

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因素分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录	(5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)	

不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响

高雪健¹, 张杰^{1,2}, 李冬^{1*}, 曹正美¹, 郭跃洲¹, 李帅^{1,2}

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 在 $15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 条件下, 将厌氧氨氧化菌混培物分别置于基质浓度为 0、60、120 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 添加比例为 1:1 的 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 环境中短期 (15 d) 储存, 探究不同基质浓度对厌氧氨氧化污泥短期保存及恢复的影响。经过短期储存后进行恢复实验, 结果表明, 1、2、3 号反应器 (分别对应 0、60、120 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 基质浓度中储存的厌氧氨氧化菌混培物) 中的厌氧氨氧化活性分别下降 41.8%、17.4%、33.4%, 1、3 号分别由于过度内源呼吸和高基质浓度抑制, 导致活性下降较大, 2 号反应器由于基质浓度相对合适, 避免了过度内源呼吸和高基质浓度抑制, 使得菌种活性在该基质浓度下保留较好; 储存期间, 3 个反应器内均发生内源呼吸消耗自身有机物的情况, 导致 EPS 含量下降 50.9%、41.7%、23.7% 和粒径下降 31.6%、16.7%、8.2%, 表明在基质匮乏期菌体通过内源呼吸的方式维持自身的活性, 较高的基质浓度可以在一定程度上延缓内源呼吸过程; 在恢复期间, 3 个反应器分别经过 15、10、7 d 实现脱氮性能和厌氧氨氧化活性的恢复, 表明同菌种增殖富集相比, 原系统通过菌种活性增强的方式脱氮性能恢复更快。

关键词: 厌氧氨氧化 (ANAMMOX); 基质浓度; 短期储存; 活性恢复; 内源呼吸

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5587-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201805107

Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria

GAO Xue-jian¹, ZHANG Jie^{1,2}, LI Dong^{1*}, CAO Zheng-mei¹, GUO Yue-zhou¹, LI Shuai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Anaerobic ammonium oxidizing bacteria were stored under $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ and $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ conditions (addition ratio 1:1) at a substrate concentration of 0, 60, and 120 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ at $15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ for 15 days. The effect of different substrate concentrations on the short-term storage and recovery of anaerobic ammonia oxidation sludge was investigated. After a short period of storage, a recovery experiment was performed. The results show that the anaerobic ammonia oxidation activities in the reactors 1, 2, and 3 decrease by 41.8%, 17.4%, and 33.4%, respectively. Because of the excessive endogenous respiration and high substrate concentration, the activities of the bacteria in reactors 1 and 3 were inhibited, respectively. Therefore, the activities decreased greatly. Because the substrate concentration was relatively suitable in reactor No. 2, excessive endogenous respiration and high substrate concentration inhibition were avoided such that the activity of the bacteria species was maintained at the substrate concentration. Endogenous respiration occurred during the storage period. Subsequently, the organic matter in the three reactors was consumed. As a result, the EPS content decreased by 50.9%, 41.7%, and 23.7% and the particle size decreased by 31.6%, 16.7%, and 8.2%, respectively. This shows that endogenous respiration is maintained by the bacteria in the matrix-deficient period and the higher concentration of the substrate can to some extent delay the endogenous respiration. During the recovery period, the three reactors recover the denitrification performances after 15, 10, and 7 d respectively. This shows that the denitrification performance of the system has a faster recovery through enhanced strain activities compared with the proliferation of the strain.

Key words: anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); substrate concentration; short-term storage; activity recovery; endogenous respiration

厌氧氨氧化是指在厌氧条件下, 厌氧氨氧化菌以 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 为电子受体, 直接将 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 氧化成 N_2 的过程, 是一种新型生物脱氮工艺^[1,2], 因其低耗高效的优点, 使其在废水生物脱氮领域具有广阔的应用前景。但厌氧氨氧化菌生长极其缓慢, 倍增时间长达 11 ~ 19 d, 细胞产率 (以 $\text{VSS}/\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 计) 仅有 $0.11 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[3-5]。厌氧氨氧化菌难以富集, 导致厌氧

氨氧化工艺启动周期过长, 工艺难以启动^[6], 极大限制了其工程化应用。接种不同种类污泥进行驯化

收稿日期: 2018-05-12; 修订日期: 2018-05-30

基金项目: 北京市青年拔尖团队项目 (2014000026833TD02)

作者简介: 高雪健 (1994 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理技术、水环境恢复理论及关键技术, E-mail: S201604224@emails.bjtu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lidong2006@bjtu.edu.cn

启动该工艺耗时过长,所用时间普遍在 2~3 个月^[7~10],高活性的厌氧氨氧化种泥很难在短期内通过普通污泥筛选得到,因此直接接种厌氧氨氧化种泥成为污水处理厂快速启动 ANAMMOX (anaerobic ammonium oxidation) 工艺的首要选择^[11]. 厌氧氨氧化菌对温度、毒物、pH 值、DO、生长基质等环境条件异常敏感,环境发生变化就会致使厌氧氨氧化菌活性降低、失稳后难以恢复^[12~16],污水处理厂的启动需要大量的种泥,种泥在运输过程中需要一定时间,这使得种泥需要适当的短期储存方法,这对种泥的储存提出了更高的要求. 汪彩华等^[17]研究了保存基质类型、温度对该菌储存的影响,结果表明,在常温(15℃±2℃)下以(NH₄)₂SO₄ 为保藏基质进行保存是一种经济高效的方法^[18];黄佳路等^[19]研究了保存时间对该菌的影响,结果表明储存时间对于该菌活性影响很大;基质浓度作为一种容易调控的参数,对于保存过程中生物的活性有着重要影响,而目前鲜有关于基质浓度对于 ANAMMOX 菌储存的研究.

本实验结合上述研究,在 15℃±1℃ 条件下,采用厌氧氨氧化种泥(正常运行所处的 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 基质浓度为 120 mg·L⁻¹),将其置于不同保存基质浓度(0、60、120 mg·L⁻¹)下进行短期储存(15 d),通过比较储存前后菌种活性、有机物及 EPS 含量,以及系统脱氮性能恢复情况,找到了适合厌氧氨氧化菌短期保存的基质浓度,以期为 ANAMMOX 的工程化应用提供理论支撑和技术

指导.

