

安莹,张慧敏,刘韵,等.高负荷活性污泥工艺污泥膨胀成因及控制[J].中国环境科学,2025,45(2):768-775.

An Ying¹, Zhang Hui-min¹, Liu Yun, et al. Causes and control of sludge bulking in high load activated sludge process [J]. China Environment Science, 2025,45(2):768-775.

高负荷活性污泥工艺污泥膨胀成因及控制

安莹¹,张慧敏¹,刘韵²,陈广²,唐晨¹,周振^{1*} (1.上海电力大学环境与化学工程学院,上海 200090; 2.上海城投污水处理有限公司,上海 201203)

摘要: 为探究活性污泥高负荷运行时发生污泥膨胀的原因及控制策略,考察了污泥负荷对污泥性质、微生物群落整体结构、丝状菌属、胞外聚合物分泌菌属、参与胞外多糖合成功能基因簇等的影响,并研究了投加香兰素对污泥膨胀的控制效果.结果表明,污泥发生膨胀后,胞外聚合物中蛋白质与多糖之比下降,限制了蛋白质发挥生物絮凝作用,导致污泥沉降性能变差.高负荷运行时发生污泥膨胀的成因是 *Sphaerotilus* 主导的丝状菌膨胀和 *Flavobacterium* 主导的粘性膨胀.投加香兰素有效抑制了 *Sphaerotilus* 繁殖,但仍发生由 *Thauera* 和 *Zoogloea* 主导的粘性膨胀.宏基因组分析揭示,参与胞外多糖合成的 *alg*、*eps* 和 *pel* 功能基因簇丰度在膨胀污泥中分别增加了 0.4~0.5 倍、0.8~1.1 倍和 10.3~15.7 倍,是胞外多糖含量上升的潜在成因.

关键词: 污泥膨胀; 高负荷运行; 香兰素; 微生物群落; 胞外多糖

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)02-0768-08

Causes and control of sludge bulking in high load activated sludge process. AN Ying¹, ZHANG Hui-min¹, LIU Yun², CHEN Guang², TANG Chen¹, ZHOU Zhen^{1*} (1.College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2.Shanghai Chengtou Waste Water Treatment Co., Ltd., Shanghai 201203, China). *China Environment Science*, 2025,45(2): 768-775

Abstract: To investigate the causes of sludge bulking during high load operation of activated sludge and the control effect of adding vanillin, this study examined the overall changes in microbial community, filamentous bacteria genus, extracellular polymeric substance secreting bacteria genus, and functional gene clusters involved in exopolysaccharides synthesis when operating under conventional load or high load with or without vanillin addition. The results indicated that after sludge bulking occurred, there was a decrease in the proportion of proteins to polysaccharides in extracellular polymeric substances. This reduction limited the ability of proteins to act as a biological flocculant and resulted in poorer settling performance of the sludge. The causes of sludge bulking during high load operation were attributed to filamentous bacteria dominated by *Sphaerotilus* and viscous bulking led by *Flavobacterium*. The addition of vanillin effectively inhibited the proliferation of *Sphaerotilus* but still allowed for viscous bulking dominated by *Thauera* and *Zoogloea*. Metagenomic sequencing analysis revealed that the abundance of *alg*, *eps*, and *pel* functional gene clusters involved in exopolysaccharide synthesis increased by 0.4~0.5 times, 0.8~1.1 times, and 10.3~15.7 times, respectively. These findings suggest that these gene clusters may be potential factors contributing to the substantial increase in exopolysaccharide content observed in bulking sludge.

Key words: sludge bulking; high load operation; vanillin; microbial community; exopolysaccharides

在传统活性污泥处理工艺中,进水中约 40%~60%的有机物被转化为二氧化碳并排放到大气中.随着有机物去除过程中高能耗和高碳排放问题逐渐受到重视,寻找技术经济可行、能够捕获污水碳源的解决方案已成为城镇污水处理领域的新兴趋势^[1].高负荷活性污泥工艺能够在较短时间内实现污水中有机物的浓缩或去除,产生含有较多有机质的剩余污泥,满足了当前城镇污水处理领域高效、低耗、可持续的要求^[2].然而,较高的污泥负荷会导致污泥胞外聚合物(EPS)大量分泌^[3].EPS 含量上升有利于

活性污泥实现对污水中有机物的捕获、吸附和储存^[4],但也会导致污泥沉降性能下降,并引发污泥膨胀^[5].污泥膨胀可分为两种类型,一是过低的负荷、温度、pH 值或溶解氧造成丝状菌属快速增殖引起的丝状菌膨胀^[6],二是负荷过高或温度过低造成某些 EPS 菌属过度繁殖引起的非丝状菌膨胀,也称为粘

收稿日期: 2024-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878403);上海市科委项目(22dz1209206)

* 责任作者, 教授, zhouzhen@shiep.edu.cn

性膨胀^[7]。目前,在高负荷活性污泥工艺运行过程中发生污泥膨胀的微观机理方面研究甚少,明晰这一机理有助于解决其污泥膨胀问题。

污泥膨胀可通过投加氯、双氧水等化学药剂杀灭丝状菌进行控制,或者通过调控曝气量等运行参数进行控制^[8]。然而,这些方法存在运行成本高、影响功能菌群生长和代谢等问题。微生物群体感应淬灭技术是通过投加群体感应抑制剂干扰和阻断信号分子的分泌、识别,在不干扰微生物生命活动的前提下,有效调控微生物群落结构和功能^[9]。香兰素作为一种天然香料,已被证明对活性污泥没有毒害作用,并且能作为群体感应抑制剂有效控制低溶解氧诱导的污泥膨胀^[10]。然而,其在高负荷条件下对污泥膨胀的调控效果与适用性尚缺乏系统研究。本研究围绕高负荷条件下的活性污泥膨胀现象及控制策略,揭示污泥膨胀的微生物学驱动机制,并评估香兰素在控制污泥膨胀中的作用及效果。研究成果将为高负荷污水处理系统中污泥膨胀的科学理解提供理论依据,并为开发低成本、高效的污泥膨胀控制策略提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行

