

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

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

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征稿简则 (4050)
信息 (4085, 4104, 4337)	

长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复

李田¹, 魏凡凯¹, 汪裕昌¹, 沈耀良^{1,2,3}, 吴鹏^{1,2,3*}, 宋吟玲^{1,2,3}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 为探究长期储存亚硝化絮状污泥的脱氮性能, 采用 CSTR 反应器, 接种 4℃ 下储存了 10 个月的亚硝化絮状污泥, 考察其活性恢复性能, 并采用 MiSeq 高通量测序技术分析了污泥中微生物菌群结构的变化情况。结果表明, 控制 DO 为 0.4~0.8 mg·L⁻¹、pH 值 8 左右、温度为 (30±1)℃ 等条件, 长期储存亚硝化絮状污泥的活性可以在 15 d 内迅速恢复, 氨氮去除率和亚硝积累率均达到 90% 以上; 此外, 污泥颜色由接种初期的灰黑色迅速恢复至棕黄色, SVI 值显著降低, MLVSS/MLSS 升高, EPS 含量明显增加。随着亚硝化性能的恢复, 厌氧、发酵微生物被洗脱, *Nitrosomonas* 等氨氧化细菌相对丰度显著增加, 同时, *Nitrospira* 等硝化菌的生长得到了有效抑制。经历长期储存的亚硝化絮状污泥可作为实现短程硝化快速启动的接种污泥, 更有利于短程硝化工艺的实际应用。

关键词: 亚硝化絮状污泥; 活性恢复; 完全混合反应器 (CSTR); 微生物菌群结构

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4310-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201802118

Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage

LI Tian¹, WEI Fan-kai¹, WANG Yu-chang¹, SHENG Yao-liang^{1,2,3}, WU Peng^{1,2,3*}, SONG Yin-ling^{1,2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou 215009, China)

Abstract: In order to explore the nitrogen removal performance of nitrosation flocculent sludge subject to long-term storage, nitrosation flocculent sludge which had been stored at 4℃ for ten months was inoculated in a continuous stirred tank reactor (CSTR) to investigate its activity recovery performance. MiSeq high throughput sequencing technology was also employed to analyze the structure of the microbial community before and after reactivation. Results showed that, under DO control of DO 0.4-0.8 mg·L⁻¹, pH value of about 8 and temperature of (30±1)℃, the sludge could be reactivated in 15 days. Both the removal efficiency of ammonia nitrogen and the accumulation ratio of nitrite nitrogen were higher than 90%. The color of the sludge quickly changed from grey at early inoculation to brown, while the sludge volume index (SVI) quickly decreased and both mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS)/mixed liquor suspended solids (MLSS) and extracellular polymer substances (EPS) significantly increased. With the recovery of nitrosation performance, anaerobic and heterotrophic bacteria were washed out, the relative abundance of ammonia-oxidizing bacteria such as *Nitrosomonas* significantly increased, while the growth of nitrite-oxidizing bacteria such as *Nitrospira* was selectively inhibited. Nitrosation flocculent sludge could be inoculated after long-term storage to achieve rapid start-up of partial nitrification and allow practical application of partial nitrification processes.

Key words: nitrosation flocculent sludge; reactivation; continuous stirred tank reactor (CSTR); microbial community structure

基于厌氧氨氧化代谢途径的自养脱氮工艺, 凭借工艺流程简短、无需外加有机碳源、曝气能耗低、污泥产量低等优势, 成为污水生物脱氮领域的研究热点^[1-3]。自养脱氮包含亚硝化和厌氧氨氧化两个过程, 亚硝化是利用参与硝化过程的亚硝化菌和硝化菌的生理特性不同, 将硝化过程稳定控制在亚硝酸盐阶段^[4], 然而, 亚硝酸盐菌增值速率慢且难以维持较高生物浓度^[5], 对环境变化敏感, 使得亚硝化的工业化推进受到影响。如何快速稳定启动亚硝化, 一直是国内外学者研究的重点^[6]。亚硝化的启动性能与反应器的类型息息相关, 目前, SBR

反应器是国内外公认的快速启动亚硝化的理想反应器^[7], 但在实际工程应用中连续流一般是环保工程师的首选工艺模式^[8-10], 连续流完全混合反应器 (CSTR) 运行基建费用低, 操作简便, 结构简单, 可作为亚硝化的理想反应器^[11-13]。然而, 采用 CSTR 反应器启动亚硝化时间较长, 启动时间基本在 45 d

