞占比(C_B)和滴头出口堵塞占比(B_0)各参数之间的 Spearman 相关系数(图8,图中**表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$)。 D_{ra} 和 C_u 与毛管淤积物质量、滴头堵塞率相关系数最大,说明毛管淤积物质量和滴头堵塞率也是影响滴头抗堵塞性能的重要因素。 D_{ra} 和 C_u 与毛管淤积物质量呈显著正相关关系($r = 0.8 \sim 1.0$, $P < 0.05$),与滴头堵塞率呈显著负相关关系($r = -1.0 \sim -0.8$, $P < 0.05$)。毛管淤积泥沙对滴头堵塞位置有极显著的影响($P < 0.01$)。毛管淤积泥沙中值粒径越小、泥沙比表面积越大,越易引发滴头流道堵塞。

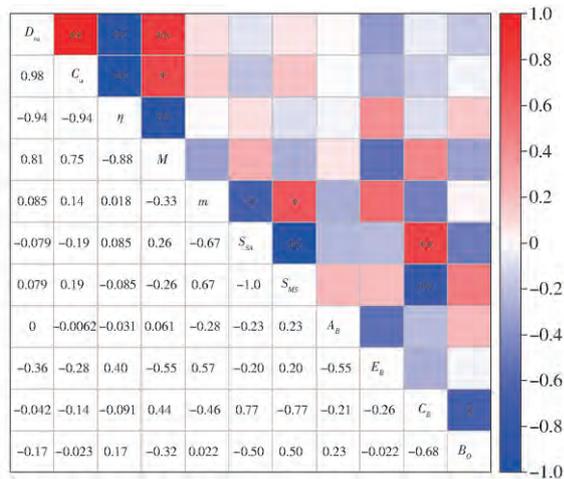


图8 影响滴头堵塞的多指标相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of multiple indicators affecting clogging of dripper

3 讨论

泥沙颗粒相互碰撞后发生凝聚、沉降行为堵塞流道被认为是造成滴头堵塞的根本原因^[8]。文献[25-26]发现水中加气能够改变毛管内水动力特性,降低壁面对泥沙颗粒的阻力,从而有效提升输沙效率,减缓泥沙沉降。文献[27]研究表明,微纳气泡桥接过程会产生很强的长程疏水作用力,可提高粗颗粒与气泡的粘附能力,减小脱落概率,促进水流对泥沙颗粒的运移,这与本研究结果一致。此外,本研究还发现加气对泥沙输移的促进作用随着泥沙最大粒径的减小而逐渐减弱(表4)。由于沉积的大颗粒在毛管运移时主要受内壁摩擦阻力的影响^[28],当泥沙颗粒沉积时会与毛管内壁发生碰撞导致沉积平均速度反向,而大颗粒的反向速度大于小颗粒^[29],从而降低了大颗粒的沉积、减小了毛管内壁摩擦阻力。此外,加气增大了水流波动,提高了水流流速(图3),进一步促进了大颗粒的运移,而细小颗粒(粒径小于0.031 mm)在其负电荷作用下易在毛管内壁发生絮凝堆积,堆积物黏附力较强不易随

水流冲动,增大了内壁摩擦阻力^[30-31],减缓了泥沙在毛管内的运移。同时,细颗粒泥沙在微气泡的桥接作用下易形成絮团,增加了泥沙与气泡的接触面积,从而提升了泥沙颗粒碰撞概率、增大了颗粒与气泡的黏附概率,加速了细颗粒泥沙在毛管内壁的黏附,有效提高了毛管絮团泥沙密度^[32-33],因此,加气减缓了大颗粒泥沙沉积,而增大小颗粒沉积(表5)。文献[34]研究表明,微气泡能够吸附水中悬浮颗粒,增大颗粒的沉降,减缓小颗粒的沉降。这与本研究结果存在差异,文献[34]试验研究泥沙为微细粉尘颗粒,其黏性颗粒占比较高,大颗粒发生絮凝沉降后形成密实度较高、体积较大的沉积物,沉积物粘附性较强且形状不易发生破碎。而本研究中使用的河沙孔隙率较大,黏粒占比较低,发生沉降的泥沙颗粒之间黏结力较弱,较易随水流以悬移质形式向前运移^[35]。因此,加气对泥沙输移的影响与泥沙性质、粒径等密切相关。

