

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.13.005

外伸型丝状菌好氧颗粒污泥对罗丹明B的降解效能

李松波¹, 尹顺昌², 王筱语³, 贺伟强³, 刘俊³, 邢保山⁴

(1. 嘉兴职业技术学院 城市建设学院, 浙江 嘉兴 314036; 2. 同济大学浙江学院 土木工程系, 浙江 嘉兴 314051; 3. 嘉兴职业技术学院 现代农业学院, 浙江 嘉兴 314036; 4. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 采用2个相同的序批式反应器(SBR, R1和R2)研究外伸型丝状菌好氧颗粒污泥(AGS)对罗丹明B(RhB)的降解效能。2个SBR接种等量脱水污泥后,在第30天成功培养出外伸型丝状菌AGS;对照组R1未投加RhB,丝状菌过度增殖未得到有效控制,导致AGS失稳。R2在第31~70天投加5~15 mg/L的RhB,可有效抑制丝状菌 *Proteobacteria*、*Actinobacterota* 和 *Chloroflexi*;当RhB投加量达到20 mg/L时,R2在曝气过程中会产生大量气泡,颗粒污泥伴随气泡溢出而流失,不利于AGS的稳定运行。因此,在第71天R2停止投加RhB,AGS逐渐恢复并实现稳定运行。R2对RhB的去除率可维持在67.4%~78.1%,去除过程通过微生物吸附和转化来实现,且以前者为主;投加RhB后COD去除率仍可保持在93.4%以上,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP去除率分别从89.0%、100.0%降至67.7%、66.3%。微生物分析结果表明,投加RhB并未抑制与COD降解相关的微生物,却能显著抑制与N和P去除相关的微生物。

关键词: 外伸型丝状菌; 好氧颗粒污泥; 罗丹明B; 有机物去除

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)13-0033-07

Degradation of Rhodamine B Using Extended Filamentous Aerobic Granular Sludge

LI Song-bo¹, YIN Shun-chang², WANG Xiao-yu³, HE Wei-qiang³, LIU Jun³,
XING Bao-shan⁴

(1. School of Urban Construction, Jiaxing Vocational & Technical College, Jiaxing 314036, China; 2. Department of Civil Engineering, Tongji Zhejiang College, Jiaxing 314051, China; 3. School of Modern Agriculture, Jiaxing Vocational & Technical College, Jiaxing 314036, China; 4. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology <Ministry of Education>, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The performance of extended filamentous aerobic granular sludge (AGS) for degrading rhodamine B (RhB) was investigated in two identical sequencing batch reactors (SBR, R1 and R2). Both SBRs were inoculated with an identical quantity of dewatered sludge, and the extended filamentous AGS

基金项目: 浙江省教育厅一般科研项目(Y202351468); 嘉兴市公益研究计划项目(2025CGZ078); 西北水资源与环境生态教育部重点实验室开放课题(2022SZY05); 浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)项目(2023R458009)

通信作者: 刘俊 E-mail: liuj521282@sina.com

was successfully cultivated on day 30. In the control group R1, where RhB was not added, the excessive growth of filamentous bacteria could not be effectively controlled, leading to instability in the AGS system. R2 was supplemented with 5–15 mg/L of RhB from day 31 to day 70, effectively inhibiting the growth of filamentous bacteria, including *Proteobacteria*, *Actinobacterota*, and *Chloroflexi*. When the dosage of RhB reached 20 mg/L, R2 produced a significant amount of bubbles during the aeration process, leading to the loss of granular sludge through bubble overflow. This phenomenon negatively impacted the stable operation of AGS. Therefore, R2 immediately ceased the addition of RhB on day 71, allowing AGS to gradually recover and restore stable operation. Meanwhile, the removal efficiency of RhB in R2 was maintained within the range of 67.4% to 78.1%. This process was primarily driven by microbial adsorption, with microbial transformation also contributing but playing a secondary role. After the addition of RhB, the removal efficiency of COD was maintained at above 93.4%. In contrast, the removal efficiencies of NH_4^+-N and TP decreased significantly, dropping from 89.0% and 100.0% to 67.7% and 66.3%, respectively. The results of the microbial analysis demonstrated that the addition of RhB did not exert inhibitory effects on microorganisms involved in COD degradation, yet it significantly suppressed the microorganisms associated with N and P removal.