收稿日期: 2018-02-22; 修订日期: 2018-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578353); 江苏省自然科学基金项目(BK20160356); 江苏高校优势学科建设工程项目; 环境工程江苏省重点专业类项目

作者简介: 李田(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水回用与处理技术, E-mail: lt690824185@sina.com

* 通信作者, E-mail: wupengniu@126.com

至数月不等^[14~16]。相比之下, 利用储存污泥的快速活化, 可显著缩短亚硝化的启动时间^[17], 有利于亚硝化工艺的实际应用。

目前, 国内外利用储存污泥进行亚硝化的研究较少, 本题组对长期储存的亚硝化颗粒污泥进行了研究, 在此基础上, 本研究在 CSTR 反应器中接种 4℃ 下储存 10 个月的亚硝化污泥, 对储存了 10 个月的亚硝化絮状污泥进行活化。系统考察了亚硝化性能恢复、外观形态、与胞外聚合物 (EPS) 组成变化, 同时采用 MiSeq 高通量测序技术对活化前后的微生物进行检测, 从分子生物学角度分析接种污泥前后的菌群结构变化, 以期为快速启动亚硝化絮状污泥提供宏观和微观依据, 促进亚硝化工艺的应用。

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验所用装置为合建式连续流 CSTR 反应器 (图 1), 由有机玻璃制成, 分为曝气池和沉淀池两部分组成, 有效容积分别为 1.9 L 和 0.7 L。反应器长 20 cm, 宽 8 cm, 有效高度 24 cm, 采用蠕动泵连续进水, 溢流水。曝气区底部装有曝气装置, 以提供溶解氧, 并使泥水充分混合, 溶解氧 DO 控制在 0.4~0.8 mg·L⁻¹ 之间, 与亚硝化絮状污泥储存之前相同, 实验前期采用连续曝气, 后期采用间歇曝气。反应器的运行工况设置如表 1 所示。活化期间, CSTR 反应器始终置于恒温水浴箱中, 温度控制在 (30±1)℃。

1.2 接种污泥性质

接种污泥为长期冷冻保存的亚硝化絮状污泥,

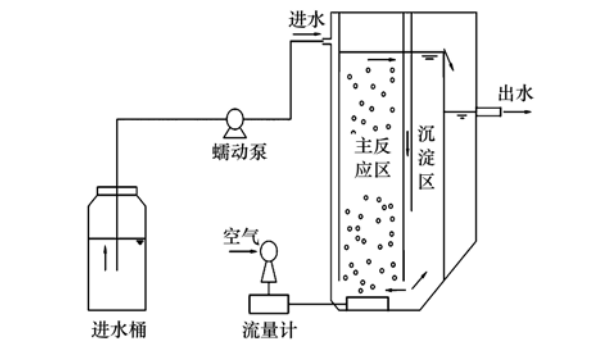


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Experimental apparatus

表 1 CSTR 反应器运行参数

Table 1 CSTR operating parameters

阶段	运行时间/d	HRT/h	氨氮容积负荷 /kg·(m ³ ·d) ⁻¹
I	1~6	4	0.94
II	7~9	3	1.26
III	10~15	2	1.89

接种前在 4℃ 条件下储存了 10 个月。储存前亚硝化絮状污泥为棕黄色, MLVSS/MLSS 为 77%, 污泥体积指数 (SVI) 值为 90 mg·L⁻¹, 氨氮容积负荷 1.024 kg·(m³·d)⁻¹, 氨氮去除率 94%, 亚硝累积率为 89%, 储存 10 个月后, MLVSS/MVSS 和 SVI 均有明显变化, 污泥颜色由储存前的棕黄色分成两层不同的颜色, 分别为灰色 (上层) 和黑色 (下层)。污泥经过 10 个月长期储存后, 会带有浓郁的臭鸡蛋气味, 这是因为污泥经过长期的厌氧储存后, 会发生内源呼吸和厌氧消化, 因而污泥的无机化程度提高, 会产生硫化氢, 甲烷等气体, 所以带有浓郁的臭鸡蛋气味^[18~20]。不同时期的污泥特征如表 2 所示。

表 2 亚硝化絮状污泥的污泥特征

Table 2 Characteristics of nitrosation flocculent sludge

项目	储存前	活化前	活化 15 d
MLVSS/MLSS	0.77	0.65	0.75
SVI/mg·L ⁻¹	90	166	73
颜色	棕黄色	灰色 (上层), 黑色 (下层)	棕黄色

