doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.030

引黄滴灌条件下混配水对堵塞物质表面特征的影响

王天志[1]　郭祖诚[2]　闫　军[3]　申要杰[2]　孙佳琦[2]　王　毅[4]

(1.清华大学环境学院,北京 100084;2.中国光大国际有限公司,香港 999077;
3.北京市南水北调大宁管理处,北京 102442;4.南京市工程造价管理协会,南京 210024)

摘要:为探明引黄滴灌条件下黄河水与微咸水混配对滴灌系统灌水器堵塞物质表面特征的影响,选择黄河水(YR)、微咸水(SW)以及黄河水和微咸水 1∶1混配水(MW)3 种水源,针对灌水器流道内易形成堵塞物质的位点,进行堵塞物质形成过程的模拟培养,借助三维白光干涉形貌仪观测并分析灌水器内部堵塞物质的表面形貌及变化特征,结果表明:黄河水与微咸水混配后堵塞物质表面凸起少,较为平坦;堵塞物质的厚度、表面均方根偏差、表面展开面积比率显著降低。其中,系统运行结束时(800 h),混配水条件下堵塞物质的平均厚度为 4.39 μm,分别比黄河水、微咸水条件下低 65.32%、32.51%,这充分说明黄河水和微咸水混配后可有效缓解灌水器堵塞。

关键词:引黄灌区;滴灌;混配水;堵塞物质;表面形貌

中图分类号:S275.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)11-0267-11

Effects of Mixing Yellow River Water with Brackish Water on Surface Characteristics of Emitter's Clogging Substance in Drip Irrigation

WANG Tianzhi[1]　GUO Zucheng[2]　YAN Jun[3]　SHEN Yaojie[2]　SUN Jiaqi[2]　WANG Yi[4]

(1. *School of Environment*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*
2. *China Everbright International Co.*, *Ltd.*, *Hongkong* 999077, *China*
3. *Daning Management Office of the Beijing South-to-North Water Transfer Diversion*, *Beijing* 102442, *China*
4. *Nanjing Engineering Cost Management Association*, *Nanjing* 210024, *China*)

Abstract: Mixing Yellow River water with brackish water for drip irrigation can be an effective solution of water shortage because the mixed water contains less sediment and salinity. However, the mixed water can still cause emitter clog and significantly reduce drip irrigation system performance because of the sediment particles and salt separators. The surface morphology of the clogging substance is an integral reflection of multiple factors. Therefore, three different types of water, including the Yellow River water (YR), brackish water (SW) and mixed water (MW) of Yellow River water and brackish water at the mixing ratio of 1∶1 were used to cultivate the emitter's clogging substance. The effect of the mixed water on the surface characteristics was studied by 3D white-light interference profilometer. The results showed that the surface of clogging substance in condition of the mixed water was less protruding and more flat, the thickness, Sq and Sdr were decreased significantly. At the end of the system operation (800 h), the average thickness of the clogging substance under the mixed water was 4.39 μm, which was 65.32% and 32.51% lower than that of the Yellow River water and brackish water, respectively. The result showed that the mixed water can not only effectively reduce the sediment content in the Yellow River water, but also reduce the salt content in the brackish water. The mixed water relieved emitter's clogging effectively because of low sediment content and salinity.

Key words: Yellow River Irrigation District; drip irrigation; mixed water; clogging substance; surface morphology

收稿日期:2019-04-14　修回日期:2019-06-12

基金项目:创新研究群体科学基金项目(51321001)

作者简介:王天志(1992—),男,博士后,主要从事水处理与利用研究,E-mail: wangtianzhi@tsinghua.edu.cn

0 引言

微咸水已成为引黄灌区农业灌溉的替代水源之一,但是微咸水中的盐分较高,长期使用微咸水灌溉会抑制作物生长,对土壤环境健康造成威胁[1]。将黄河水和微咸水混配后灌溉不仅可以有效减少黄河水中的泥沙含量[2],还可以降低微咸水中的盐分,将盐分调节至适宜范围,可改善土壤结构,增加土壤通透性,减小土壤容重,从而起到提高土壤饱和含水率、增加作物根部吸水功能[3]的作用。滴灌被认为是引黄灌区发展高效节水灌溉最为有效和可靠的灌溉方式[4-5]。灌水器是滴灌系统的关键部件之一,由于消能的需要,其流道尺寸一般只有 0.5 ~ 1.2 mm,极易被水中的颗粒物堵塞而导致整个系统报废[6-7]。因此,发展引黄灌区混配水滴灌技术的前提就是控制黄河水与微咸水混配条件下滴灌灌水器堵塞的发生。

已有研究表明,黄河水中泥沙颗粒物借助其巨大的表面积,吸附了大量的微生物,泥沙表面附着一层生物膜,与水中含有的微生物、盐分离子、有机物等发生一系列微观动力学行为,使得灌水器的堵塞并非简单表现为水沙动力学作用下的物理堵塞,堵塞物质形成过程与组分都非常复杂[8-9]。ZHANGZHONG 等[10]发现,微咸水条件下的堵塞物质生长过程为渐进型,由于水中较多的阳离子(Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 Fe^{3+} 等)和阴离子(CO_3^{2-}、HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 等)发生化学反应,形成不可溶性物质而诱发堵塞,微咸水盐度与灌水器堵塞参数间存在线性负相关关系。HILLS 等[11]研究发现,降低灌溉水的 pH 值可以减缓化学堵塞。MARZIO 等[12]和 ZHANG 等[13]研究表明,减少颗粒物在流道内的浓度,可有效缓解灌水器堵塞的发生。将黄河水和微咸水混配后得到的混配水具有含沙量少、盐度低等特点,理论上可有效缓解灌水器堵塞。张晓晶等[14]研究表明,黄河水泥沙颗粒物和微生物的共同作用是引起灌水器堵塞的主要原因,降低泥沙颗粒物浓度可显著缓解灌水器堵塞,HAN 等[15]与刘燕芳等[16]研究表明,与黄河水相比,微咸水灌溉条件下,灌水器内部可有效避免固体颗粒在灌水器内壁的沉积附着,微咸水配合毛管冲洗可有效缓解灌水器堵塞的发生。但目前有关混配水条件下灌水器内部堵塞物质的研究还仅在理论阶段。

堵塞物质的形成过程受到水力条件、水质、温度、时间等多因素的共同影响,堵塞物质的表面形貌是多重影响因素的综合体现,能够体现堵塞物质的生长、固体颗粒物和有机污染物的沉淀与被捕捉及微生物的生长,堵塞物质的表面形貌特征可通过表面的粗糙度、厚度、孔隙率等微观特征直接衡量[17],探索混配水条件下灌水器流道内部的堵塞物质表面特征具有重要意义。基于此,本文利用自行设计的滴灌灌水器内部堵塞物质快速培养装置及取样方法,选择黄河水、微咸水、黄河水和微咸水 1∶1 混配水 3 种水源,对滴灌灌水器流道内堵塞物质的形成过程进行模拟培养,结合三维白光干涉形貌仪观测灌水器内部堵塞物质表面形貌,分析引黄滴灌条件下黄河水与微咸水混配对堵塞物质表面特征的影响。以期为混配水滴灌系统堵塞机理研究及控制模式的建立提供理论参考,为推广引黄灌区微咸水的使用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 水源

