

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

**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

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM<sub>2.5</sub>影响 ..... 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)

京津冀内陆平原地区PM<sub>2.5</sub>浓度时空变化定量模拟 ..... 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)

成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 ..... 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)

华山地区PM<sub>2.5</sub>中无机离子垂直分布特征 ..... 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)

烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)成分图谱 ..... 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)

长三角地区中小燃煤锅炉PM<sub>2.5</sub>成分谱特征 ..... 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)

民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 ..... 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)

冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 ..... 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 ..... 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)

辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 ..... 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)

典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 ..... 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)

苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 ..... 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)

上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 ..... 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)

城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性:以宁波市北仑区芦江为例 ..... 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)

艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 ..... 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)

三峡澎溪河水华期间水体CH<sub>4</sub>浓度及其通量变化特征初探 ..... 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)

漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 ..... 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)

柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 ..... 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 ..... 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 ..... 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)

典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 ..... 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)

河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制 ..... 李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)

茶普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 ..... 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵顺利, 王聿琳, 彭明国 (1645)

真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 ..... 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)

热活化过硫酸盐降解三氯生 ..... 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆隽鹤 (1661)

水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 ..... 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)

海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 ..... 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)

外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 ..... 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 ..... 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)

分段进水对改良A<sup>2</sup>/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 ..... 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 ..... 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)

智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 ..... 徐旻昉, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 ..... 李玥, 胡奇, 高大文 (1731)

污泥臭氧原位减量工艺中抗生素的去除 ..... 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 ..... 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)

环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 ..... 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)

后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 ..... 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)

复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 ..... 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)

氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 ..... 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)

1株铜绿假单胞菌对苊的降解特性及代谢途径 ..... 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)

铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 ..... 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)

垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 ..... 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)

黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 ..... 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)

河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究 ..... 丁帮环, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)

藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 ..... 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 ..... 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)

香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估 ..... 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)

偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例 ..... 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)

西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 ..... 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 ..... 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)

长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 ..... 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)

三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 ..... 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)

稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 ..... 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响 ..... 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 ..... 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)

模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 ..... 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)

紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 ..... 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)

季节非对称升温对喀斯特土壤CO<sub>2</sub>释放的影响 ..... 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)

《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)

# 外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能

于德爽, 吴国栋, 李津\*, 周同, 王骁静

(青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071)

**摘要:** 废水因含盐量高而导致其生物处理效率降低, 对于如何提高高盐环境下的生物处理效率已成为目前的研究热点. 采用厌氧氨氧化工艺处理高盐废水, 以不同甜菜碱浓度对厌氧氨氧化脱氮效能为研究对象, 探讨了甜菜碱对厌氧氨氧化脱氮效能的影响. 结果表明: ①投加甜菜碱对系统脱氮效能有明显的改善作用, 甜菜碱浓度为  $0.1 \sim 0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 添加甜菜碱缓解了盐胁迫对厌氧氨氧化菌生长的抑制, 也促进了反硝化菌的生长; 甜菜碱浓度为  $0.4 \sim 0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 推测反硝化菌为优势菌群, 但对总氮去除表现为促进作用. 甜菜碱浓度大于  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  后, 添加甜菜碱已无法缓解盐胁迫对反应器脱氮效能的抑制, 最终在甜菜碱浓度  $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时对反应器产生完全抑制. ②甜菜碱的添加浓度为  $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 反应去除效能达到最佳,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  分别提升了 16% 和 32%, NRR 提升了 26.8%. ③在最后的恢复试验中, 随着甜菜碱浓度的降低反应器脱氮效能得到快速恢复,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  恢复到 50.6%,  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  平均去除率为 63.7%, NRR 恢复到  $0.65 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 这说明甜菜碱对反应器的影响是可逆的.

**关键词:** 高盐废水; 厌氧氨氧化; 甜菜碱; 盐胁迫; 脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1688-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201706023

## Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition

YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin\*, ZHOU Tong, WANG Xiao-jing

(School of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** High salt content could result in the inhibition of microbes and affect biological treatment processes. At present, an important research topic is how to improve the efficiency of biological treatments. The anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX) process was used to treat high saline wastewater. Nitrogen removal performance with betaine was studied by analyzing the ANAMMOX activity, and ammonia nitrogen and nitrate nitrogen removal. The results showed that: ① It has obvious improvement when betaine concentration was  $0.1 \sim 0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ . It alleviated the salt stress on bacteria growth inhibition of ANAMMOX, and also promoted the growth of denitrifying bacteria. When betaine concentration was  $0.4 \sim 0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , denitrifying bacteria was found to have grown greatly. When betaine concentration was greater than  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , it was unable to alleviate the salt stress inhibiting denitrification efficiency. As a result, betaine concentration of  $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  completely inhibited bacteria. ② When concentration of betaine was  $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , the optimal nitrogen removal efficiency was achieved.  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  and  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  increased by 16% and 32%, respectively. Nitrogen removal rate (NRR) increased by 26.8%. ③ At the end of the recovery experiment, with the decreasing concentrations of betaine,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  was 50.6%,  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  was 63.7%, and NRR was  $0.65 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , so the nitrogen removal efficiency underwent fast recovery.

**Key words:** high saline wastewater; anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); betaine; salt stress; nitrogen removal

随着工业发展含盐废水 ( $>1\%$ , NaCl, 质量浓度) 排放量越来越大, 含盐废水直接排放对环境造成严重污染及破坏, 如高盐废水渗透入土壤系统中, 会使土壤生物和植物因脱水死亡, 造成土壤生态系统的破坏<sup>[1]</sup>. 废水的生物处理方法是一种常见的方法, 但高盐的存在对常规生物处理有明显的抑制作用, 盐类物质引起的废水高渗透压会降低微生物活性, 抑制微生物的代谢作用, 使酶代谢活性减弱, 以至降低反应动力学系数, 最终使废水中氮素去除效率下降; 严重时将导致细胞脱水, 最后发生质壁分离, 甚至死亡<sup>[2]</sup>. 而厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 作为一种以  $\text{NH}_4^+$  为电子供体,  $\text{NO}_2^-$

为电子受体,  $\text{N}_2$  与  $\text{NO}_3^-$  为产物的生物脱氮工艺<sup>[3]</sup>, 研究证明厌氧氨氧化菌对高盐污水有良好的去除效果, 有研究发现厌氧氨氧化是海洋氮循环中生物脱氮的主要贡献者, 其对海洋生物脱氮的贡献率约在  $4\% \sim 79\%$ <sup>[4,5]</sup>, 海洋型厌氧氨氧化菌的发现为其处理高盐废水提供了可行性. Vyrides 等<sup>[6]</sup> 采取长期的盐度驯化的方式使淡水厌氧氨氧化污泥

收稿日期: 2017-06-04; 修订日期: 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278258, 51478229); 山东省自然科学基金项目 (BS2015HZ007); 山东省高等学校科技计划项目 (J15LC61)

作者简介: 于德爽 (1964~), 男, 教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: qdydsh@163.com

\* 通信作者, E-mail: ljim0532@126.com

产生耐盐性, 最终可适应高达  $30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的盐度环境. Dapena-Mora 等<sup>[7]</sup>将淡水厌氧氨氧化污泥经过驯化后, 可以在 30‰海水盐度下取得较好的脱氮性能, 最大比厌氧氨氧化活性(SAA)出现在盐度为  $15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时.