1 材料与方法

1.1 接种污泥和实验用水

储存前的污泥来自于实验室小试 SBR 反应器中,其运行温度为 35℃,进水基质中 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 浓度为 120 mg·L⁻¹,C/N 为 5,水力停留时间为 12 h,总氮去除速率为 1.852 kg·(m³·d)⁻¹,总氮去除率为 80% 以上,其消耗的 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 与产生的 NO₃⁻-N 实测值之比为 1:1.37:0.23,具有良好厌氧氨氧化活性的厌氧氨氧化污泥.

本实验采用人工配水,(NH₄)₂SO₄ 提供 NH₄⁺-N,NaNO₂ 提供 NO₂⁻-N,NaHCO₃ 提供无机碳源和碱度,其 C/N 为 5,KH₂PO₄ 为 2.5 mg·L⁻¹,CaCl₂ 为 12.5 mg·L⁻¹ 以及 1.00 mL·L⁻¹ 的微量元素;微量元素成分为:EDTA (15 g·L⁻¹),CoCl₂·6H₂O (0.25 g·L⁻¹),ZnSO₄·7H₂O (0.42 g·L⁻¹),CuSO₄·5H₂O (0.24 g·L⁻¹),MnCl₂·4H₂O (0.98 g·L⁻¹),H₃BO₄ (0.015 g·L⁻¹),NiCl₂·2H₂O (0.020 g·L⁻¹),NaWO₄·2H₂O (0.060 g·L⁻¹).

储存期间,1 号装置采用低基质浓度保存,无基质添加;2 号装置采用中基质浓度保存,其基质浓度为 60 mg·L⁻¹ NH₄⁺-N、60 mg·L⁻¹ NO₂⁻-N;3 号装置采用高基质浓度保存,其基质浓度为 120 mg·L⁻¹ NH₄⁺-N、120 mg·L⁻¹ NO₂⁻-N.

恢复期间(NH₄)₂SO₄、NaNO₂ 根据系统恢复情况按需配制(表 1).

表 1 反应器不同阶段基质配比
Table 1 Matrix ratios in different stages

阶段	温度/℃	主要基质配比
储存前	35	566 mg·L ⁻¹ 硫酸铵和 591 mg·L ⁻¹ 亚硝酸钠(分别提供 120 mg·L ⁻¹ 的氨氮和亚硝酸盐氮), 1 010 mg·L ⁻¹ 的碳酸氢钠提供碱度和无机碳源
储存阶段	15	1 号 无任何基质投加
		2 号 283 mg·L ⁻¹ 硫酸铵、296 mg·L ⁻¹ 亚硝酸钠、505 mg·L ⁻¹ 碳酸氢钠
		3 号 566 mg·L ⁻¹ 硫酸铵、591 mg·L ⁻¹ 亚硝酸钠 1 010 mg·L ⁻¹ 碳酸氢钠
恢复阶段	35	283~566 mg·L ⁻¹ 硫酸铵、296~591 mg·L ⁻¹ 亚硝酸钠、505~1 010 mg·L ⁻¹ 碳酸氢钠

1.2 实验装置及运行参数

本实验分为两个阶段:污泥储存阶段和活性恢复阶段.

污泥储存阶段:将 600 mL 种泥置于 2 L 的厌氧瓶中,分别加入高、中、低浓度的配水,定容至 2 L,并塞紧保证其厌氧环境;为减小温度波动过大对菌种保存造成影响,将装有菌种的厌氧瓶置于装有水浴的容器中于避光处进行常温水浴;将水浴容

器放置于室内,在 15℃±1℃ 环境中保存 15 d.

活性恢复阶段:将储存后的菌种用蒸馏水冲洗 3 遍,并分别置于 3 组相同规格的 SBR 反应器 1、2、3 号中进行恢复实验,反应器高 60 cm,内径 10 cm,有效容积 4 L,换水比是 66.7%,采用低基质浓度逐步恢复方法,恢复初期基质浓度为 60 mg·L⁻¹ NH₄⁺-N、60 mg·L⁻¹ NO₂⁻-N,待效果提升后恢复至 120 mg·L⁻¹ NH₄⁺-N、120 mg·L⁻¹ NO₂⁻-N. 水

力停留时间根据反应器的恢复效果由 24 h 逐渐递减至储存前的 12 h; 置于 35℃ (储存前温度) 下进行恢复, 并对相关参数进行测定。

1.3 分析方法

NH_4^+ -N 的测定采用纳氏试剂分光光度法; NO_2^- -N 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO_3^- -N 采用紫外分光光度法, 污泥形态采用光学显微镜 (Olympus BX51) 进行观察和记录。污泥的粒径分布采用激光粒度仪 (Malvern Mastersizer 2000) 进行测定。荧光物质采用三维荧光分光光度计 (上海棱光技术有限公司 F97) 测定, EPS 中 PS: 苯酚-硫酸比色法; PN: 考马斯亮蓝法。

比厌氧氨氧化活性 (SAA) 测定: 将厌氧氨氧化污泥 5 g 于初始 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度分别为 120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 158 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 100 mL 配水置于厌氧瓶中, pH 值在 7.7 ~ 8 之间, 通过高纯氮气曝气 20 min 以保证配水的厌氧环境。然后避光培养于 30℃、140 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的水浴摇床, 每隔 1.5 h 取水样测定 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度。由基质浓度降解曲线, 计算出污泥的 SAA, 每个样品设置 3 个平行样。

三维荧光测定: 首先取泥水混合样品于 10 mL 离心管中, 室温下用离心机以 8 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 倒掉上清液, 加入适量磷酸盐缓冲溶液, 将污泥稀释至原体积。之后将污泥摇散后超声处理 3.5 min, 接着 80℃ 水浴 30 min (每隔 10 min 左右将泥摇匀 1 次), 最后用离心机 8000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 取上清液进行测定; E_x (激发光谱) 扫描范围为 200 ~ 900 nm, E_m (发射光谱) 扫描范围为 200 ~ 900 nm, 扫描步长均为 10 nm, 扫描速度 1 000 $\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。其中 X 轴代表发射波长, Y 轴代表激发波长, 等高线颜色深浅反映样品的荧光强度。