1.3 反应器进水

采用人工配水, 以 (NH₄)₂SO₄ 为氮源 (150 mg·L⁻¹), 不投加任何有机物, 加碳酸氢钠以调节 pH 至 8 左右。另外还包括生物所需的其它营养元素氯化钙 (10 mg·L⁻¹)、硫酸镁 (10 mg·L⁻¹)、磷酸氢二钾 (4 mg·L⁻¹) 及微量元素。微量元素分为微量元素 I 和微量元素 II, 微量元素按照 1 mL·L⁻¹ 添加。微量元素 I 组分 (g·L⁻¹): EDTA 5, FeSO₄ 5,

微量元素 II 组分 (g·L⁻¹): EDTA 15, ZnSO₄·7H₂O 0.43, CoCl₂·6H₂O 0.24, MnCl₂·4H₂O 0.99, CuSO₄·5H₂O 0.25, NaMoO₄·2H₂O 0.22, NiCl₂·6H₂O 0.19, NaSeO₄·10H₂O 0.21, H₃BO₄ 0.014。

1.4 分析方法

实验过程中每隔 1 d 取水样测定, 测定项目主要包括 NH₄⁺-N: 纳氏试剂分光光度法; NO₂⁻-N: N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO₃⁻-N: 紫外分光光

度法; MLSS、MLVSS:标准重量法; SVI:30 min 沉降法; pH:pHS-9V 数显酸度计; 溶解氧:YSI550A 溶氧仪。

采用甲醇-NaOH 法^[21]对絮状污泥的 EPS 进行提取,其主要包含蛋白质(PN)和多糖(PS)组分。PN、PS 分别采用 Lowry 法^[22]和改进苯酚-硫酸法^[23]测定。

1.5 微生物高通量测序分析

分别将活性恢复前、后的亚硝化絮状污泥采集送样,采用 FastPrep DNA 提取试剂盒(QBIOGENE, USA)DNA,完成基因组 DNA 抽提后,利用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测抽提的基因组 DNA。用 16S rRNA 基因引物 338F (ACTCCTACGGGAGGCA GCAG) 和 806R (GGACTACHVGGGTWTCTAAT) 对细菌 16S rRNA 基因进行 PCR 扩增,PCR 仪采用 ABI GeneAmp® 9700 型,采用 TransGen AP221-02; TransStart Fastpfu DNA Polymerase, 20 μ L 反应体系。反应程序为 95℃ 预变性 3 min, 95℃ 变性 30 s, 55℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 45 s, 27 个循环后, 72℃ 延伸 10 min, 每个样品重复 3 次。

使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒 (AXYGEN 公司)切胶回收 PCR 产物,委托上海美吉生物医药科技有限公司完成对 PCR 扩增产物的高通量测序,微生物多样性分析于上海美吉医药生物科技有限公司所提供的 I-Sanger 生信分析云平台上完成。

2 结果与讨论

2.1 亚硝化性能的恢复

在活性恢复的 1~6 d, 控制进水氨氮浓度为 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HRT 为 4 h, 氨氮负荷为 0.945 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, DO 为 0.4~0.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 以选择性抑制 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 等硝化菌(NO_B)的生长^[24~26]。如图 2, 接种储存污泥的第一天, 氨氮去除率就达到了 54.17%, 第二天氨氮去除率便达到 99%, 但由于过高的曝气量, 致使 DO 为 2.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 此时出水硝态氮浓度高达 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 遂在接下来的 4 d 时间降低曝气量, 使 DO 降低至 0.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水硝态氮浓度降低至 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮去除率、亚硝累积率均达到 90% 以上, 各时间段出水氮浓度如图 3。随后分别在第 7 d 和第 10 d 缩短 HRT 为 3 h 和 2 h, 分阶段将进水氨氮负荷提升至 1.89 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 氨氮去除率在第 7 d 和第 10 d 略有降低, 随后迅速恢复, 反应器运行至 15 d 时, 氨氮去除率和亚硝累积率分别为 95% 和 92%, 亚

