



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201907148

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

王昕竹, 张星星, 徐乐中, 等. 短期有机冲击下船用景观一体化反硝化除磷装置的处理效能[J]. 环境工程学报, 2020, 14(5): 1259-1266.

WANG Xinzhu, ZHANG Xingxing, XU Lezhong, et al. Treatment efficiency of ship-landscape integrated denitrifying phosphorus removal device for under short-term organic shock[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(5): 1259-1266.

短期有机冲击下船用景观一体化反硝化除磷装置的处理效能

王昕竹¹, 张星星¹, 徐乐中^{1,2,3,*}, 吴鹏^{1,2,3}, 刘文如^{1,2,3}

1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009

2. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 苏州 215009

3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009

第一作者: 王昕竹(1995—), 女, 硕士研究生。研究方向: 废水生物处理。E-mail: wangxinzhu66@163.com

*通信作者: 徐乐中(1962—), 男, 学士, 副教授。研究方向: 废水生物处理。E-mail: kgre505@163.com

摘要 为高效、稳定处理船舶生活污水, 研究了船用景观一体化反硝化除磷装置面对短期水质波动的效能变化, 采用富集反硝化聚磷菌(DPAOs)的 ABR-CSTR 连续流组合工艺耦合生态单元处理船舶生活污水, 对比了 ABR 进水容积负荷(VLR)为 $1.2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、COD 为 $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的基准条件, 通过短期内提高进水中有机底物的浓度, 来模拟 1.5 倍和 2.0 倍进水有机负荷的有机冲击, 此外通过控制硝化液回流比及溶解氧获得应对冲击的调控策略。结果表明: 在 2 种短期冲击下, COD 去除率分别为 94.1% 和 92.6%, 出水 BOD 和 TN 可达标, 生物单元出水磷平均为 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 缺氧吸磷量为 $7.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 生态单元可深度降解氮磷及缓冲波动; 在 1.5 倍 VLR 下, 调整硝化液回流比由 200% 至 300%, 反硝化吸磷量由 $7.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $7.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 2.0 倍冲击下, 提高硝化液回流比对系统除磷帮助甚微, 将 DO 从 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 吸磷量由 $5.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $6.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统反硝化除磷效果得以提升; 污泥特性方面, ABR 内 MLVSS/MLSS 比值和 EPS 量随有机底物浓度的提高而上升, 厌氧段 EPS 增幅最大, 可由 $154.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 升至 $164.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $183.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。ABR-CSTR-生态单元一体化装置面对短期有机冲击具有稳定处理效果, 研究结果可为船舶生活污水的治理提供参考。

关键词 短期有机冲击负荷; 船舶生活污水; 反硝化除磷; 污染物去除; 污泥特性

船舶运输往来推动经济高速发展和人民生活质量的提升, 但同时其生活污水排放不可避免会造成水体污染, 若近海及河道的船舶产生的生活污水处理不当, 将影响内河、湖泊、水库等与人类生活息息相关的用水水质^[1-2]。船舶相对城镇来说, 具有人口集中、占地面积小的特点, 因而生活污水水质短期波动大、碳氮负荷、TSS 高^[3]。目前存在的船舶生活污水处理装置多与常规市政污水处理一致^[4], 处理深度和稳定性存有不足, 亦易忽略节能和美观需求^[5]。船舶人口集中, 污水处理装置须面对短期有机负荷的冲击, 同时针对船舶生活污水碳氮磷排放的新标准^[6], 须迫切寻求高效稳定、节能美观的船舶生活污水处理装置。

收稿日期: 2019-07-23; 录用日期: 2019-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578353); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20160356); 苏州科技大学自然科学基金项目