Key words: extended filamentous bacteria; aerobic granular sludge; rhodamine B; organic matter removal

罗丹明 B(RhB)作为一种人工合成的非偶氮基的阳离子型鲜红色碱性染料,被广泛用于纺织印染、食品等行业。该染料一旦进入自然水体,会因其较高的色度而降低水体的透光度和水生植物的光合作用,严重抑制水生生物的生长,从而加剧水体环境污染^[1]。当前处理印染废水的方法主要有物理法、化学法和生物法。其中,生物处理技术因操作简单、运行费用低、对环境友好等特性,被广泛用于印染废水处理^[2-3]。研究表明,微生物对染料的降解主要通过酶降解、吸附脱色以及两者协同作用,并且混合菌群相比单一菌群对染料具有更好的去除效能,这得益于混合菌群可通过微生物共代谢机制实现对难降解有机物的有效去除^[4-5]。普通活性污泥因粒径较小且缺乏足够的微生物菌群,需增设厌氧/好氧条件、投加铁刨花等,这将增加运行费用^[4-5]。因此寻找新型高效的生物处理技术是印染废水处理中急需解决的难题。

好氧颗粒污泥(AGS)具有普通活性污泥和厌氧颗粒污泥的优点,与普通活性污泥相比,AGS具有粒径大、生物量高、好氧和厌氧区共存、沉降性能好、结构密实、有机负荷及有毒有害物质耐受度高等优点^[6-9]。研究者已尝试将 AGS 技术用于处理印染废水并取得了良好效果^[10],然而有关丝状菌 AGS

降解染料 RhB 的研究鲜有报道。研究表明,适度的丝状菌有助于加速 AGS 的形成并能提高有机物的降解效能,但过度生长的丝状菌会导致污泥膨胀和 AGS 瓦解^[11-12],同时染料对微生物的生长也具有一定的抑制作用。如何耦合丝状菌、染料和 AGS 三者在难降解有机物和颗粒化方面的优势,实现丝状菌 AGS 有效降解 RhB 并稳定运行是一个值得深入研究的课题。为此,笔者在序批式反应器(SBR)中探究丝状菌 AGS 对模拟污水中 RhB 的降解效能及其稳定运行情况,分析 RhB 投加量对 AGS 特性、有机物降解效果和微生物菌群的影响,以期为丝状菌 AGS 在印染废水处理中的应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 SBR 的构建与运行

采用两个相同的 SBR(R1 和 R2)进行试验。SBR 装置由有机玻璃制成,高为 50 cm,内径为 10 cm,有效容积为 3.6 L,并配置阀门、曝气装置和管道等,整个试验装置的运行为自动化控制。SBR 运行周期包括进水(4 min)、曝气(140 min)、沉淀(2 min)、出水(4 min)、闲置(30 min)5 个阶段,每天运行 8 个周期,容积交换率为 50%。SBR 装置的接种污泥为嘉兴市再生水厂的脱水污泥,接种量为 200 mL,经清水淘洗、筛分后平均粒径 ≤ 0.5 mm;进水为

人工配制的模拟污水,以醋酸钠为碳源、氯化铵为氮源、磷酸二氢钾为磷源,并添加微量元素,COD、 NH_4^+-N 和TP分别为800~1 000、45~55和10~15 mg/L。R1作为对照组,不投加RhB。R2投加5~20 mg/L的RhB,直至丝状菌得到有效控制,停止投加RhB。试验在室温(20 ± 5) °C条件下进行。

1.2 分析项目及方法

混合液悬浮固体(MLSS)、混合液挥发性悬浮固体(MLVSS)、污泥容积指数(SVI)、COD、 NH_4^+-N 和TP等常规指标采用国家标准方法进行测定。采用紫外分光光度计在550 nm波长处测定不同浓度RhB溶液的吸光度,绘制RhB(0~20 mg/L)的标准曲线($y=20.9176x+0.0927$, $R^2=0.9999$)。为了探究微生物对RhB的吸附效能,在2个500 mL的烧杯中分别投加200 mL丝状菌AGS混合液,用去离子水洗涤3次后,分别投加10和20 mg/L的RhB,并置于磁力搅拌器上(300 r/min)搅拌180 min,每隔30 min取样一次,测定RhB浓度。采用光电显微镜和智能手机对污泥形态进行观察和拍照。为了探究试验过程中微生物菌群的变化,当污泥上述特征发生显著变化时,从R2中随机取污泥3次,每次取100 mL,将这些污泥混合后再随机取10 mL存于离心管中,并立即放置于-20 °C冰箱中用于微生物测序分析。试验中留存S0~S6共7个污泥样品(分别取自第0、20、30、55、65、80、100天),将这些污泥样品送至上海美吉生物有限公司进行16S rRNA基因测序分析。