2 结果与讨论

2.1 储存前后污泥的活性变化

在 15℃ ± 1℃ 不同基质浓度 (低、中、高) 条件下, 进行 15 d 的短期储存, 分别在储存前后上述标准方法测定反应器中种泥的 SAA, 通过 SAA 的变化可以间接反映 ANAMMOX 菌的丰富程度和反应器的运行效果, 从而表征污泥的活性变化。

在储存前对种泥 SAA 测定, 其值 (以 N/VSS 计, 下同) 为 0.223 $\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$, 将污泥从储存环境中取出, 置于纯净水中淘洗 3 遍后, 立即对其 SAA 进行测定取平均值。由图 1 可知室温条件下在不同基质浓度中储存 15 d 后储存的菌种活性下降程度

差别较大, 1、2、3 号反应器其活性分别下降 41.8%、17.4%、33.4%。由于储存期间温度降低, 使得 1、2、3 号反应器中菌种厌氧氨氧化活性均出现了较大幅度的降低, 这与 Dosta 等^[20]的研究发现降低反应器运行温度后, 重新恢复至原温度运行 ANAMMOX 菌活性会出现大幅下降的研究结果一致^[21,22], 储存期间基质浓度这个重要参数较储存前也发生了较大的变化, 温度和基质浓度的巨大变化对系统产生了极大冲击, 打破系统原来的稳态, 使得菌种活性产生不同程度的下降。经过 15d 的储存后, 2 号反应器中的菌种活性保留最高为 0.184 $\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$, 这是因为在该储存条件 (15℃ ± 1℃) 下, 温度降低导致厌氧氨氧化菌活性降低, 底物消耗速率降低, 适当的基质浓度为其反应提供了相对充足的底物, 支撑其在短期储存过程中的物质能量需求; 除此之外, 由于温度对于厌氧保存状态下的 ANAMMOX 菌的影响比其他异养菌的影响更大^[23], 因此要保持 ANAMMOX 菌的优势地位, 必须考虑在储存过程中不同菌种之间的竞争问题, 而 NO_2^- -N 对于很多微生物具有毒害作用, 但 ANAMMOX 菌对 NO_2^- -N 的耐受度比其他菌更高^[24], 2 号反应器的 NO_2^- -N 的基质浓度在为 ANAMMOX 菌提供反应底物的同时, 还起到抑制系统中其他异养菌的作用, 这对于抵消温度对 ANAMMOX 菌冲击, 保持该菌在系统中的优势菌群地位具有重要作用。3 号反应器中 SAA 为 0.149 $\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$, 因为储存过程中 NO_2^- -N 的基质浓度过高, 由于在该温度下菌种活性较低, 导致过量的 NO_2^- -N 不能被及时消耗, 系统长时间处于较高浓度的 NO_2^- -N 中, 在抑制其他异养菌的同时, 对 ANAMMOX 也产生了抑制作用。由此可知, 在保存过程中及时解除 NO_2^- -N 的抑制对于菌种活性的保存具有重要意义; 1 号反应器中菌种活性保留更低 SAA 仅为 0.13 $\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$, 只是由于在

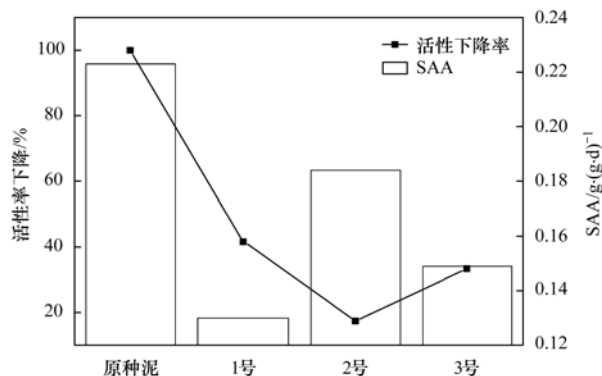


图1 SAA 变化及活性下降率

Fig. 1 Change of the SAA and activity decline rate

无基质的环境中,系统中 ANAMMOX 长期处于饥饿状态,导致部分细菌死亡,而死亡的菌体为系统中异养菌提供营养物质,致使系统中其他菌种繁殖,ANAMMOX 失去在系统中的菌种优势.

在 ANAMMOX 常温短期储存过程中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度为 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 储存环境更有利于菌种活性和菌种优势的保留. 除此之外,与无基质 ($0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 饥饿状态相比,较高的基质浓度 ($120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 抑制更有利于系统中 ANAMMOX 菌种优势.

2.2 储存前后污泥内有机物及 EPS 的变化

胞外聚合物 (EPS) 是细菌在一定的环境条件下分泌于细胞体外的一些高分子聚合物,有利于细胞膜的稳定,对保持生物膜微观结构和功能的完整性起着关键作用,而且还可以在不利环境中为微生物提供营养物质. EPS 中 PN 含有大量带有不同官能团的芳香环结构和不饱和脂肪酸,其组分及含量对污泥性能有重要影响^[25],这些官能团具有荧光特性,是可以表征污泥活性和稳定性的一个重要参数.

三维荧光光谱技术是通过在不同的激发波长上扫描发射荧光谱以获得激发-发射矩阵 (EEM),基于 EEM 数据构建三维立体图或等高线 (指纹图) 描绘监测对象特性^[26]. 本实验利用化学分析结合三维荧光光谱分析对储存前后种泥中有机物类型和 EPS 含量更直观地表征,进一步解释储存前后污泥的性能变化.

在种泥储存前后,对预处理后的污泥进行三维荧光光谱分析,根据 Coble^[27] 等基于 ^{13}C 核磁共振分析研究和 DOM (dissolved organic matter, DOM) 组分分级^[28],将废水处理出水中可溶性微生物产物分为 5 类主要荧光基团:类腐殖酸 ($E_x/E_m = 237 \sim 260/400 \sim 500 \text{ nm}$)、类酪氨酸 ($E_x/E_m = 225 \sim 237/309 \sim 321 \text{ nm}$ 及 $E_x/E_m = 275/310 \text{ nm}$)、类腐殖酸 ($E_x/E_m = 300 \sim 370/400 \sim 500 \text{ nm}$)、类色氨酸 ($E_x/E_m = 275/340 \text{ nm}$)、类色氨酸 ($E_x/E_m = 225 \sim 237/340 \sim 381 \text{ nm}$).

