

盐度波动对好氧颗粒污泥形成及稳定性的影响

鞠鸿林, 毕学军*, 徐 杰

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

摘要:研究了实际污水中盐度波动对好氧颗粒污泥形成过程、污染物去除效能及微生物群落演替特性的影响。结果表明,频繁的盐度波动($\Delta C_{NaCl} > 3.84$ g/L)会显著抑制污泥颗粒化进程,系统内颗粒污泥比例最高仅为 24.57%,且颗粒结构松散、易解体。污泥胞外聚合物(EPS)受盐度波动影响较大,尤其是紧密结合型蛋白质(TB-PN),其含量在前 3 次波动过程中分别下降了 34.31%、12.54%和 47.35%。氮去除效能受盐度波动影响较小,系统内 NH_4^+-N 、TIN 去除率稳定在 99%和 50%左右,而 $PO_4^{3-}-P$ 去除能力在盐度波动过程中几乎完全丧失。高通量测序分析显示,微丝菌属(*Candidatus_Microthrix*)的相对丰度与颗粒比例及结构稳定性呈正相关,表明丝状菌在颗粒化过程中发挥了重要作用。

关键词:好氧颗粒污泥;盐度波动;胞外聚合物;污染物去除效能;微生物群落结构

中图分类号:TU992.3 文献标志码:A 文章编号:1673-4602(2025)01-0072-07

Effect of salinity fluctuation on the formation and stability of aerobic granular sludge

JU Honglin, BI Xuejun*, XU Jie

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: This study investigated the effect of salinity fluctuations in actual sewage on aerobic granular sludge (AGS). The specific details include AGS formation process, pollutant removal efficiency and microbial community succession characteristics. The results show that frequent salinity fluctuations ($\Delta C_{NaCl} > 3.84$ g/L) can significantly inhibit the sludge granulation process, the highest proportion of granular sludge in the system is only 24.57% and the AGS structure is loose. AGS is easy to disintegrate. It was also found that extracellular polymeric substances (EPS) were greatly affected by salinity fluctuations, especially the tightly bound protein (TB-PN) whose content decreased by 34.31%, 12.54% and 47.35% during the three fluctuations. Nitrogen removal efficiency was less affected by salinity fluctuations during the reactor operation. The removal rates of NH_4^+-N and TIN in the system were stable at 99% and 50%, while the removal capacity of $PO_4^{3-}-P$ was almost lost when the salinity fluctuated. High-throughput sequencing analysis showed that the relative abundance of *Candidatus_Microthrix* was positively correlated with the AGS proportion and the sludge

收稿日期:2023-05-17

基金项目:山东省自然科学基金青年项目(ZR2021QE274)

作者简介:鞠鸿林(1997—),男,山东潍坊人。硕士,研究方向为城镇水污染控制与资源化。E-mail:juhonglin111@163.com。

* 通信作者:毕学军(1969—),男,山东青岛人。博士,教授,博导,主要从事城镇水污染控制与资源化等方面的研究。

E-mail:xuejunb@126.com。

structural stability, which indicated that filamentous bacteria play an important role in the AGS formation process.

Key words: aerobic granular sludge; salinity fluctuation; extracellular polymeric substances; pollutant removal efficiency; microbial community structure

受潮汐作用及人类活动影响,沿海城市存在海水倒灌现象^[1]。大量海水进入城镇污水处理厂,导致进水中盐度升高且大幅波动,这不仅会抑制污水生物处理系统中微生物代谢活性、降低脱氮除磷效能,还会造成污泥膨胀,导致系统崩溃^[2]。

好氧颗粒污泥(Aerobic Granular Sludge, AGS)是一种在选择压力、胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substances, EPS)等因素影响下自聚集形成的特殊生物膜。与传统污水生物处理工艺相比,AGS具有沉降性能优良、污染物去除效率高等优点^[3]。此外,其特殊的层状结构能够保护微生物免受恶劣环境的影响,提高系统抗冲击负荷能力^[4]。目前,AGS工艺已成功应用于包括高盐废水在内的多种污废水的处理,对于高盐废水而言,其最高盐度适应能力(以 NaCl 计)可达 50 000 mg/L^[5]。但以往研究多集中于高基质-高盐度条件下 AGS 系统的构建及运行,针对低基质-盐度波动条件下污泥颗粒化过程的研究尚未见报道。

基于此,本研究以沿海地区实际污水为基质培养颗粒污泥,分析颗粒化过程中污泥理化性质、污染物去除效能及微生物群落演替的变化特性,以期明确盐度波动条件下影响 AGS 形成的关键因素。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行工况