厌氧氨氧化菌的驯化和筛选为高盐废水的厌氧氨氧化处理提供了可能性, 但也存在有不足之处. Kartal 等<sup>[8]</sup>通过提高配水中 NaCl 浓度对淡水厌氧氨氧化污泥进行长期驯化, 发现淡水厌氧氨氧化污泥最终在高达  $75 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的 NaCl 浓度时达到阈值. Liu 等<sup>[9]</sup>对污泥进行长期驯化后厌氧氨氧化污泥最终适应  $30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的盐浓度, 当盐度继续升高后, 污泥受到可逆抑制. 在盐度驯化过程中盐度变化幅度越大对反应系统造成的负面影响越大, Yang 等<sup>[10]</sup>在驯化过程中将盐度由  $14 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  突然上升到  $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时, ANAMMOX 菌活性受到盐度的完全抑制, Malovanyy 等<sup>[11]</sup>使用快速的盐度驯化策略也导致了 ANAMMOX 菌的失活现象. 工业废水中的高盐度和盐度的巨大波动成为厌氧氨氧化工程应用的障碍, 应从高盐废水厌氧氨氧化微生物脱氮强化措施等方面展开研究, 以期在高盐胁迫下使厌氧氨氧化能取得良好的脱氮效能. 相容性溶质 (compatible solutes) 是耐盐微生物在高渗透环境中细胞内积累的小分子物质, 在细胞内高浓度积累不会影响生物大分子如蛋白质和核酸的正常生理功能, 但可以平衡细胞外的渗透压, 也可以作为蛋白质稳定剂<sup>[12]</sup>. 甜菜碱是一种生物碱, 在维持细胞渗透压和缓解盐胁迫方面有明显作用. 甜菜碱的溶解度很高, 不带静电荷, 其高浓度对许多酶及其他生物大分子没有影响, 甚至能解除高浓度盐对酶活性的毒害. 国内外学者针对甜菜碱应用于高盐废水处理领域的可行性和效果展开了研究, Yerkes 等<sup>[13]</sup>率先研究了甜菜碱在不同厌氧消化系统中对钠毒性的拮抗作用, 结果表明浓度低至  $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的甜菜碱对减缓钠盐毒性仍有效果. Vyrides 等<sup>[14]</sup>的研究认为甜菜碱在高盐条件下对保护产甲烷菌的功能是最有效的, 甜菜碱对高盐废水处理污泥的驯化有积极作用, 甜菜碱的添加策略对其效果有着较重要的影响.

在对外源添加甜菜碱提高微生物对渗透胁迫适应性的研究中发现, 甜菜碱能有效地缓解盐度抑制作用, 而现在研究大都集中在高盐度废水厌氧产甲烷系统中, 对 ANAMMOX 工艺的研究较少. 因此本文将进一步探索利用甜菜碱缓解盐度对 ANAMMOX 活性抑制的可行性, 探讨外源甜菜碱投加提高高盐

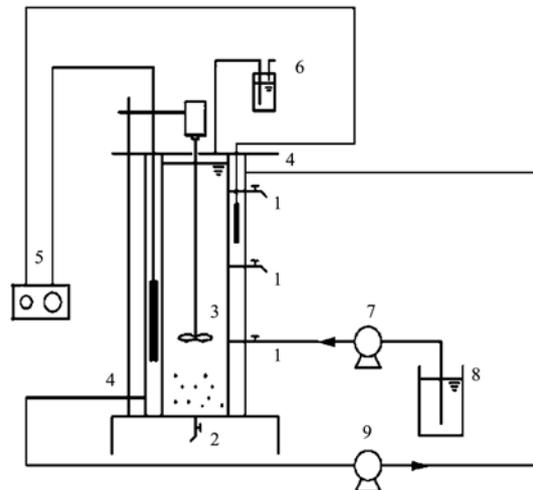
废水厌氧氨氧化脱氮的机制, 以期为之后相关研究提供基础, 拓展 ANAMMOX 工艺处理高盐废水的应用范围.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与运行条件

试验采用 ASBR 厌氧氨氧化反应器, 其结构如图 1 所示. 该反应器由有机玻璃制作而成, 有效体积 7 L. 人工配制的废水从反应器下部的进水口由恒流泵进入反应器内, 内置电动搅拌器, 整个反应器表面用黑布包裹, 防止光线对厌氧氨氧化活性污泥造成负面影响, 反应器的外层有恒温水浴, 温度控制在  $(35 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .

试验所选污泥已经本课题组将海水长期驯化, 已适应海水的复杂组成成分, 能在全海水条件下稳定运行, 反应器内有约占反应器有效体积 1/3 的块状海绵载体, 活性污泥颗粒及絮体附着在块状海绵上生长, 块状海绵呈现黄色, 内部有大量砖红色颗粒污泥. 该污泥形态基本为颗粒状, 呈现砖红色.



1. 取样口及进/出水口; 2. 排泥口; 3. 搅拌; 4. 水浴循环进/出水口;
5. 水浴恒温控制器; 6. 水封; 7. 进水蠕动泵;
8. 储水箱; 9. 水浴循环蠕动泵

图 1 ASBR 厌氧氨氧化反应器装置示意

Fig. 1 ASBR ANAMMOX reactor plant

### 1.2 试验废水

试验所用废水由人工配置: 海水 (5 L) 取自黄海 (青岛麦岛周边)、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.145 g、 $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.75 g、 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.3 g、 $\text{NaHCO}_3$  8.4 g、微量元素 I 和微量元素 II 各 6 mL. 微量元素 I: EDTA  $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 微量元素 II: EDTA  $15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{H}_3\text{BO}_4$   $0.011 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$   $0.99 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$   $0.25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$

0.43 g·L<sup>-1</sup>、NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.19 g·L<sup>-1</sup>、CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.24 g·L<sup>-1</sup>、(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>MoO<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.16 g·L<sup>-1</sup>、NaSeO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 0.1596 g·L<sup>-1</sup>。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>由NH<sub>4</sub>Cl提供, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>由NaNO<sub>2</sub>提供, 确保进水氨氮为110 mg·L<sup>-1</sup>、亚硝态氮浓度为145.2 mg·L<sup>-1</sup>, 甜菜碱按需配置。