此外,文献[36]研究结果表明,泥沙颗粒与气泡之间存在的长程疏水力在颗粒间的团聚、气泡与颗粒的碰撞吸附过程中发挥了重要的作用,而泥沙颗粒大小是影响长程疏水力的最主要因素。本研究发现不同粒径浑水灌溉时,加气减少了D1、D2和D3浑水处理的滴头堵塞物,增大了D4和D5浑水处理的滴头堵塞物(图7)。这是因为加气增大浑水中大颗粒泥沙的运移的同时,导致小颗粒泥沙被滞留于毛管和流道内(表5)。随着灌水时间的增加,沉积的细小颗粒逐渐增多,而细小颗粒在微气泡的絮凝促进作用下逐渐发生絮团^[37],当随水流进入流道时,流道入口处流速骤减,使得一部分泥沙在此沉积,随着泥沙粒径减小,黏性泥沙占比逐渐增多,流道入口处沉积黏附泥沙增多,形成粗糙的壁面粘附层造成滴头堵塞^[8]。而D1~D3浑水机械组成主要以沙粒为主,水流对该粒径段(0.05~0.1 mm)泥沙大颗粒输移大于小颗粒的沉降,从而减少了流道淤积物质量,而D4、D5浑水则相反。因此,加气加剧了小颗粒在流道入口黏附,加速了流道入口堵塞(表6)是造成滴头堵塞的主要原因(图4)。文献[28]研究表明,通过冲洗可以减少细颗粒泥沙沉积,降低絮凝率,抑制堵塞物的形成从而降低流道入口堵塞的风险。建议进行毛管冲洗以减缓流道入口堵塞风险。

从滴头堵塞物结构观测图可以看出(图9),加气条件下的堵塞物结构较为紧密,而未加气较为松散,这是由于加气增大了细小颗粒沉积造成的。5种浑水中,D1、D2、D3浑水大颗粒泥沙占比较高(表1),易在重力作用下沉降形成堆积体,引起滴头

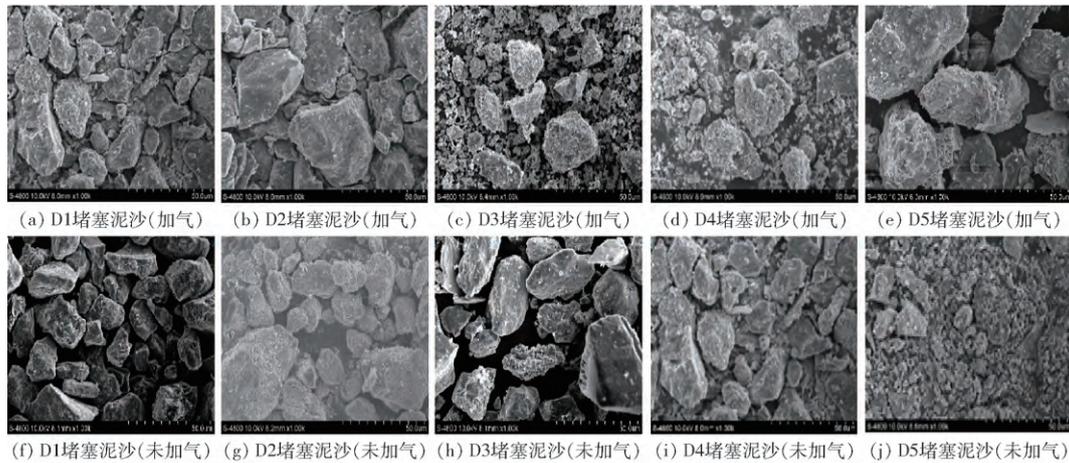


图 9 不同处理下堵塞泥沙电镜图

Fig. 9 Electron micrographs of clogged sediment under different treatments

堵塞。同时由于微气泡吸附泥沙颗粒的负电荷, 增大了微气泡的界面电位和颗粒间的非键能, 促进了细小颗粒在大颗粒表面黏附^[38-39], 减小了颗粒间孔隙(图 9) 增大了堆积体密实度, 滴头堵塞后堆积体不易在水流剪切作用下发生破坏, 因此, 加气处理的滴头堵塞更为严重(图 4)。而 D4、D5 浑水小颗粒泥沙占比较高, 细小颗粒在微气泡的桥力作用、颗粒间的吸附水膜促进作用下形成团聚体的机率相比其他粒径泥沙较大^[38-40], 同时加气水流紊动性较大提升了颗粒间碰撞频率, 增大了团聚体的密实度, 从而加剧了滴头堵塞。D5 浑水加气处理的堵塞物团聚体体积虽然最大, 但形成的团聚体缺少大颗粒骨架, 沉积泥沙颗粒易被水流夹带流出流道^[41], 这也是该粒径浑水流量下降较为缓慢的主要原因。D2 浑水加气处理的堵塞物中基础骨架颗粒较多, 且颗粒间孔隙率较小密实度高, 不易随水流带出流道, 从而表现出 D2 浑水加气处理的流量下降速率最快(图 4)。D1 浑水沙粒占比小于 D2 浑水, 黏粒占比小于 D3 和 D4 浑水, 因此, 其沉积泥沙堆积和絮凝作用较为缓和, 从而表现出 D1 浑水流量下降最慢(图 4)。