本试验采用 3 种水源(黄河水、微咸水以及黄河水和微咸水 1∶1 混配水)供水。其中黄河水取自内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区先锋桥下二干渠,含沙量为 36.5 kg/m^3,电导率(Ec)为 0.92 dS/m;参考内蒙古河套灌区的微咸水水质情况,在当地地下水(Ec 为 1.67 dS/m)的基础上,添加 1∶2.27∶5.85 (mol)配比的 $NaHCO_3$、KCl 和 NaCl 配置微咸水(Ec 为 4.25 dS/m)。取 4℃恒温保存的不同水体样品各 500 mL,进行水质检测,结果如表 1 所示。

表 1 水质检测结果

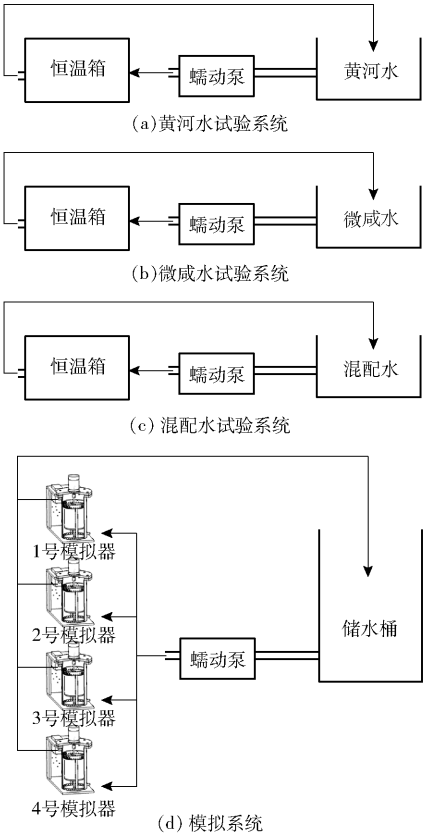
Tab.1 Water quality detection results

水源类型	K^+ 质量浓度/(mg·L^{-1})	Ca^{2+} 质量浓度/(mg·L^{-1})	Na^+ 质量浓度/(mg·L^{-1})	Mg^{2+} 质量浓度/(mg·L^{-1})	HCO_3^- 质量浓度/(mg·L^{-1})	CO_3^{2-} 质量浓度/(mg·L^{-1})	Cl^- 质量浓度/(mg·L^{-1})	SO_4^{2-} 质量浓度/(mg·L^{-1})	pH 值	矿化度/(g·L^{-1})
YR	9.81	63.60	134.00	33.30	214.00	0	114.00	176.00	7.95	0.52
SW	609.00	54.80	1 330.00	71.80	843.00	50.20	1 830.00	409.00	8.27	3.77
MW	333.00	47.70	820.00	58.80	562.00	31.60	1 050.00	320.00	8.20	2.44

注:YR 表示黄河水;SW 表示微咸水;MW 表示混配水。

1.1.2　模拟系统介绍

本试验包括黄河水、微咸水、混配水的 3 个模拟系统，每个模拟系统由储水桶、蠕动泵、乳胶管、滴灌系统模拟器等组成。将水储存在储水桶中，为系统提供水源；蠕动泵（BT100L 型，保定创锐泵业有限公司）为系统提供工作驱动力，用乳胶管与储水桶连接，从储水桶中提水进入 1 号模拟器，模拟器（1 ~ 4 号）采用并联方式连接，蠕动泵通过乳胶管连接 1 号模拟器的进水口，蠕动泵提水至所有模拟器的内外筒之间充满水后，1 号模拟器的出水口通过乳胶管再次回到储水桶中，2、3、4 号模拟器与 1 号模拟器连接情况一致，并联情况如图 1 所示。模拟器如图 2 所示，其外筒尺寸 Φ130 mm × 252 mm，内筒尺寸 Φ110 mm × 135 mm，进水口和出水口尺寸均为 Φ10 mm，电机功率 150 W，转速范围 0 ~ 3 000 r/min。



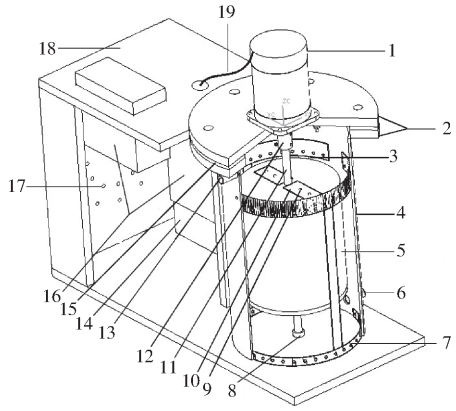
(a)黄河水试验系统　(b)微咸水试验系统　(c) 混配水试验系统　(d) 模拟系统

图 1　试验系统及模拟系统示意图

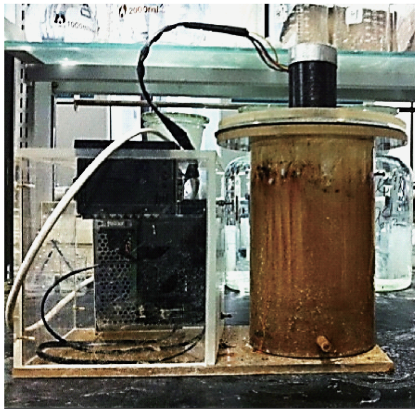
Fig. 1　Test system and simulation system

1.1.3　流道内部易堵塞位置的水力剪切力模拟

利用数显卡尺（Mitutoyo，日本，精度 0.01 mm）测量直齿直角形迷宫流道尺寸，流道深 0.78 mm、宽 1.68 mm、齿高 1.5 mm、齿宽 0.50 mm，如图 3a 所示，LI 等[18]的研究表明，堵塞物质主要集中在 *d* 和 *e* 位点，因此本文选取这两个位点作为研究对象。运用三维画图软件 UGS NX9.0 建立三维模型，利用 ANSYS 15.0 对模型进行网格划分和计算，边界条件为压力入口（额定工作压力 0.1 MPa）、压力出口



(a) 结构示意图

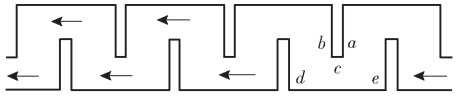


(b) 实物图

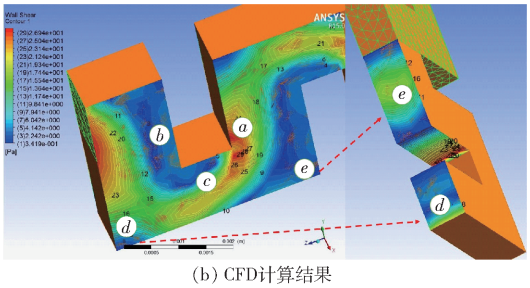
图 2　模拟器

Fig. 2　Simulator

1. 电机　2. 法兰盘　3. 样品槽　4. 外筒　5. 内筒　6. 进水口　7. 取样架　8. 固定轴承　9. 螺钉　10. 钢片　11. 电机轴　12. 连接轴承　13. 出水口　14. 变压器　15. 密封垫片　16. 速度控制器　17. 散热孔　18. 配电盒　19. 电线



(a) 直齿直角形迷宫流道



(b) CFD计算结果

图 3　灌水器类型及流道近壁面水力剪切力 CFD 计算结果

Fig. 3　Type of emitter and CFD calculation results of hydraulic shear force near wall of flow path

（0 MPa），计算模型为 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型[19]。得到灌水器流道近壁面水力剪切力 CFD 计算结果如图 3b 所示。结果表明 *a* 位点（齿尖迎水区）的水力剪切力为 2 ~ 26 Pa，*b* 位点（齿尖背水区）的水力剪切力为 0.3 ~ 2 Pa，*c* 位点（主流变形区）的水力剪切