表 1 SBR 进水水质

Table 1 Influent water quality in SBR operations

水质指标	COD(mg/L)	TN(mg/L)	TP(mg/L)
范围	400~450	9~11	3~4

序批式反应器(SBR)具有操作灵活,耐冲击负荷的优点,本研究搭建了 3 套 SBR,分别在常规负荷、高负荷(未投加香兰素)、高负荷(投加 100mg/L 香兰素^[11])条件下运行。接种污泥均取自上海市某污水处理厂好氧池,污泥浓度为 3.0g/L。进水按照典型生活污水配制,以乙酸钠为主要碳源,添加少量淀粉和蛋白胨,氯化铵为氮源,磷酸二氢钾为磷源,同时添加微量元素液以保证污泥微生物生长繁殖所需的营养^[12],具体水质见表 1。试验过程中控制 pH 值为 7~8,溶解氧浓度为 2mg/L,排水比为 50%。常规负荷 SBR 的进水 COD 负荷为 0.6kgCOD/(kgMLSS·d),运行周期为 8h,包括进水 18min,反应 360min,沉淀 60min,静置 35min,出水 7min。高负荷 SBR 的进水 COD 负荷为 1.8kgCOD/(kgMLSS·d)^[13],运行周期为 4h,包括

进水 18min,反应 120min,沉淀 60min,静置 35min,出水 7min。3 套 SBR 均运行 60 个周期。

1.2 检测和分析方法

COD、TN、TP 和污泥容积指数(SVI)采用国家标准方法测定^[14]。EPS 采用热法离心分层法提取,其中胞外多糖(PS)和蛋白质(PN)分别采用蒽酮比色法和 Lowry 法测定^[15]。活性污泥形态采用荧光显微镜(Zeiss Axio Scope. A1,蔡司,德国)进行观察,并且使用图像处理软件 Image J 得到污泥絮体的面积 A 和周长 P ,对 $\ln P$ 和 $\ln A$ 进行线性拟合所得斜率为分形维数^[16]。溶解氧采用便携式溶氧仪(HQ-30d,哈希,美国)测定。基因组 DNA 采用 FastDNA 自旋试剂盒提取,16S rRNA 基因的 V3~V4 区域采用 338F(5'-ACTCCTACG-GGAGGCAGCAG-3')和 806R(5'-GGACTACHVGG-GTWTCTAAT-3')为引物进行 PCR 扩增,序列处理委托上海美吉生物医药科技有限公司基于 Illumina MiSeq 测序平台进行,并在其平台进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 污泥沉降性能分析

活性污泥絮体结构与沉降性能密切相关,絮体结构越密实沉降性能越好,絮体结构越松散则沉降性能越差^[17]。在 60 个周期的运行过程中,常规负荷 SBR 的活性污泥絮体结构紧密、边缘清晰,未观察到丝状菌(图 1(a)和图 1(b)),SVI 值在 80~100mL/g 间波动(图 2),未发生污泥膨胀。分形维数可以描述颗粒与微小絮体在复杂絮体结构内部的分布情况,适合分析絮体结构的形成和生长^[18]。常规负荷 SBR 第 6 个和第 60 个周期的分形维数分别为 1.25 和 1.26,说明絮体结构规则并且生长良好。高负荷 SBR 运行至第 40 个周期时 SVI 值仍小于 150mL/g;继续运行 2 个周期,未投加香兰素的活性污泥 SVI 值升高至 160mL/g,进入微膨胀阶段^[19],分形维数为 1.33(图 1(c));第 44 个周期时,活性污泥 SVI 值超过 250mL/g,进入恶性膨胀阶段,第 60 个周期时,观察到大量无序生长的丝状菌相互交织在絮体表面(图 1(d)),分形维数升高为 1.49,说明随着污泥膨胀的恶化,絮体形状变得不规则并且边界粗糙,不利于污泥的沉降^[20];投加香兰素的活性污泥未发生污泥膨胀的絮体中有少量丝状菌(图 1(e)),第 56 个周期后,活性污泥 SVI 值上升至 158mL/g,此后处于微膨胀阶段,同时观察到丝状菌从絮体内部向外伸长形成网状结

构与菌胶团共生(图 1(f)),分形维数也在第 60 个周期

升高为 1.37^[21].