4 结论

(1) 加气和泥沙粒对滴头堵塞具有极显著影响 ($P < 0.01$), 加气加剧了滴头堵塞。泥沙粒径为 0.075 ~ 0.100 mm 的浑水流量下降速率最快, 粒径为 0 ~ 0.100 mm 的浑水流量下降速率最慢, 与未加气处理相比, 加气处理滴头平均相对流量和灌水均匀度低 9 ~ 18.7 个百分点和 16.2 ~ 36.4 个百分点。

(2) 加气增大了水流波动, 促进了毛管内泥沙运移和大颗粒的排出, 减小淤积泥沙中值粒径, 且加气对泥沙运移的影响作用随泥沙最大粒径的减小而减弱。与未加气处理相比, 加气处理毛管淤积物质量降低 8.75% ~ 31.92%, 淤积泥沙中值粒径减小 8.59% ~ 35.64%。

(3) 加气对流道淤积物影响显著 ($P < 0.05$), 加气对 0.050 ~ 0.100 mm 粒径浑水中大颗粒的运移作用大于小颗粒的沉降作用, 减少了流道淤积物, 而对 0 ~ 0.050 mm 粒径浑水作用则相反: 加气加剧浑水中细小颗粒在流道入口黏附, 是造成滴头堵塞的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 杨海军, 仵峰, 方海平, 等. 基于加气水滴灌的土壤环境调节机理研究[J]. 物理学报, 2019, 68(1): 94-106. YANG Haijun, HAO Feng, FANG Haiping, et al. Mechanism of soil environmental regulation by aerated drip irrigation[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(1): 94-106. (in Chinese)
- [2] CUI B J, NIU W Q, DU Y D, et al. Response of yield and nitrogen use efficiency to aerated irrigation and N application rate in greenhouse cucumber[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 265: 109220.
- [3] DU Y D, ZHANG Q, CUI B J, et al. Aerated irrigation improves tomato yield and nitrogen use efficiency while reducing nitrogen application rate[J]. Agricultural Water Management, 2020, 235: 106152.
- [4] JI F, WANG W, LIU H. Study on fluid movement characteristics inside the emitter flow path of drip irrigation system using the yellow river water[J]. Sustainability, 2020, 12(4): 1319.
- [5] 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 Peng, XIAO Yang, WU Naiyang, et al. Cascade relationship between the emitter structure - sedimentation - clogging behavior in drip irrigation systems with yellow river water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11): 1372-1382. (in Chinese)
- [6] EI B, OUARRICHE H, BOUISFI F, et al. Clogging investigation of pressure compensating button emitters: an experimental study of four types[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(35): 44325-44332.