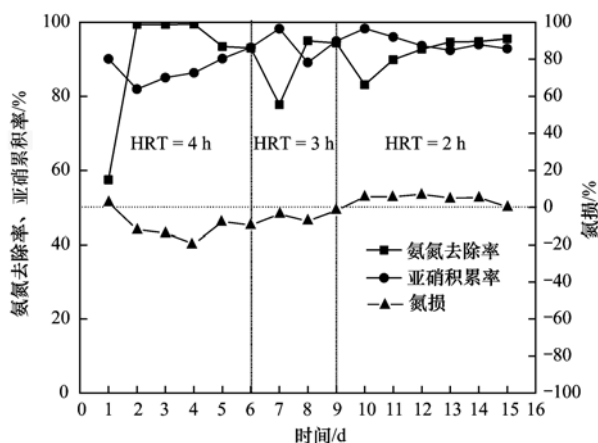


图 2 氨氮去除率、亚硝累积率和氮损的变化

Fig. 2 Variations in removal efficiency of ammonia nitrogen, accumulation ratio of nitrite nitrogen, and nitrogen loss

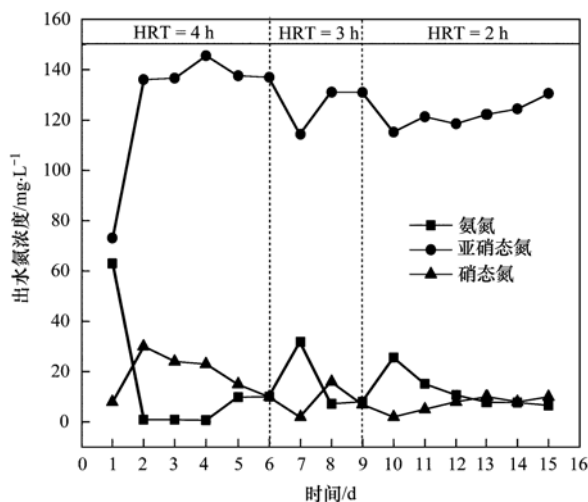


图 3 出水氮浓度变化

Fig. 3 Change in effluent nitrogen concentration

硝化性能恢复良好。

值得说明的是, 反应器对氨氮去除速率仅需 2 d 就达到 99%, 张肖静等^[27]在研究亚硝化絮状污泥的活性时, 在恢复的前几天, 氨氮去除率几乎为 0, 这与本实验的研究结果不符, 这与张控制的 DO 较低, 仅为 0.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 有关。钱飞跃等^[28]在研究常温储存亚硝化颗粒污泥的活化时, 在 1~8 d 内, 反应器对氨氮去除率逐渐增大, 最终达到 95%, 而本实验仅在两天内就达到 99%, 推测可能与污泥形态有关系, 钱飞跃等所用实验污泥为颗粒污泥, 颗粒污泥结构密实, 氧气在颗粒污泥的传递比在絮状中困难^[29], 且钱飞跃所做实验为亚硝化污泥在常温下储存了 1 a, 污泥在常温下长期储存可能导致大量微生物死亡, 这也是钱飞跃所做实验恢复较慢的原因。另外, 在活性恢复的前 9 d 时间中, 出现了不同程度的氮损为负值的现象, 即出水总氮大于进

水总氮. 分析原因是污泥长达 10 个月的储存中, 衍生出一定量的厌氧菌, 在活性恢复实验中因不能适应好氧环境而发生细胞自溶, 从而释放大量的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 进而被 AOB 氧化为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$, 导致出水总氮升高. 在随后的 6 d 中, 有不同程度的氮损, 这是因为反应器中有部分区域为死区, 造成局部厌氧环境, 且反应器中同时有氨氮和亚硝态氮的存在, 为厌氧氨氧化菌提供了适宜的生存环境, 反应器中发

生了局部的厌氧氨氧化反应, 故出现了氮损的现象.

2.2 污泥形态与 EPS 组成的变化

在活化的过程中, 污泥的颜色发生了显著的变化, 活化仅 2 d, 污泥颜色便由长期放置的黑色变为棕黑色, 之后逐渐恢复至棕黄色(图 4), 这是典型的亚硝化絮状污泥的颜色^[30], 表明污泥的亚硝化性能得到恢复.