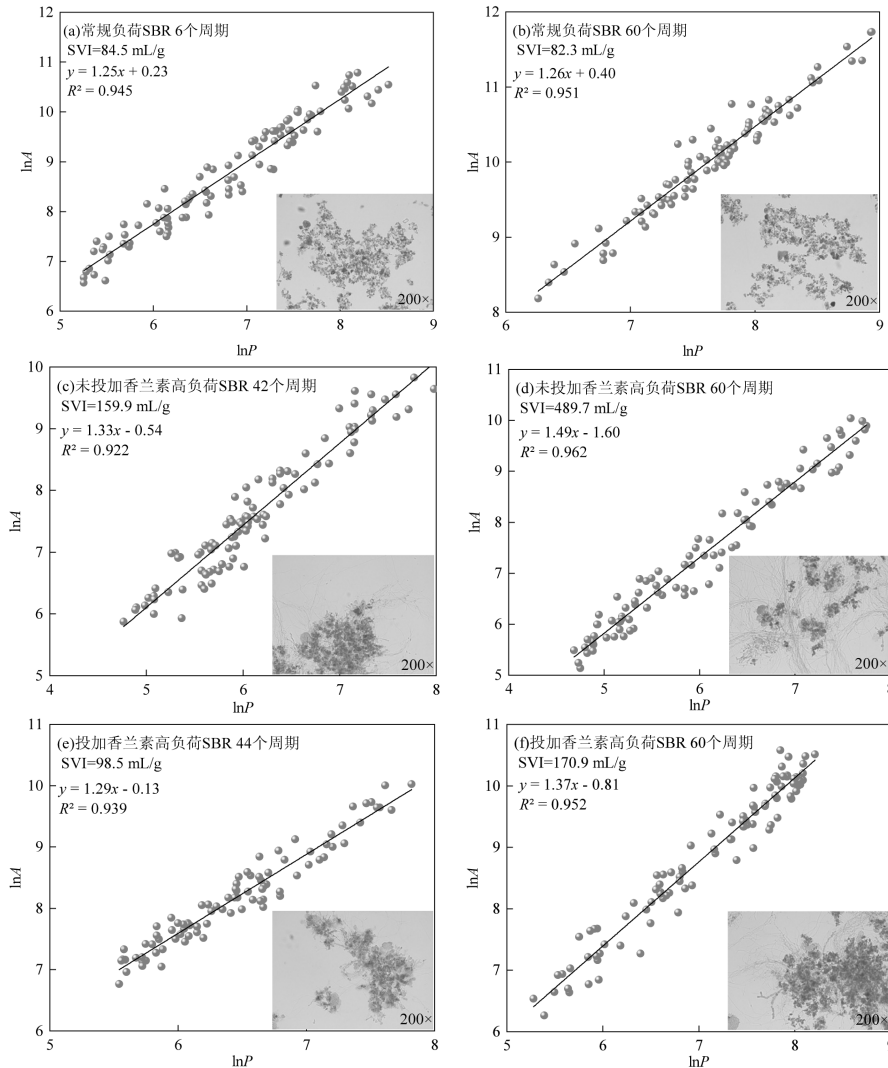


图 1 不同运行周期时常规负荷 SBR 和高负荷 SBR 活性污泥镜检和分形维数

Fig.1 Microscopy inspection and fractal dimension analysis of activated sludge in conventional load SBR and high load SBR after different operating cycles

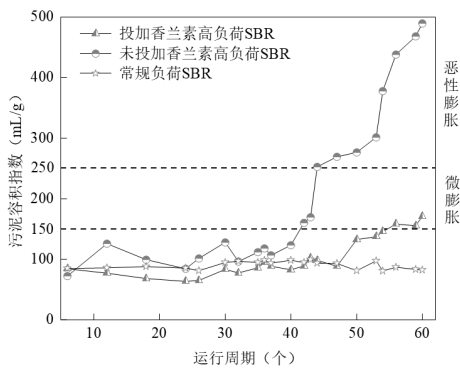


图 2 常规负荷 SBR 和高负荷 SBR 污泥容积指数随运行周期的变化

Fig.2 Variations of SVI in conventional load SBR and high load SBR with operational cycles

2.2 EPS 含量变化分析

活性污泥是微生物的聚集体,丝状菌是其絮体的骨架,菌胶团可以通过分泌 EPS 附着在骨架上^[11]. EPS 的含量和组成对微生物聚集体的结构、絮体稳定性和沉降性能具有重要影响^[22].对比常规负荷 SBR,高负荷 SBR 在污泥膨胀过程中,EPS 中 PN 和 PS 的含量均显著增加,但 PN/PS 却呈明显下降趋势(图 3).EPS 中 PS 主要来源于内源呼吸的分解作用,活性污泥在高负荷条件下运行时微生物代谢旺盛,过量的有机物会被转化为 PS^[23].PN 主要来源于吸附的外源有机物的和微生物自身代谢产物^[24].EPS 中的疏水官能团对生物絮凝作用有积极影响,PN/PS

降低会引起 PS 占据 EPS 的空间提升,进而限制带负电的疏水 PN 的生物絮凝作用^[25].投加香兰素后可以减少 EPS 中过量 PS 的产生,从而抑制污泥微膨胀后沉降性能进一步恶化.