本研究所用实验装置为圆柱形序批式反应器(SBR)。反应器有效容积 5 L,内径 11 cm,高径比 5。系统供气由曝气泵提供,气体流量计调节,控制表观气速为 (0.80 ± 0.03) cm/s;反应器排水比设置为 50%。实验装置的运行周期为 3 h,包括:10 min 进水期、50 min 厌氧搅拌期、102 min 曝气期、3 min 沉淀期、1 min 排水期及 14 min 闲置期(保证进水时系统处于厌氧状态);对应水力停留时间(HRT)为 6 h。实验过程中通过温控开关及伴热带控制反应器内温度为 (20 ± 2) °C。

1.2 实验用水及接种污泥

本研究的实验地点为青岛市某区污水厂。反应器进水为污水厂初沉池出水,其中 COD 浓度为 (158.38 ± 109.12) mg/L、 NH_4^+ -N 浓度为 (38.34 ± 10.43) mg/L、 NO_2^- -N 浓度为 (0.46 ± 0.23) mg/L、 NO_3^- -N 浓度为 (1.47 ± 0.80) mg/L、 PO_4^{3-} -P 浓度为 (4.37 ± 1.93) mg/L。由于该污水厂紧邻胶州湾,周边部分污水井海拔较低,进水盐度受海洋潮汐影响较为严重。如图 1 所示,系统运行过程中共经历了 4 次盐度波动,分别为第 13 天($\Delta C_{\text{NaCl}} = 3.84$ g/L)、第 40 天($\Delta C_{\text{NaCl}} = 6.72$ g/L)、第 92 天($\Delta C_{\text{NaCl}} = 5.06$ g/L)和第 114 天($\Delta C_{\text{NaCl}} = 6.46$ g/L)。

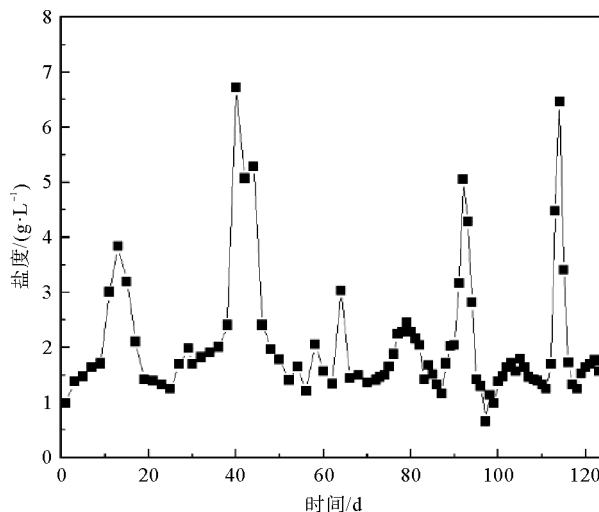


图 1 系统进水盐度随运行时间的变化

接种污泥取自该厂二沉池回流污泥,污泥经 150 μm 筛网过滤,闷曝 24 h 后接入反应器,接种后混合液悬浮固体浓度(MLSS)为 3500 mg/L,污泥体积指数(SVI_{30})为 202.86 mL/g。

1.3 分析方法

COD、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P 及 MLSS 等常规指标按照《水和废水监测分析方法》^[6]中的标准方法进行检测。进水盐度采用德国 WTW 多参数便携式水质分析仪检测。污泥宏观及微观形态通过光学显微镜、体式显微镜及扫描电子显微镜(SEM)观测。采用热提取法^[7]对污泥 EPS 进行提取,而

后使用福林酚法^[8]与硫酸-苯酚法^[9]对其中的蛋白质(PN)与多糖(PS)含量进行检测。利用湿式筛分法对污泥粒径进行监测。微生物群落结构采用高通量测序进行分析,选定引物名称为 338F_806R,样品冻干后送上海美吉生物公司检测分析。

2 结果与讨论

2.1 盐度波动对污泥颗粒化过程的影响

对实验期间污泥特性变化情况进行分析,以明确盐度波动对污泥颗粒化过程的影响。如图 2 所示,污泥在反应器运行前期表现出明显颗粒化趋势,至第 35 天时,颗粒污泥占比已达 18.28%, SVI_{30} 也降至 57.78 mL/g,接近颗粒成熟所要求的 50 mL/g^[10],表明低于 3.84 g/L 的盐度波动并不会对颗粒化过程产生明显影响。但当盐度波动幅度达 6.72 g/L 时(第 40 天),反应器内污泥沉降性迅速下降, SVI_{30} 在 26 d 内升高至 123.34 mL/g,大量絮状污泥随出水排出系统,导致 MLSS 由 3265 mg/L 降至 1735 mg/L。与絮状污泥相比,AGS 表现出较强的抗盐度冲击能力,其相对含量在第 70 天时升高至 24.57%。对该阶段污泥形貌进行分析(图 3(a)),可见颗粒结构松散,孔隙度较高;高倍率 SEM 图像(图 3(b))显示,颗粒表面微生物呈团簇状聚集,且内部包覆大量丝状菌。研究表明,丝状菌对污泥颗粒化过程的影响具有两面性:污泥内部一定比例的丝状菌能够发挥骨架支撑作用,有利于颗粒化的进行,但丝状菌的过度增殖会导致颗粒解体,不利于 AGS 系统的稳定运行^[11]。在本研究中,丝状菌大多分布于颗粒内部,并未外向伸展,这使得其不仅能够为微生物提供附着位点,还能够维持颗粒结构稳定性,提高系统抵抗盐度冲击的能力。