考虑治理要求和环保发展前景,可应用反硝化除磷(denitrifying phosphorus removal, DNPR)高效生物脱氮除磷技术的厌氧折流板反应器(ABR)-连续流搅拌槽式反应器(CSTR)连续流组合工艺与生态法耦合联用装置处理船舶污水。ABR-CSTR较序批式工艺在实际应用中更稳定可控,各功能菌能于各自生长适宜条件下成为优势菌种,ABR可生物相分离,生成优质碳源^[7],使反硝化聚磷菌(denitrifying phosphorus accumulating organisms, DPAOs)的富集和增殖更易实现;CSTR通过完全混合培养硝化菌,与膜生物反应器(MBR)相比,具有成本低且污染小的特点,更适合船舶生活污水治理。ABR-CSTR组合工艺通过污泥回流和硝化液回流实现DNPR,在厌氧条件下,DPAOs分解多聚磷酸盐产生能量(ATP),同时挥发性脂肪酸(VFA)在质子推动力(PMF)下进入胞内合成聚羟基脂肪酸(PHA)^[8];缺氧时分解PHA生成乙酰辅酶A进行三羧酸(TCA)循环,产生ATP用于过量吸磷合成体内聚磷,同时反硝化 $\text{NO}_x\text{-N}$,实现碳源同时脱氮除磷^[9],大幅降低氧和碳源需求,节约运行成本^[10-11]。生物单元出水流经末端由水生植物、鱼类、微生物和基质共同组成的生态单元后排出,从外观看,动植物构成的生态景观较传统处理工艺更具美感;同时,植物本身的吸附作用及其根系附着的微生物可强化降解污染物,对水质波动起缓冲作用,绿色技术的融入可改善装置能源渠道。

综合船舶生活污水水质波动的现状,基于 $1.2\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\text{ d})^{-1}$ ABR进水容积负荷(VLR)、COD值为 $350\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的稳定运行条件,模拟1.5倍和2.0倍VLR的短期冲击。有机负荷冲击会影响处理效能,主要体现在污染物去除率和生物质表面及内部的特征变化^[12]。碳源量影响聚磷菌(PAOs)和聚糖菌(GAOs)的生长繁殖,GAOs的增多可抑制除磷效果^[13]。有机底物浓度较高时,微生物会分泌更多的胞外聚合物(EPS)来抵御不利条件^[14-15],因此,观察污泥特性变化有助于深入探究处理效能。本研究模拟船舶生活污水短期有机冲击负荷,从系统高效去碳脱氮除磷的性能和污泥特性的变化方面,考察了ABR-CSTR-生态单元一体化反应装置的运行情况,同时通过调整运行工况获得了应对波动的稳定策略。结果表明,在不同冲击下,末端生态单元确保系统具有抗波动的稳定性,使装置在高效处理船舶生活污水的同时提供景观价值,可为生活污水治理领域提供新思路 and 理论支持。

1 材料和方法

1.1 实验装置

ABR-CSTR-生态单元一体化反应装置见图1,生态单元内置3隔室ABR-CSTR组合反应器。生

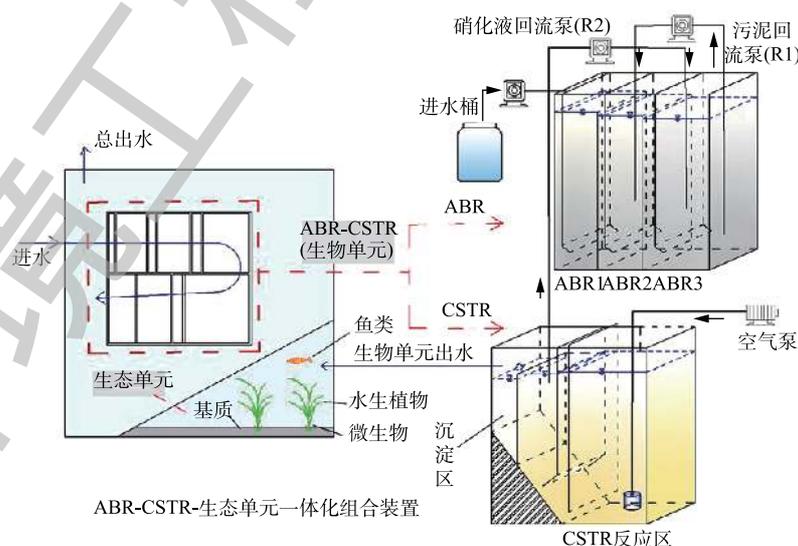


图1 反应装置图

Fig. 1 Reaction device diagram

态单元、ABR、CSTR 反应区和沉淀区有效容积分别为 27、5.4、2.7 和 1.8 L, ABR1、ABR2 为厌氧区域, ABR3 通过 CSTR 内硝化液回流 (R_2) 构成缺氧环境, ABR3 污泥回流 (R_1) 至 ABR2, 使 DPAOs 历经含氧环境循环实现除磷。生态缸水深为 35 cm, 底部基质为天然亚热带酸性肥沃黑土所制的水草泥, 厚度为 5 cm, 按底面积适宜密度栽培 6 株常见水生植物皇冠草 (*Echinodorus amazonicus*), 投放美观、生长力佳的金鲫鱼, 水浴温度维持在 27~28 °C。

