

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ) 吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094)	
《环境科学》征订启事 (4126)	
信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响

李祥^{1,2}, 黄勇^{1,2*}, 巫川^{1,2}, 王孟可^{1,2}, 袁怡^{1,2}

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技学院环境生物技术研究所, 苏州 215009)

摘要: 通过接种厌氧氨氧化污泥研究了 Fe 离子浓度及价态变化对厌氧氨氧化污泥活性的影响。短期浓度影响结果表明, 当进水铁离子浓度由 0 升高到 5 mg·L⁻¹ 时, 厌氧氨氧化污泥活性因受刺激而逐渐增强; 当进水铁离子浓度大于 5 mg·L⁻¹ 时, 因厌氧氨氧化反应产碱, 铁离子形成氢氧化物沉淀, 生物活性未受到影响。不同价态铁离子浓度变化对厌氧氨氧化污泥活性的影响无明显区别。长期价态影响结果表明, 经过 71 个周期培养, 含 Fe²⁺ 进水的厌氧氨氧化反应器 R1 脱氮效能(以氮计)由 0.28 kg·(m³·d)⁻¹ 升高到 0.65 kg·(m³·d)⁻¹, 是含 Fe³⁺ 进水反应器 R2 的 1.28 倍。因此 Fe²⁺ 更适合厌氧氨氧化菌生长的需求。实验结果进一步表明, Fe³⁺ 易导致厌氧氨氧化反应器 R2 内氨氮过量转化, 亚硝氮与氨氮转化比(1.17)明显低于含 Fe²⁺ 进水的反应器 R1 内亚硝氮与氨氮转化比(1.24)。

关键词: 厌氧氨氧化; 铁离子; 离子价态; 反应过程; 影响

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4224-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.026

Effect of Fe²⁺ and Fe³⁺ on the Activity of ANAMMOX

LI Xiang^{1,2}, HUANG Yong^{1,2}, WU Chuan^{1,2}, WANG Meng-ke^{1,2}, YUAN Yi^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The effect of the change in concentration and valence of iron ion on the ANAMMOX sludge activity was studied by inoculating ANAMMOX sludge. The concentration experimental results showed that the ANAMMOX sludge activity was stimulated and gradually increased when the influent iron ion concentration increased from 0 to 5 mg·L⁻¹. Iron hydroxide precipitate was formed with the pH value increased due to the alkalinity of the ANAMMOX product when the influent iron ion concentration was higher than 5 mg·L⁻¹, while the biological activity was not inhibited. There was no significant difference in the effects of the concentration change of iron ions with different valence effects on the ANAMMOX sludge activity. The long-term experimental results showed that the nitrogen removal rate (as N) of anammox reactor R1 was increased from 0.28 kg·(m³·d)⁻¹ to 0.65 kg·(m³·d)⁻¹ with Fe²⁺ in influent, which was 1.28 times as high as that in the ANAMMOX reactor R2 containing Fe³⁺ in influent, after 71 cycles of cultivation. Therefore, Fe²⁺ could better meet the growth needs of ANAMMOX bacteria. The results also showed that Fe³⁺ easily led to the excessive conversion of ammonia in the ANAMMOX reactor. The conversion ratio between nitrate and ammonia was 1.17 in reactor R2, which was significantly lower than that in the reactor R1, with a conversion ratio between nitrate and ammonia of 1.24.

Key words: ANAMMOX; iron ion; valence; reaction process; effect

厌氧氨氧化是指在厌氧的条件下厌氧氨氧化菌利用NH₄⁺-N作为电子供体, NO₂⁻-N作为电子受体, 通过氧化还原作用将这两种化合态氮转为氮气的生化过程。与传统的生物脱氮工艺相比, 厌氧氨氧化工艺具有脱氮效能高, 且在生物反应过程中无需分子氧和有机碳源的参与, 节省了大量动力和能源的消耗。因此, 对厌氧氨氧化反应的研究成为热点^[1]。