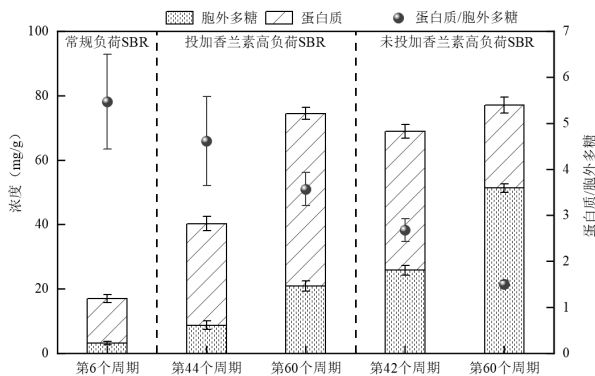


图3 不同运行周期时常规负荷 SBR 和高负荷 SBR 活性污泥中蛋白质和胞外多糖含量的变化

Fig.3 Changes of proteins and polysaccharides concentrations of conventional load SBR and high load SBR under different operating cycles

2.3 微生物群落结构分析

2.3.1 微生物多样性分析 第 60 个周期运行结束后,分别取常规负荷 SBR、未投加香兰素高负荷 SBR 和投加香兰素高负荷 SBR 中的活性污泥进行高通量测序分析,其多样性指数分析结果见表 2.所有样本的 Coverage 指数均大于 0.99,表明所生成的序列很好地反映了微生物的实际情况.对比常规负荷 SBR,代表微生物群落丰富度的 Ace 和 Chao 指数在高负荷 SBR 中均显著增加,而衡量微生物群落多样性的 Shannon 指数在未投加香兰素高负荷 SBR 中降低、在投加香兰素高负荷 SBR 中升高.这可能是由于高负荷 SBR 中丝状菌属、EPS 分泌菌属以及其它

菌属在污泥膨胀过程中的竞争作用,导致微生物群落多样性降低^[26].而香兰素的投加抑制了某些菌属的生长,缓解了微生物间的竞争作用.

表 2 常规负荷 SBR 和高负荷 SBR 活性污泥微生物多样性分析

Table 2 Richness and diversity estimators of microbial communities in conventional load SBR and high load SBR

样本	Coverage	Ace	Chao	Shannon
常规负荷 SBR	0.998	599	585	4.40
未投加香兰素高负荷 SBR	0.995	749	718	4.33
投加香兰素高负荷 SBR	0.995	790	774	4.60

2.3.2 微生物群落结构门水平分析 在常规负荷 SBR 中,优势菌门(相对丰度 >1%)依次为 Proteobacteria(30.5%)、Chloroflexi(27.4%)、Actinobacteriota(20.7%)、Patescibacteria(6.4%)、Bacteroidota(4.9%)、Acidobacteriota(2.3%)、Gemmatimonadota(2.3%)和 Firmicutes(1.8%)等(图 4).对比常规负荷 SBR,Proteobacteria、Bacteroidota 和 Firmicutes 相对丰度在高负荷 SBR 中均明显上升,未投加香兰素组为 71.9%、15.9%和 6.1%,投加香兰素组则为 60.7%、20.4%和 9.4%.Proteobacteria 在有机物降解过程中发挥重要作用,包括多种分泌 EPS 的功能属^[27].Bacteroidota 可参与蛋白质循环过程,能将蛋白质降解为氨基酸等小分子物质^[28].Firmicutes 含有多种好氧和兼性厌氧细菌,可产生大量与有机物降解密切相关的水解酶^[29].此外,对比常规负荷 SBR,高负荷 SBR 中 Chloroflexi、Actinobacteriota、Patescibacteria、Acidobacteriota 和 Gemmatimonadota 等可能无法适应该环境而衰减.

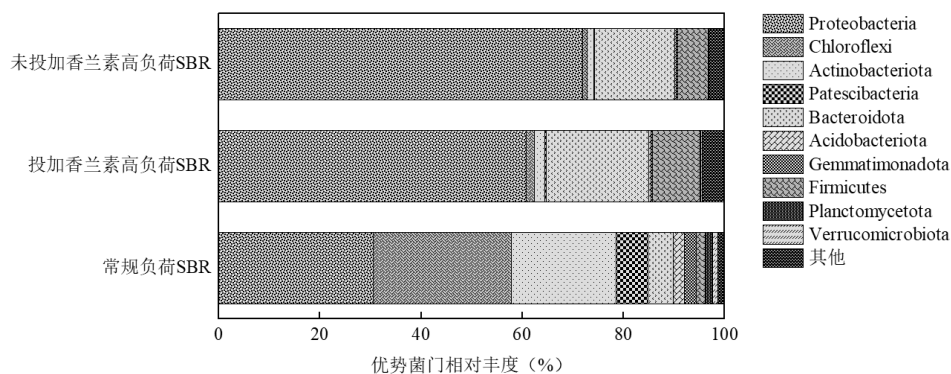


图 4 常规负荷 SBR 和高负荷 SBR 活性污泥门水平上的微生物群落组成

Fig.4 The relative abundances of the predominant phylogenetic groups of conventional load SBR and high load SBR at phylum level

2.3.3 微生物群落结构属水平分析 在高负荷条件下,丝状菌的过度繁殖和 EPS 的异常分泌是导致污泥膨胀的主要原因.因此,在属水平上重点分析了丝状菌属和 EPS 分泌相关功能菌属相对丰度的变化情况(图 5).常规负荷 SBR 中以 *Sphaerotilus*、*Haliscomenobacter* 和 *Thiothrix* 等为代表的丝状菌属相对丰度分别为 0.01%、0.01%和 0%,在未投加香兰素高负荷 SBR 和投加香兰素高负荷 SBR 中,*Sphaerotilus*、*Haliscomenobacter* 和 *Thiothrix* 相对丰度分别上升至 8.55%、0.12%、0.05%和 1.44%、0.19%、0.16%.*Sphaerotilus* 过量繁殖会导致污泥沉降性能变差而发生膨胀^[30],广泛存在于发生污泥膨胀的污水处理厂中^[31],香兰素的投加有效抑制了 *Sphaerotilus* 的生长,与 Shi 等^[10]研究结果相符. *Haliscomenobacter* 是菌丝细长的革兰氏阴性菌,过度生长会导致污泥絮体尺寸减小,沉降性能变差^[32].*Thiothrix* 对污泥的表观粘度和氧传递有负面影响^[33].