### 1.3 试验方法

本试验采用ASBR工艺进行, 每天运行2个周期, 运行方式为: 静置沉淀30 min后排水, 排水5 L, 留2 L; 废水的配制完成后利用高纯氮气进行15 min的曝气, 将水中的分子氧去除后, 再按量投加NH<sub>4</sub>Cl、NaNO<sub>2</sub>和甜菜碱, 进水pH通过0.1 mol·L<sup>-1</sup>的盐酸控制在7.4±0.1; 最后由恒流泵进水, 进水约为3 min; 进水完成后开启搅拌, 搅5 min后接进水水样。

参考已有的研究成果, 且防止过量添加引起反应器内菌群结构尤其是反硝化细菌的崛起, 将甜菜碱添加初始量设定为0.1 mmol·L<sup>-1</sup>, 添加甜菜碱浓度分别为0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.7 mmol·L<sup>-1</sup>。每个梯度试验5 d, 甜菜碱过量会使系统中产生反硝化细菌, 进而对反应产生抑制, 因此在反应器产生抑制时应及时停止试验, 从产生抑制的甜菜碱浓度开始再缓慢降低甜菜碱的浓度, 考察甜菜碱浓度的回落能否使厌氧氨氧化反应效能得到恢复。

### 1.4 分析方法

指标测定方法为: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N采用纳氏分光光度法; NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N采用麝香草酚分光光度法; pH值: WTW pH/0xi 340i 便携式pH计; 紫外/可见分光光度计: UV-5200; 试验所要测的数据包括氨氮和亚硝态氮的去除率, 硝态氮的生成量。

## 2 结果与分析

### 2.1 投加甜菜碱对厌氧氨氧化脱氮效能的影响

由图2可知, 在10周期左右时间内反应器的处理效能趋于稳定, 在不添加甜菜碱的情况下, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的平均去除率分别为51.6%和55.9%, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N平均生成量10.3 mg·L<sup>-1</sup>, NLR和NRR分别为1.43 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>和0.71 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>。当在反应器中加入0.1 mmol·L<sup>-1</sup>甜菜碱后, 甜菜碱的加入打破了原有反应器中的平衡, 在刚开始的5个周期内, 出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度略有

些上升, 但反应器快速的适应了甜菜碱的存在, 在0.1 mmol·L<sup>-1</sup>浓度梯度末期, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率为52.9%, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的去除率则为52.7%, 与0 mmol·L<sup>-1</sup>时相比, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率有所上升, 而NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的去除率有所下降, 说明0.1 mmol·L<sup>-1</sup>甜菜碱未对厌氧氨氧化脱氮产生明显促进效果, 这可能由于甜菜碱浓度过低未对厌氧氨氧化活性产生刺激。当甜菜碱浓度为0.2 mmol·L<sup>-1</sup>时, 甜菜碱对厌氧氨氧化脱氮效能产生明显促进作用, 在这一浓度梯度周期内脱氮效能不断提升, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的去除率由周期前的61.9%和46.6%至周期末分别上升至70.4%和65.7%, 而NRR更由0.71 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>上升至0.92 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>, 这一现象在0.3 mmol·L<sup>-1</sup>浓度梯度时也有所体现, 这是由于甜菜碱会在厌氧氨氧化菌内产生积累, 说明甜菜碱对厌氧氨氧化的促进有持续性效果。在0.3 mmol·L<sup>-1</sup>浓度下, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除效能达到最佳, 这时NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的去除率分别为71.3%和75.7%, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的平均生成量为8.6 mg·L<sup>-1</sup>, NRR达到0.97 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>, 与0 mmol·L<sup>-1</sup>时相比, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N分别提升了16%和32%, NRR提升了26.8%。

从0.4 mmol·L<sup>-1</sup>开始, 甜菜碱浓度的提升不再促进NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除效果, 但NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的去除率还能不断提升, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的平均去除率为67%, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的平均去除率则达到82.1%, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N平均生成量为5.6 mg·L<sup>-1</sup>, NRR则达到1.04 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>, 与0.3 mmol·L<sup>-1</sup>相比NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N略有些下降而NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N却有些上升。甜菜碱作为一种小分子相容性有机物可作为有机碳源促进反硝化菌的生长, 甜菜碱的存在使得反应器中处于厌氧氨氧化与反硝化耦合的状态, 当甜菜碱浓度达到0.4 mmol·L<sup>-1</sup>时, 已不再促进厌氧氨氧化反应, 反而促进了反硝化反应, 这时反应器中反硝化菌占有优势。在0.5 mmol·L<sup>-1</sup>的浓度下, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的平均去除率分别为61.4%和79.2%, NRR为1.01 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>, 与前一浓度相比NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N去除率和NRR都产生下降, 且波动幅度比较大, 由此看出, 甜菜碱在浓度为0.5 mmol·L<sup>-1</sup>下对厌氧氨氧化菌和反硝化菌都产生抑制。为研究甜菜碱对厌氧氨氧化完全产生抑制时的浓度, 进一步提高甜菜碱浓度, 在0.7 mmol·L<sup>-1</sup>时, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N平均去除率分别为47%和72.5%, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N几乎没有生成,

$\text{NO}_2^-$ -N在周期内变化不大, 但 $\text{NH}_4^+$ -N在这一周期内由周期前的 70.8% 降低到了 35.6%, 对厌氧氨氧化产生明显抑制. 一开始甜菜碱在菌内的积累量并未对反应产生明显抑制, 但随着厌氧氨氧化菌吸收的甜菜碱越来越多, 推测菌体内积累的甜菜碱量超过厌氧氨氧化菌的耐受极限, 进而使得 $\text{NH}_4^+$ -N去除率下降, 而反应器中反硝化菌耐受甜菜碱的极限要比厌氧氨氧化菌要高, 因此 $\text{NO}_2^-$ -N的去除率并未有明显下降. 在甜菜碱浓度达到  $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,  $\text{NH}_4^+$ -N去除率进一步下降, 只有 20.1%, 且 $\text{NO}_2^-$ -N也有下降, 为 58.6%, 厌氧氨氧化菌与反硝化菌同时产生抑制, 为了防止过高甜菜碱浓度进一步恶化

反应器脱氮效能, 立即停止了试验. 综上所述, 甜菜碱浓度达到  $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时为极限值.