1.2 污水水质及接种污泥

为精准控制研究条件, 研究采用基于校园厕所废水优化配置的模拟进水 (比例为 1:1), 以 $C_6H_{12}O_6$ 、淀粉调配碳源, 以 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 分别调配氮、磷源, 使氮和磷浓度控制在 $55\sim 65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4\sim 7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此外, 加入 $CaCl_2$ 、 $MgSO_4\cdot 7H_2O$ 等补充生物所需的常量元素, 同时添加微量元素^[16], 为更贴近船舶生活污水, 另加高岭土 ($50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 确保污水浊度, 使用 $NaHCO_3$ 调节 pH 为 7.5 左右。

ABR-CSTR 连续流反应器接种污泥来自苏州市某污水处理厂浓缩池, ABR 各隔室投放至 2/3 处, MLSS 为 $21\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; CSTR 内污泥参数为 SVI 105.5 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, MLSS $5\ 500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3 实验方案

在前期研究中, ABR-CSTR-生态缸在 VLR(ABR) 为 $1.2\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, COD 为 $350\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥沉淀时间为 2.3 h, 总 HRT 为 12.8 h, SRT 为 20 d, R_1 为 80%、 R_2 为 200% 的情况下稳定实现反硝化除磷, 总出水 COD、TP 和 TN 去除率达到 94%、81% 和 82%。当 SS 和 BOD 值低于 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 采用 RYU 等^[17] 的方法估算富集 DPAOs 占 PAOs 比值约为 73%, 此工况定为基准态。本实验设计方案如表 1 所示, 基态运行 30 d(阶段 I), 保持 HRT 不变, 通过提高进水 COD 值以实现 1.5 倍 VLR(阶段 II, 工况 2、3) 和 2.0 倍 VLR(阶段 IV, 工况 5、6、7) 冲击, 期间恢复基态运行 12 d(阶段 III), 阶段 II 和 IV 每段工况运行 5 d, 其中将工况 3 和 6 中 R_2 调整至 300%, 工况 7 提高 DO 至 2.0, 以此探究了应对冲击的调控策略。

表 1 实验运行方案
Table 1 Test operation plan

运行阶段	运行条件	工况	运行时间/d	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	VLR _{ABR} / ($\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$)	硝化液 回流比/%	流量/ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	DO/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
I	稳定运行	1	1~30	350	1.2	200	12.9	1.5
II	1.5倍VLR	2	31~35	525	1.8	200	12.9	1.5
II	1.5倍VLR	3	36~40	525	1.8	300	12.9	1.5
III	恢复基准	4	41~52	350	1.2	200	12.9	1.5
IV	2.0倍VLR	5	53~57	700	2.4	200	12.9	1.5
IV	2.0倍VLR	6	58~62	700	2.4	300	12.9	1.5
IV	2.0倍VLR	7	63~67	700	2.4	300	12.9	2.0

1.4 测定分析方法

水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 中速滤纸过滤, COD、BOD, NH_4^+-N 、 $NO_2^- -N$ 、 $NO_3^- -N$ 、TN、TP 及 MLSS、MLVSS 按文献中的方法^[18] 进行测试分析, 使用 HACH-HQ30d 便携式测定仪检测 DO, 使用 FiveGo F2 便携酸度计测定 pH。污泥特性部分取自工况 1、2、4 和 5, 采用 10 mL 泥水混合液以 $10\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min 来提取 EPS, 倒掉上清液, 加 EPS 缓冲液补充至原体积, 重复离心步骤后倒掉上清液, 再补充缓冲液至 10 mL 后, 将泥水倒入锥形瓶, 加 0.06 mL 甲醛在摇床内, $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 1 h, 上清液离心 15 min 后, 使用 $0.22\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 此上清液即为紧密结合型胞外聚合物 (TB-EPS); 多糖 (PS) 采用苯酚-硫酸法测定, 蛋白质 (PN) 含量使用福林酚试剂法测定。

2 结果与讨论

2.1 不同冲击负荷下污染物去除情况

1) 有机物去除情况。大部分耗氧有机污染物(以COD计)在厌氧段被消耗,经水解酸化为VFA后,以胞内聚合物PHAs储存在微生物内,因而碳源去除情况与反硝化除磷效果息息相关。不同有机冲击负荷下有机污染物的去除情况见图2,系统对有机物始终保持较好的去除效果,1.5倍和2.0倍VLR冲击下生物单元COD出水值先上升后下降,平均去除率分别为94.1%和92.6%,总出水浓度在 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。