高负荷 SBR 发生污泥膨胀后,*Thauera*、*Zoogloea* 和 *Flavobacterium* 等与 EPS 分泌相关功能菌属的相对丰度大幅度上升,对比常规负荷 SBR 增

加了 178~2795 倍.*Thauera* 和 *Zoogloea* 的富集会产更多 EPS 包裹在细胞表面,尤其会使 PS 含量上升,引发粘性膨胀^[34-35].*Flavobacterium* 是革兰氏阴性菌,具有合成聚羟基脂肪酸和 EPS 功能,对其生长的抑制可以有效控制 PS 的分泌,改善污泥沉降性能^[36-37].

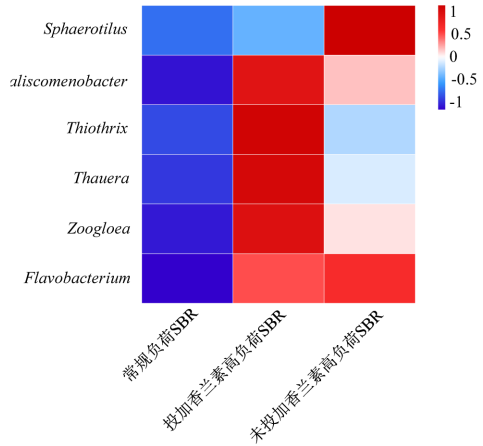


图 5 常规负荷 SBR 和高负荷 SBR 活性污泥中丝状菌属和 EPS 分泌相关功能菌属相对丰度的变化

Fig.5 Changes of relative abundance of filamentous bacteria and EPS secretion-related functional bacteria in conventional and high-load SBR activated sludge

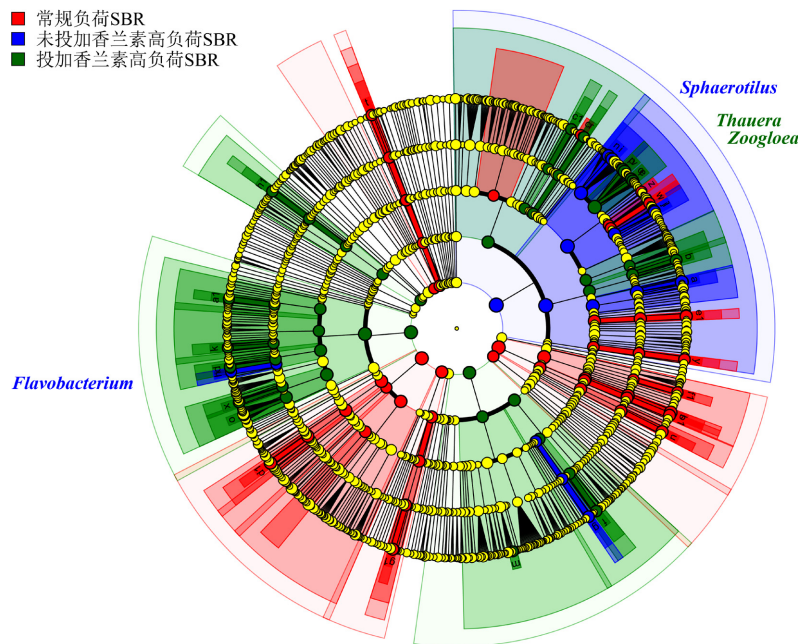


图 6 常规负荷 SBR 和高负荷 SBR 活性污泥微生物群落多级物种差异判别分析

Fig.6 LEfSe multi-level species of activated sludge microbial community between conventional SBR and high-load SBR

2.3.4 微生物多级物种差异判别分析 图 6 显示了常规负荷和高负荷 SBR 中活性污泥多级物种差异判别分析.图中不同颜色节点代表在组内显著富

集,且对组间差异性存在影响的微生物种群.在线性判别分析阈值为 3.8 时,其差异性物种分别有 11、15 和 8 个.高负荷 SBR 的两套反应器都发生了污泥膨

胀现象,其中投加香兰素组具有代表性的差异性功能属包括 *Thauera* 和 *Zoogloea* 等,而未投加组则包括 *Sphaerotilus* 和 *Flavobacterium* 等.综合分析发现,高负荷 SBR 污泥膨胀的成因是 *Sphaerotilus* 主导的丝状菌膨胀和 *Flavobacterium* 主导的粘性膨胀.投加香兰素有效抑制了 *Sphaerotilus* 繁殖,但仍发生由 *Thauera* 和 *Zoogloea* 主导的粘性膨胀.