由图 2 所示,经过处理的泥样在三维荧光光谱

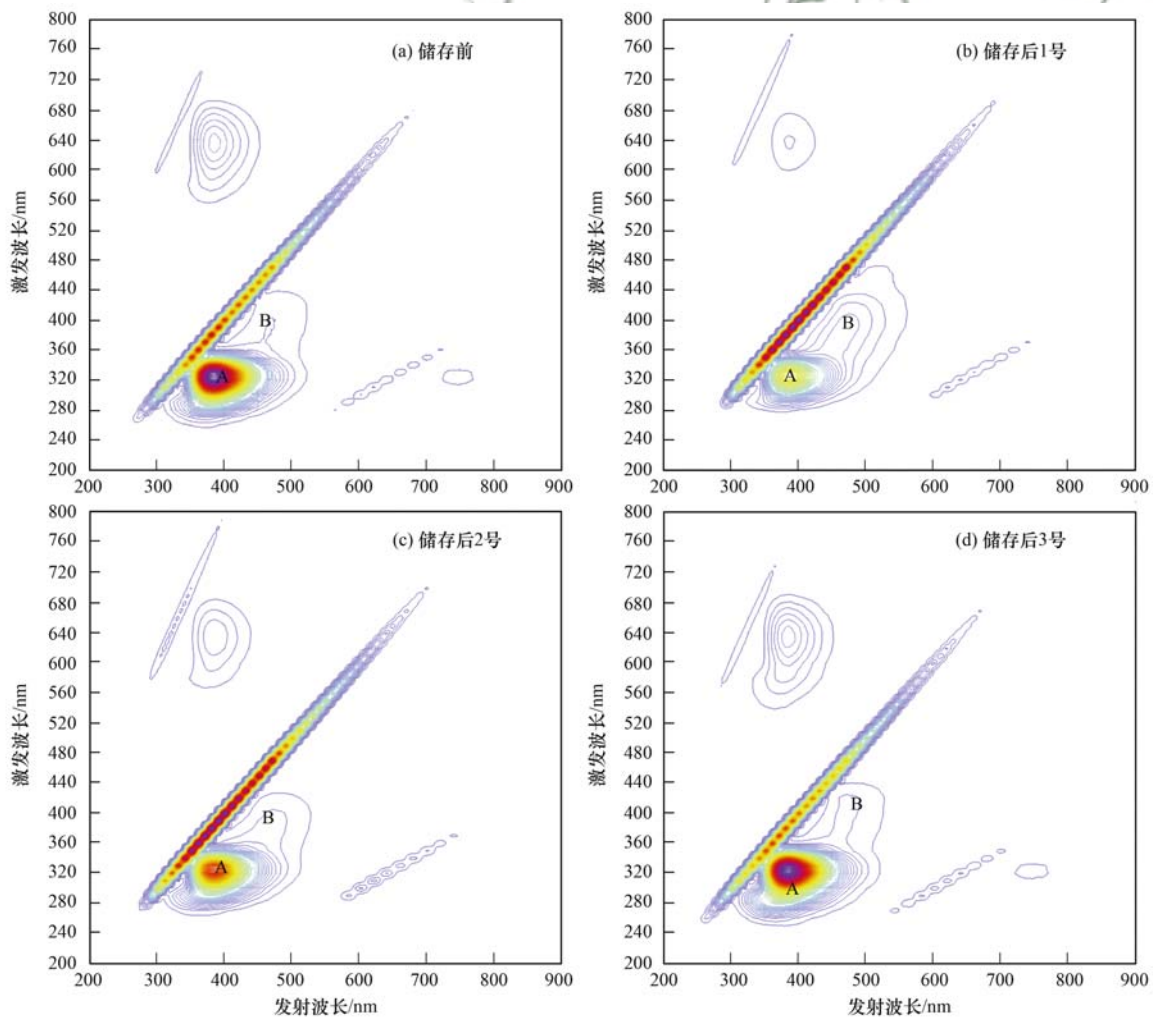


图 2 储存前后种泥三维荧光图

Fig. 2 Three-dimensional fluorescence map of seed sludge before and after storage

中存在着两个荧光尖峰: PeakA、PeakB, 其分别代表的物质为类色氨酸、类腐殖酸。根据峰的颜色深浅可以表征峰强度, 通过比较储存前后不同污泥三维荧光光谱可知, 经过 15 d 的储存后, 样品的三维荧光光谱中 PeakA 与 PeakB 的颜色都出现了不同程度的变浅, 表明 PeakA 与 PeakB 的峰强降低, 即类色氨酸、类腐殖酸物质在储存的过程中被不同程度地消耗或分解, PeakA 下降较明显, 即类色氨酸消耗较多。除此之外, 不同基质浓度保存条件下的泥样, 该物质的消耗程度各有不同, 高基质浓度中颜色保持较好, 表明该物质被消耗得最少, 其次是中基质浓度, 而低基质浓度的泥样中该物质跟储存前相比已经被大量消耗, 荧光尖峰颜色发生较大的削弱, 上述物质的含量变化表明该物质可能作为在污泥饥饿的阶段一种储能物质, 在储存期间作为内源呼吸的营养物质被菌体吸收。

待测污泥样品因其 DOM 组分复杂, 在采用三维荧光光谱技术对系统中 DOM 定性定量分析的同时, 为进一步提高其分析能力, 本实验结合标准 EPS 测定方法, 以期对储存前后污泥的活性变化做出合理解释; 这是因为以往研究表明, EPS 中所存在的 DOM 主要包含了类蛋白、类富里酸、类腐殖酸和各种亲水性有机酸、羧酸、氨基酸和碳水化合物等, 其中的类色氨酸、类腐殖酸含量较高占据 EPS 中较高比例, PeakA 与 PeakB 中大部分的类色氨酸、类腐殖酸中主要来源于 EPS。除此之外, 还有小部分来自于细胞死亡, 导致细胞内溶有机物水解释放出一定量的类色氨酸、类腐殖酸。