2 结果与讨论

2.1 污泥形态变化

R1和R2接种等量的脱水污泥,经过15 d的运行,均实现了污泥颗粒化。这是由于污泥在脱水过程中因压力作用使得间距缩小、胞外聚合物(EPS)释放、絮状污泥快速聚集,形成了较多的污泥聚集体^[13],尽管这些聚集体不够密实,在水力剪切力的作用下会分解为较多的絮状污泥和少量的聚集体[见图1(a)和(g)],但这些聚集体为启动阶段AGS的快速形成提供了“诱导核”和“载体”,且SBR的周期运行模式为微生物提供了适宜的生存条件,从而加速了AGS的形成^[6,12]。由于人工配制的污水易降解,随着颗粒污泥粒径的增加,第25天开始出现丝状菌。在第30天,R1和R2中AGS表面的外伸型丝状菌越来越明显[见图1(c)和(i)]。由于R1未投加RhB,丝状菌快速增殖,导致AGS在第50天开始解体,丝状菌占据优势,膨胀污泥伴随出水被排出R1。自第31天起,在R2进水中投加5 mg/L的RhB,5 d后发现丝状菌增殖有所缓解,但依然占据主导地位。为了进一步有效控制丝状菌,自第42天开始逐步增大RhB的投加量。当RhB投加量增至15 mg/L时,丝状菌得到有效抑制,在第55天时AGS表面基本观察不到丝状菌。然而当第62天RhB投加量增至20 mg/L时,在曝气反应过程中R2出现大量泡沫并导致AGS伴随泡沫流出反应器。因此,在第71天R2停止投加RhB,AGS逐步得到恢复并趋于稳定运行。

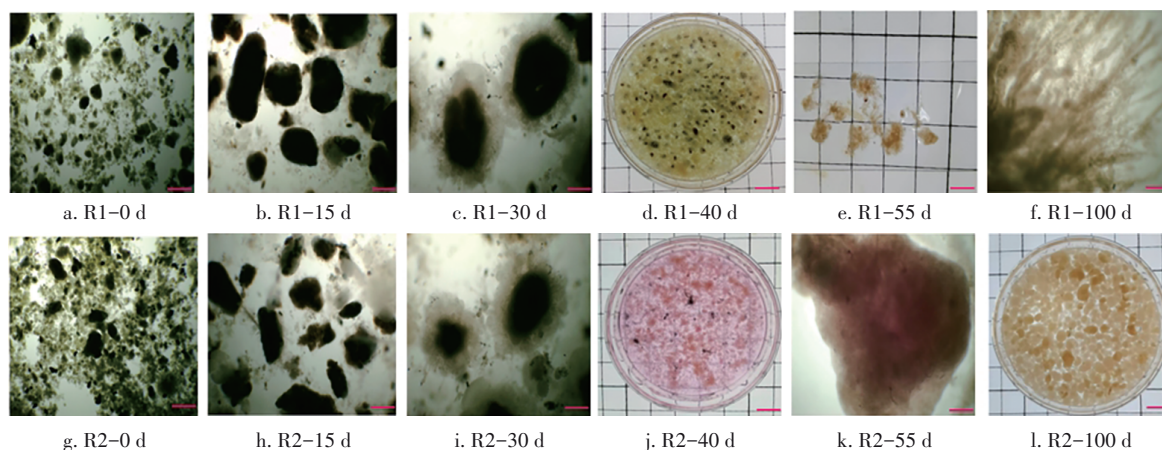


图1 SBR中污泥形态的变化(标尺:1 cm)

Fig.1 Change in sludge morphology in SBR (scale bar: 1 cm)