力为 2.4 ~ 6.5 Pa,d(齿跟迎水区)和 e 位点(齿跟背水区)的水力剪切力为 0.3 ~ 0.8 Pa。由于堵塞物质主要集中在 d 和 e 位点,因此本文选取剪切力区间为 0 ~ 0.8 Pa。

1.1.4 模拟器水力剪切力计算

本试验模拟器采用下端进水上端溢流出水的方式,推荐水力停留时间 2 h,模拟器总容积 1 210 mL 时,进水量为 10.08 mL/min,流量很小,可以近似忽略。则反应器中水流对壁面剪切力的计算,可以采用《粘性流体力学》[20]中同轴旋转圆柱间流动的计算公式,即

$$\tau_r = -2\mu \frac{R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{\omega_1 - \omega_2}{r_2^2} \tag{1}$$

式中 τ_r——半径为 r 这一点的摩擦应力,Pa,其方向与角速度 ω_1 相反

R_1、R_2——内筒和外筒半径,m

ω_1、ω_2——内筒和外筒旋转角速度,rad/s

r_2——内筒和外筒之间某一圆形切面的半径

μ——液体粘滞系数,20℃水的动力粘滞系数为 1.005×10^{-3} Pa·s

结合本试验的具体情况,$\omega_2 = 0$ rad/s;$r_2 = R_2$;由于摩擦应力为壁面对水流的摩擦力,而此处需讨论水流对壁面的水力剪切力,故可将式(1)简化为

$$\tau_r = 2\mu \frac{R_1^2 \omega_1}{R_2^2 - R_1^2} \tag{2}$$

即

$$\omega_1 = \frac{\tau_r (R_2^2 - R_1^2)}{2\mu R_1^2} \tag{3}$$

式(3)即为本试验模拟器外筒内壁壁面水力剪切力计算公式。由模拟器参数可知,$R_1 = 65$ mm,$R_2 = 55$ mm,$\mu = 1.005 \times 10^{-3}$ Pa·s,因此,模拟器的外筒内壁壁面水力剪切力计算公式为

$$\tau_r = \frac{6\,080.25\omega_1}{1\,200} \times 10^{-3} \tag{4}$$

1.2 试验处理

试验采用 PE 毛管切片贴于反应器外筒内壁,为了真实模拟灌水器流道壁面介质,切片采用常用的 Φ16 滴灌毛管,尺寸为 19 cm × 1 cm。当模拟器电机工作时,内筒旋转带动水流运动,会带动外筒内壁水流运动,由于带有 PE 片的取样架固定在外筒内壁,所以在 PE 片表面会产生剪切力。根据式(4)设置模拟系统模拟位点的水力参数,试验处理编号如表 2 所示。为避免光照对堵塞物质的影响,系统置于恒温光照培养箱中,温度保持 30℃。试验共进行 800 h,在系统运行 80、320、560、800 h 时取样。

1.3 堵塞物质表面三维形貌测定

利用三维白光干涉形貌仪(Phase Shift Micro XAM - 3D 型,布鲁克海文仪器公司,美国)对堵塞物质样品形貌特征进行测试,采集的图像利用 SPIP(Scaning probe image processor)软件进行分析,考虑到需要对堵塞物质样品表面的平均厚度、表面粗糙度、表面稳定程度、表面对水流作用等方面进行分析,故根据 2005 年产品尺寸和几何规范及检验技术委员会颁布的 ISO/TC213N756 参数表征体系筛选出区域表面平均厚度、表面均方根偏差(Sq)、表面高度分度的峭度(Sku)、中心液体滞留指数(Sci)、表面的展开面积比率(Sdr)5 个参数。参数的计算方法参照文献[21 - 22]。其中平均厚度反映了堵塞物质的生长情况,Sq 反映了堵塞物质表面的粗糙度,Sku 可以用于识别堵塞物质表面的稳定性,Sci 反映了表面对液体的滞留能力,Sdr 表示堵塞物质表面的综合性能信息,可以用来衡量堵塞物质表面能量,值越大说明堵塞物质表面对固体颗粒物质、微生物团体、微生物等的吸附和捕捉作用越强[23]。

表 2 水源类型及样品编号

Tab. 2 Sampling locations and number

水源类型	剪切力/Pa	内筒转速/(r·min^{-1})	编号
YR	0.05	84	YR - 0.05
	0.20	340	YR - 0.20
	0.40	675	YR - 0.40
	0.70	1 181	YR - 0.70
SW	0.05	84	SW - 0.05
	0.20	340	SW - 0.20
	0.40	675	SW - 0.40
	0.70	1 181	SW - 0.70
MW	0.05	84	MW - 0.05
	0.20	340	MW - 0.20
	0.40	675	MW - 0.40
	0.70	1 181	MW - 0.70

2 结果与分析

2.1 堵塞物质形成过程中表面形貌特征

本试验对不同水源不同剪切力条件下堵塞物质形成过程中 80、320、560、800 h 时的样品进行分析,表面形貌的测试结果如图 4 ~ 7 所示。

从图 4 ~ 7 可以看出,灌水器内壁附着的堵塞物质表面并不是平坦的,均呈现高低起伏的山丘分布状。此外,还能明显看出黄河水与微咸水的混配对堵塞物质表面的影响,即混配水条件下的堵塞物质表面凸起少,较为平坦。