由图 3 可知, PeakA 与 PeakB 所对应的物质在污泥储存前后的变化与 EPS 的变化趋势大致相同, 即储存基质浓度越低, 物质消耗量越大。同储存前相比, 储存后种泥中的 EPS 含量均出现不同程度的下降, 1、2、3 号反应器中种泥 EPS 含量分别下降 50.9%、41.7%、23.7%, 且随着基质浓度的减小, EPS 的消耗量迅速增大, 这是因为 EPS 可以在基质匮乏时充当碳源和能源物质发生水解并被消耗导致, 3 号反应器基质相对充裕, 这是因为较高的总氮质量浓度可以提高 EPS 的含量^[29], 一定的基质浓度为 EPS 的消耗提供一定的缓冲作用, 减少了 EPS 的消耗, 使得 EPS 剩余最多, 而 1 号反应器中一直处于无基质供应状态, 过长的基质匮乏阶段导致了 EPS 作为碳源和能源物质在菌体内源呼吸阶段被大量消耗。

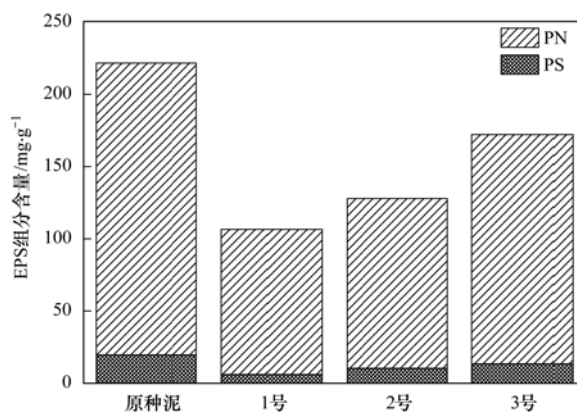


图 3 储存前后污泥 EPS 组分变化

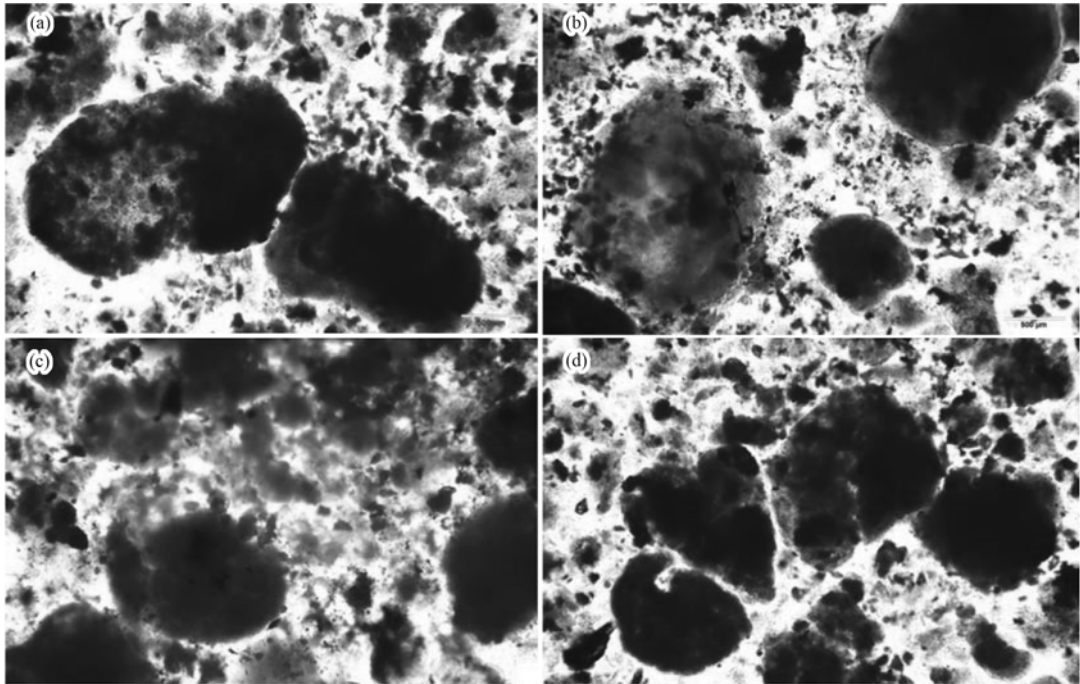
Fig. 3 Change of the EPS composition of the sludge

2.3 污泥恢复性能差异

将储存后的污泥按照一定的恢复策略进行恢复, 本阶段对污泥储存前后、污泥性状和污泥粒径进行了观测和对比, 以明晰污泥厌氧氨氧化过程中活性恢复和菌群变化情况。

如图 4、图 5 所示, 储存前后污泥形态颜色、大小以及污泥粒径都发生了较大的变化, 表明在短期储存过程中, 不同的基质浓度会对污泥的性状和粒径产生影响。储存前污泥结构紧实, 颜色深红, 颗粒饱满, 平均粒径为 491 μm ; 储存后污泥结构都有变松散的趋势, 污泥颗粒颜色变浅, 1、2、3 号反应器中污泥的粒径分别下降为原来的 68.4%、83.3%、91.8%, 在 1 号反应器中污泥粒径骤降 31.6%, 污泥颜色变灰, 颗粒污泥发生解体, 这是菌体死亡、污泥活性基本丧失的体现, 表明在该条件下储存, 大部分污泥已经开始内源呼吸, 并伴随着菌种死亡, 导致生物量锐减。2 号反应器内污泥颗粒颜色和形态结构相对保存较好, 因其有部分基质, 减少环境冲击对污泥的影响, 并在基质匮乏期为菌种提供适当的物质储备, 减少了污泥的内源呼吸期对颗粒污泥的损耗, 使其较 1 号反应器相比具有相对完整的污泥形态和粒径大小, 生物量保持较好。3 号反应器内污泥颗粒颜色和形态结构保存最好, 颜色同储存前一致, 仅颗粒变小, 表明在 3 号反应器中菌种死亡较少, 生物量保持最好。