- [7] 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/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 304–312.
YU Liming, YU Xingjiao, LI Na, et al. Sediment distribution mechanism of labyrinth channel emitters under different flushing measures[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2021, 52(7): 304–312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210732&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-4298.2021.07.032. (in Chinese)
- [8] LIU L, NIU W, GUAN Y, et al. Effects of urea fertigation on emitter clogging in drip irrigation system with muddy water[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 2019, 145(9): 04019020.
- [9] LIU L, NIU W, WU Z, et al. Effect of fertilization and sediment flow hydraulic characteristics on emitter clogging in muddy water drip fertigation system[J]. Irrigation and Drainage 2018, 67(5): 713–723.
- [10] 刘璐, 牛文全, ZHOU Bob. 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, ZHOU Bob. Influence of sediment particle size on clogging performance of labyrinth path emitters[J]. Transactions of the CSAE 2012, 28(1): 87–93. (in Chinese)
- [11] 任改萍, 吴普特, 朱德兰, 等. 泥沙粒径对大流道迷宫灌水器堵塞影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 1–6.
REN Gaiping, WU Pute, ZHU Delan, et al. Influence of sediment particle size on clogging of large labyrinth channels emitters[J]. Journal of Irrigation and Drainage 2016, 35(3): 1–6. (in Chinese)
- [12] 范兴华, 谭大鹏, 李霖, 等. 气-液-固三相流混合建模与求解方法[J]. 物理学报, 2021, 70(12): 261–271.
FAN Xinghua, TAN Dapeng, LI Lin, et al. Modeling and solution of gas-liquid-solid three-phase flow mixing[J]. Acta Physica Sinica 2021, 70(12): 261–271. (in Chinese)
- [13] LU J, WANG T, LI L, et al. Dynamic characteristics and wall effects of bubble bursting in gas-liquid-solid three-phase particle flow[J]. Processes 2020, 8(7): 760.
- [14] ZHAO X J, ZONG Z, JIANG Y C, et al. Numerical simulation of micro-bubble drag reduction of an axisymmetric body using openfoam[J]. Journal of Hydrodynamics 2019, 31(5): 900–910.
- [15] 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 flowrate 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)
- [16] 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 the first later 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)
- [17] 闫大壮, 杨培岭, 任树梅. 滴头流道中颗粒物运动动态分析与 CFD 模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 71–74, 81.
YAN Dazhuang, YANG Peiling, REN Shumei. Study on dynamic analysis of particle movement in drip emitter based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2007, 38(6): 71–74, 81. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 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[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [21] ZHOU H, LI Y, WANG Y, et al. Composite fouling of drip emitters applying surface water with high sand concentration: dynamic variation and formation mechanism[J]. Agricultural Water Management 2019, 215: 25–43.
- [22] 李久生, 陈磊, 栗岩峰. 地下滴灌灌水器堵塞特性田间评估[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1272–1278.
LI Jiusheng, CHEN Lei, LI Yanfeng. Field evaluation of emitter clogging in subsurface drip irrigation system[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2008, 39(10): 1272–1278. (in Chinese)
- [23] 国家住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 微灌工程技术规范: GB/T 50485—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [24] 温圣林, 牛文全, 郇梦龙, 等. 浑水滴灌过程中不同类型滴头堵塞的动态变化特征[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 287–294. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200333&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-4298.2020.03.033. (in Chinese)
- [25] WANG T, SUN T, WANG C, et al. Large eddy simulation of microbubble drag reduction in fully developed turbulent boundary layers[J]. Journal of Marine Science and Engineering 2020, 8(7): 524.
- [26] 李成祥, 崔怡洲, 石孝刚, 等. 表面活性物质影响下单个自由上升微气泡传质过程的直接数值模拟[J]. 过程工程学报, 2021, 21(8): 877–886.
LI Chengxiang, CUI Yizhou, SHI Xiaogang, et al. Direct numerical simulation of the mass transfer process of single free rising microbubbles under the influence of surface active materials[J]. The Chinese Journal of Process Engineering 2021, 21(8): 877–886. (in Chinese)
- [27] 韩峰, 刘安, 樊民强. 微纳米气泡对粗粒煤浮选的效果研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(9): 111–116.
HAN Feng, LIU An, FAN Minqiang. Study on the effect of micro-nano bubbles on flotation of coarse coal[J]. Mining Research and Development 2020, 40(9): 111–116. (in Chinese)

(下转第 169 页)

- [25] GAO X, XIAO Y, DENG L, et al. Spatial variability of soil total nitrogen, phosphorus and potassium in Renshou County of Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(2): 279 - 289.
- [26] 陕西省农业勘测设计院. 陕西农业土壤 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1982: 100 - 103.
- [27] 李佳佳, 樊妙春, 上官周平. 黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2019, 39(21): 7996 - 8002.
LI Jiajia, FAN Miaochun, SHANGGUAN Zhouping. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of the *Robinia pseudoacacia* forest on the north-south strip of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(21): 7996 - 8002. (in Chinese)
- [28] 严玉梅, 李水利, 李茹, 等. 陕西省耕地土壤养分现状与分布特征 [J]. *土壤通报*, 2019, 50(6): 1298 - 1305.
YAN Yumei, LI Shuli, LI Ru, et al. Current situation and distribution characteristics of soil nutrients in cultivated land of Shaanxi Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(6): 1298 - 1305. (in Chinese)
- [29] LIU Z, SHAO M, WANG Y. Regional spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the Loess Plateau region, China [J]. *Water Resources Management*, 2013, 197: 67 - 68.
- [30] HUYNH H T, HUFNAGEL J, WURBS A, et al. Influences of soil tillage, irrigation and crop rotation on maize biomass yield in a 9-year field study in Müncheberg, Germany [J]. *Field Crops Research*, 2019, 241(35): 107565.