基准态、1.5倍和2.0倍VLR冲击下,ABR前2隔室中COD去除率为82.5%、80.7%和75.8%,说明有机物在系统中得以充分转化为优质碳源VFA,而可被DPAOs释磷时利用。进入好氧段的COD值较低,可避免对硝化反应的干扰。进入ABR段,污水BOD/COD比值经水解酸化后升高,由平均值0.4升至0.65,从而进一步提升了生物降解性,好氧后出水BOD值维持在 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,总出水BOD与之持平,符合排放标准,可见高有机负荷冲击下系统对BOD的降解效果稳定。

2) 氮的去除特性。在2种有机负荷的冲击下(阶段II和IV),氨氮去除率存在明显的波动。如图3所示,1.5倍VLR冲击时出水氨氮高于 $6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这可能是由于面对高有机负荷时,硝化菌对外界基质变化更为敏感^[19]所致,因自养菌在与异养细菌竞争氧气等生存要素时处于劣势地位,系统很快恢复氨氮去除性能,说明好氧段NOB对有机负荷变化有良好的适应力。在2种冲击下,连续流内氨氮平均去除率分别为92.7%和98.0%,生物单元出水氨氮可达到 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。

在3种负荷下,TN去除率分别为62%、67.3%和73.7%,有机负荷冲击下水TN浓度低于 $18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可见随着VLR升高,有额外碳源进入CSTR反应区,使硝化段发生了同步硝化反硝化作用,TN进一步降低。在SBR和ABR-MBR连续流工艺的相关研究^[20-21]中,均发现进水COD值提高对系统TN去除性能和DNB反硝化速率有显著的强化作用。生态单元可进一步吸附氨氮,保证了在连续流出水存在波动的情况下,生态单元内氨氮浓度可稳定维持于一定的水平,生态缸内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在生态循环作用下可比CSTR出水低 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,以确保装置对氨氮良好的去除效果。

3) 对同步脱氮除磷的影响。不同有机冲击下生物单元除磷效果存在一定波动,系统总出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 保持在 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。如图4所示;在 R_2 为200%、1.5倍VLR冲击下,生物单元除磷效率变化较小(由87.5%降至86.1%),除磷率最高点在1.5倍VLR; R_2 为300%时(工况3),可达92.5%,其浓度为 $0.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硝化液回流比的升高强化了DPAOs的除磷效果,吸磷量由 $7.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $7.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当有机负荷升高时,ABR具有进一步提高消耗耗氧有机污染物生成优质碳源的能