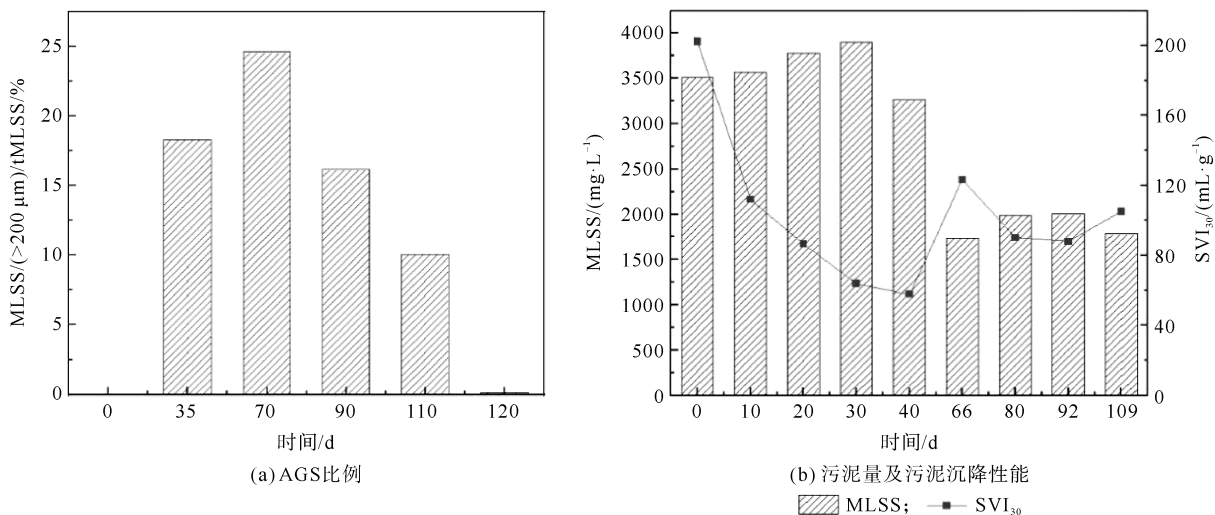
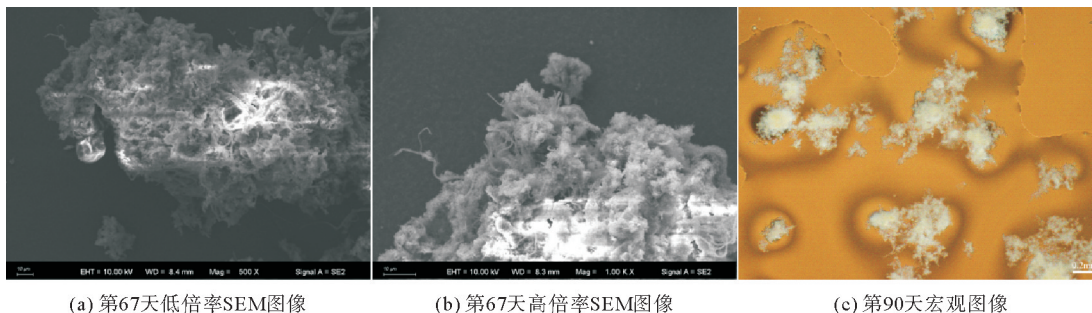


图 2 反应器中 AGS 比例、污泥量及污泥沉降性能随时间变化规律

从第 80 天开始,反应器内颗粒污泥开始逐渐解体,系统在后续 2 次盐度波动影响下趋于崩溃,至第 120 天时,系统内颗粒污泥占比已不足 1%。对解体阶段的颗粒形貌进行分析,其结果如图 3(c)所示。通常情况下,导致 AGS 解体的直接原因有 2 种:一种为丝状菌膨胀;另一种为颗粒内部存在“空腔”^[12]。但本研究中解体颗粒的状态与二者均不相符,其呈现出表面松散、内部密实的状态,颗粒周围可见脱落的絮状污泥,表明盐度波动影响下的颗粒解体为自外向内的剥离过程,而不是颗粒整体结构破碎。