在厌氧氨氧化过程中, ASBR 厌氧氨氧化反应器基本遵循厌氧氨氧化反应原理, 其计量比与理论值  $1:1.32:0.26$  相接近. 而在本试验中, 由图 2(c) 可知, 随着甜菜碱浓度的提升,  $\text{NO}_2^-$ -N/ $\text{NH}_4^+$ -N 比值变化幅度较大, 在  $0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,  $\text{NO}_2^-$ -N/ $\text{NH}_4^+$ -N 平均比值为 1.06, 而  $\text{NO}_3^-$ -N/ $\text{NH}_4^+$ -N 平均比值为 0.17. 在  $0.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,  $\text{NO}_2^-$ -N/ $\text{NH}_4^+$ -N 平均比值为 1.28, 而  $\text{NO}_3^-$ -N/ $\text{NH}_4^+$ -N 平均比值为 0.16, 在这一浓度梯度内,  $\text{NO}_2^-$ -N 去除量显著增加使得  $\text{NO}_2^-$ -N/ $\text{NH}_4^+$ -N 比值上升. 此后在 0.2

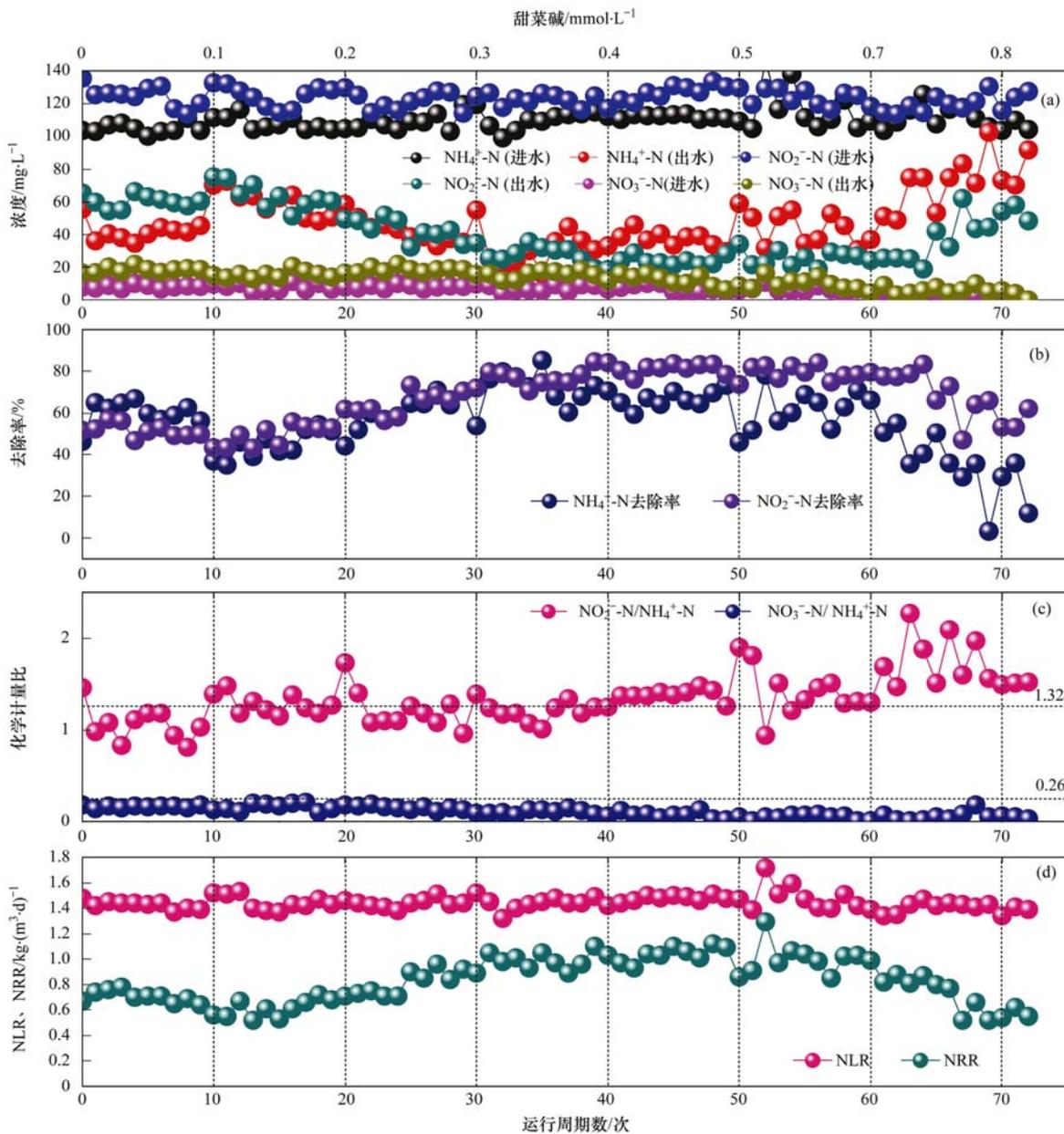


图 2 甜菜碱浓度对厌氧氨氧化脱氮效能的影响

Fig. 2 Effect of betaine concentrations on the anaerobic ammonia oxidation denitrification efficiency

$\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和  $0.3\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 梯度内,  $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值在 1.32 上下波动, 且在  $0.4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,  $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值高于理论值 1.32, 甜菜碱对  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的促进效果更好, 使得  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 比值偏高. 此后在  $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和  $0.7\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,  $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值波动更大, 使得  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除效率无法保持稳定, 在试验最后,  $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值已严重偏离理论值, 甜菜碱浓度已对厌氧氨氧化反应产生不利影响. 而  $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值在未添加甜菜碱前已偏离理论值, 期间虽有些上升, 但总体呈下降趋势, 在高盐浓度下, 添加过量的甜菜碱会引起反应器内菌群结构尤其是反硝化细菌的崛起, 甜菜碱作为小分子有机物可作为反硝化菌的碳源, 促进反应器内反硝化菌的生长, 使得  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 生成量不断降低, 在试验末期几乎没有生成. 由于反应器中厌氧氨氧化与反硝化的同时存在, 试验过程中  $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值一直低于理论值.

综上所述, 外源甜菜碱对厌氧氨氧化脱氮效能有明显的促进作用, 随着甜菜碱浓度的升高, 甜菜碱浓度在  $0.1\sim 0.4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度随之下降, 去除率显著上升, 同时促

进了反硝化菌的生长. 接着随着甜菜碱浓度的提升, 在  $0.4\sim 0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度内, 出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度不再降低而有些上升, 而出水  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度则继续下降. 在甜菜碱浓度大于  $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后, 出水  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度也不再下降开始缓慢上升, 最终在  $0.8\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度高于未添加甜菜碱时, 此时甜菜碱已对反应器脱氮效能产生不利影响.