2.2 污泥物化特性变化

试验过程中,两个反应器中污泥浓度和SVI的变化如图2所示(A为丝状菌AGS培养阶段,B、C、

D、E、F阶段R2中RhB投加量分别为5、10、15、20、0 mg/L)。在前30 d,两个反应器中MLSS、MLVSS、SVI的变化基本一致。此阶段污泥系统处于相对平稳

状态,MLSS和MLVSS分别维持在3.389~3.446 g/L和2.774~2.821 g/L,SVI₃₀和SVI₅分别维持在40.1~44.1 mL/g和48.2~49.5 mL/g,SVI₃₀/SVI₅维持在87.6%~89.1%,说明污泥压缩沉降性较低,且此时污泥轮廓清晰,粒径均大于0.2 mm,表明AGS已形成并占据主导地位^[6]。第30天,丝状菌开始在AGS表面出现,SVI₃₀和SVI₅都显著增加,在R1中分别达到87.1、133.5 mL/g,在R2中分别达到90.5、132.2 mL/g。在对照组R1,由于未投加RhB,丝状菌过度增殖导致SVI₅和SVI₃₀在第40天升至159.8和146.5 mL/g,随后快速增加,最终高达362.2和296.8 mL/g,并在第70天AGS彻底解体。此时MLSS和MLVSS降至0.113和0.089 g/L。第31天,R2中开始投加5 mg/L的RhB,经过10 d的运行,丝状菌得到一定程度的抑制,但效果并不是很明显。自第42天开始将RhB投加量逐步提高至15 mg/L,在第55天丝状菌得到有效控制。与此同时,SVI₅和SVI₃₀分别从132.25和90.5 mL/g降至80.15和78.75 mL/g,MLSS和MLVSS也略有增加。然而,当第62天RhB投加量增至20 mg/L时,R2在曝气阶段产生大量的泡沫且溢出,污泥随之流出反应器,导致MLSS、MLVSS降至2.624和2.216 g/L。R2在第71天暂停投加RhB,运行10 d后污泥SVI₃₀开始趋于稳定,至第100天稳定在45.7 mL/g,MLSS为5.864 g/L。试验表明,投加15 mg/L的RhB能有效抑制丝状菌的过度增殖,但投加过量(20 mg/L)的RhB并不利于AGS的稳定运行,这是因为丝状菌对有毒有害物质RhB较为敏感^[9]。