(a) 第67天低倍率SEM图像

(b) 第67天高倍率SEM图像

(c) 第90天宏观图像

图 3 反应器内活性污泥宏观及微观形态变化

2.2 盐度波动对污染物去除效能的影响

对反应器进出水中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TIN 及 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度进行检测分析,以明确盐度波动对颗粒化过程中污染物去除效能的影响。如图 4 所示,系统 COD 去除率在 28.85%~85.29% 波动,其变化趋势与进水 COD 浓度的变化基本保持一致。但当进水中 $\Delta C_{\text{NaCl}} > 6.72 \text{ g/L}$ 时(第 40 天),COD 去除率维持在较低水平,并未随进水浓度升高而恢复,表明盐度的大幅波动对 COD 去除效能具有抑制作用。

图 5 所示为系统脱氮性能变化情况。在运行初期,系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 TIN 去除率逐渐下降,并在首次盐度波动时达到最低,分别为 8.67% 和 3.44%。此后,随着微生物逐渐适应运行环境, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 TIN 去除率迅速升高,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率在第 26 天时达到 99.35%,并在此后基本保持稳定,直至系统崩溃。TIN 去除率虽在第 26 天时升高至 64.29%,但受进水水质影响,其在后续的运行中波动剧烈,并未表现出明显趋势。需要注意的是,氨氧化活性的升高使得系统中出现 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 累积现象,出