在系统运行初期,不同水源条件下堵塞物质表面较为光滑,仅出现局部凸起。黄河水条件下的堵塞物质表面的局部凸起明显高于微咸水和混配水条

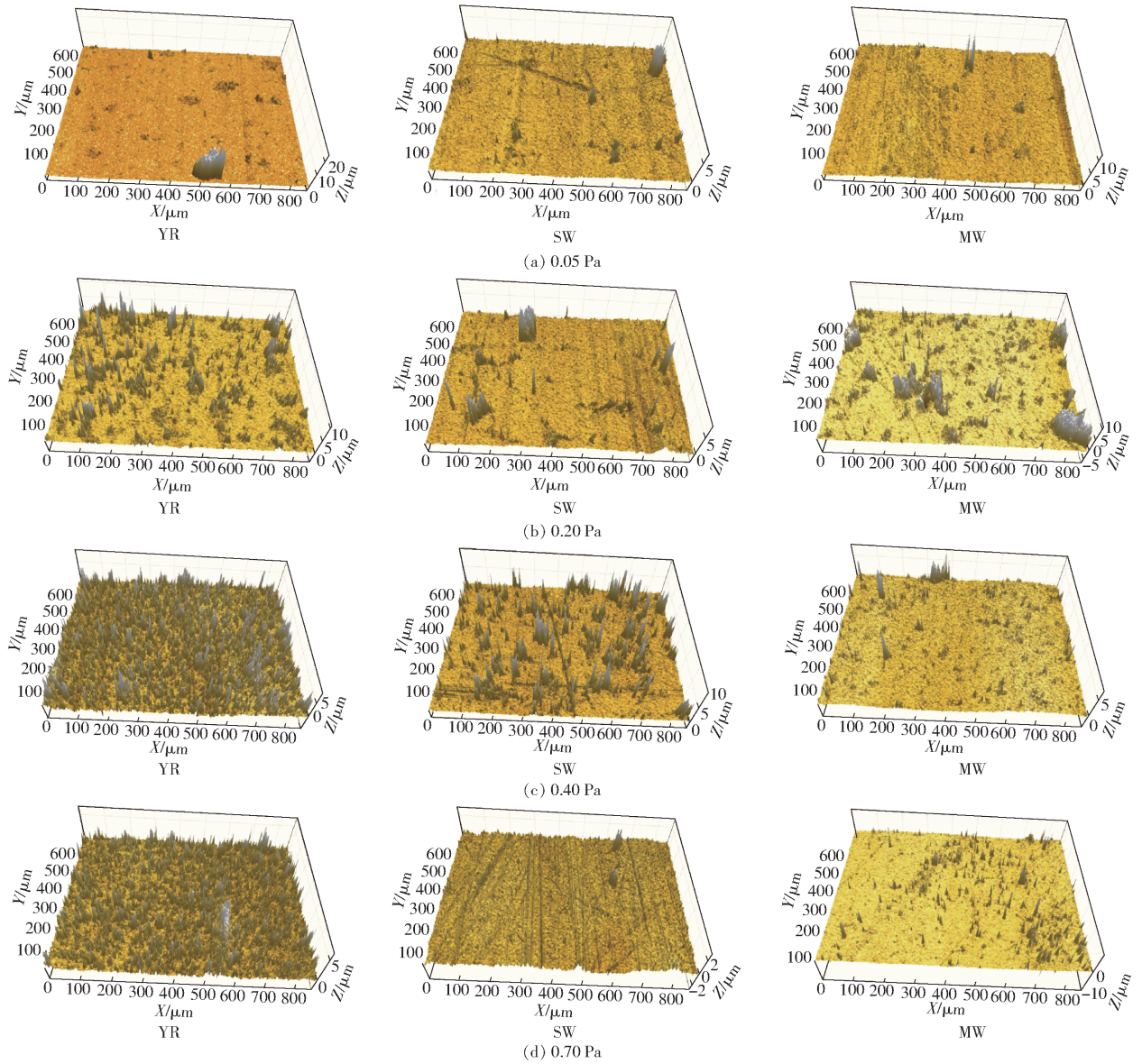


图 4　系统运行 80 h 时堵塞物质表面形貌

Fig. 4　Surface morphology of clogging substance after running of 80 h

件下，说明黄河水中的泥沙颗粒物初始含量较高，容易沉淀，被微生物吸附或者粘附于介质表面。在系统运行中期，不同水源条件下堵塞物质表面变得较为粗糙，凸起增加。黄河水条件下的堵塞物质表面结构较紧密，微咸水条件下堵塞物质表面紧密度次之，混配水条件下堵塞物质表面空隙较多，高低起伏较大，仅有一些独立的凸起。随着系统运行到 800 h 时，堵塞物质表面结构变得非常粗糙，微咸水条件下堵塞物质表面结构紧密，空隙较少，表面的“沟壑”多；黄河水条件下堵塞物质表面凸起较多，十分粗糙；混配水条件下堵塞物质表面较为平坦，高低起伏不大。

在灌水器流道易堵塞位点上，剪切力为 0.05 Pa 的区域内，堵塞物质表面出现局部凸起，剪切力为 0.20 ~ 0.40 Pa 的区域内堵塞物质结构较紧密，高低起伏不大，独立的凸起少，剪切力为 0.70 Pa 的区域内堵塞物质表面结构很紧密，局部凸起少，但表面的“沟壑”较多。

2.2　堵塞物质形成过程中表面厚度变化特征

不同水源不同剪切力条件下堵塞物质表面平均厚度的变化特征如图 8 所示。从图 8 可以看出，堵塞物质的平均厚度随着时间的增加均表现为先缓慢增加后快速增加的趋势，在缓慢增长期(0 ~ 560 h)时，黄河水条件下堵塞物质厚度增加最快，为 0.27 μm/d，微咸水条件下次之，为 0.17 μm/d，混配水条件下堵塞物质增加最慢，为 0.10 μm/d。在快速增长期(560 ~ 800 h)时，同样是黄河水条件下堵塞物质厚度增加最快，微咸水次之，混配水最慢，增速分别为 0.73、0.23、0.19 μm/d。系统运行结束时(系统运行 800 h)，不同水源条件下堵塞物质的平均厚度均值为 7.85 μm，其中，混配水条件下堵塞物质的平均厚度为 4.39 μm，分别比黄河水、微咸水条

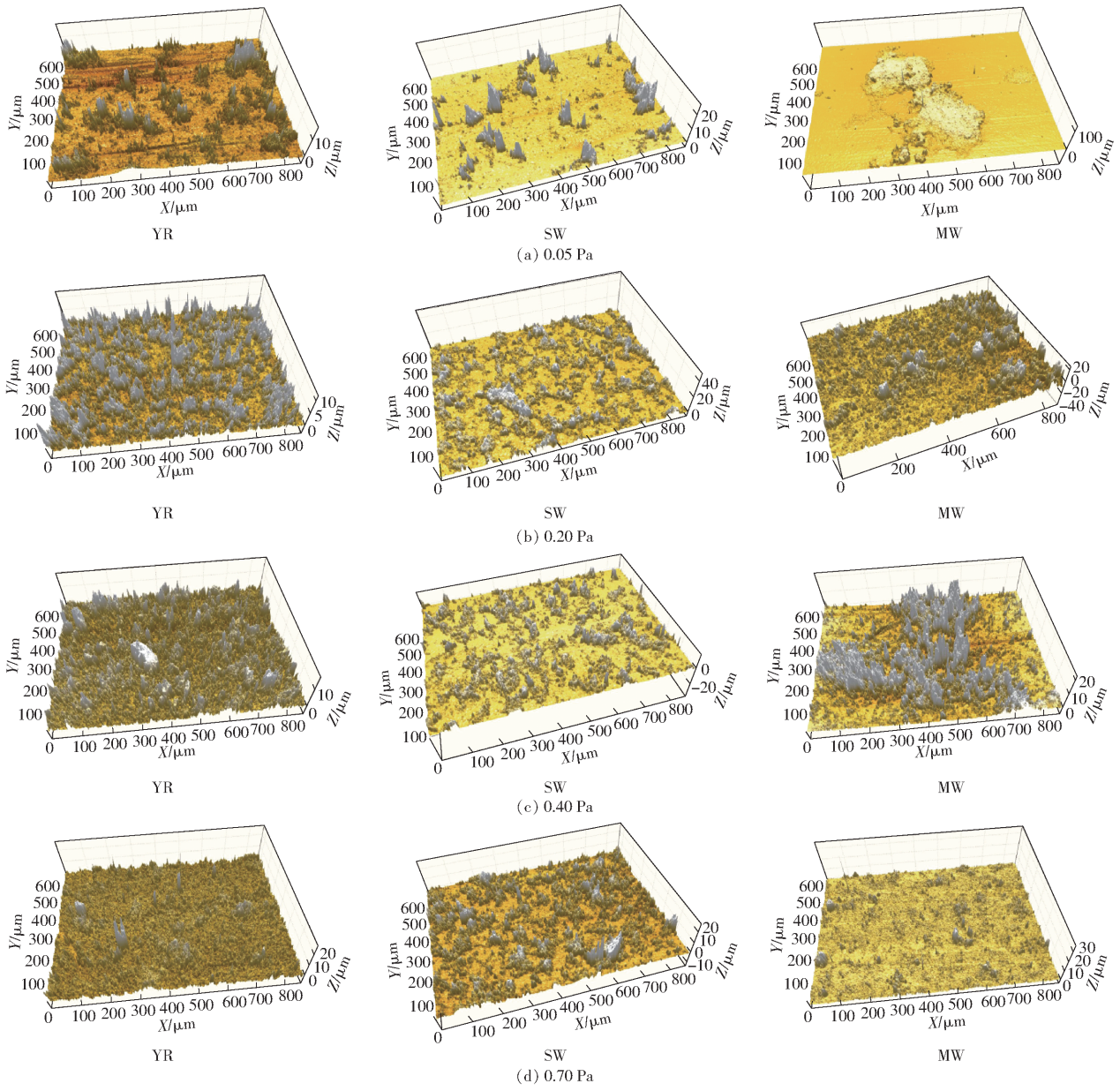


图 5 系统运行 320 h 时堵塞物质表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of clogging substance after running of 320 h