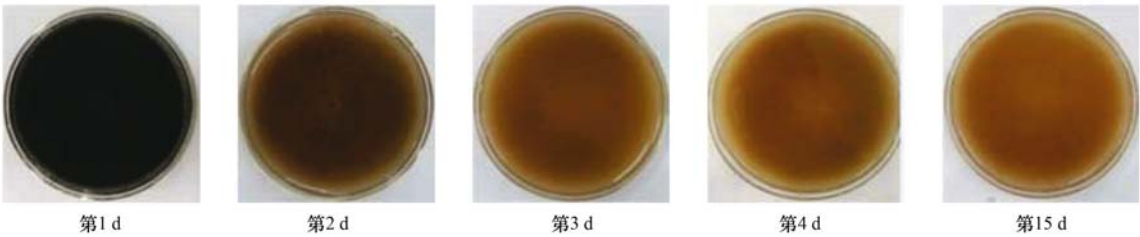


图 4 不同时期污泥颜色
Fig. 4 Sludge color at different times

亚硝化絮状污泥在经历长期储存时, 微生物的内源呼吸导致细胞水解, 产生大量絮体, 在活性恢复实验中由水解产生的絮体随水流出, 导致污泥浓度由 $4\,800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐降低至 $4\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在储存过程中, 由污泥解体产生的絮体导致 SVI 值升至 $166\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 沉降性能明显恶化, 在活性恢复实验中, 絮体随水流出, SVI 值逐渐降低至 $73\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 污泥的絮凝性能和沉降性能得到提升.

接种储存污泥时, 总固体质量浓度 (MLSS) 为 $4\,800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在活性恢复过程中, MLSS 有所降低, 逐渐下降至 $4\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这是因为污泥在长期储存过程中, 微生物的内源呼吸致使细胞水解, 在活性恢复时, 污泥解体产生的絮体和沉降性能较差的污泥随水流出, 反应器内的 MLSS 下降. 正是因为污泥在长期储存过程中, 微生物得不到营养基质和溶解氧, 微生物发生细胞水解, 部分微生物死亡, 污泥的沉降性能和 VSS 含量有所下降, VSS/SS 由储存前的 0.77 下降至 0.56, SVI 指数由 $90\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右上升至 $232\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 在活性恢复过程中, 污泥解体产生的絮体和沉降性能较差的污泥随水流出, SVI 值有所下降(图 5), 沉降性能得到恢复, 同时 VSS/SS 也逐渐恢复, 15 d 后达到 0.75, 表明污泥性能得到提高.

微生物所分泌的胞外聚合物 (EPS) 能够将细菌粘结到一起, 形成菌胶团, 即通常所说的絮凝作用, 故 EPS 是反映污泥性能的重要参数. 本研究分别在污泥储存后和污泥活性恢复后对污泥做了 EPS

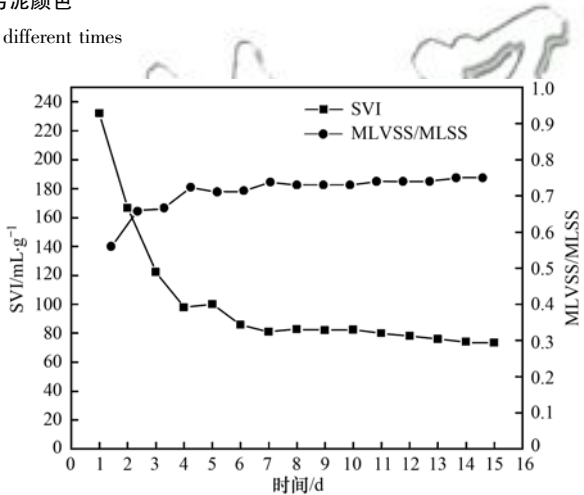


图 5 亚硝化絮状污泥 SVI 和 MLVSS/MLSS 值的变化
Fig. 5 Variations in SVI and MLVSS/MLSS values of nitrosation flocculent sludge

提取实验, 如表 3 所示. 亚硝化絮状污泥在经历了长期储存后, 蛋白质 (PN) 与多糖 (PS) 含量分别只有 $13.9\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $14.7\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 这是由于污泥在储存时, 由于营养物质的缺乏, 污泥分泌的 EPS 被微生物作为底物利用^[31]. 如表 3 所示, 随着污泥活性的恢复, EPS 总量显著增加, 且 PN 的增长量更为显著, 由活性恢复前的 $13.9\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加至 $66.2\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. Sponza 等^[32]发现污泥在 DO 为 0.5 ~ 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 蛋白质、糖类和核酸含量随着时间增长而升高; 李延军等^[33]也发现好氧污泥随着 DO 的升高, 污泥中多糖、蛋白质及 EPS 总量有所增加, 蛋白质产生量约为多糖的 2 ~ 3 倍. 有研究表明, EPS 的总量与污泥的 SVI 值存在相关性, EPS 增多, SVI 值降低, 污泥的沉降性能变强, 这与本实

验的研究结果较为一致,这是因为 EPS 成分大多呈负电性,细胞表面的负电性能够更容易与 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等正价无机离子相结合,增加絮体疏水性能和沉降速度,故 SVI 值降低. 本实验结果与钱飞跃等^[28]和王新华^[34]的实验结果均不一致,后者的实验结果显示亚硝化絮状污泥在活性恢复后 EPS 含量比储存时有所减少,这可能是因为它所做实验污泥为颗粒污泥的原因.