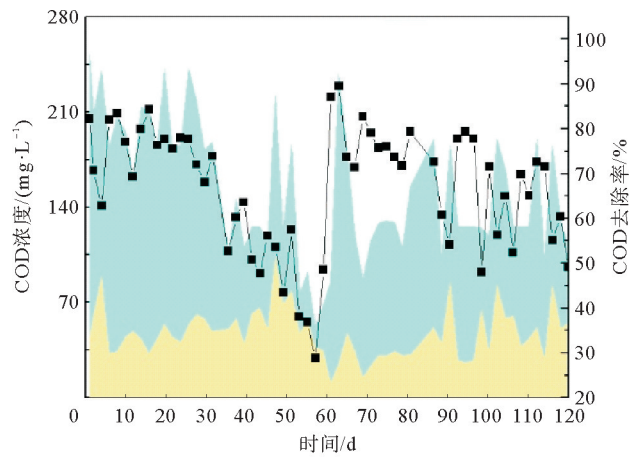


图 4 系统 COD 去除效能随时间的变化情况
 —■— COD 去除率; ■ 进水 COD 浓度; ■ 出水 COD 浓度

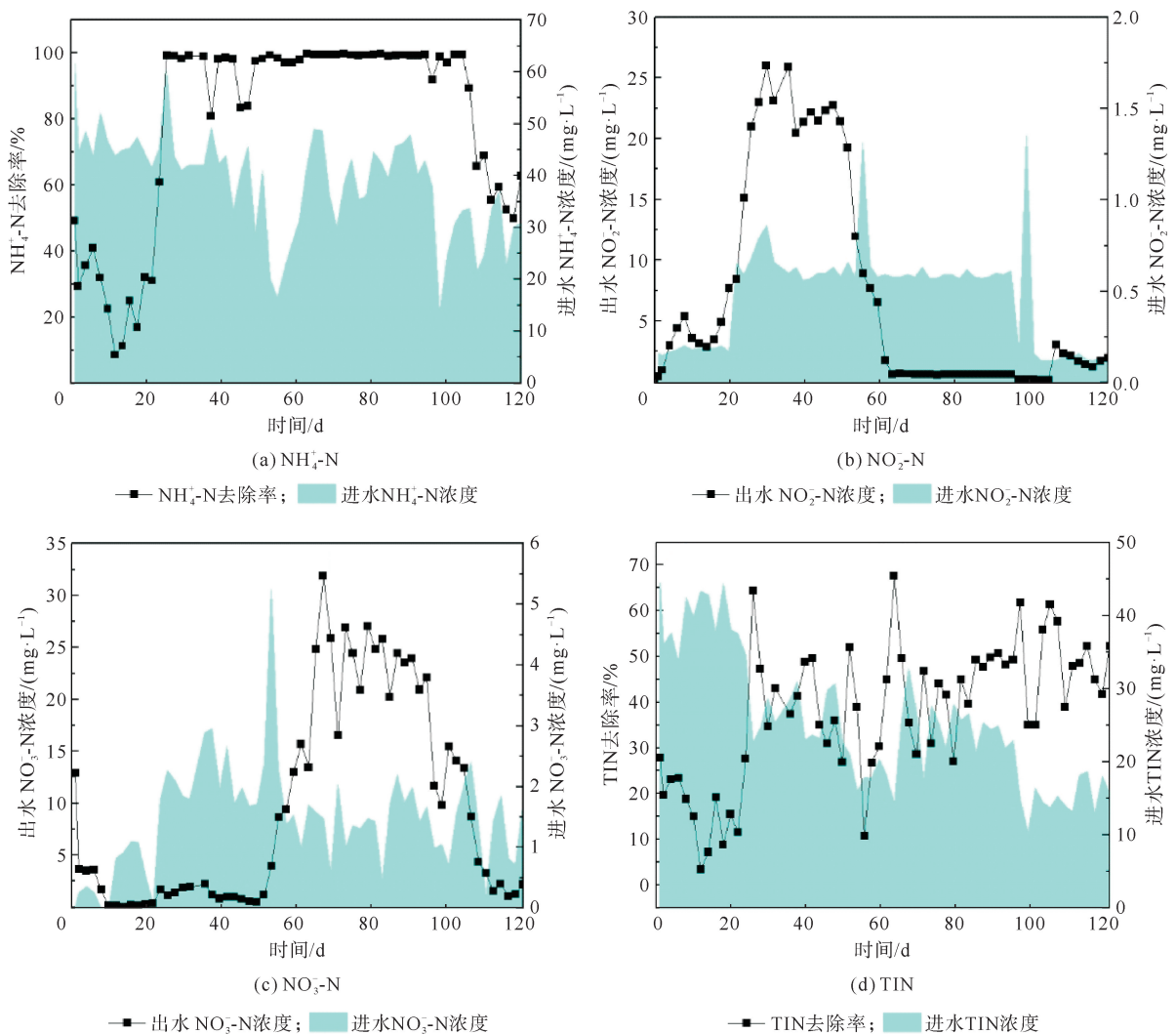


图 5 系统氮去除效能随时间的变化情况

水 NO_2^- -N 浓度在 30 d 内升高至 26.04 mg/L, 累积率达 63.36%。研究表明, 高浓度 NO_2^- -N 对亚硝酸盐氧化菌(NO_B)具有毒害作用^[13], 这也使得系统运行前 50 d 出水中 NO_3^- -N 始终保持在较低水平。此后随着反应器中 AGS 比例不断提高, NO_B 对 NO_2^- -N 的抵抗能力逐渐增强, 系统中亚硝酸盐氧化能力随之提高, 出水 NO_2^- -N 浓度迅速下降至 1 mg/L 以下同时伴随 NO_3^- -N 累积。结合进水中盐度波动情况可以发现, 颗粒化过程中氮去除过程对盐度波动的抵抗能力较强, 虽然氨氧化能力在第 2 次盐度波动时出现短暂下降, 但能在随后的运行中迅速恢复。这与 CHEN 等得出的高盐环境会显著抑制硝化及反硝化过程的结论不同^[14]。其原因可能在于, 系统内一定比例的颗粒污泥在为氨氧化细菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO_B)及反硝化菌提供庇护, 提高了其抵抗盐度波动的能力。这也为颗粒解体阶段氨氧化效率及亚硝酸盐氧化效率的下降提供了解释。

在磷去除方面, 系统表现出与盐度波动的高度相关性。如图 6 所示, 每当进水盐度出现大幅波动时, 系统的 PO_4^{3-} -P 去除率即迅速下降至 10% 以下, 表明盐度冲击会显著影响系统的磷去除效能, 这一现象与文献[15]的研究结果基本一致, 在其研究中, 盐度主要通过影响对聚磷菌(PAO)活性产生影响, 进而抑制生物除磷过程。进一步分析可见, 在首次盐度波动后, 系统内 PO_4^{3-} -P 去除效能逐渐恢复, 至第 28 天时已达到 79.02%, 但此后 PO_4^{3-} -P 去除率再次下降, 且在第 2 次盐度波动前已降至 12.19%。这是由于系统中高浓度 NO_2^- -N 同样对聚磷菌(PAO)活性具有较强抑制作用^[16]。这也使得第 2 次盐度冲击后磷去除效能恢复缓慢。此后 PO_4^{3-} -P 去除率虽于第 64 天恢复至 61.29%, 同时, 在第 100 天后迅速升高, 但结合反应器运行过程可知其原因在于系统内污泥流失所致的污泥龄缩短。