件下低 65.32%、32.51%。这说明黄河水和微咸水混配不仅显著降低了堵塞物质的厚度,还延缓了堵塞物质的生长速度。此外,对于不同剪切力而言,0.05 ~ 0.40 Pa 条件下的堵塞物质厚度随着剪切力的增加而增加,高于 0.40 Pa 时,堵塞物质厚度随着剪切力增加而减小。系统运行结束时,0.40 Pa 剪切力条件下堵塞物质厚度最大,均值为 10.83 μm,分别比 0.05、0.20、0.70 Pa 剪切力条件下高 52.20%、16.33%、160.26%。

2.3 堵塞物质形成过程中的表面三维形貌参数

利用三维形貌评价理论(采用 ISO/TC213N756 参数表征体系),分析不同水源条件下堵塞物质三维形貌特征参数,如表 3 ~ 6 所示。

由表可知,随着时间的增加,堵塞物质表面均方根偏差和表面展开面积比率均显著增加,这说明随着时间的增加堵塞物质表面的粗糙度增加,表面能量增加,堵塞物质对固体颗粒物、微生物团体、有机物等的吸附和捕捉能力越来越强;表面高度分度峭度减小,说明堵塞物质的表面稳定性低于 PE 材料;中心液体滞留指数基本不变,说明堵塞物质表面对液体的滞留能力相对稳定。黄河水和微咸水的混配对堵塞物质三维形貌特征参数的影响主要体现在表面均方根偏差和表面展开面积比率两个参数上,混配水条件下堵塞物质表面的 Sq、Sdr 均显著小于其他两种水源,这说明黄河水和微咸水混配会降低堵塞物质表面粗糙度和表面能量,降低堵塞物质对固体颗粒物、微生物团体、有机物等的吸附和捕捉能力,抑制堵塞物质进一步形成。这与三维形貌特征

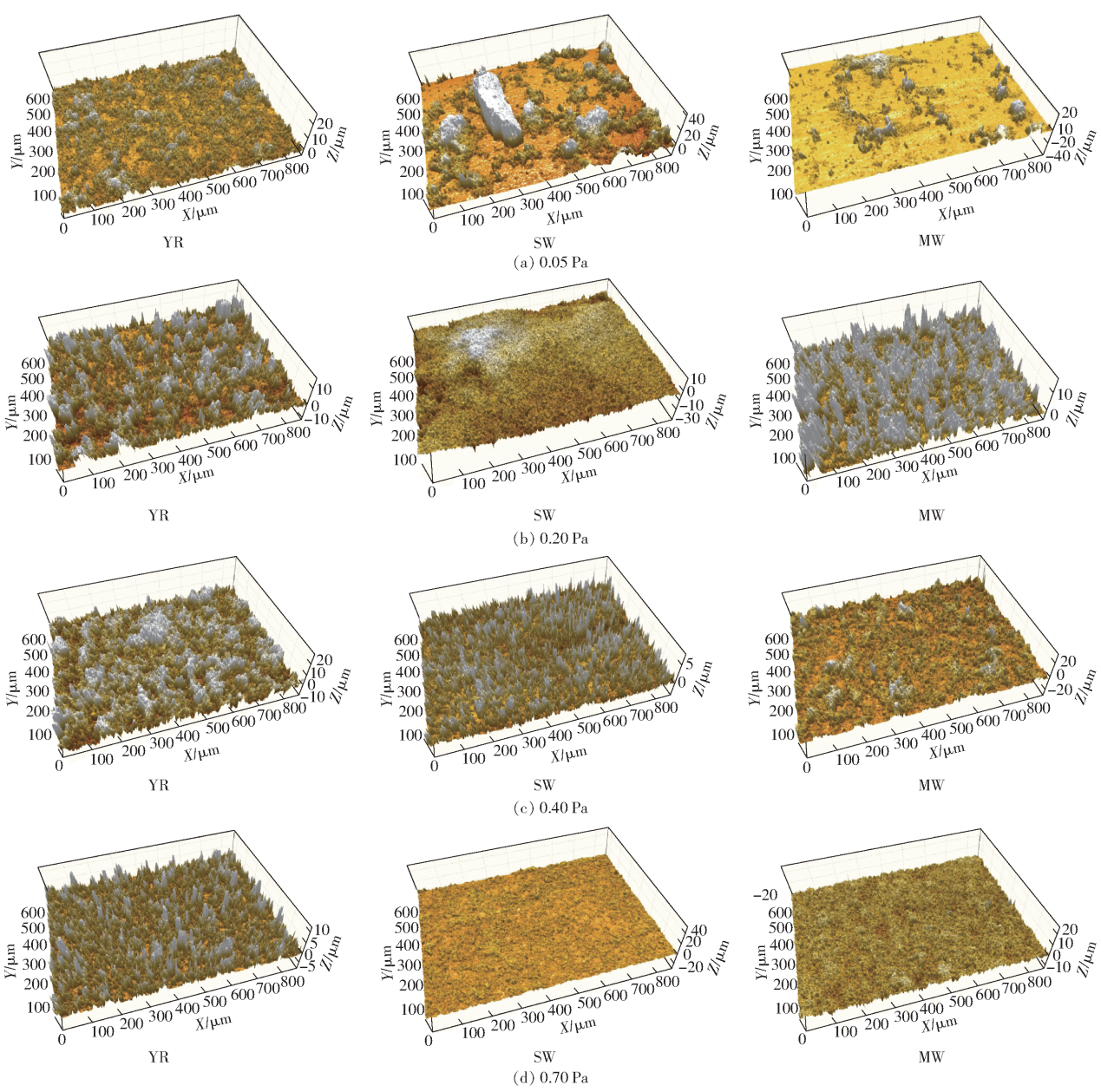


图 6　系统运行 560 h 时堵塞物质表面形貌

Fig. 6　Surface morphology of clogging substance after running of 560 h

图的直观表现一致。此外，对于不同剪切力而言，表面均方根偏差和表面展开面积比率随剪切力变化趋势相似，都是随着剪切力上升，出现一个峰值后再下降，其中 Sq 在 0.40 Pa 剪切力条件下最大，Sdr 在 0.20 Pa 剪切力条件下最大。