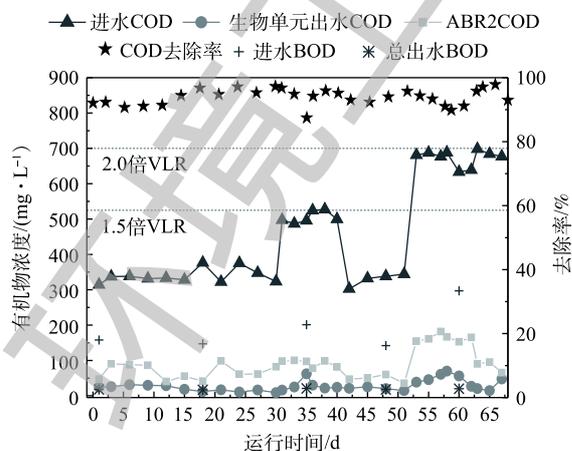


图2 COD去除情况

Fig. 2 COD removal performance

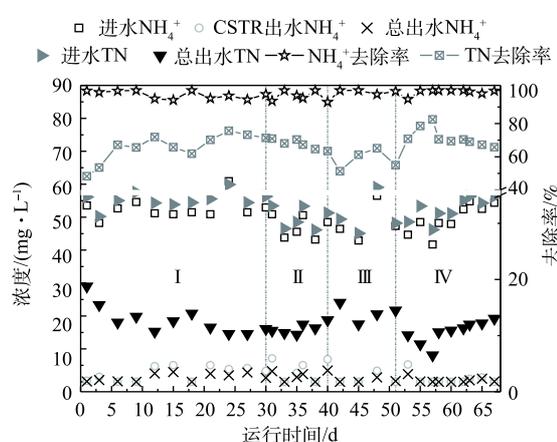


图3 氨氮和总氮的去除效果

Fig. 3 Removal effect of NH_4^+ and TN

力，生成更多的 VFAs，供 DPAOs 在厌氧段释磷，硝化液回流比的升高使可供过量吸磷的电子受体浓度增加，缺氧吸磷更充分；在 2 倍有机冲击、 R_2 为 200% 时 (工况 5)，COD 去除率降至 76.4%；提升 R_2 至 300%，除磷率未有明显上升，此时 ABR 内微生物在底物浓度增加下持续增殖，而过量 COD 在 ABR 内未能消耗完全，进入 CSTR 的剩余碳源含量高于 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，影响 NOB 和 AOB 氧化氨氮。反硝化菌在碳源存在下逐渐占据优势，使硝化反应未能充分进行，此时 R_2 的提升增加了回流液的稀释作用，但对系统反硝化除磷效果没有明显帮助。随之采用提高曝气量的策略，将 DO 由 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提升为 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，系统除磷效果随之升高，达 84.6%。反应区内含氧量的增加抑制 DNB 合成体内硝酸盐还原酶，使 NOB 活性释放，硝化反应得以良好进行，此时提升的硝化液回流比增加了进入缺氧段的 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度，吸磷量由 $5.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $6.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，在充足的电子供体下，反硝化除磷效果获得进一步提高。由图 4 可知，生态单元可对磷进一步降解，缸内 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量稳定维持在 $0.5\sim 0.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，生态缸对波动具有较强的缓冲作用，当 CSTR 出水磷浓度在短时间内小于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，缸内含磷量并不会随之立即下降，而是维持在一定范围，以保证生态循环内营养元素的稳定。

装置沿程 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和氮素浓度变化直接反映系统反硝化除磷效果。图 5 反映了不同有机冲击下， $R_2=200\%$ 时系统各隔室氮磷浓度的变化。由图 5 可知，在 1.5 倍和 2.0 倍 VLR 冲击下，生物单元出水磷浓度分别为 $0.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在 1.5 倍有机冲击时，ABR2 中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度有少量升高，由 $8.99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $9.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，释磷量也相应增加。这是因为在进入厌氧区的有机物浓度瞬时上升时，微生物在充足底物下刺激活性激增，ABR 水解促使更多优质碳源 (如 VFA) 生成，DPAOs 在 ABR2 充足的 ATP 下合成胞内聚羟基烷酸 (PHA)，同时释磷，此时在电子受体 $\text{NO}_x\text{-N}$ 有限的情况下，缺氧除磷量受到限制，因而系统除磷量变化较小。

当有机冲击升负荷至 2.0 倍 VLR 时，释磷量出现明显下降，ABR2 磷含量降至 $8.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，此时有机浓度过高，促使 ABR 内的少量聚糖菌的活性增强，而 GAO 在消耗 VFAs 时并不具备除磷能力^[22]，使可供 DPAOs 释磷的优势碳源量出现不足，影响释磷。在此负荷下，缺氧吸磷量由 $7.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $5.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，由于部分有机物进入好氧区，影响了硝化菌氧化氨氮，使硝化不完全，CSTR 内的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 由 $10.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $6.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，回流液中 $\text{NO}_x\text{-N}$ 量减小，缺氧隔室内 DPAOs 进行同步脱氮除磷的电子受体不足，这是影响系统除磷效率的关键。

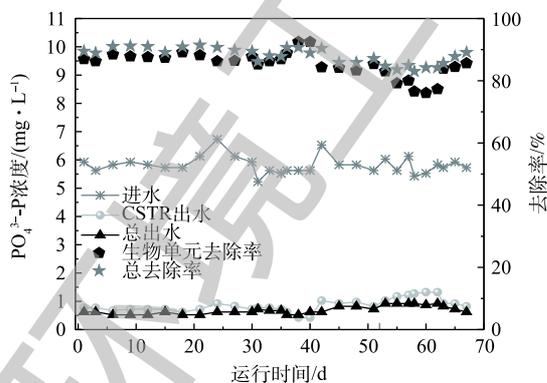


图 4 系统内 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除的变化

Fig. 4 Change of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ removal effect in the system