2.3 胞外聚合物变化特性分析

EPS 是微生物在特定环境下分泌并包裹在细胞周围的大分子物质, 是其抵抗不利环境影响的主要手段。研究表明, AGS 的形成与 EPS 含量及特性的变化紧密相关^[17]。图 7 所示为颗粒化过程中污泥 EPS 内 PN 与 PS 的变化情况。可以看出, 污泥中 EPS 含量(以 VSS 计)在前 10 d 内迅速升高, 但在首次盐度波动后, 其 TB-PN 含量下降了 34.31%, 此后其 TB-PN 含量虽略有恢复, 但每次盐度波动时其含量均会大幅下降, 尤其在第 92 天, 其含量与盐度波动前相比下降了 47.35%, 表明 TB-PN 在维持颗粒结构稳定性方面发挥重要作用。这一现象与 HONG 等得出的水中盐度增加可以刺激 EPS 分泌的结论不符^[18], 其原因可能在于, 该研究是在高盐-高基质浓度条件下进行的, 微生物能够获得充足的基质进行 EPS 合成, 以抵抗高盐环境的影响。但本研究中基质浓度较低, 无法为 EPS 的合成提供充足碳源。此外, 多价阳离子是 PN 的重要组成部分, 能够在其结构中发挥架桥作用^[19]。海水倒灌所引入的高浓度 Na^+ 能够与其发生置换反应, 导致其结构稳定性下降, 易于向松散态转变, 这也与盐度波动后污泥 EPS 中松散结合型胞外聚合物(LB-PN)含量升高的现象一致。

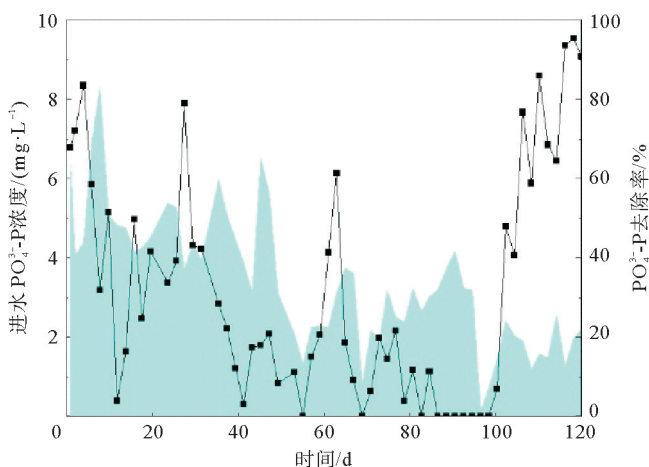


图 6 系统 PO_4^{3-} -P 去除效能随时间的变化情况

—■— PO_4^{3-} -P 去除率; ■ 进水 PO_4^{3-} -P 浓度

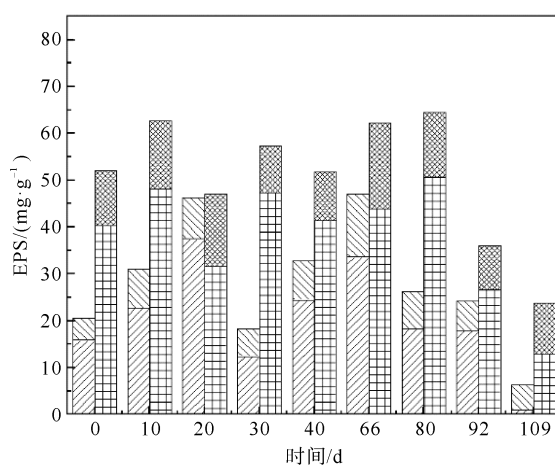


图 7 污泥胞外聚合物特性变化情况

▨ LB-PN; ▩ LB-PS; ▤ TB-PN; ▥ TB-PS

2.4 微生物群落演替规律分析

对反应器内第 20 天、第 40 天、第 66 天与第 90 天的污泥样品进行高通量测序,以探究盐度波动对微生物群落演替过程的影响。如图 8 所示,反应器运行期间微生物群落结构变化较大,各阶段优势菌属差异明显。在系统运行前期,微丝菌属(*Candidatus_Microthrix*)的相对丰度不断升高,至第 40 天时,其相对丰度已由接种污泥中的 2.59% 升高至 30.10%,与污泥颗粒化程度呈正相关。但从第 40 天开始,其相对丰度逐渐下降,至第 66 天时已降至 1.42%,在第 90 天的样品中已不足 0.01%,表明 $\Delta C_{NaCl} > 3.84$ g/L 的盐度波动可能会抑制该菌属的增殖。结合污泥 EPS 特性及颗粒形貌特征可知,该菌属的丝状结构能够在 AGS 中发挥骨架支撑作用,提高颗粒结构稳定性,当其相对丰度与 TB-PN 同时下降时,颗粒表面团簇状污泥因失去结合力而剥离,这可能是导致颗粒解体的主要原因。

norank_f_Saprospiraceae 的相对丰度在颗粒化过程中呈现出先下降后升高的趋势,其在解体颗粒中占优势地位,相对丰度为 11.81%(第 90 天)。研究表明,*norank_f_Saprospiraceae* 能够通过分泌胞外酶实现对蛋白质的降解^[20],该菌属的富集可能与解体颗粒中 PN 含量的下降直接相关。硝化螺菌属(*Nitrospira*)与 *norank_f_Saprospiraceae* 表现出相似的趋势,其相对丰度从不足 0.01%(第 20 天)逐渐升高至 1.81%(第 90 天),与该阶段系统中 NO_3^- -N 累积的现象一致。各样品中反硝化菌属的差异较大,如第 20 天样品中的反硝化菌属主要为 *Paracoccus*(9.16%),在第 66 天的样品中,其相对丰度已降至 2.42%,*Rhodobacter*(6.85%)则处于优势地位,而在第 90 天样品中,各典型反硝化菌属的相对丰度均不足 2%,表明盐度波动对于反硝化菌属的富集影响较大。