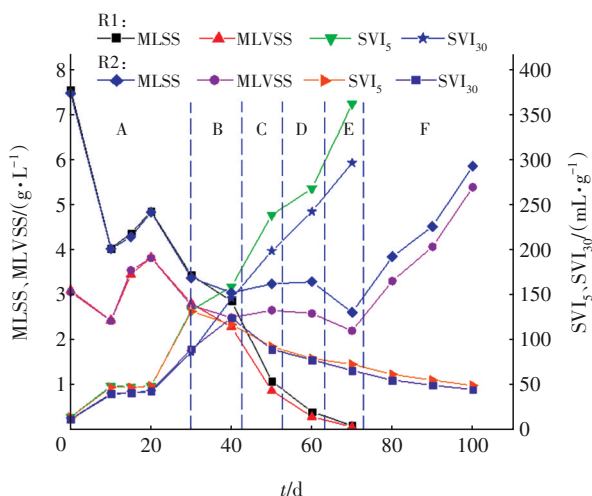


图2 SBR中MLSS和SVI的变化

Fig.2 Change in MLSS and SVI in SBR

2.3 对污染物的降解效能

试验过程中,SBR对污染物的去除效果如图3所示。

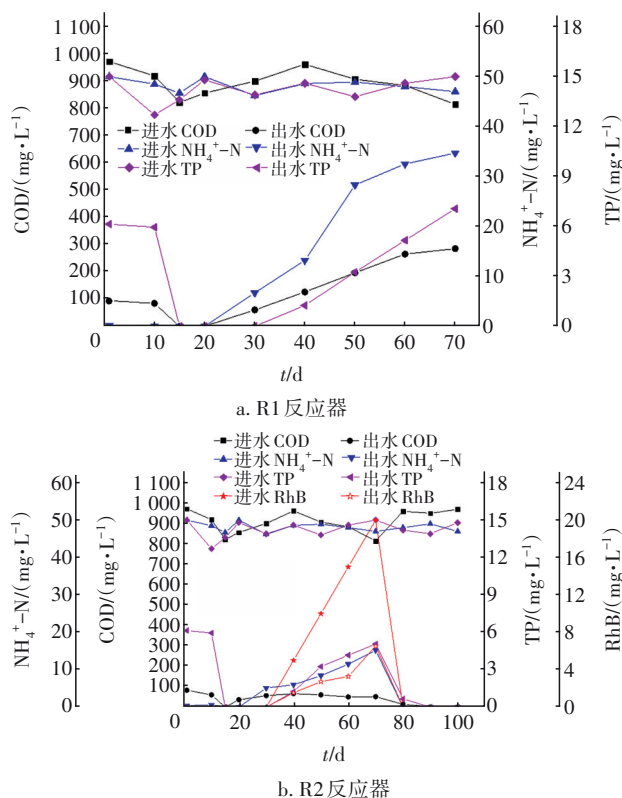


图3 SBR对污染物的去除效果

Fig.3 Removal effect of pollutants in SBR

前30 d,随着AGS的快速形成,R1和R2出水COD、NH₄⁺-N和TP都可降至0 mg/L,去除率达到100%。随着丝状菌的出现,R1中丝状菌过度生长,导致AGS系统逐渐恶化,使得出水COD、NH₄⁺-N和TP在第70天快速升至285、34.7和7.1 mg/L。分析原因,丝状菌的过度增殖、AGS解体、SVI升高导致MLSS快速降低,最终导致对污染物的降解效能显著降低。R2由于及时投加RhB,丝状菌得到有效抑制,其出水COD略有升高,达到50~66 mg/L,去除率仍可保持在93.4%以上。但是,出水NH₄⁺-N和TP随着RhB投加量的增加而显著升高,最高可达15.2和5.1 mg/L,去除率分别由89.0%、100.0%降至67.7%、66.3%。同时,出水RhB也呈现相似的变化趋势,其去除率基本维持在67.4%~78.1%。试验结果表明,投加RhB对微生物降解N、P具有显著的负作用,对COD的去除并无显著影响。

为明确微生物对RhB的吸附效能,开展吸附试

验,结果如图4所示。当RhB初始浓度分别为10、15 mg/L时,经丝状菌AGS吸附30 min后,RhB浓度快速降至5.6、9.5 mg/L,去除率分别为44.0%、36.7%;随着试验时间的延长,RhB浓度逐渐降低,至150 min时趋于稳定,分别为4.9、8.0 mg/L,去除率基本稳定在51.0%和46.7%。试验表明,丝状菌AGS对RhB的吸附作用在30 min时基本完成,提高RhB浓度对丝状菌AGS的吸附效果有一定的负作用。由此可见,丝状菌AGS对RhB的降解过程主要包括生物吸附和生物分解2个过程,且以生物吸附为主,这与之前的研究结果基本一致^[9-10]。