## 2.2 周期内甜菜碱浓度变化对厌氧氨氧化脱氮性能的影响

选取 8 个甜菜碱浓度梯度, 考察了一个周期内  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度变化. 由图 3 可知, 随着甜菜碱浓度的提升, 出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的浓度逐渐降低, 基质浓度( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度之和)下降趋势明显, 基质去除速率也随之升高, 在  $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下, 反应器脱氮效能几乎不受甜菜碱影响, 基质反应速率前 1 h 内低于未添加甜菜碱时, 但随后开始波动且总体要高于未添加甜菜碱时, 说明甜菜碱在反应器中会有一段适应过程; 而在  $0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 出水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度已有些降低, 甜菜碱对反应器脱氮效能产生影响, 且此时出水  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 达到最大值为  $21.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 基质

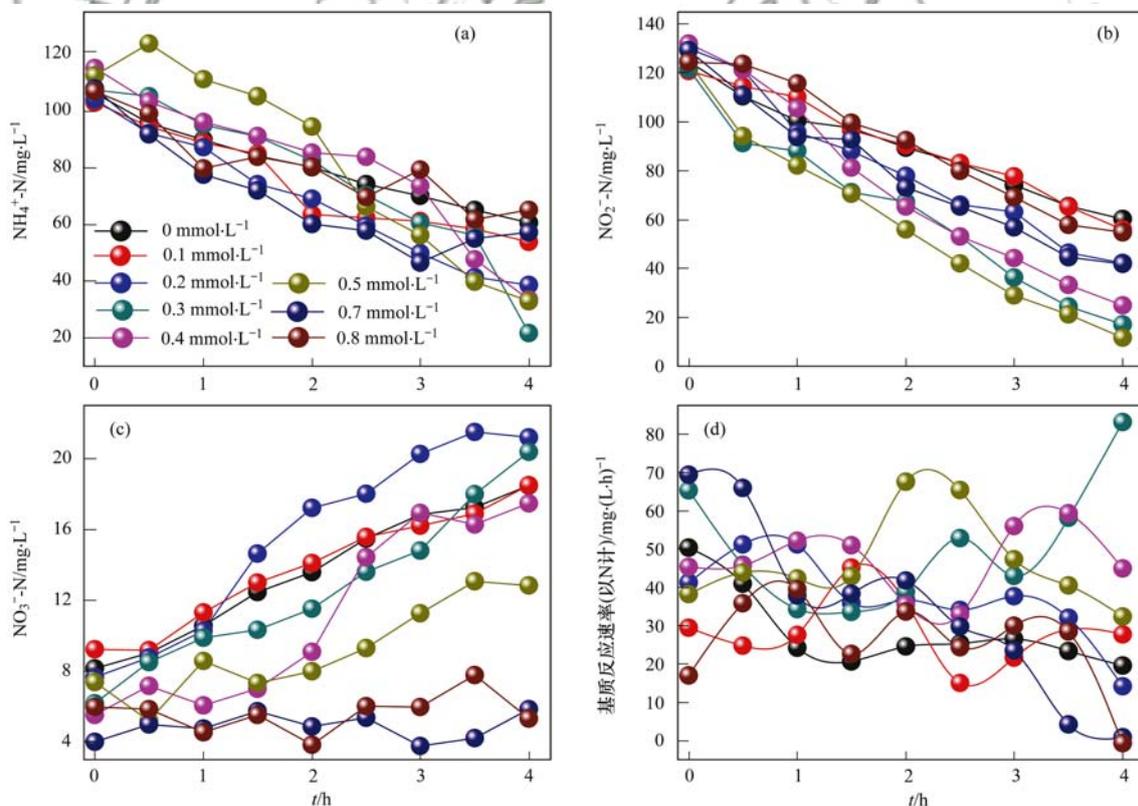


图 3 周期内甜菜碱浓度对厌氧氨氧化脱氮效能的影响

Fig. 3 Effect of betaine concentrations on the anaerobic ammonia oxidation denitrification efficiency during one period

去除速率总体高于前一梯度, 说明在此浓度前甜菜碱主要促进的是反应器中的厌氧氨氧化反应; 在  $0.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时去除效果达到最佳, 4 h 内出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度为  $21.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $17.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度为  $20.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 基质去除速率总体要高于前几个浓度梯度, 但却低于  $0.4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 这可能是甜菜碱进一步促进了反硝化作用. 虽然在  $0.4$  和  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时对反硝化反应还有促进作用,  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  更达到了最低值为  $11.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 但在这两个梯度下出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  都有些下降,  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  为  $33.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  为  $12.84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 此时反应器中厌氧氨氧化反应产生抑制. 此后在  $0.7 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时反硝化也产生抑制, 出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  随之降低为  $41.99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  为  $57.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  为  $5.86 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 基质去除速率也有些下降, 但仍表现为较强的去除效果. 最终在  $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时基质去除速率已低于  $0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时的基质去除速率, 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  为  $65.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  为  $54.92 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  为  $5.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 也低于未添加甜菜碱时的去除效能, 此时甜菜碱浓度对反应器产生完全抑制.

### 2.3 甜菜碱浓度降低对厌氧氨氧化脱氮性能的影响

从产生抑制的甜菜碱浓度  $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  开始, 降低甜菜碱的浓度, 考察甜菜碱浓度的回落能否使厌氧氨氧化反应效能得到恢复. 由于甜菜碱浓度为  $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时对反应抑制较大, 为了防止甜菜碱在厌氧氨氧化菌内产生积累, 进一步恶化厌氧氨氧化菌活性, 将高浓度时的运行周期数缩短至 5 次. 由图 4 可知, 在浓度为  $0.8$ 、 $0.7$  和  $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度波动很大, 但总体呈下降趋势, 出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度则呈上升趋势,  $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$  严重偏离理论值, NRR 由周期开始前的  $0.52 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$  降低到  $0.42 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ . 这是由于厌氧氨氧化菌的活性还未得到恢复, 且吸收了废水中新添加的甜菜碱而进一步使厌氧氨氧化菌活性恶化. 但从  $0.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时开始,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  去除率开始上升,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  生成量也有所升高,  $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$  接近 1.32. 延长运行周期数, 可以看到出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度明显下降,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率由 22.8% 上升至 49.6%,

$\text{NO}_2^-\text{-N}$  去除率由 36.5% 上升至 46.6%, NRR 由  $0.39 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$  上升至  $0.62 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ . 在  $0.2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度变化不大, 厌氧氨氧化菌活性基本恢复, 此时  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均去除率为 50.6%,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  平均去除率为 63.7%, NRR 为  $0.65 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ , 已恢复到试验前的脱氮效能. 这说明甜菜碱对厌氧氨氧化反应的抑制作用是短期效果, 甜菜碱浓度的回落能使厌氧氨氧化反应效能得到恢复.