2.3 微生物菌群结构变化

利用 MiSeq 高通量测序平台对污泥中微生物多样性进行分析,本研究中 2 个样本的覆盖度均大于 99.99%,可确保本次测序结果能够代表样本中微

生物群落组成. 活性恢复前后,污泥中的微生物分别从属于 22 个门、38 个纲、167 个属和 22 个门、47 个纲、182 个属. 如表 4 所示,Chao1 和 ACE 指数有所增加,表明活性恢复后的亚硝化絮状污泥拥有更高的微生物物种丰度,Shannon 和 Simpson 指数变化较小,污泥活性恢复前后多样性略有增加.

表 3 亚硝化絮状污泥 EPS 组成变化/ $mg \cdot g^{-1}$

Table 3 Variation in EPS composition of nitrosation

污泥	floculent sludge/ $mg \cdot g^{-1}$			
	PN 含量	PS 含量	EPS 总量	PN/PS
活性恢复前	13.9	14.7	28.6	0.94
活性恢复后	66.2	36.1	102.3	1.83

表 4 污泥活性恢复前后微生物多样性变化

Table 4 Variations in microbial diversity of sludge before and after reactivation

样品	Chao1 指数	ACE 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖度/%
活性恢复前	39.5	42.09	2.04	0.18	99.99
活性恢复后	47	4.25	2.30	0.16	99.99

如图 6,活性恢复前后丰度较高的菌门均为 α -Proteobacteria(变形菌门)、Bacteroidetes(拟杆菌门)和 Chloroflexi(绿弯菌门),Proteobacteria 门所占比例由恢复前的 40.61% 增加到 58.83%,这主要是因

为 β -Proteobacteria 纲所占比例由活性恢复前的 16.80% 增加到活性恢复后的 32.29% 所致, β -Proteobacteria 纲几乎涵盖了所有类型的 AOB^[35],这也从微生物角度证明了亚硝化性能的恢复.

活性恢复前,属于发酵酸化菌的 Cytophagia 纲大量存在,活化 15 d 后,Cytophagia 纲大量减少,且 Bacteroidia 纲、Clostridia 纲等厌氧微生物的相对丰度大量降低,甚至达到未测出的状态. 活性恢复后,与分泌 N-酰基高丝氨酸内酯类(AHLs)群体感应信号分子相关的 Sphingobacteria 纲和 Flavobacteria 纲增加,Sphingobacteria 纲和 Flavobacteria 纲具有增加硝化污泥活性、提高微生物生长速率和增强氨氮转化效率的功能^[36],且 Flavobacteria 纲与分泌 EPS 密切相关,故从微生物角度解释了活性恢复前后 EPS 含量增加的原因. 此外,以 *Nitrosomonas* 为代表的 AOB 的相对丰度由活性恢复前的未检出状态上升至 25.33%,同时,*Nitrospira* 等 NOB 的生长亦得到了有效抑制,活性恢复前后均呈现出未检测状态,这也解释了本实验 NAR 积累率较高的原因.

3 结论

(1)通过缩短 HRT 提升氨氮负荷 $[0.64 \sim 1.89 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}]$ 、控制 DO 为 $0.4 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 值为 8 左右等措施,在 15d 内成功活化了 4°C 储存了 10 个月的亚硝化絮状污泥. 氨氮去除率和亚硝积累率分别达到 95% 和 92%.