2.4 宏基因组分析

通过对 3 套 SBR 活性污泥的宏基因组分析,筛选出调控海藻酸盐生成的 *alg*、调控 EPS 生成的 *eps* 和调控果胶裂解酶生成的 *pel3* 种参与 PS 合成的功能基因簇^[38](图 7).相比常规负荷 SBR,投加和未投加香兰素的高负荷 SBR 中 *alg* 基因簇的总丰度增加了 0.4 和 0.5 倍.Wan 等^[39]研究表明,*Flavobacterium* 相对丰度上升会促进 *alg* 基因簇的表达,合成更多的 PS.*eps* 属于革兰氏阳性细菌基因簇,通常由 15 个基

因(*epsA* ~ *epsO*)组成.本研究在膨胀污泥中检测出了 *epsF*、*epsJ* 和 *epsN*.其中 *epsF* 和 *epsJ* 是糖基转移酶基因,负责将单糖转运到脂载体上构成重复单位^[40].*eps* 基因簇可以调控 EPS 产量,其缺失会导致某些菌株丧失合成 EPS 的能力^[41].对比常规负荷 SBR,高负荷 SBR 污泥的 *eps* 基因簇总丰度上升了 0.8~1.1 倍.研究表明,EPS 和 SVI 具有显著相关性,EPS 含量上升会导致污泥 SVI 升高,污泥的沉降性能和疏水性降低而发生粘性膨胀^[42].果胶裂解酶对细胞间相互作用和表面粘附起重要作用,还能抑制某些抗生素对细胞的伤害,其生物合成与 *pel* 基因簇有关^[43].在高负荷条件下,所检测的 *pel* 基因簇(*pel*、*pelA*~*pelG*)的丰度均显著上升,总丰度对比常规负荷 SBR 增加了 10.3~15.7 倍.其中,*pelD*~*pelG* 是生物膜形成所必需的^[44],丰度对比常规负荷 SBR 上升 18.7~27.2 倍.

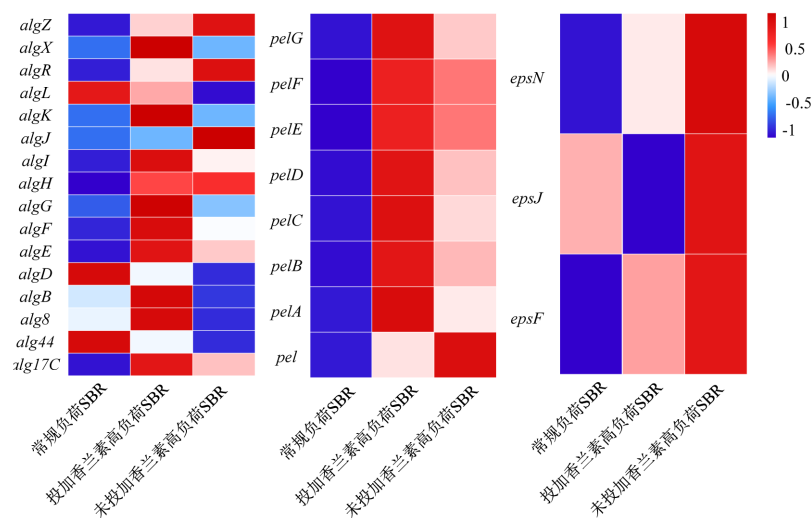


图 7 常规负荷 SBR 和高负荷 SBR 活性污泥中与胞外多糖合成有关功能基因簇丰度变化

Fig.7 Changes in abundance of functional gene clusters related to exopolysaccharide synthesis in conventional load SBR and high load SBR

3 结论

本研究旨在探究活性污泥高负荷运行时污泥膨胀的成因及控制策略,重点考察了污泥负荷对微生物群落结构、EPS 分泌及其 PS 相关功能基因的影响,同时评估了香兰素对污泥膨胀的抑制效果.基于全面的实验研究与数据分析,得出以下主要结论:

3.1 运行至 60 个周期,常规负荷 SBR 未发生膨胀现象,污泥絮体结构紧密;投加香兰素高负荷 SBR 污

泥处于轻微膨胀状态,表明香兰素在一定程度上缓解了膨胀问题.未投加香兰素高负荷 SBR 污泥处于恶性膨胀状态,丝状菌数量远超过菌胶团数量,显著降低了污泥的沉降性能.

3.2 高负荷 SBR 污泥 PS 含量随膨胀程度上升呈显著上升趋势,PN/PS 随膨胀程度上升呈下降趋势.PN 是 EPS 中发挥生物絮凝作用的主要成分,PN/PS 下降可能会限制 PN 发挥生物絮凝作用,从而导致污泥沉降性能下降.

3.3 高负荷 SBR 发生污泥膨胀的成因是 *Sphaerotilus* 主导的丝状菌膨胀和 *Flavobacterium* 主导的粘性膨胀.投加香兰素有效抑制了 *Sphaerotilus* 繁殖,但仍发生由 *Thauera* 和 *Zoogloea* 主导的粘性膨胀,揭示了香兰素在控制特定类型污泥膨胀方面具有局限性.

3.4 宏基因组分析表明对比常规负荷 SBR,高负荷 SBR 污泥所筛选出的 3 种参与 PS 合成的功能基因簇 *alg*、*eps* 和 *pel* 丰度大幅度上升,为理解 PS 含量大幅度上升提供了数据支撑.表明在高负荷条件下,PS 合成的增加是造成污泥膨胀的潜在原因之一.