3　讨论

堵塞物质的表面形貌特征是环境多重因素的共同影响下的整体体现，本文研究发现：堵塞物质表面形貌呈现一种典型的膜结构，表面均呈现高低起伏的山丘分布状，并且堵塞物质的平均厚度随着时间的增加均表现为先缓慢增加后快速增加的趋势，这是由于水中含有微生物、营养盐、有机物及大量的阴阳离子，水中的阳离子和阴离子发生化学反应形成不可溶的沉淀物质，微生物分泌大量的胞外聚合物，水源中的固体颗粒物、微生物、有机质及化学沉淀等多物质在水动力学条件下通过碰撞、絮凝、生物粘附过程附着在 PE 介质表面，并不断吸附或捕捉固体颗粒及其他絮凝体形成膜结构；此时 PE 片内壁表面水流一方面为膜结构的形成输送基质[24]，但堵塞物质在形成初期需要适应此时的水力条件，另一方面已经形成的膜在水力剪切力的作用下不断发生脱落[25]，因此，该阶段灌水器内部堵塞物质平均厚度缓慢增加。随着系统运行，水中化学反应逐渐发生及膜结构中的微生物基数增加，沉淀物质沉积及有机质团聚体附着在 PE 片内壁的同时，还增加了壁面粗糙度，改变了固体泥沙颗粒与壁面的碰撞特性，加剧了颗粒物及微生物的附着沉积[26]，虽然这期间

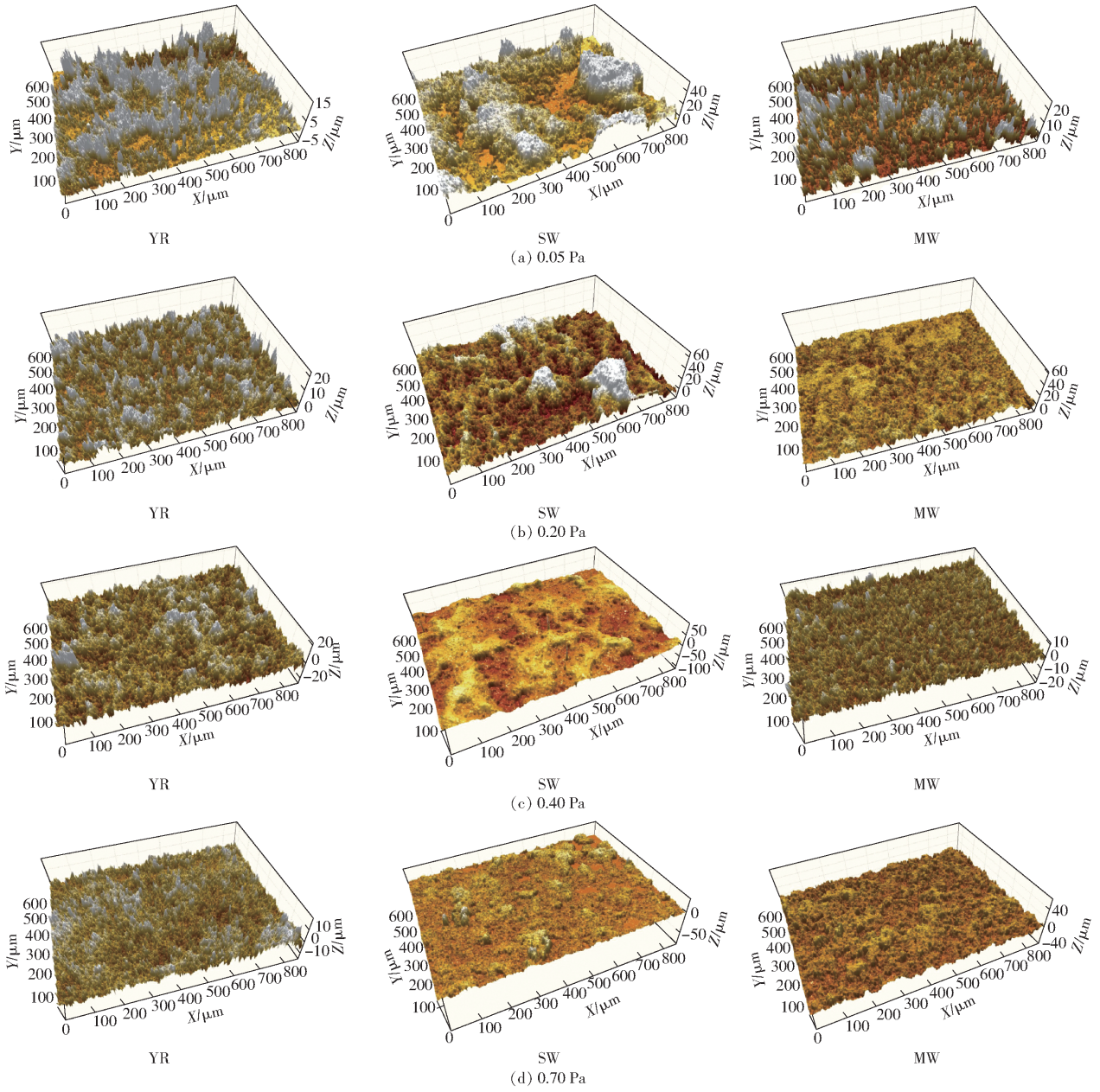


图 7 系统运行 800 h 时堵塞物质表面形貌

Fig. 7 Surface morphology of clogging substance after running of 800 h

也伴随着膜的脱落,但新膜的生长量大于膜的脱落量,堵塞物质的平均厚度呈现快速增加的趋势。

黄河水与微咸水混配后,堵塞物质表面凸起少,较为平坦;堵塞物质的厚度、表面均方根偏差、表面展开面积比率显著降低。这是由于黄河水中含有大量的泥沙颗粒物,本试验黄河水的含沙量为 36.5 kg/m^3,泥沙颗粒物初始含量较高,容易沉淀,被微生物吸附或者粘附于介质表面。微咸水中含有大量的 Mg^{2+}、Ca^{2+}、HCO_3^-、CO_3^{2-}(表 1),随着 pH 值的增加,灌溉水中电解的 OH^- 离子随之增加,从而推进化学反应,进而增加了 $CaCO_3$ 生成,当 pH 值大于 8 时(本文微咸水 pH 值为 8.27),$CaCO_3$ 极易发生沉淀[11,27]。当黄河水与微咸水混配后,不仅使得混配水中泥沙含量低于黄河水中的泥沙含量,还使得混配水中的 Mg^{2+}、Ca^{2+}、HCO_3^-、CO_3^{2-} 含量分别比微咸水中低 18.12%、12.96%、33.33%、37.05%(表 1),也降低了混配水的 pH 值,HILLS 等[11]研究发现降低灌溉水的 pH 值不利于化学沉淀的形成,这就使得在堵塞物质形成初期附着在 PE 内壁表面的颗粒物、微生物、化学沉淀较少,其对固体颗粒物质、微生物团体、微生物等的吸附和捕捉作用较弱,使得表面能量较少,进而影响堵塞物质的进一步发展,堵塞物质的粗糙度自然就比较小,表面的凸起较少,整体较为平坦。这充分说明黄河水和微咸水混配后可有效缓解灌水器堵塞。