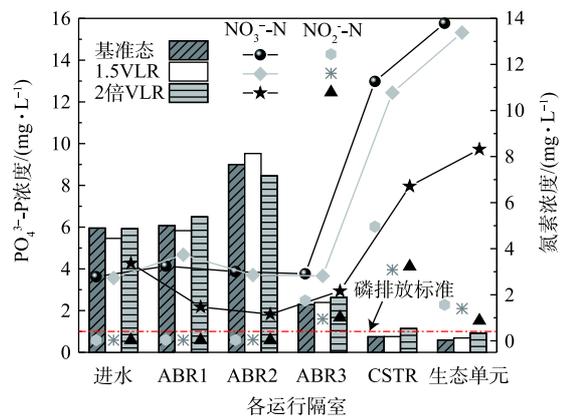


图 5 不同冲击下沿程 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和氮素浓度变化

Fig. 5 Changes of concentration of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and nitrogen under different organic shocks

2.2 污泥特性变化

1) 微生物量变化情况。MLVSS/MLSS 比值意味着污泥中活性物质组分的多少^[14]，不同有机冲

击下的结果见图6。与CHEN等^[23]的研究结果一致,随着进水有机冲击负荷增加,MLVSS和MLSS均有所上升,厌氧段ABR1比值增幅最大,由0.6升至0.79。这说明该段污泥在高有机底物的促进下,微生物活性成分急剧增多。每段冲击相较其前段基准态,1.5倍VLR下各运行隔室MLVSS/MLSS比值增幅均高于2倍冲击,ABR1内分别为0.16和0.09,可能由于在高有机负荷进水下,微生物对底物的吸收存在限度,使MLVSS和MLSS生长趋势减缓。

2)对胞外聚合物(EPS)的影响。胞外聚合物(EPS)聚集在微生物表面,主要由多糖和蛋白质构成,起维持细胞体结构稳定的保护作用,随外界环境的变化而改变胞外的物化性质^[24-25]。如图7所示,在有机负荷冲击下,多糖和蛋白质含量均上升,在厌氧环境尤其是ABR2隔室内EPS含量增幅明显,在1.5倍和2.0倍VLR冲击下,其由154.5 mg·g⁻¹分别升至164.2 mg·g⁻¹和183.4 mg·g⁻¹,这可能由于厌氧环境下高有机负荷刺激最为剧烈,微生物需要分泌更多EPS来维持细胞的稳定生存。CSTR内微生物EPS及其组成成分变化最小,因为有机负荷在前端ABR内被大量去除,进入硝化区的冲击水平被大幅削弱,故对硝化菌结构特性影响小。多糖与蛋白质的比值(PS/PN)可反映污泥絮凝性,蛋白质占比越大,说明污泥表面疏水性越强,越利于污泥絮凝体稳定聚集;PS/PN比值越低,代表絮凝性好^[26-28]。ABR内多糖与蛋白质的比值变化明显,1.5倍VLR冲击下,PS/PN最低为0.48,厌氧隔室内污泥颗粒化效果也最佳,在有机负荷冲击进一步增强下,污泥表面结构失稳,疏水性降低。此外,CSTR内PS/PN维持在0.87~0.89,这表明有机冲击对硝化段内污泥絮凝效果影响较小。