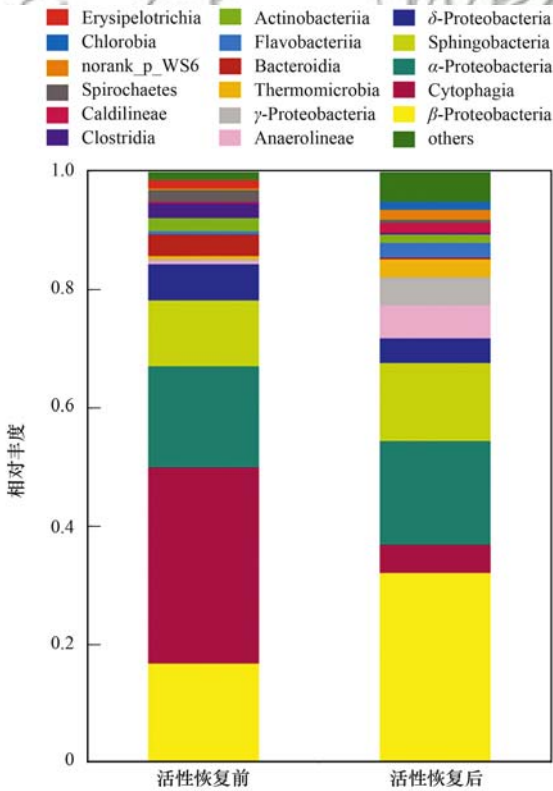


图 6 活性恢复前后,亚硝化絮状污泥中各菌群在纲级别上的相对丰度

Fig. 6 Relative abundance of different microbial classes in nitrosation sludge before and after reactivation

(2)在储存污泥活性恢复过程中, 污泥颜色迅速从黑灰色向棕黄色转变; VSS/SS 由储存后的 0.56 提高到 0.75, SVI 值由 232 下降至 73 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; EPS 总量显著增加, 且 PN 增量明显大于 PS 增量。

(3)随着亚硝化性能的恢复, 厌氧、发酵微生物被洗脱, *Nitrosomonas* 等 AOB 相对丰度显著增加, 成为了优势菌属, 同时, *Nitrospira* 等 NOB 的生长得到了有效的抑制, 是长期储存的亚硝化絮状污泥活性快速恢复的原因, 是实现短程硝化快速启动的核心因素。

参考文献:

- [1] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences-An application survey [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 292-303.
- [2] Ma B, Wang S Y, Cao S B, *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **200**: 981-990.
- [3] Van Hulle S W H, Vandeweyer H J P, Meesschaert B D, *et al.* Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **162**(1): 1-20.
- [4] 朱强, 刘凯, 董石语, 等. 连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4316-4323.
- Zhu Q, Liu K, Dong S Y, *et al.* Start-up and capacity enhancement of a partial nitrification pilot reactor in continuous flow [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4316-4323.
- [5] 李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 等. 两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1997-2005.
- Li H J, Peng D C, Chen G Y, *et al.* Comparison of operating performance of partial nitrification systems with two different inhibition strategies [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1997-2005.
- [6] Hong N C T, Vlčková S, Drtil M. Alternative processes of nitrogen removal from wastewater — startup of nitrification reactor [J]. *Acta Chimica Slovaca*, 2017, **10**(1): 70-73.
- [7] 彭永臻. SBR 法的五大优点[J]. *中国给水排水*, 1993, **9**(2): 29-31.
- [8] Torà J A, Moliné E, Carrera J, *et al.* Efficient and automated start-up of a pilot reactor for nitrification of reject water: From batch granulation to high rate continuous operation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **226**: 319-325.
- [9] Show K Y, Lee D J, Tay J H. Aerobic granulation: advances and challenges [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, **167**(6): 1622-1640.
- [10] Juang Y C, Adav S S, Lee D J, *et al.* Stable aerobic granules for continuous-flow reactors: Precipitating calcium and iron salts in granular interiors [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8051-8057.
- [11] 鲁航, 信欣, 管蕾, 等. 部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4741-4749.
- Lu H, Xing X, Guan L, *et al.* Start-up of partial nitrification AGS-SBR and analysis of its microbial community composition [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4741-4749.
- [12] 巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 等. ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4195-4201.
- Wu K C, Wu P, Shen Y L, *et al.* Research on cultivation and stability of nitrification granular sludge in integrated ABR-CSTR reactor [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4195-4201.
- [13] 李冬, 陶晓晓, 李占, 等. SBR 亚硝化快速启动过程中影响因素研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2317-2322.
- Li D, Tao X X, Li Z, *et al.* Factors of the rapid startup for nitrification in sequencing batch reactor [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(8): 2317-2322.
- [14] 仲航, 李冬, 吴迪, 等. 常温 CSTR 部分亚硝化影响因素及工况优化研究[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(4): 1225-1230.
- Zhong H, Li D, Wu D, *et al.* Research on influencing factors and operation optimization for CSTR partial nitrification at normal temperature [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(4): 1225-1230.
- [15] 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 等. 有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1294-1300.
- Li D, Wang Y J, Lü Y F, *et al.* Effect of organic carbon source on start-up and operation of the CANON granular sludge process [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1294-1300.
- [16] 张婷, 吴鹏, 沈耀良, 等. CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3399-3405.
- Zhang T, Wu P, Shen Y L, *et al.* Fast start-up of shortcut nitrification in a CSTR and an MBR [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3399-3405.
- [17] Wan C L, Zhang Q L, Lee D J, *et al.* Long-term storage of aerobic granules in liquid media: viable but non-culturable status [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **166**: 464-470.
- [18] Zhu J R, Wilderer P A. Effect of extended idle conditions on structure and activity of granular activated sludge [J]. *Water Research*, 2003, **37**(9): 2013-2018.
- [19] Liu Q S, Liu Y, Tay S T, *et al.* Startup of pilot-scale aerobic granular sludge reactor by stored granules [J]. *Environmental Technology*, 2005, **26**(12): 1363-1370.
- [20] 刘文如, 阴芳芳, 王建芳, 等. 限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3038-3043.
- Liu W R, Yin F F, Wang J F, *et al.* Effects of anaerobic feeding period on nitrifying granular [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3038-3043.
- [21] Liang Z W, Li W H, Yang S Y, *et al.* Extraction and structural characteristics of extracellular polymeric substances (EPS), pellets in autotrophic nitrifying biofilm and activated sludge [J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(5): 626-632.
- [22] Adav S S, Lee D J. Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 1120-1126.
- [23] Luo J H, Hao T W, Wei L, *et al.* Impact of influent COD/N ratio on disintegration of aerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2014, **62**: 127-135.
- [24] Vadivelu V M, Yuan Z G, Fux C, *et al.* The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of