此外,灌水器流道内堵塞物质主要集中位置的水力剪切力为 0.20 ~ 0.40 Pa,这是因为水源中含

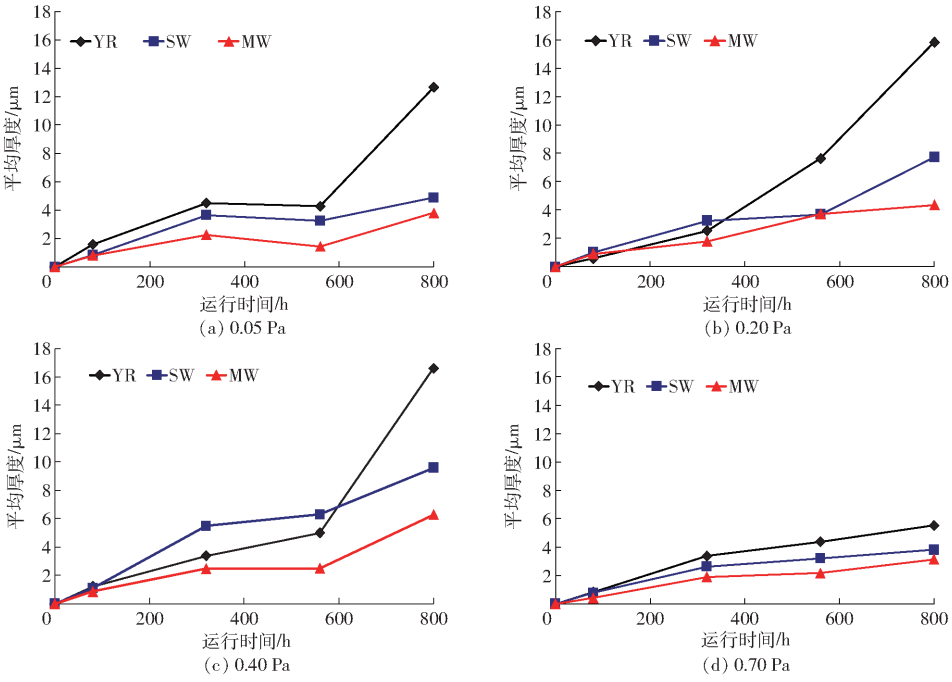


图 8　不同水源条件下堵塞物质平均厚度动态变化特征

Fig. 8　Dynamic variation characteristics of average thickness of clogging substance

表 3　系统运行 80 h 时不同水源条件下堵塞物质三维形貌特征参数

Tab. 3　Surface characteristic parameters of clogging substance after running of 80 h

剪切力/Pa	水源类型	表面均方根偏差/μm	表面高度分度峭度	中心液体滞留指数	表面展开面积比率/%
0.05	YR	0.93	262.0	0.50	2.17
	SW	0.39	66.6	1.40	0.98
	MW	0.57	171.0	0.99	0.64
0.20	YR	0.30	69.7	0.85	1.44
	SW	0.95	51.8	1.56	4.31
	MW	0.70	39.0	1.61	8.61
0.40	YR	0.83	8.6	2.04	5.73
	SW	0.43	39.3	1.39	2.56
	MW	0.69	34.0	1.49	4.96
0.70	YR	0.58	13.2	1.99	5.72
	SW	0.39	24.4	1.19	1.00
	MW	0.22	8.9	1.49	0.32

表 4　系统运行 320 h 时不同水源条件下堵塞物质三维形貌特征参数

Tab. 4　Surface characteristic parameters of clogging substance after running of 320 h

剪切力/Pa	水源类型	表面均方根偏差/μm	表面高度分度峭度	中心液体滞留指数	表面展开面积比率/%
0.05	YR	2.37	36.9	1.54	8.0
	SW	2.67	6.12	2.51	12.6
	MW	1.54	17.5	1.74	12.4
0.20	YR	1.01	29.9	1.80	40.4
	SW	6.38	6.8	2.06	70.7
	MW	1.68	8.9	2.15	26.9
0.40	YR	2.34	5.3	1.85	28.0
	SW	4.15	7.7	2.15	44.6
	MW	1.86	9.1	2.24	21.8
0.70	YR	2.31	9.3	2.07	32.2
	SW	2.14	12.3	1.70	13.2
	MW	1.36	7.9	2.09	28.4

有一定量的粘性细小颗粒，这些粘性颗粒形成絮团，絮团发育成长，互相搭接形成网状结构，当剪切力较小时，不利于这些小颗粒之间相互碰撞和吸引[28]，同时也不利于水中的阴阳离子的更新，进而不利于化学沉淀的产生[29]。同时泥沙表面附着生物膜后，微生物分泌的胞外聚合物（EPS）覆盖在颗粒物表面，颗粒物之间的粘结作用增强，剪切力较低时不利于胞外多糖的产生[30]，所形成的堵塞物质结构为多孔且宽松[31]，不利于在 PE 内壁表面附着。当水力剪切力很大，会显著地影响堵塞物质的脱落[25,32]，RITTMANN[33]在较早的研究中发现管道壁面附着物的脱落速率与水力剪切力的 0.58 次方成比例，而 BAKKE 等[34]研究发现管道壁面附着物的脱落速率与剪切力之间存在线性关系，同时当剪切力较大时，不利于水中颗粒物之间的絮团与絮网结构的形成，对已经形成的絮团也具有破坏作用[35]。堵塞物质的厚度随水力剪切力变大有上升的趋势，然而水力剪切力变大也会增大水流对膜结构的侵蚀作用，加速堵塞物质的脱落，当两者达到动态平衡时堵塞物质会表现出较大的积累量，使得剪切力为 0.20 Pa

表 5 系统运行 560 h 时不同水源条件下堵塞物质三维形貌特征参数

Tab. 5 Surface characteristic parameters of clogging substance after running of 560 h

剪切力/Pa	水源类型	表面均方根偏差/μm	表面高度分度峭度	中心液体滞留指数	表面展开面积比率/%
0.05	YR	3.15	11.5	2.32	47.7
	SW	1.77	5.1	2.08	22.6
	MW	1.69	15.4	2.33	12.5
0.20	YR	8.49	4.8	1.51	44.9
	SW	2.18	6.5	1.95	36.6
	MW	2.80	4.8	2.08	58.1
0.40	YR	3.28	5.4	1.96	51.5
	SW	3.99	2.8	1.73	32.5
	MW	2.89	5.3	2.03	24.8
0.70	YR	1.58	7.8	1.77	25.4
	SW	1.49	3.4	1.45	28.2
	MW	0.97	6.1	2.01	15.3

表 6 系统运行 800 h 时不同水源条件下堵塞物质三维形貌特征参数

Tab. 6 Surface characteristic parameters of clogging substance after running of 800 h

剪切力/Pa	水源类型	表面均方根偏差/μm	表面高度分度峭度	中心液体滞留指数	表面展开面积比率/%
0.05	YR	8.82	3.1	1.86	72.7
	SW	3.49	5.5	2.09	34.9
	MW	2.75	5.3	1.87	29.3
0.20	YR	11.18	6.7	1.86	86.1
	SW	5.22	2.7	1.32	79.7
	MW	2.91	3.6	1.95	67.6
0.40	YR	9.32	2.6	1.6	77.1
	SW	3.56	3.3	1.69	58.3
	MW	4.15	3.3	1.63	44.7
0.70	YR	3.66	5.1	1.92	54.5
	SW	2.40	3.3	1.73	42.5
	MW	2.14	3.7	1.69	52.7

和 0.40 Pa 条件下堵塞物质结构较紧密,表面厚度、表面均方根偏差和表面展开面积比率均较大。

4 结论

(1)通过白光干涉形貌显微镜能够获取清晰真实的堵塞物质表面三维形貌,堵塞物质表面并不是平坦的,均呈现高低起伏的山丘分布状。

(2)黄河水与微咸水混配后堵塞物质表面凸起少,较为平坦;堵塞物质的厚度、表面均方根偏差、表面展开面积比率显著降低,充分说明黄河水和微咸水混配后不仅可以有效减少黄河水中的泥沙含量,还可以降低微咸水中的盐分,可有效缓解灌水器堵塞现象。

(3)灌水器流道内堵塞物质主要集中位置的水力剪切力为 0 ~ 0.8 Pa,在 0.20 ~ 0.40 Pa 剪切力范围内堵塞物质结构较紧密,表面厚度、表面均方根偏差和表面展开面积比率均较大。

参 考 文 献

[1] 张余良, 陆文龙, 张伟,等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):969 - 973.
ZHANG Yuliang, LU Wenlong, ZHANG Wei, et al. Effects of long term brackish water irrigation on characteristics of agrarian soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4): 969 - 973. (in Chinese)

[2] 蒋如琴, 曹文洪. 引黄灌区泥沙研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.