将污泥从储存结束后进行恢复, 储存前进水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 120 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 由于储存后菌种活性降低, 为避免较大基质浓度对菌群造成冲击, 在恢复阶段, 采用较低的进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度 (60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 对菌种进行复壮, 随着反应器中菌种活性的增强, 系统脱氮效果的恢复, 逐渐将



(a) 储存前; (b) 储存后 1 号; (c) 储存后 2 号; (d) 储存后 3 号
图 4 储存前后污泥形态变化

Fig. 4 Change of the sludge morphology before and after storage

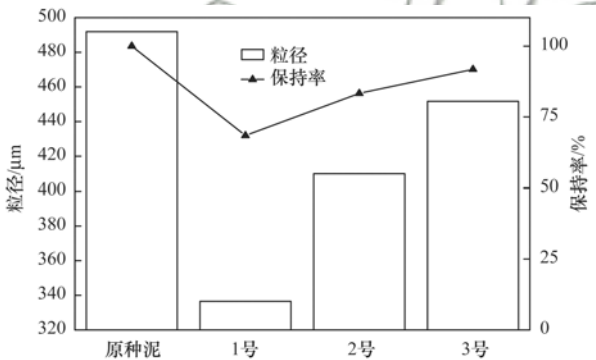


图 5 储存前后污泥粒径变化

Fig. 5 Change of the sludge particle size

进水基质浓度恢复至原水平. 通过反应器脱氮性能和化学计量数的变化, 间接反映菌种恢复情况.

此阶段通过测定反应器脱氮性能和化学计量数的变化, 间接反映菌种恢复情况. 由图 6 可知, 储存前种泥的处理效果较为稳定, NH_4^+-N 、 NO_2^--N 出水均维持在较低水平, 其总氮去除率均为 82.3% 以上. 1、2、3 号反应器在恢复初期其总氮去除率仅为 25.2%、45.3%、51.1%, 由于 1 号反应器中种泥经过较长时间的基质匮乏期, 导致菌体开始内源呼吸, 造成菌体消耗和大量菌体死亡, 死亡的菌体为系统中其他异养菌提供了营养物质, 异养菌开始繁殖, 进一步削弱了厌氧氨氧化菌在系统中的竞争优势, 导致较低的厌氧氨氧化菌生物量,

进而影响到反应器恢复初期的去除率, 系统需要较长时间来重新富集厌氧氨氧化菌使其生物量达到储存前程度, 才能使系统脱氮性能恢复; 2 号反应器与 1 号相比因有部分基质缓冲, 储存过程中的内源呼吸期较短, 厌氧氨氧化菌种死亡较少, 加上一定程度的基质抑制使得厌氧氨氧化菌在系统中还保存有一定的优势, 因此较 1 号相比 2 号需要重新富集厌氧氨氧化菌量较少, 需要较短的恢复时间, 就可以使系统脱氮性能恢复; 3 号反应器中由于较高的基质浓度, 抑制了系统中其他菌种, 保证了厌氧氨氧化菌在系统中的优势地位. 除此之外, 还提供了充足的基质, 使得厌氧氨氧化菌体死亡较少, 生物量保持较好, 但是由于较长时间处于高基质浓度环境中, 厌氧氨氧化菌活性也受到了一定程度的抑制, 因此在 3 号反应器中需要通过恢复菌种活性解除基质抑制的方式来恢复系统脱氮性能; 通过表 2 中开始恢复时 1、2、3 号中化学计量数同标准 0.26:1:1.32 偏离大小比较, 表明了 3 个系统中反硝化现象的逐渐减弱, 进一步支撑了上述观点.

1、2、3 号反应器分别经过了 15、10、7 d 的活性迟滞期, 化学计量数之比分别从刚恢复时的 0.1:1:1.6、0.16:1:1.49、0.19:1:1.42 恢复至 0.21:1:1.39、0.24:1:1.37、0.23:1:1.37, 反应器

脱氮性能逐渐恢复至原水平. 厌氧氨氧化种泥活性恢复的实质就是系统内厌氧氨氧化菌的活化、扩增、功能增强的过程. 厌氧氨氧化菌的世代周期为 10~15 d 左右, 厌氧氨氧化菌必须达到一定的生物量才能体现出厌氧氨氧化活性. 1、2 号反应器中细菌经过适当的增殖后, 生物量才能依次恢复至原水平, 逐渐补充因内源呼吸导致减少的数量, 实现活性的恢复; 3 号中因基质相对充足, 细菌总量因内源呼吸损失较少, 恢复过程主要是解除厌氧氨氧化菌高基质抑制, 使系统脱氮性能提升至原水平. 相比于菌体重新增殖恢复而言, 通过这种方式系统脱

氮性能恢复时间更快.

表 2 反应器化学计量数变化

Table 2 Change of the stoichiometry in the reactor

阶段	时间/d	反应器编号	化学计量数之比 ¹⁾
开始恢复时	1	1	0.1:1:1.6
		2	0.16:1:1.49
		3	0.19:1:1.42
效果稳定后	15	1	0.21:1:1.39
	10	2	0.24:1:1.37
	7	3	0.23:1:1.37