### 3 讨论

盐胁迫下, 微生物将吸收大量盐离子贮存于细胞体内从而降低了细胞质中的盐浓度, 而甜菜碱含量在一定范围内也会随盐胁迫程度的增加而增加, 在细胞中逐渐积累达到很高水平, 从而调节渗透压, 维持细胞的水分平衡. 微生物细胞内积累相容溶质, 使外部高渗透压在细胞质中保持平衡<sup>[15,16]</sup>, 通常中度嗜盐菌耐盐机制属于这种策略, 当环境中的渗透压升高时中度嗜盐菌体内无机盐离子浓度也会相应升高, 但是其作用有限, 不足以抗衡外界高的渗透压, 此时大多数中度嗜盐菌会通过自身合成甜菜碱及其它相容性有机物来应对盐胁迫作用<sup>[17]</sup>. 吴红珍等<sup>[18]</sup>的研究结果显示嗜盐四联球菌以甘氨酸甜菜碱作为主要的相容性溶质, 在一定盐浓度范围内, 甘氨酸甜菜碱和可溶性蛋白会随盐浓度的增加而升高, 然而超过一定盐浓度范围后, 表达量将会减少, 细菌能够根据外部环境做出适当的调整以维持细胞的正常生理功能.

中度嗜盐菌可通过快速合成和释放甜菜碱来抵抗盐胁迫, 甜菜碱作为中度嗜盐菌中一类很重要的相容性溶质, 通常大多数中度嗜盐菌都以胆碱为前体物质, 经过两步氧化反应生成甘氨酸甜菜碱<sup>[19]</sup>, 这两步氧化反应需要两个酶的催化: 第一个是胆碱单加氧酶, 它催化胆碱氧化成甜菜碱醛; 第二个是甜菜碱醛脱氢酶, 它催化甜菜碱醛形成甜菜碱<sup>[17,20]</sup>. 但是还没有报道提及中度嗜盐菌能从简单的碳源(如葡萄糖)合成甘氨酸, 中度嗜盐菌中甘氨酸甜菜碱的合成方式都是采用酶促胆碱反应或者直接从环境中摄入在体内进行积累, 在适应环境高渗透压中, 嗜盐菌可通过胞外吸收转运相容物质以抵抗胞外高渗透压以节省从头合成所需的能量<sup>[21]</sup>, 其具有特殊的相容性物质吸收转运系统<sup>[22]</sup>. 因此有些科学家通过外源添加甘氨酸甜菜碱以提高细菌或植物的

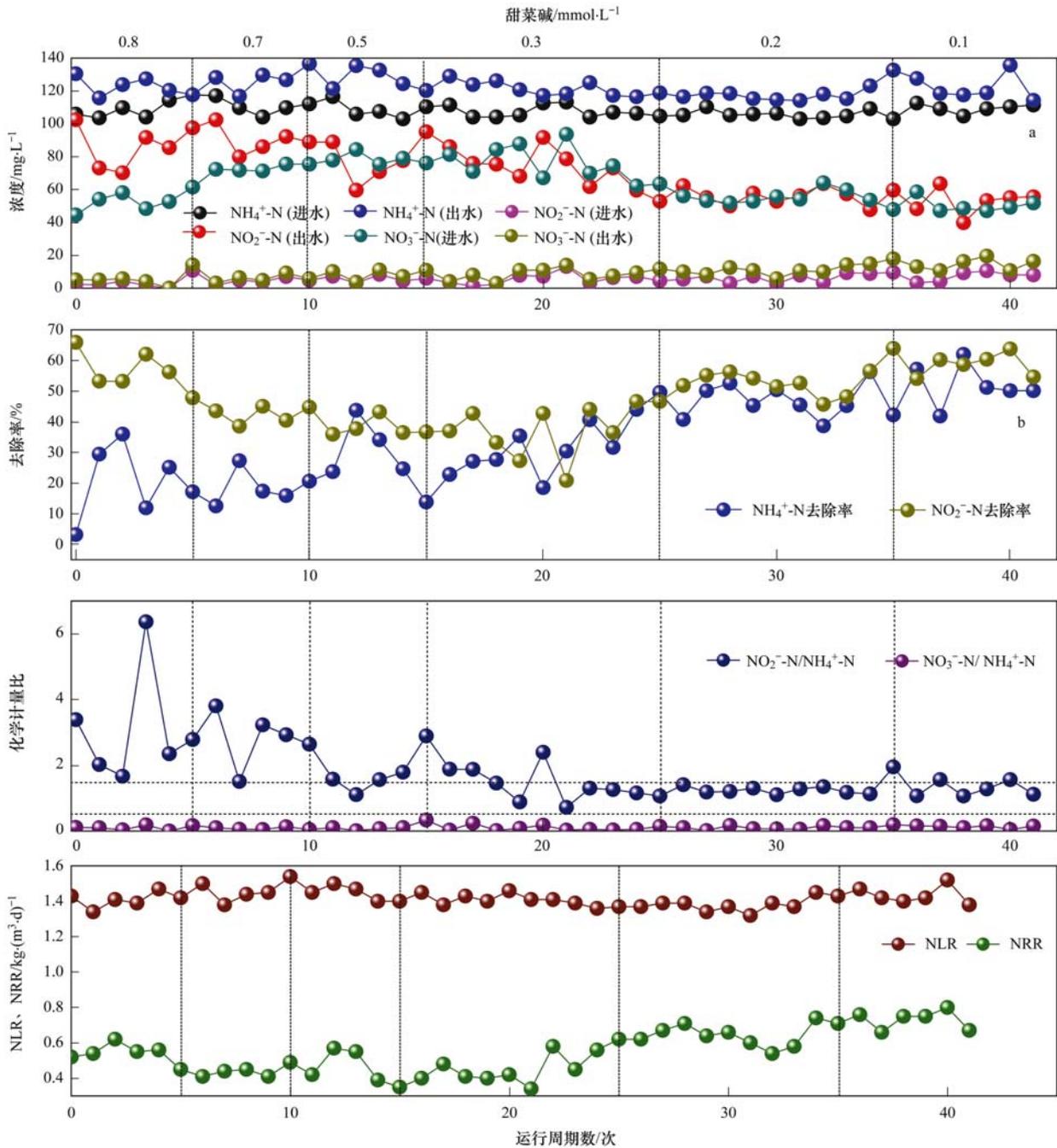


图4 甜菜碱浓度降低对厌氧氨氧化脱氮效能的影响

Fig. 4 Effect of lower betaine concentrations on the anaerobic ammonia oxidation denitrification efficiency

耐盐能力<sup>[23,24]</sup>.