- an enriched *Nitrobacter* culture [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(14): 4442-4448.
- [25] 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.
- [26] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid [J]. *Journal-Water Pollution Control Federation*, 1976, **48**(5): 835-852.
- [27] 张肖静, 周月, 张楠, 等. 自养脱氮污泥的亚硝化活性恢复策略 [J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(9): 1464-1470.
Zhang X J, Zhou Y, Zhang N, *et al.* Strategy for recovering the partial nitrification activity of autotrophic nitrogen removal sludge [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(9): 1464-1470.
- [28] 钱飞跃, 王琰, 王建芳, 等. 长期储存亚硝化颗粒污泥的活化及菌群结构变化 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(4): 1052-1058.
Qian F Y, Wang Y, Wang J F, *et al.* Reactivation performance of nitrosation granular sludge after long-term storage and microbial community variation [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1052-1058.
- [29] 王建龙, 张子健, 吴伟伟. 好氧颗粒污泥的研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 449-473.
Wang J L, Zhang Z J, Wu W W. Research advances in aerobic granular sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(3): 449-473.
- [30] Zhang X J, Li D, Liang Y H, *et al.* Application of membrane bioreactor for completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process [J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(11): 2832-2838.
- [31] 赵军, 徐高田, 秦哲, 等. 胞外聚合物 EPS 组成及对污泥特性的影响研究 [J]. *安全与环境工程*, 2008, **15**(1): 66-69, 73.
Zhao J, Xu G T, Qin Z, *et al.* Composing of extracellular polymeric substances and Its effect on sludge characteristics [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2008, **15**(1): 66-69, 73.
- [32] Sponza D T. Investigation of extracellular polymer substances (EPS) and physicochemical properties of different activated sludge flocs under steady-state conditions [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2003, **32**(3-4): 375-385.
- [33] 李延军, 李秀芬, 华兆哲, 等. 好氧颗粒污泥胞外聚合物的产生及其分布 [J]. *环境化学*, 2006, **25**(4): 439-443.
Li Y J, Li X F, Hua Z Z, *et al.* Production of extracellular polymeric substances from aerobic granular sludge and its distribution [J]. *Environmental Chemistry*, 2006, **25**(4): 439-443.
- [34] 王新华. 好氧硝化颗粒污泥的性能及储存与解体后的自修复行为研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008. 64-65.
Wang X H. Performance of aerobic nitrifying granules and self-remediation behaviors after granule storage and disintegration [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. 64-65.
- [35] Varas R, Guzmán-Fierro V, Giustinianovich E, *et al.* Startup and oxygen concentration effects in a continuous granular mixed flow autotrophic nitrogen removal reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **190**: 345-351.
- [36] 侯保连, 李安婕, 孙趣. AHLs 群体感应信号分子对硝化污泥附着生长及硝化效果的影响 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2773-2779.
Hou B L, Li A J, Sun Q. The effect of N-acy-homoserine lactones mediated quorum-sensing on the adhesion growth and nitrification of nitrifying sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2773-2779.

CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)