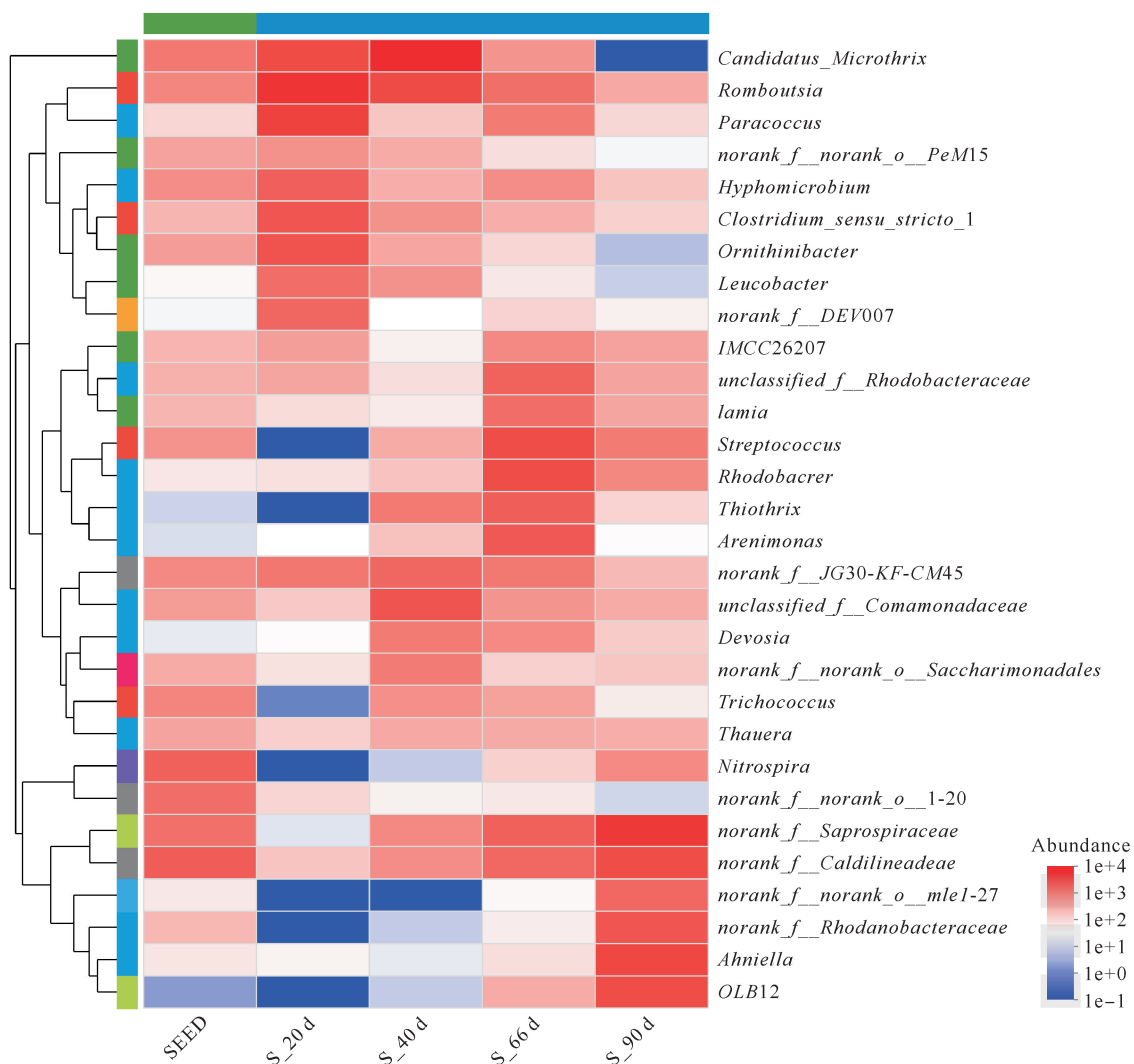


图 8 微生物群落结构在属水平的变化情况

3 结论

1) 频繁的盐度波动对污泥颗粒化过程具有显著的抑制作用,系统内 AGS 比例最高仅为 24.57%,无法实现完全颗粒化。

2) 丝状菌能够在颗粒化过程中发挥骨架支撑作用,提高颗粒抗盐度冲击能力,但当 $\Delta C_{\text{NaCl}} > 3.84 \text{ g/L}$ 时,丝状菌的富集受到抑制,相对丰度迅速下降。