参考文献:

- [1] Wang H C, Jiang C C, Wang X, et al. Application of internal carbon source from sewage sludge: A vital measure to improve nitrogen removal efficiency of low C/N wastewater [J]. *Water*, 2021,13(17): 2338.
- [2] Cao S B, Lu D, Phua K M, et al. Organics transformation and energy production potential in a high rate A-stage system: A demo-scale study [J]. *Bioresource Technology*, 2020,295:122300.
- [3] 詹巍.基于污水碳源捕获的菌藻共生 SBR 脱氮及污泥产甲烷发酵效能与机制 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
Zhan W. Performance and mechanism of bacteria - algae symbiosis SBR nitrogen removal and sludge methanogenic fermentation based on sewage carbon capture [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [4] Rahman A, Meerburg F A, Ravadagundhi S, et al. Bioflocculation management through high-rate contact-stabilization: A promising technology to recover organic carbon from low-strength wastewater [J]. *Water Research*, 2016,104(1):485-496.
- [5] 李亚男,闫冰,郑蕊,等.一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中胞外聚合物变化特征 [J]. *环境科学学报*, 2022,42(11):106-116.
Li Y N, Yan B, Zheng R, et al. Study on the characteristics of extracellular polymeric substances changes during the sludge bulking occurrence and restoration in one-stage combined partial nitrification and Anammox process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022,42(11): 106-116.
- [6] 潘红光,张莹婷,折洋洋,等.城市污水处理过程污泥膨胀识别与抑制综述 [J]. *控制理论与应用*, 2023.
Pan H G, Zhang Y T, Zhe Y Y, et al. Review on identification and suppression of sludge bulking in municipal wastewater treatment process [J]. *Control Theory & Applications*, 2023.
- [7] 黄潇潇.好氧颗粒污泥反应器启动和运行中的膨胀研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2022.
Huang X X. Study on Bulking during start-up and operation of aerobic granular sludge reactor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [8] 杨阔,林慧敏,陈坦,等.膨胀污泥中主要丝状菌及生物调控措施研究进展 [J]. *应用化工*, 2023,52(12):3365-3370.
Yang K, Lin H M, Chen T, et al. Research progress on dominant filamentous bacteria and biological control measures in bulking sludge [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023,52(12):3365-3370.
- [9] 赵畅,王文昭,徐期勇.群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 [J]. *环境科学*, 2016,37(12):4720-4726.
Zhao C, Wang W Z, Xu Q Y. Isolation of quorum quenching bacteria and their function for controlling membrane biofouling [J]. *Environmental Science*, 2016,37(12):4720-4726.
- [10] Shi H X, Wang X, Guo J S, et al. A new filamentous bulking control strategy: The role of N-acyl homoserine lactone (AHL)-mediated quorum sensing in filamentous bacteria proliferation within activated sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022,428:132097.
- [11] Shi H X, Wang J, Liu S Y, et al. New insight into filamentous sludge bulking: Potential role of AHL-mediated quorum sensing in deteriorating sludge floc stability and structure [J]. *Water Research*, 2022,212:118096.
- [12] 施洪鑫.AHLs 介导的群感效应对丝状菌膨胀的调控机制 [D]. 重庆:重庆大学, 2021.
Shi H X. Role of n-acyl homoserine lactone mediated quorum sensing in filamentous bacteria bulking within activated sludge [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [13] 陈嘉亮.城市污水高负荷活性污泥工艺碳分离试验研究 [D]. 唐山:华北理工大学, 2020.
Chen J L. Experimental research on separating organic carbon from municipal wastewater by high-rate activated sludge system [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020.
- [14] 国家环保局.水和废水监测分析方法(第 4 版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. *Water and wastewater monitoring and analysis methods (4th)* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [15] 郑月.填料对污泥原位侧流减量工艺强化作用研究 [D]. 上海:上海电力大学, 2020.
Zhen Y. Investigating the effect of packing carriers on in situ side-stream sludge reduction system [D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2020.
- [16] Li Z H, Guo Y, Hang Z Y, et al. Simultaneous evaluation of bioactivity and settleability of activated sludge using fractal dimension as an intermediate variable [J]. *Water Research*, 2020,178:115834.
- [17] 章晨.低压光引发疏水改性聚丙烯酰胺的制备与絮凝性能研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2022.
Zhang C. Study on the preparation and flocculation properties of low pressure light induced hydrophobically modified polyacrylamide [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [18] 李冬梅,施周,梅胜,等.絮凝条件对絮体分形结构的影响 [J]. *环境科学*, 2006,27(3):488-492.
Li D M, Shi Z, Mei S, et al. Effects of flocculation conditions on aggregates fractal structures [J]. *Environmental Science*, 2006,27(3): 488-492.
- [19] 陈浩林,彭轶,安东,等.分段进水多级 A/O 工艺污泥膨胀控制专家系统 [J]. *中国给水排水*, 2021,37(8):153-159.
Chen H L, Peng Y, An D, et al. Expert system for sludge bulking control in multi-stage A/O process [J]. *China Water & Wastewater*,