采用 ASBR 厌氧氨氧化反应器, 通过逐步提高所含海水比例, 经过一定时间的驯化后, 厌氧氨氧化菌可以在各个海水比例下保持活性并维持较高的脱氮性能厌氧氨氧化菌<sup>[25]</sup>. 盐胁迫对厌氧氨氧化菌的生长均有不同程度的抑制作用<sup>[26]</sup>, 但没有报道提及厌氧氨氧化菌可自身合成甜菜碱, 因此添加外源甜菜碱可作为一种缓解盐胁迫作用的方法. 李智行等<sup>[27]</sup>利用人工配制的高盐废水研究了甜菜碱

对厌氧氨氧化过程的影响, 结果认为甜菜碱对厌氧氨氧化过程有促进作用, 并能起到缓解低温抑制作用的功能. 本试验结果表明, 添加甜菜碱缓解了盐胁迫对厌氧氨氧化菌生长的抑制, 在本试验开始时厌氧氨氧化效果较好, 在 4 h 内, 氨氮去除率 51.6%, 亚硝态氮 55.9%, NLR 为 1.43  $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ , NRR 为 0.71  $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ , 当甜菜碱浓度为 0.1 ~ 0.4  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 均能有效增加盐胁迫下厌氧氨氧化菌的脱氮效能. 对于不能合成相

容性物质的微生物来说, 其吸收系统至关重要<sup>[28]</sup>, 因此, 在利用甜菜碱的厌氧氨氧化菌体内应存在一些与相溶性物质高度亲和的转运系统, 以便快速吸收和转化甜菜碱. 另外在这一浓度变化内甜菜碱作为有机物也促进了反应器中反硝化菌的生长, 这是由于甜菜碱不但可以作为相容性溶质, 还能作为碳源和能源物质. 甜菜碱浓度为  $0.4 \sim 0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率下降, 而  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  去除率还有上升, 此时甜菜碱浓度对厌氧氨氧化菌产生抑制但还是促进反硝化菌的生长. 在这一阶段的浓度内, 甜菜碱缓解微生物的耐盐能力存在差异, 这可能是由于不同的微生物积累或转运的相容性溶质不同, 抗渗能力也不同<sup>[29]</sup>, 厌氧氨氧化菌体内的甜菜碱已经积累到极限, 甜菜碱作为渗透物质不能进一步发挥保持渗透压平衡的作用, 仅作为碳源和能量来源来发挥作用<sup>[30]</sup>. 甜菜碱浓度大于  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  后, 添加甜菜碱已无法缓解盐胁迫对反应器脱氮效能的抑制, 且过量的甜菜碱会对反应器产生不利影响, 使得反应器脱氮效能持续降低, 这是因为随着试验的进行高盐环境渐渐抑制分解甜菜碱代谢酶, 从而导致该物质不能作为碳源和能源<sup>[31]</sup>, 反硝化菌也受到抑制, 最终在甜菜碱浓度  $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时反应器脱氮效能低于未添加甜菜碱时的脱氮效能, 已对反应器产生完全抑制. 而在最后的恢复试验中, 随着甜菜碱浓度的降低反应器脱氮效能得到快速恢复, 当下降至  $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时反应器已基本稳定运行, 这说明甜菜碱对反应器的损害是可恢复的.

#### 4 结论

(1) 在稳定运行的厌氧氨氧化处理高盐废水系统中, 投加甜菜碱对系统脱氮效能有明显的改善作用, 甜菜碱浓度为  $0.1 \sim 0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 添加甜菜碱缓解了盐胁迫对厌氧氨氧化菌生长的抑制; 甜菜碱浓度为  $0.4 \sim 0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 此时甜菜碱浓度对厌氧氨氧化菌产生抑制但还是促进反硝化菌的生长, 还对反应表现为促进作用. 甜菜碱浓度大于  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  后, 添加甜菜碱已无法缓解盐胁迫对反应器脱氮效能的抑制, 最终在甜菜碱浓度  $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时反应器脱氮效能低于未添加甜菜碱时的脱氮效能, 已对反应器产生完全抑制.

(2) 本试验条件下, 甜菜碱的添加浓度为  $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  浓度时, 反应去除效能达到最佳, 这时  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的去除率分别为 71.3% 和 75.7%,

$\text{NO}_3^- - \text{N}$  的平均生成量为  $8.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , NRR 达到  $0.97 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 与  $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时相比,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  分别提升了 16% 和 32%, NRR 提升了 26.8%.

(3) 本试验条件下, 在最后的恢复试验中, 随着甜菜碱浓度的降低反应器脱氮效能得到快速恢复, 经过 25 周期的运行, 在甜菜碱浓度降至  $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时反应器脱氮效能得到恢复, 这说明甜菜碱对反应器的影响是可逆的.

#### 参考文献:

- [1] 晁雷, 邵雪, 胡成, 等. 高盐废水处理工艺技术研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(31): 19387-19389, 19404. Cao L, Shao X, Hu C, *et al.* Research progress on the treatment technology of wastewater with high salinity [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, **39**(31): 19387-19389, 19404.
- [2] Ma C, Jin R C, Yang G F, *et al.* Impacts of transient salinity shock loads on Anammox process performance [J]. Bioresource Technology, 2012, **112**: 124-130.
- [3] Jin R C, Yang G F, Yu J J, *et al.* The inhibition of the Anammox process: a review [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, **197**: 67-79.
- [4] Terada A, Zhou S, Hosomi M. Presence and detection of anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) bacteria and appraisal of anammox process for high-strength nitrogenous wastewater treatment: a review [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2011, **13**(6): 759-781.
- [5] Kuener J G, Kartal B, Van Loosdrecht M C M. Application of anammox for N-removal can turn sewage treatment plant into biofuel factory [J]. Biofuels, 2011, **2**(3): 237-241.
- [6] Vyrides I, Stuckey D C. Adaptation of anaerobic biomass to saline conditions: role of compatible solutes and extracellular polysaccharides [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2009, **44**(1): 46-51.
- [7] Dapena-Mora A, Vázquez-Padín J R, Campos J L, *et al.* Monitoring the stability of an Anammox reactor under high salinity conditions [J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, **51**(3): 167-171.
- [8] Kartal B, Koleva M, Arsov R, *et al.* Adaptation of a freshwater anammox population to high salinity wastewater [J]. Journal of Biotechnology, 2006, **126**(4): 546-553.
- [9] Liu C L, Yamamoto T, Nishiyama T, *et al.* Effect of salt concentration in anammox treatment using non woven biomass carrier [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2009, **107**(5): 519-523.
- [10] Yang J C, Zhang L, Hira D, *et al.* Anammox treatment of high-salinity wastewater at ambient temperature [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2367-2372.
- [11] Malovany A, Plaza E, Trela J, *et al.* Ammonium removal by partial nitrification and Anammox processes from wastewater with increased salinity [J]. Environmental Technology, 2015, **36**(5): 595-604.
- [12] Cyplik P, Piotrowska-Cyplik A, Marecik R, *et al.* Biological denitrification of brine: the effect of compatible solutes on enzyme activities and fatty acid degradation [J]. Biodegradation, 2012,