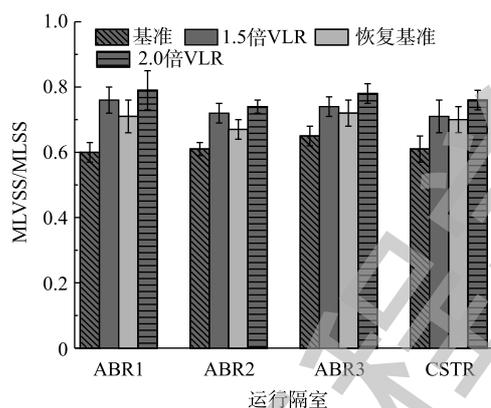


图6 各运行隔室的MLVSS/MLSS

Fig. 6 MLVSS/MLSS in different operating compartments

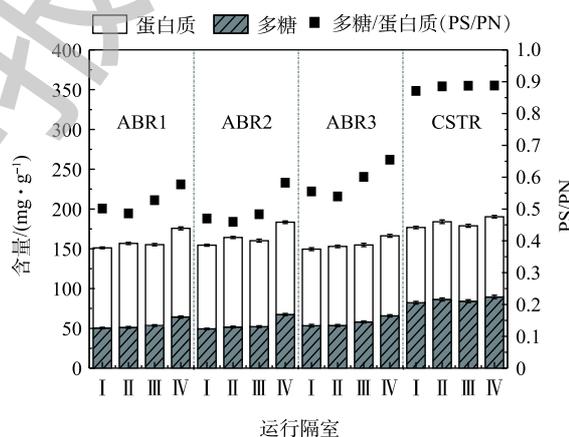


图7 各隔室微生物EPS含量变化

Fig. 7 Changes in microbial EPS content of each compartment

3 结论

1) ABR-CSTR生态单元一体化反硝化除磷装置具有一定抗有机冲击能力,在1.5倍和2倍稳态进水有机负荷下,耗氧有机污染物(以COD计)平均去除率始终大于90%,总出水BOD和TN可达标排放,系统除磷效果稳定;在有机负荷为2倍基准条件下,CSTR硝化反应受干扰,供DPAOs缺氧同步脱氮除磷的电子受体不足,从而影响吸磷。

2)在一定的有机冲击下,升高硝化液回流比有助于提升反硝化除磷效果;当有机负荷进一步提升时,提高硝化液回流比对除磷提升效果甚微,增高好氧段DO可使系统缺氧吸磷量有所提升。

3)生态单元通过生态循环进一步降解氮磷,同时对水质波动具有缓冲作用,可维持生态单元内水质的稳定及水生动植物的良好生长。

4)污泥MLVSS/MLSS比值及微生物体内EPS含量随有机底物浓度的升高而上升,前者在

ABR1 内增幅最大; ABR2 内 EPS 含量增加最为显著, CSTR 内微生物 EPS 含量最多, 但其成分变化最小, 在有机冲击下, 厌氧隔室多糖/蛋白质比值可达最低, 此时污泥絮凝性最佳。

参考文献

- [1] 白韬光, 李星仪, 周昊. 船舶与海工生活污水处理技术及其发展趋势[J]. 船舶工程, 2016(11): 82-84.
- [2] 陈志莉, 易其臻, 熊开生, 等. 生物接触氧化法处理船舶生活污水的中试[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2009, 24(6): 882-885.
- [3] 张文涛. MBR法处理模拟船舶生活污水的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
- [4] 田金平. 探究船舶生活污水处理进展及发展趋势[J]. 科技与企业, 2015(17): 98.
- [5] 陈忠, 陈薇, 詹佳钧, 等. 新型景观生态污水处理系统研究进展[J]. 市政技术, 2017, 35(6): 139-142.
- [6] 中华人民共和国环境保护局, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 船舶水污染物排放控制标准: GB 3552-2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [7] 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 等. ABR-MBR反硝化除磷工艺的启动及稳定运行[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 298-305.
- [8] SAUNDERS A M, MABBETT A N, MCEWAN A G, et al. Proton motive force generation from stored polymers for the uptake of acetate under anaerobic conditions[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2007, 274(2): 245-251.
- [9] 章璋, 朱易春, 王佳琪, 等. 短程反硝化除磷的影响因素分析[J]. 江西理工大学学报, 2019, 40(1): 46-53.
- [10] 张伟. 不同诱导模式下CAST工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- [11] KAPAGIANNIDIS A G, ZAFIRIADIS I, AIVASIDIS A. Comparison between UCT type and DPAO biomass phosphorus removal efficiency under aerobic and anoxic conditions[J]. *Water Science & Technology*, 2009, 60(10): 2695-2703.
- [12] WU B, YI S, FANE A G. Microbial community developments and biomass characteristics in membrane bioreactors under different organic loadings[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(13): 6808-6814.
- [13] 韩芸, 许松, 董涛, 等. 碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 590-596.
- [14] 朱逸舟, 李秀芬, 王新华, 等. 高有机负荷冲击对填料型MBR运行性能的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5): 1985-1992.
- [15] SPONZA D T. Investigation of extracellular polymer substances (EPS) and physicochemical properties of different activated sludge flocs under steady-state conditions[J]. *Enzyme & Microbial Technology*, 2003, 32(3/4): 375-385.
- [16] 李田, 印雯, 王昕竹, 等. ABR除碳-CANON耦合工艺除碳脱氮特性[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 313-318.
- [17] RYU H D, KIM D, LIM H E, et al. Nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen wastewater in four-stage biological aerated filter system[J]. *Process Biochemistry*, 2008, 43(7): 729-735.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] 刘伶俐. 硝化细菌固定化方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
- [20] 孙洪伟, 郭英, 尤永军, 等. 不同碳氮比(C/N)条件下驯化微生物的反硝化特性[J]. 环境化学, 2014, 33(5): 770-775.
- [21] 吴鹏, 程朝阳, 沈耀良, 等. 基于ABR-MBR组合工艺不同进水C/N比对反硝化除磷性能的影响机制[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3781-3786.
- [22] 王晓莲, 王淑莹, 彭永臻. 进水C/P比对A²O工艺性能的影响[J]. 化工学报, 2005, 56(9): 1765-1770.
- [23] CHEN R, NIE Y, HU Y, et al. Fouling behaviour of soluble microbial products and extracellular polymeric substances in a submerged anaerobic membrane bioreactor treating low-strength wastewater at room temperature[J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 531: 1-9.
- [24] LIAO B Q, ALLEN D G, DROPPA I G, et al. Surface properties of sludge and their role in bio-flocculation and settle ability[J]. *Water Research*, 2001, 35(2): 339-350.
- [25] BADIREDDY A R, CHELLAM S, GASSMAN P L, et al. Role of extracellular polymeric substances in bioflocculation of