[3] 王全九, 徐益敏, 王金栋,等. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2002, 21(4):73 - 77.
WANG Quanjiu, XU Yimin, WANG Jindong, et al. Application of saline and slight saline water for farmland irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2002,21(4): 73 - 77. (in Chinese)

[4] WAN S Q, KANG Y H, WANG D, et al. Effect of drip irrigation with saline water on tomato (*Lycopersicon esculentun* Mill) yield and water use in semi-humid area[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(1 - 2):63 - 74.

[5] KARLBERG L, ROCKSTROM J, ANNANDALE J G, et al. Low-cost drip irrigation—a suitable technology for southern Africa: an example with tomatoes using saline irrigation water[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(1 - 2):59 - 70.

[6] BUCKS D A, NAKAYAMA F R. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance[J]. Agricultural Water Management, 1979, 2(2): 149 - 162.

[7] NAKAYAMA F R, BUCKS D A. Water quality in drip/trickle irrigation: a review[J]. Irrigation Science, 1991, 12(4): 187 - 192.

[8] 王伟楠, 徐飞鹏, 周博,等. 引黄滴灌水源中泥沙表面附生生物膜的分形特征[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(10): 914 - 920.
WANG Weinan, XU Feipeng, ZHOU Bo, et al. Structural and fractal characteristics of biofilm attached on surfaces of sediments in Yellow River for drip irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(10): 914 - 920. (in Chinese)

[9] ZHOU B, LI Y K, PEI Y T, et al. Quantitative relationship between biofilms components and emitter clogging under reclaimed water drip irrigation[J]. Irrigation Science, 2013, 31(6): 1251 - 1263.

[10] ZHANGZHONG L L, YANG P L, REN S M, et al. Chemical clogging of emitters and evaluation of their suitability for saline water drip irrigation[J]. Irrigation & Drainage, 2016, 65(4):439 - 450.

[11] HILLS D J, NAWAR F M, WALLER P M. Effects of chemical clogging on drip-tape irrigation uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(4): 1202 – 1206.
[12] MARZIO P, ENRICO N, THOMAS J. DNS study of turbulent transport at low Prandtl numbers in a channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 458: 419 – 441.
[13] ZHANG J, ZHAO W H, WEI Z Y, et al. Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitters with arc labyrinth channels[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 120 – 129.
[14] 张晓晶, 于健, 马太玲, 等. 黄河水滴灌条件下灌水器堵塞试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3): 7 – 12.
ZHANG Xiaojing, YU Jian, MA Tailing, et al. Experimental study on emitter clogging under drip irrigation with Yellow River water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(3): 7 – 12. (in Chinese)
[15] HAN Siqi, LI Yunkai, XU Feipeng, et al. Effect of lateral flushing on emitter clogging under drip irrigation with Yellow River water and a suitable method[J]. Irrigation and Drainage, 2018, 67(2): 199 – 209.
[16] 刘燕芳, 李丹, 吴普特, 等. 不同类型灌水器在硬水滴灌条件下的堵塞特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 96 – 102.
LIU Yanfang, LI Dan, WU Pute, et al. Clogging characteristic of different emitters in drip irrigation with hard water[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 96 – 102. (in Chinese)
[17] 秦松岩. 德国奥德河水中生物膜形态及其生物多样性的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
QIN Songyan. Study on morphology and biodiversity of biofilm of river Oder[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2008. (in Chinese)
[18] LI Y K, ZHOU B, LIU Y Z, et al. Preliminary surface topographical characteristics of biofilms attached on drip irrigation emitters using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4): 557 – 574.
[19] ZHANGZHONG L L, YANG P L, REN S M, et al. Flow characteristics and pressure-compensation mechanism of non-pressure-compensation drip irrigation emitters[J]. Irrigation and Drainage, 2015, 64(5): 637 – 646.
[20] 朱克勤, 许春晓. 粘性流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
[21] DONG W P, SULLIVAN P J, STOUT K J. Comprehensive study of parameters for characterization 3-D surface topography[J]. Wear, 1994, 178(1): 29 – 60.
[22] CARNEIRO K, JENSEN C P, JOGENSEN J F, et al. Roughness parameters of surface by atomic force microscopy [R]. Annals of the CIRP, 1995, 44(1):517 – 522.
[23] 李爽,张晓健. 给水管壁生物膜的生长发育及其影响因素[J]. 中国给水与排水,2003,19(13):49 – 52.
LI Shuang, ZHANG Xiaojian. Growth and its effect factors of biofilm attached on surface of water pipe[J]. China Water and Wastewater, 2003, 19(13): 49 – 52. (in Chinese)
[24] VAN LOOSDRECHT M C M, EIKELBOOM D, GJALTEMA A, et al. Biofilm structures[J]. Water Science and Technology, 1995, 32(8): 35 – 43.
[25] CHANG H T, RITTMANN B E, AMAR D R, et al. Biofilm detachment mechanisms in a liquid fluidized bed[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1991, 38(5): 499 – 506.
[26] SHAFAGH I. Plaque accumulation on cast gold complete crowns polished by a conventional and an experimental method[J]. Journal of Prosthetic Dentistry, 1986, 55(3): 339 – 342.
[27] AALI K A, LIAGHAT A, DEHGHANISANIJ H. The effect of acidification and magnetic field on emitter clogging under saline water application[J]. Journal of Agricultural Science (Toronto), 2009, 1(1): 132 – 141.
[28] LI G B, LI Y K, XU T W, et al. Effects of average velocity on the growth and surface topography of biofilms attached on the reclaimed wastewater drip irrigation system laterals[J]. Irrigation Science, 2011, 30(2): 103 – 113.
[29] XAVIER J D B, PICIOREANU C, LOOSDRECHT M C M V. A general description of detachment for multidimensional modelling of biofilms[J]. Biotechnology & Bioengineering, 2005, 91(6): 651 – 669.
[30] TAY J H, LIU Q S, LIU Y. The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2001, 57(1 – 2): 227 – 233.
[31] LASPIDOU C S, RITTMANN B E. Modeling the development of biofilm density including active bacteria, inert biomass, and extracellular polymeric substances[J]. Water Research, 2004, 38(14 – 15): 3349 – 3361.
[32] ETIENNE P, JUAN C O, YOAN P, et al. Effect of shear stress and growth conditions on detachment and physical properties of biofilms[J]. Water Research, 2012, 46(17): 5499 – 5508.
[33] RITTMANN B E. The effect of shear stress on biofilm loss rate[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1982, 24(2): 501 – 506.
[34] BAKKE R, TRULEAR M G, ROBINSON J A, et al. Activity of pseudomonas aeruginosa in steady-state biofilms[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1984, 26(11): 1418 – 1424.
[35] BAGNOLD R A. Experiments on the gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1954, 225(1160): 49 – 63.