- 2021,37(8):153-159.
- [20] 李 倩. 城镇污水脱氮除磷系统污泥膨胀生物学成因及控制措施研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- Li Qian. An study on biological causes and control measures of sludge bulking in urban sewage nitrogen and phosphorus removal system [D]. Qingdao: Qingdao Technology University, 2015.
- [21] Li Z H, Guo Y, Hang Z Y, et al. Simultaneous evaluation of bioactivity and settleability of activated sludge using fractal dimension as an intermediate variable [J]. *Water Research*, 2020,178:115834.
- [22] Peng S N, Wang Z Y, Yu P F, et al. Aggregation and construction mechanisms of microbial extracellular polymeric substances with the presence of different multivalent cations: Molecular dynamic simulation and experimental verification [J]. *Water Research*, 2023, 232:119675.
- [23] Huang L, Jin Y, Zhou D, et al. A review of the role of extracellular polymeric substances (EPS) in wastewater treatment systems [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022,19:12191.
- [24] An Q, Chen Y, Tang M, et al. The mechanism of extracellular polymeric substances in the formation of activated sludge flocs [J]. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023,663:131009.
- [25] Li S, Duan G, Xi Y, et al. Insights into the role of extracellular polymeric substances (EPS) in the spread of antibiotic resistance genes [J]. *Environmental Pollution*, 2024,343:123285.
- [26] He Q, Zhang J, Gao S, et al. A comprehensive comparison between non-bulking and bulking aerobic granular sludge in microbial communities [J]. *Bioresource Technology*, 2019,294:122151.
- [27] 许炜怡, 黄凯文, 刘 崇, 等. 高氮负荷下硫自养反硝化菌群的胞外聚合物和信号分子特征 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(8):4314-4325.
- Xu W Y, Huang K W, Liu C, et al. Characterization of extracellular polymer substances and acyl-homoserine lactones of sulfur-based autotrophic denitrification microbial community under high nitrate loading [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(8):4314-4325.
- [28] 郝立图, 杨晓欢, 田端云, 等. 吸附剂对市政污水浓缩效能的影响 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(11):6174-6180.
- Hao L T, Yang X H, Tian D Y, et al. The influence of adsorbents on the concentration efficiency of municipal wastewater [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(11):6174-6180.
- [29] Cui H, Xu R, Yu Z, et al. Tank-dependence of the functionality and network differentiation of activated sludge community in a full-scale anaerobic/anoxic/aerobic municipal sewage treatment plant [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2023,17(3):36.
- [30] Lu X, Chen C L, Fu L, et al. Social network of filamentous *Sphaerotilus* during activated sludge bulking: Identifying the roles of signaling molecules and verifying a novel control strategy [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023,454:140109.
- [31] Ferreira R, Amado R, Padrão J, et al. The first sequenced *Sphaerotilus natans* bacteriophage- Characterization and potential to control its filamentous bacterium host [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2021, 97(4):fiab029.
- [32] Zhang B, Ning D L, Nostrand J D V, et al. The call for regional design code from the regional discrepancy of microbial communities in activated sludge [J]. *Environmental Pollution* 2021,273:116487.
- [33] Wu X W, Huang J, Lu Z C, et al. *Thiothrix eikelboomii* interferes oxygen transfer in activated sludge [J]. *Water Research*, 2019,151: 134-143.
- [34] Zhang H, Song S L, Jia Y Y, et al. Stress-responses of activated sludge and anaerobic sulfate-reducing bacteria sludge under long-term ciprofloxacin exposure [J]. *Water Research*, 2019,164:114964.
- [35] Kim H, Kim J, Ahn D. Effects of carbon to nitrogen ratio on the performance and stability of aerobic granular sludge [J]. *Environmental Engineering Research*, 2021,26(1):114-122.
- [36] Wen Q X, Liu S J, Lin X, et al. Rapid recovery of mixed culture polyhydroxyalkanoate production system from EPS bulking using azithromycin [J]. *Bioresource Technology*, 2022,350:126944.
- [37] Qiang J X, Zhou Z, Wang K Q, et al. Coupling ammonia nitrogen adsorption and regeneration unit with a high-load anoxic/aerobic process to achieve rapid and efficient pollutants removal for wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2020,170:115280.
- [38] Shi H X, Wang J, Liu S Y, et al. Potential role of AHL-mediated quorum sensing in inducing non-filamentous sludge bulking under high organic loading [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023,454(4): 140514.
- [39] Wan C L, Lee D J, Yang X, et al. Calcium precipitate induced aerobic granulation [J]. *Bioresource Technology*, 2015,176:32-37.
- [40] 田佳乐, 刘 洋, 李嘉雯, 等. 胞外多糖嗜热链球菌 *eps* 基因簇的表达及生物信息学分析 [J]. *中国食品学报*, 2021,21(11):244-251.
- Tian J L, Liu Y, Li J W, et al. Expression of *eps* gene cluster in *Streptococcus thermophilus* exopolysaccharide and bioinformatics analysis [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021,21(11):244-251.
- [41] 代安娜尔, 乔少婷, 孙思霖, 等. 嗜热链球菌 IMAU20246 胞外多糖基因簇及其表达分析 [J]. *微生物学报*, 2023,63(1):403-418.
- Dai A, Qiao S T, Sun S L, et al. Identification and expression profiling of exopolysaccharide gene cluster in *Streptococcus thermophilus* IMAU20246 [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2023,63(1):403-418.
- [42] 王 帅. 胞外多糖特性及其对颗粒污泥聚集性能及稳定性的影响机制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- Wang S. Characteristics of exopolysaccharide and its impacts mechanism on granular aggregation and stability [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [43] Gregory B W, Lindsey S M, Alex O, et al. Pel polysaccharide biosynthesis requires an inner membrane complex comprised of PelD, PelE, PelF, and PelG [J]. *Journal of Bacteriology*, 2020,202(8): e00684-19.
- [44] Whitfield G B, Marmont L S, Bundalovic-torma C, et al. Discovery and characterization of a Gram-positive Pel polysaccharide biosynthetic gene cluster [J]. *PLoS Pathogens*, 2020,16(4):1008281.

作者简介: 安 莹(1981-),女,山东滨州人,副教授,博士,主要从事污水处理与资源化利用研究.发表论文 30 余篇.anying007@163.com.