3) 盐度波动下的颗粒解体为自外向内的剥离过程,造成这一结果的主要原因可能在于:污泥中丝状菌丰度及 EPS 中 TB-PN 含量同时下降,导致颗粒表面团簇状结构间结合力下降。

参考文献(References):

- [1] 栾志翔,李志伟,王江宽,等.北方某污水处理厂抗氯离子冲击效果分析[J].给水排水,2020,46(1):32-38.
LUAN Zhixiang, LI Zhiwei, WANG Jiangkuan, et al. Effectiveness analysis of anti-chloride ion shock in a wastewater treatment plant in Northern China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(1): 32-38.
- [2] CORSINO S F, CAPODICCI M, TORREGROSSA M, et al. Physical properties and extracellular polymeric substances pattern of aerobic granular sludge treating hypersaline wastewater[J]. Bioresource Technology, 2017, 229: 152-159.
- [3] LIU S, 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.
- [4] FRANCA R D G, PINHEIRO H M, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. Stability of aerobic granules during long-term bioreactor operation[J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(1): 228-246.
- [5] WAN C, YANG X, LEE D J, et al. Partial nitrification of wastewaters with high NaCl concentrations by aerobic granules in continuous-flow reactor[J]. Bioresource Technology, 2014, 152: 1-6.
- [6] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].第4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water and wastewater monitoring and analysis methods[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [7] 王晨,王雪欣,樊星,等.剩余污泥胞外聚合物热提取方法优化研究[J].青岛理工大学学报,2019,40(6):117-124.
WANG Chen, WANG Xuexin, FAN Xing, et al. Optimization of heat extraction method of extracellular polymeric substances from waste activated sludge[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2019, 40(6): 117-124.
- [8] PENG T, WANG Y, WANG J, et al. Effect of different forms and components of EPS on sludge aggregation during granulation process of aerobic granular sludge[J]. Chemosphere, 2022, 303: 135116.
- [9] IORHEMEN O T, HAMZA R A, ZAGHLOUL M S, et al. Aerobic granular sludge membrane bioreactor (AGMBR): Extracellular polymeric substances (EPS) analysis[J]. Water Research, 2019, 156: 305-314.
- [10] DERLON N, WAGNER J, DA COSTA R H R, et al. Formation of aerobic granules for the treatment of real and low-strength municipal wastewater using a sequencing batch reactor operated at constant volume[J]. Water Research, 2016, 105: 341-350.
- [11] SONG T, ZHANG X, LI J. The formation and distinct characteristics of aerobic granular sludge with filamentous bacteria in low strength wastewater[J]. Bioresource Technology, 2022, 360: 127409.
- [12] LUO J, HAO T, WEI L, et al. Impact of influent COD/N ratio on disintegration of aerobic granular sludge[J]. Water Research, 2014, 62: 127-135.
- [13] GIUSTINIANOVICH E A, CAMPOS J L, ROECKEL M D, et al. Influence of biomass acclimation on the performance of a partial nitrification-anammox reactor treating industrial saline effluents[J]. Chemosphere, 2018, 194: 131-138.
- [14] CHEN Y, HE H, LIU H, et al. Effect of salinity on removal performance and activated sludge characteristics in sequencing batch reactors[J]. Bioresource Technology, 2018, 249: 890-899.
- [15] DE KREUK M K, PRONK M, VAN LOOSDRECHT M C M. Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperatures[J]. Water Research, 2005, 39(18): 4476-4484.
- [16] YOSHIDA Y, KIM Y, SAITO T, et al. Development of the modified activated sludge model describing nitrite inhibition of aerobic phosphate uptake[J]. Water Science and Technology, 2009, 59(4): 621-630.
- [17] ISMAIL S B, DE LA PARRA C J, TEMMINK H, et al. Extracellular polymeric substances (EPS) in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors operated under high salinity conditions[J]. Water Research, 2010, 44(6): 1909-1917.
- [18] HONG C C, CHAN S K, SHIM H. Effect of chloride on biological nutrient removal from wastewater[J]. Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation, 2007, 2(3): 85-92.
- [19] SAJJAD M, KIM K S. Studies on the interactions of Ca^{2+} and Mg^{2+} with EPS and their role in determining the physicochemical characteristics of granular sludges in SBR system[J]. Process Biochemistry, 2015, 50(6): 966-972.
- [20] GUO Y, PENG Y, WANG B, et al. Achieving simultaneous nitrogen removal of low C/N wastewater and external sludge reutilization in a sequencing batch reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 306: 925-932.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)