activated sludge microorganisms under glucose-controlled conditions[J]. *Water Research*, 2010, 44(15): 4505-4516.

[26] 蔡春光, 刘军深, 蔡伟民. 胞外多聚物在好氧颗粒化中的作用机理[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(5): 623-626.

[27] 张心钰, 陈瑶, 董黎明, 等. 柠檬酸废水污泥脱水中蛋白质和多糖变化特征[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(S2): 76-80.

[28] 高占尧, 仝攀瑞, 徐甜甜. A/O两种工况条件下污泥胞外聚合物的比较研究[J]. *西安工程大学学报*, 2014, 28(4): 464-468.

(本文编辑: 曲娜, 郑晓梅, 张利田)

Treatment efficiency of ship-landscape integrated denitrifying phosphorus removal device for under short-term organic shock

WANG Xinzhu¹, ZHANG Xingxing¹, XU Lezhong^{1,2,3,*}, WU Peng^{1,2,3}, LIU Wenru^{1,2,3}

1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China

2. National Regional Engineering Laboratory of Urban Domestic Wastewater Resources Utilization Technology, Suzhou 215009, China

3. Jiangsu High Education Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China

*Corresponding author, E-mail: kgre505@163.com

Abstract In order to treat the ship domestic sewage efficiently and stably, the efficiency of the ship-landscape integrated denitrifying phosphorus removal device under short-term water quality fluctuation was studied. The ABR-CSTR continuous flow combined process enriching denitrifying phosphorus accumulating bacteria (DPAOs) coupled with ecological unit was used to treat ship domestic sewage. Compared with the benchmark conditions of ABR inlet volume load rate (VLR) of $1.2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ and COD of $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the increase of organic concentration was used to simulate organic short-term shocks of 1.5 and 2.0 times VLR, at the same time, the nitrification reflux ratio (R2) and dissolved oxygen (DO) were controlled to obtain the regulative strategies for coping with the shocks. The results showed that the COD removal rates were 94.1% and 92.6% under two short-term shocks, the effluent BOD and TN could meet the standard. The average phosphorus concentrations of effluents from biological treatment units were $0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $1.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, and the anoxic phosphorus absorption amounts were $7.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $5.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The ecological unit could deeply remove nitrogen and phosphorus and buffer the fluctuations. At 1.5 time VLR, the denitrifying phosphorus absorption amount increased from $7.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $7.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ when R2 was adjusted from 200% to 300%. Under 2.0 time VLR shock, the increase of R2 did not significantly improve the phosphorus removal efficiency of system. When DO increased from $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the phosphorus absorption amount could increased from $5.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $6.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the denitrifying phosphorus removal effect of the system was improved. In terms of sludge characteristics, the MLVSS/MLSS ratio and microbial EPS content of ABR increased with the increase of organic substrate concentration, and the largest increase in EPS content occurred in the anaerobic compartment sludge, which increased from an average of $154.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ to $170.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $183.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. The ABR-CSTR-ecological unit integrated device has a stable treatment effect in the face of short-term organic shock, and provides a certain theoretical guidance value for the ship domestic sewage treatment.

Keywords short-term organic load shock; ship domestic sewage; denitrifying phosphorus removal; pollutant removal; sludge characteristics