(上接第 152 页)

- [28] ZHANG W, NIU W Q, LI G, et al. Lateral inner environment changes and effects on emitter clogging risk for different irrigation times [J]. *Agricultural Water Management* 2020 233: 106069.
- [29] 李云开, 王伟楠, 孙昊苏. 再生水滴灌毛管内颗粒 - 管壁碰撞特性研究 [J/OL]. *农业机械学报* 2015 46(9): 159 - 166.
LI Yunkai, WANG Weinan, SUN Haosu. Particle-wall collision characteristics influenced by biofilms in drip irrigation laterals with reclaimed water [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* 2015 46(9): 159 - 166. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150923&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-4298.2015.09.023. (in Chinese)
- [30] 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/OL]. *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/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* 2014 45(6): 177 - 182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140627&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-4298.2014.06.027. (in Chinese)
- [31] 金文, 张鸿雁. 灌水器内流道流场 Micro - PIV 试验分析 [J]. *农业工程学报* 2010 26(2): 12 - 17.
JIN Wen, ZHANG Hongyan. Micro - PIV analysis of flow fields in flow channel of emitter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010 26(2): 12 - 17. (in Chinese)
- [32] 荆树励, 李梅, 冉宇, 等. 微纳米气泡对细粒稀土矿物聚团行为的影响 [J]. *矿业研究与开发* 2019, 39(3): 113 - 117.
JING Shuli, LI Mei, RAN Yu, et al. The influence of micro-nano bubbles on the agglomeration behavior of fine-grained rare earth minerals [J]. *Mining Research and Development* 2019 39(3): 113 - 117. (in Chinese)
- [33] 郭超, 何青, 郭磊城, 等. 紊动对黏性细颗粒泥沙絮凝沉降影响的试验研究 [J]. *泥沙研究* 2019 44(2): 18 - 25.
GUO Chao, HE Qing, GUO Leicheng, et al. Study on the effects of turbulence on cohesive sediment flocculation and settling properties [J]. *Journal of Sediment Research* 2019 44(2): 18 - 25. (in Chinese)
- [34] 孙茹, 薛红俊. 微纳米气泡技术在环保领域中的应用 [J]. *石化技术* 2021 28(4): 61 - 62.
SUN Ru, XUE Hongjun. Analysis on the application of micro-nano bubble technology in environmental protection field [J]. *Petrochemical Technology* 2021 28(4): 61 - 62. (in Chinese)
- [35] 龚政, 葛冉, 冯骞, 等. 泥沙颗粒间黏结力作用及其对泥沙起动影响研究进展 [J/OL]. *水科学进展* <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20210517.1529.002.html>.
- [36] 陈文胜, 付君浩, 韩海生, 等. 微细粒矿物分选技术研究进展 [J]. *矿产保护与利用* 2020 40(4): 134 - 145.
CHEN Wensheng, FU Junhao, HAN Haisheng, et al. Advance in the separation of ultrafine minerals [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources* 2020 40(4): 134 - 145. (in Chinese)
- [37] CALGAROTO S, WILBERG K Q, RUBIO J. On the nanobubbles interfacial properties and future applications in flotation [J]. *Minerals Engineering* 2014 60(6): 33 - 40.
- [38] 李婷竹, 郭冀峰, 王嘉琳, 等. 微纳米气泡及其在环境工程领域的应用 [J]. *净水技术* 2021 40(2): 88 - 92, 110.
LI Tingzhu, GUO Jifeng, WANG Jialin, et al. Micro and nano bubbles and the applications in environmental engineering [J]. *Water Purification Technology* 2021 40(2): 88 - 92, 110. (in Chinese)
- [39] 张宇卓, 张根广. 黏性泥沙絮团形态的模拟研究 [J]. *泥沙研究* 2021 46(3): 16 - 19, 42.
ZHANG Yuzhuo, ZHANG Genguang. Simulation study on flocculation morphology of cohesive sediment [J]. *Journal of Sediment Research* 2021 46(3): 16 - 19, 42. (in Chinese)
- [40] LUO Y X, LI H, DING W Q, et al. Effects of dlvo, hydration and osmotic forces among soil particles on water infiltration [J]. *European Journal of Soil Science* 2018 69(4): 710 - 718.
- [41] BIZIMANA H, AITUNKAYNAK A. Prediction of the incipient motion of sediment entrainment via a novel hybrid geno-fuzzy approach with experimental investigations [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 2021 147(5): 04021013.