1) 生成硝酸盐氮: 消耗氨氮: 消耗亚硝酸盐氮

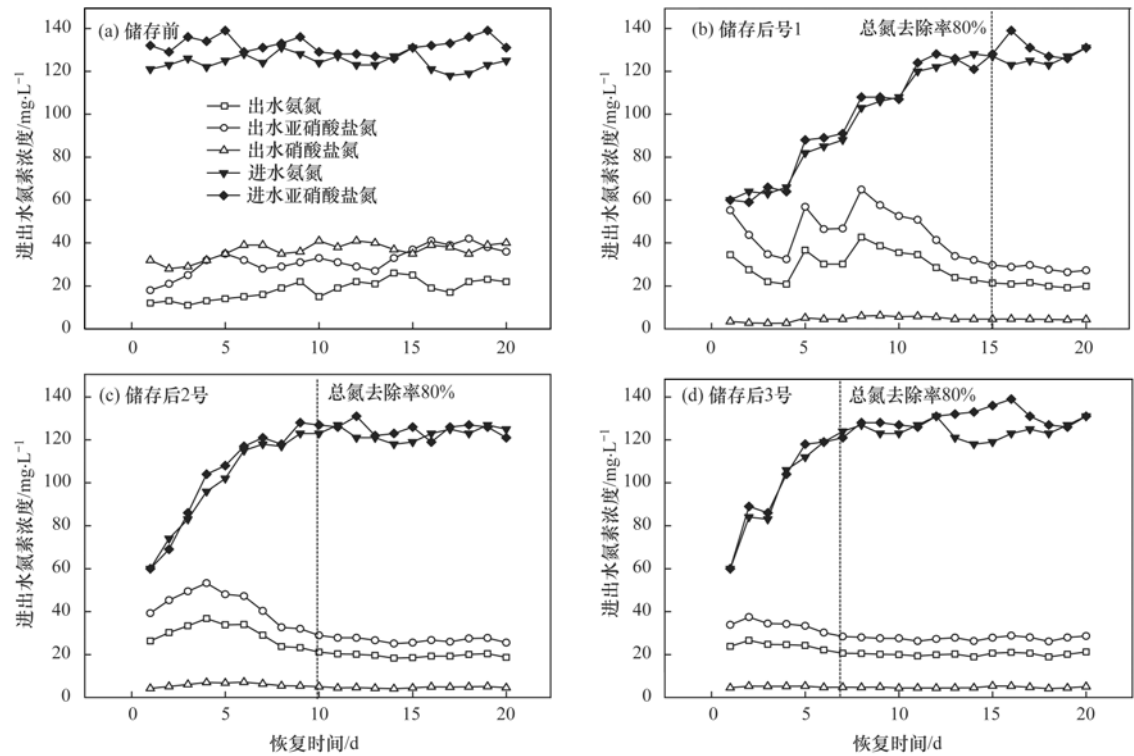


图6 恢复期脱氮性能对比

Fig. 6 Comparison of the denitrification performance

3 结论

(1) 在 15℃ ± 1℃ 条件下, 经过 15 d 短期储存后, 储存在基质浓度为 0、60、120 mg·L⁻¹ 的 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 中的厌氧氨氧化菌种泥的 SAA 下降为原来的 58.2%、82.6%、66.6%, 60 mg·L⁻¹ NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 由于其适当的底物缓冲以及该浓度下抑制其他菌种的原因使得其活性保留最高.

(2) 在储存期间, 由于基质匮乏导致细胞内源呼吸消耗有机物, 使得 1、2、3 号反应器内污泥粒径分别下降为原来的 68.4%、83.3%、91.8%, EPS 含量分别下降 50.9%、41.7%、23.7%, 在一定浓

度范围内, 储存基质浓度越低, 污泥自身有机物的消耗越高, 即一定的基质浓度可以缓解其污泥内源呼吸导致的自身消耗.

(3) 1、2、3 号反应器分别经过 15、10、7 d 实现系统脱氮性能和厌氧氨氧化活性恢复, 表明储存在高基质环境中的菌种恢复时间更快, 即对菌种进行活化和功能增强同菌种增殖补充内源呼吸损失的生物量相比, 更有利厌氧氨氧化活性的恢复.

参考文献:

[1] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(7): 3248-3250.

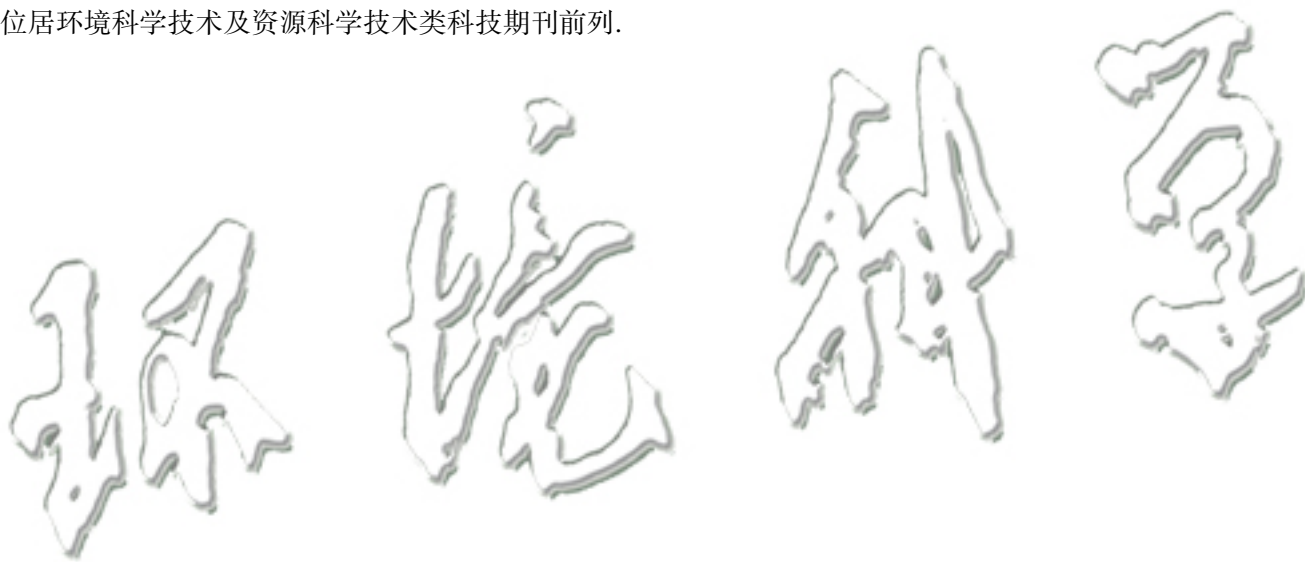
[2] Fux C, Boehler M, Huber P, et al. Biological treatment of

- ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) in a pilot plant [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **99**(3): 295-306.
- [3] Van Der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [4] 于英翠, 高大文, 陶彧, 等. 利用序批式生物膜反应器启动厌氧氨氧化研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(5): 843-849.
- Yu Y C, Gao D W, Tao Y, *et al.* Start-up of anammox in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR) [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(5): 843-849.
- [5] 唐崇俭, 郑平, 陈建伟. 流加菌种对厌氧氨氧化工艺的影响[J]. *生物工程学报*, 2011, **27**(1): 1-8.
- Tang C J, Zheng P, Chen J W. Effect of sequential biocatalyst addition on Anammox process [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2011, **27**(1): 1-8.
- [6] 曾涛涛, 李冬, 谢水波, 等. 厌氧氨氧化菌微生物特性研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, **20**(6): 1111-1116.
- Zeng T T, Li D, Xie S B, *et al.* A review on microbial properties of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) bacteria [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2014, **20**(6): 1111-1116.
- [7] 丛岩, 黄晓丽, 王小龙, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥的快速形成[J]. *化工学报*, 2014, **65**(2): 664-671.
- Cong Y, Huang X L, Wang X L, *et al.* Faster formation of anammox granular sludge [J]. *CIESC Journal*, 2014, **65**(2): 664-671.
- [8] 唐崇俭, 郑平, 张蕾. 厌氧氨氧化反应器的接种污泥和启动策略[J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(14): 15-20.
- Tang C J, Zheng P, Zhang L. Seeding sludge and start-up strategy for anammox bioreactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, **24**(14): 15-20.
- [9] Tsushima I, Kindaichi T, Okabe S. Quantification of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in enrichment cultures by real-time PCR [J]. *Water Research*, 2007, **41**(4): 785-794.
- [10] 张泽文, 李冬, 张杰, 等. 接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5215-5221.
- Zhang Z W, Li D, Zhang J, *et al.* Effect of seeding single/mixed sludge on rapid start-up of an ANAMMOX reactor [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5215-5221.
- [11] 闫刚, 李田, 徐乐中, 等. 基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4324-4331.
- Lü G, Li T, Xu L Z, *et al.* Quick start-up performance of combined ANAMMOX reactor based on different inoculated sludge types [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4324-4331.
- [12] Van Dongen U, Jetten M S, Van Loosdrecht M C. The SHARON-Anammox process for treatment of ammonium rich wastewater [J]. *Water Science & Technology*, 2001, **44**(1): 153-160.
- [13] Van Niftrik L A, Fuerst J A, Damsté J S S, *et al.* The anammoxosome: an intracytoplasmic compartment in anammox bacteria [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2004, **233**(1): 7-13.
- [14] Egli K, Fanger U, Alvarez P J J, *et al.* Enrichment and characterization of an anammox bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium-rich leachate [J]. *Archives of Microbiology*, 2001, **175**(3): 198-207.
- [15] Waki M, Tokutomi T, Yokoyama H, *et al.* Nitrogen removal from animal waste treatment water by anammox enrichment [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(14): 2775-2780.
- [16] 高大文, 侯国凤, 陶彧, 等. 厌氧氨氧化菌代谢有机物研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, **44**(2): 89-93.
- Gao D W, Hou G F, Tao Y, *et al.* Review of the studies on metabolizing organic matter by ANAMMOX bacteria [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, **44**(2): 89-93.
- [17] 汪彩华, 郑平, 蔡靖, 等. 厌氧氨氧化菌混培物保藏方法的研究[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(8): 1474-1482.
- Wang C H, Zheng P, Cai J, *et al.* Preservation of ANAMMOX bacteria [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(8): 1474-1482.
- [18] 李祥, 郑宇慧, 黄勇, 等. 保存温度及时间对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(1): 56-61.
- Li X, Zheng Y H, Huang Y, *et al.* Effect of preservation temperature and time on ANAMMOX sludge activity [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(1): 56-61.
- [19] 黄佳路, 王小龙, 高大文. 常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4687-4695.
- Huang J L, Wang X L, Gao D W. Storage and reactivation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) sludge at room temperature [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4687-4695.
- [20] Dosta J, Fernández I, Vázquez-Padín J R, *et al.* Short- and long-term effects of temperature on the anammox process [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 688-693.
- [21] Hu Z Y, Lotti T, De Kreuk M, *et al.* Nitrogen removal by a nitrification-anammox bioreactor at low temperature [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, **79**(8): 2807-2812.
- [22] Lotti T, Kleerebezem R, Van Loosdrecht M C M. Effect of temperature change on anammox activity [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2015, **112**(1): 98-103.
- [23] 宋成康, 王亚宜, 韩海成, 等. 温度降低对厌氧氨氧化脱氮效能及污泥胞外聚合物的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 2006-2013.
- Song C K, Wang Y Y, Han H C, *et al.* Effect of decreasing temperature on the performance and extracellular polymeric substance of anaerobic ammonia oxidation sludge [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 2006-2013.
- [24] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia and free nitrous acid concentration on the anabolic and catabolic processes of an enriched *Nitrosomonas* culture [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, **95**(5): 830-839.
- [25] 樊鹏超, 曾薇, 纪兆华, 等. 城市污水厂活性污泥中胞外聚合物与工艺运行及污泥沉降性能的相关性分析[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(8): 2996-3002.
- Fan P C, Zeng W, Ji Z H, *et al.* Correlation of extracellular polymeric substance (EPS) in activated sludge of municipal wastewater treatment plants to process performance and sludge settleability [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(8): 2996-3002.
- [26] Zhang Y L, Yin Y, Feng L Q, *et al.* Characterizing

- chromophoric dissolved organic matter in Lake tianmuhu and its catchment basin using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis [J]. *Water Research*, 2011, **45** (16): 5110-5122.
- [27] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51** (4): 325-346.
- [28] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37** (24): 5701-5710.
- [29] 李冬, 田海成, 梁瑜海, 等. 水质条件对厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, **49** (2): 6-12.
- Li D, Tian H C, Liang Y H, *et al.* Effect of water quality of influent on the content of extracellular polymeric substances in anammox granule sludge [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, **49** (2): 6-12.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2018 年 11 月 1 日, 中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2017 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2017 年度总被引频次 11 228, 影响因子 1. 958, 多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)