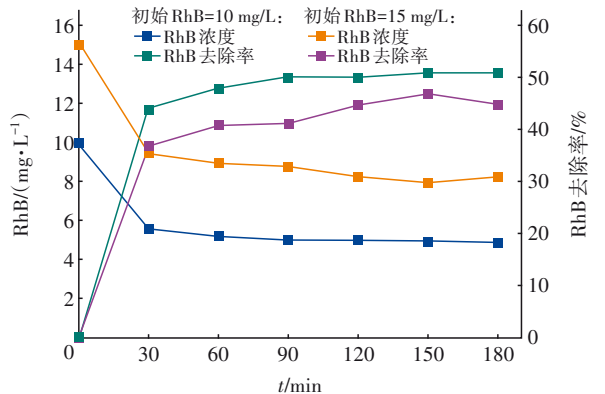


图4 丝状菌AGS系统对RhB的吸附效果

Fig.4 Biosorption of RhB by filamentous AGS

2.4 微生物群落结构变化

试验中,所有污泥样品(S0~S6)的有效序列在102 456~186 508,平均长度为412~425 bp,按照0.97的置信度进行聚类分析,最终聚类为324~1 400个操作分类单元(OTU),满足试验要求。表1为所有污泥样品中微生物的Alpha多样性分析结果。接种污泥(S0)的ACE和Chao1指数最大,其次是S1。Chao1或ACE指数越大,说明群落丰富度越高,表明接种污泥(S0)中微生物丰度最高。同时,S0的Shannon指数最大、Simpson指数最小,Shannon指数越大代表微生物群落多样性越高,Simpson指数越大代表微生物群落多样性越低。由此可见,接种污泥的菌群多样性最高。值得注意的是,在S0~S6中,ACE、Chao1和Shannon指数呈现先降低(S0~S4)后升高(S5)再降低(S6)的趋势,这表明颗粒污泥的快速形成(S1)并未显著降低接种污泥(S0)的群落多样性,但随着丝状菌的过度生长并占据主导地位,污泥中微生物群落多样性进一步降低(S2)。这可能与丝状菌具有较强的竞争特征有关。

为了有效抑制丝状菌的过度生长,投加5~20 mg/L的RhB,虽然控制了丝状菌,但污泥中微生物菌群多样性也再次降低(S3和S4)。停止投加RhB后,污泥中的微生物得以恢复,其多样性指数有所增加(S5),此时AGS逐渐恢复且占据主导地位并实现稳定运行,微环境的存在导致其他微生物不适应,使得其多样性指数有所降低(S6)。另外,上述7个污泥样品的Coverage值均达到0.99,表明此次测序结果足够反映样品真实情况,且未被分析出的菌群较少。

表1 污泥中微生物的Alpha多样性

Tab.1 Alpha diversity of microorganisms in sludge

项目	ACE	Chao1	Shannon	Simpson	Coverage
S0	1 437.35	1 414.73	5.36	0.01	0.99
S1	1 344.14	1 300.55	4.53	0.06	0.99
S2	786.47	771.68	2.07	0.40	0.99
S3	502.43	469.92	2.64	0.17	0.99
S4	477.41	464.39	3.38	0.07	0.99
S5	598.86	583.10	3.37	0.10	0.99
S6	344.34	341.50	3.11	0.11	0.99

7个污泥样品在门水平上的菌群相对丰度如图5所示。可以看出,变形菌门(*Proteobacteria*)的相对丰度最高,在S0~S6样品中分别为29.2%、56.9%、86.3%、81.1%、78.1%、83.8%和60.1%,占据主导地位,这和前人的研究结果高度一致^[7,10]。其他优势菌门依次是拟杆菌门(*Bacteroidota*)、放线菌门(*Actinobacteriota*)、浮霉菌门(*Planctomycetota*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、疣微菌门(*Verrucomicrobiota*)、酸杆菌门(*Acidobacteriota*)和厚壁菌门(*Firmicutes*),在不同样品中的相对丰度有所差异。据报道,丝状菌群中的*Proteobacteria*、*Actinobacteriota*和*Chloroflexi*广泛存在于AGS中,一旦有适宜的生长条件,就会过度增殖,导致颗粒污泥解体^[8,11]。在试验中发现,接种污泥(S0)和颗粒污泥(S1)均含有这3类丝状菌,在人工配制污水条件下,*Proteobacteria*增殖最快且在S2中相对丰度达到最大值86.3%,此时也是丝状菌生长达到鼎盛的时期。研究结果证实了易降解有机物醋酸钠有助于丝状菌的过度增殖,这与前人的研究结果一致^[6,8]。随着RhB投加量的逐步增加,污泥中*Proteobacteria*和*Chloroflexi*的相对丰度开始降低(S3和S4),这表明丝状菌对有毒有害物质RhB较为敏感,其生长受到一定的抑制,这与前人的