- 23(5): 663-672.
- [13] Yerkes D W, Boonyakitombut S, Speece R E. Antagonism of sodium toxicity by the compatible solute betaine in anaerobic methanogenic systems [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(6-7): 15-24.
- [14] Vyrides I, Santos H, Mingote A, *et al.* Are compatible solutes compatible with biological treatment of saline wastewater? Batch and continuous studies using submerged anaerobic membrane bioreactors (SAMBRs) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(19): 7437-7442.
- [15] 金仁村, 马春, 郑平, 等. 盐度对 Anammox 的短期影响研究 [J]. *高校化学工程学报*, 2013, **27**(2): 322-329.
- Jin R C, Ma C, Zheng P, *et al.* Short-term effects of salinity on Anammox [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2013, **27**(2): 322-329.
- [16] Galinski E A. Osmoadaptation in bacteria [J]. *Advances in Microbial Physiology*, 1995, **37**: 273-328.
- [17] 王伟伟, 唐鸿志, 许平. 嗜盐菌耐盐机制相关基因的研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2015, **42**(3): 550-558.
- Wang W W, Tang H Z, Xu P. Salt-tolerance related genes in halophilic bacteria and archaea [J]. *Microbiology China*, 2015, **42**(3): 550-558.
- [18] 吴红珍. 色盐杆菌 DSM 22428<sup>T</sup> 新种鉴定及其甜菜碱醛脱氢酶研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- Wu H Z. The identification of *Chromohalobacter* sp. DSM 22428<sup>T</sup> and the study of its betaine aldehyde dehydrogenase [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2015.
- [19] 卢良坤, 罗立新, 黎攀, 等. 甘氨酸甜菜碱和分子伴侣 dnaK 在嗜盐四联球菌耐盐机制中的作用 [J]. *中国酿造*, 2013, **32**(2): 25-32.
- Lu L K, Luo L X, Li P, *et al.* The role of glycine betaine and molecular chaperone dnaK from *Tetragenococcus halophilus* on salinity adaptation [J]. *China Brewing*, 2013, **32**(2): 25-32.
- [20] 赵百锁, 杨礼富, 王磊, 等. 中度嗜盐菌相容性溶质机制的研究进展 [J]. *微生物学报*, 2007, **47**(5): 937-941.
- Zhao B S, Yang L F, Wang L, *et al.* Study progress on compatible solutes in moderately halophilic bacteria [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2007, **47**(5): 937-941.
- [21] 文利. 外源甜菜碱对生菜耐盐性和产量的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2007.
- [22] Pflüger K, Müller V. Transport of compatible solutes in extremophiles [J]. *Journal of Bioenergetics and Biomembranes*, 2004, **36**(1): 17-24.
- [23] 龙启福, 朱德锐, 韩睿, 等. 嗜盐菌相溶物质合成与转运调节机制 [J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(9): 63-66.
- Long Q F, Zhu D R, Han R, *et al.* Recent progress in researches on synthesis and transportation mechanism of compatible Solutes in Halophilic Bacteria [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(9): 63-66.
- [24] 何健, 蒋建东, 贾开志, 等. 外源甜菜碱提高恶臭假单胞菌 (*Pseudomonas putida*) DLL-1 耐盐性的研究 [J]. *微生物学报*, 2006, **46**(1): 154-157.
- He J, Jiang J D, Jia K Z, *et al.* Glycine betaine supplied exogenously enhance salinity tolerance of *Pseudomonas putida* DLL-1 [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2006, **46**(1): 154-157.
- [25] 柴宏祥, 胡学斌, 何强, 等. 投加甜菜碱对 ASBBR 处理榨菜废水效能的影响 [J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(15): 10-13.
- Cai H X, Hu X B, He Q, *et al.* Influence of Betaine on treatment of high-salt mustard tuber wastewater by ASBBR [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, **26**(15): 10-13.
- [26] 齐泮晴, 于德爽, 李津, 等. 盐度对厌氧氨氧化工艺处理含海水污水脱氮特性的影响 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(5): 1392-1399.
- Qi P Q, Yu D S, Li J, *et al.* Effects of salinity on nitrogen removal of treating sewage with seawater by ANAMMOX process [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1392-1399.
- [27] 李智行, 张蕾, 陈晓波, 等. 高效耐海水型厌氧氨氧化污泥的驯化 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(3): 748-756.
- Li Z X, Zhang L, Chen X B, *et al.* Acclimation of a highly-efficient and seawater tolerant anammox sludge [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(3): 748-756.
- [28] 马春. 厌氧氨氧化工艺处理低温和高盐度废水的可行性研究 [D]. 杭州: 杭州师范大学, 2012.
- Ma C. The Feasibility of Anammox process for the treatment of saline wastewater at low temperature [D]. Hangzhou: Hangzhou Normal University, 2012.
- [29] Poolman B, Glaasker E. Regulation of compatible solute accumulation in bacteria [J]. *Molecular Microbiology*, 1998, **29**(2): 397-407.
- [30] 曲宜, 韩雪, 张兰威, 等. 微生物积累及转运的相容性溶质种类的研究进展 [J]. *食品科技*, 2012, **37**(11): 27-30, 34.
- Qu Y, Han X, Zhang L W, *et al.* Progress on the variety of compatible solutes accumulated or transported in microorganisms [J]. *Food Science and Technology*, 2012, **37**(11): 27-30, 34.
- [31] Diaz M R, Taylor B F. Metabolism of methylated osmolytes by aerobic bacteria from Mono Lake, a moderately hypersaline, alkaline environment [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1996, **19**(4): 239-247.

## CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM <sub>2.5</sub> .....	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM <sub>2.5</sub> Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu .....	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM <sub>2.5</sub> at Mt. Huashan, Inland China .....	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM <sub>2.5</sub> ) Produced by Burning Fireworks .....	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region .....	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion .....	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring .....	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao .....	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay .....	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas .....	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City .....	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai .....	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River; A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo .....	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region .....	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH <sub>4</sub> Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River .....	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River .....	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments .....	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River .....	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake .....	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta .....	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process .....	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen; Removal, Transformation and Risk Assessment .....	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine .....	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation .....	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water .....	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater .....	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition .....	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads .....	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A <sup>2</sup> /O-BAF System .....	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control .....	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process .....	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater .....	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process .....	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process .....	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge .....	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process .....	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02 .....	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances .....	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain .....	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings .....	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin .....	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region .....	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feamnox in the Surface Soils of a Riparian Zone .....	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding .....	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China .....	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment .....	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajuhu Lake, Shengongjia .....	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China .....	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi .....	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It .....	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment .....	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains .....	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage .....	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern .....	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland .....	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission .....	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO <sub>2</sub> Release in Karst Region .....	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)