研究结果一致^[10]。停止投加 RhB 后, *Proteobacteria* 的相对丰度有小幅增加(S5), 此时 AGS 以丝状菌为骨架且逐渐恢复并占据主导地位, *Proteobacteria* 的相对丰度下降至 60.1%(S6)。该研究表明, 丝状菌 *Proteobacteria* 和 *Chloroflexi* 在含有易降解有机物醋酸钠的污水中容易过度增殖, 不及时有效抑制将会导致 AGS 解体^[8,11]。投加 RhB 能有效抑制这类丝状菌的过度增殖, 并且 AGS 以适量的丝状菌作为骨架加速恢复并占据主导地位, 从而实现系统的稳定运行。与此同时, AGS 的微环境为 *Bacteroidota* 的生长提供了较理想的生存条件, *Bacteroidota* 的相对丰度逐渐增至 26.2%。*Proteobacteria*、*Actinobacteriota*、*Chloroflexi*、*Bacteroidota* 等微生物与 EPS 的分泌、有机物的降解有密切关系^[10,14]。在试验过程中发现, 投加 RhB 后 N 和 P 的去除效能受到显著抑制, 而 COD 的去除效能并未受到显著影响, 这是因为投加 RhB 对丝状菌 *Proteobacteria* 和 *Chloroflexi* 具有显著抑制效应, 而这两类菌群与 N 和 P 的去除密切相关^[10,14], 与 COD 去除相关的 *Bacteroidota* 并未受到抑制^[7,14]。由此可见, 丝状菌对 AGS 的形成和稳定以及污染物的去除具有正、负两种作用, 投加适量的 RhB (15 mg/L) 可有效抑制丝状菌的过度增殖, 使得适量丝状菌作为 AGS 形成的骨架, 有助于颗粒污泥系统的稳定运行, 从而提高污染物的去除效能。

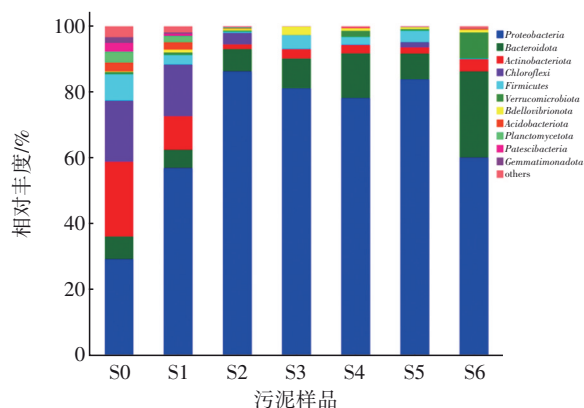
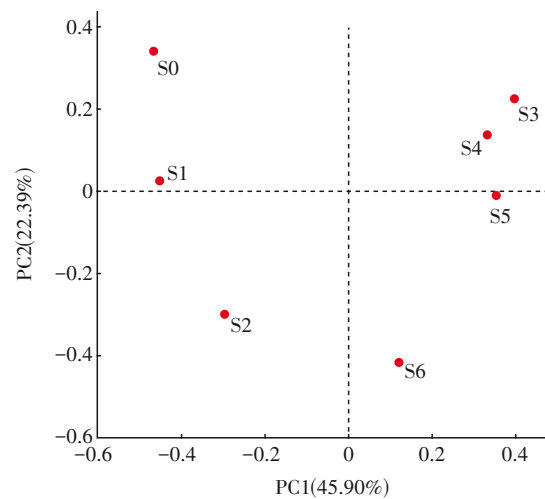


图5 污泥中门水平上微生物的相对丰度

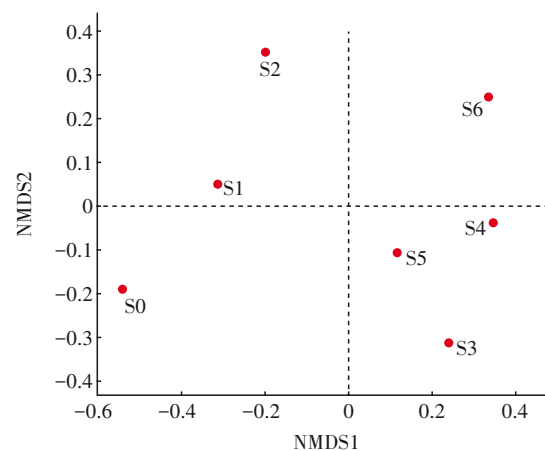
Fig.5 Relative abundance of microbial community at phylum level in sludge

该研究在 OTU 基础上采用多元统计方法对 7 个污泥样品中的微生物菌群结构进行比较分析, 基于 Unweighted Unifrac 的主坐标分析 (PCoA) 及非度量多维列 (NMDS) 分析结果见图 6。PCoA 分析结果表明, 其第一主成分和第二主成分的贡献率分别为

45.90% 和 22.39%, S0、S1 和 S2 的距离不大, S3、S4 和 S5 的距离相对较小, 但 S6 与其他样品的距离较大。这一结果与 NMDS 分析结果保持一致。



a. PCoA 分析结果



b. NMDS 分析结果

图6 基于 Unweighted Unifrac 的 PCoA 和 NMDS 分析结果

Fig.6 PCoA and NMDS analysis results based on Unweight Unifrac

3 结论

① 在 SBR 中接种脱水污泥, 运行 30 d 后成功培养出丝状菌 AGS。

② 投加 15 mg/L 的 RhB 可有效抑制丝状菌的过度增殖, 而投加 20 mg/L 的 RhB 会导致生化反应过程中产生大量气泡, 使得 AGS 伴随气泡溢出 SBR, 及时停止投加 RhB 有助于 AGS 的恢复和稳定运行。

③ 丝状菌 AGS 对 RhB 的去除率可保持在 67.4%~78.1%, 去除过程通过微生物吸附和转化来实现, 且以微生物吸附为主。

④ 微生物测序结果表明,投加RhB对与COD去除相关的菌群 *Bacteroidota* 无抑制作用,但对与N、P去除相关的丝状菌 *Proteobacteria* 和 *Chloroflexi* 有显著的抑制作用,这解释了系统对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP去除率的变化。

参考文献:

- [1] NASEEM K, ABRAR E, KHALID A, *et al.* Inorganic nanoparticles as a potential catalyst for the reduction of rhodamine B dye: a critical review [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2024, 163: 112367.
- [2] ZHANG B, FAN J W, LI W, *et al.* Low salinity enhances azo dyes degradation in aerobic granular sludge systems: performance and mechanism analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 372: 128678.
- [3] LI F, XIA Q, GAO Y Y, *et al.* Anaerobic biodegradation and decolorization of a refractory acid dye by a forward osmosis membrane bioreactor [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2018, 4: 272-280.
- [4] PAN K, GUO T, LIAO H L, *et al.* Adding iron shavings in activated sludge system to enhance removal of refractory organics and nitrogen for textile-dyeing wastewater [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(5): 110999.
- [5] HAN T X, ZHENG J J, HAN Y T, *et al.* Comprehensive insights into core microbial assemblages in activated sludge exposed to textile-dyeing wastewater stress [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148145.
- [6] LIU S L, ZHOU M, DAIGGER G T, *et al.* Granule formation mechanism, key influencing factors, and resource recycling in aerobic granular sludge (AGS) wastewater treatment: a review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 338: 117771.
- [7] LIU J, HAN X S, ZHU X W, *et al.* A systemic evaluation of aerobic granular sludge among granulation, operation, storage, and reactivation processes in an SBR [J]. *Environmental Research*, 2023, 235: 116594.
- [8] ZHANG B, HUANG S C, WU L, *et al.* Micro (nano) plastic size and concentration co-differentiate the treatment performance and toxicity mechanism in aerobic granular sludge systems [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 457: 141212.
- [9] HE Q L, ZHANG J, GAO S X, *et al.* Comprehensive comparison between non-bulking and bulking aerobic granular sludge in microbial communities [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122151.
- [10] GUO T, QIAN Z, LI F, *et al.* Aerobic granular sludge coupling with Fe-C in a continuous-flow system treating dyeing wastewater on-site [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 30: 103065.
- [11] FIGUEROA M, VAL DEL RÍO A, CAMPOS J L, *et al.* Filamentous bacteria existence in aerobic granular sludge reactors [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2015, 38: 841-851.
- [12] HAN X S, JIN Y, YU J G. Rapid formation of aerobic granular sludge by bioaugmentation technology: a review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 437: 134971.
- [13] SUN Z, ZHANG J M, WANG J, *et al.* Direct start-up of aerobic granular sludge system with dewatered sludge granular particles as inoculant [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 326: 116540.
- [14] XIA J T, YE L, REN H Q, *et al.* Microbial community structure and function in aerobic granular sludge [J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2018, 102: 3967-3979.

作者简介:李松波(1986-),男,黑龙江大兴安岭人,硕士,副教授,主要从事污水处理及其资源化利用研究。

E-mail:315647590@qq.com

收稿日期:2025-02-19

修回日期:2025-04-04

(编辑:刘贵春)