研究者发现厌氧氨氧化菌生长缓慢, 影响因子较多, 严重制约着反应器的快速启动^[2~4]。目前众多研究者将研究目标集中于溶解氧、pH、温度、营养基质等环境因子对厌氧氨氧化菌活性的影响^[5~8], 很少关注微量元素对厌氧氨氧化活性的影响。本课题组前期研究表明适当提高铜、锌的浓度对厌氧氨氧化菌活性具有明显的刺激作用, 有利于厌氧氨氧化反应器的启动^[9]。da Graaff 等^[10] 研究

表明 Ca²⁺ 不仅能够刺激厌氧污泥的活性, 同时也能影响厌氧颗粒污泥的结构。说明部分微量元素对微生物活性的提高具有重要的意义。

近年来 van Niftrik 等^[11] 研究表明, 厌氧氨氧化菌体内的厌氧氨氧化体单元内含有大量的 Fe 颗粒。张蕾等^[12] 研究表明 Strous^[13] 的模拟废水配方中 Fe 含量不能满足厌氧氨氧化菌的需求。同时厌氧氨氧化体内含有大量血红素, Fe 是血红素的重要组成物质, 因此, Fe 很有可能成为厌氧氨氧化反应器启动

收稿日期: 2014-04-04; 修订日期: 2014-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408387); 江苏省环境保护厅重大项目(201104); 苏州科技学院基金项目(XKY201103)

作者简介: 李祥(1984~), 男, 硕士, 实验师, 主要研究方向为废水脱氮处理理论及工艺, E-mail: lixiang@mail.usts.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn

过程中的缺乏元素. 然而有关 Fe 离子浓度变化对厌氧氨氧化菌活性影响的相关报道很少. 另一方面, 模拟废水中 Fe^{2+} 易氧化为 Fe^{3+} , 进入到厌氧氨氧化装置中的 Fe 基本以 Fe^{3+} 为主. 因此研究不同 Fe 离子价态变化对厌氧氨氧化活性影响也具有重要的意义. 为此本研究通过接种厌氧氨氧化污泥研究了不同价态 Fe 离子及其浓度对厌氧氨氧化菌活性的影响, 旨在为厌氧氨氧化菌培养和反应器启动过程中控制条件的优化提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验装置和运行条件

整个实验期间的运行装置选用 100 mL (或者 500 mL) 规格的血清瓶, 采用螺旋盖密封. 内置一块直径 5 cm 的圆形无纺布, 用以吸附颗粒较小的厌氧氨氧化污泥. 所有装置的运行条件: 温度为 32°C , 通过水浴振荡器加热维持; 进水 pH 值 6.5 ~ 6.6, 通过 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸控制进水 pH 值, 以保持 Fe 离子溶解; 进水方式为全进全出.

1.2 接种污泥

接种污泥取自本课题组自 2008 年成功驯化后长期运行至今的厌氧氨氧化种泥^[14]. 整个培养过程中厌氧氨氧化效果较好, 出水 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 的去除率均保持在 98% 以上, 脱氮效能为 $20 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 该污泥形态基本为颗粒状, 颗粒粒径主要分布在 0.5 ~ 2 mm 之间, MLVSS/MLSS 为 0.7 ~ 0.8.

1.3 模拟废水组成

实验所用废水由人工配置. 废水主要由 NH_4Cl (按需配制)、 NaNO_2 (按需配制)、 NaHCO_3 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 KHCO_3 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 KH_2PO_4 $27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $136 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、微量元素 I $1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 和微量元素 II $1.25 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组成. 微量元素浓缩液 I: EDTA $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $430 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $240 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $990 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $220 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $190 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NaSeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $210 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 H_3BO_4 $14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 微量元素浓缩液 II: EDTA $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 FeSO_4 或者 FeCl_3 (按需配置), 其中为了保持 Fe^{2+} 不被氧化, 在废水的配制过程中首先利用高纯氮气将水中的分子氧去除, 然后投加 Fe 粉保持. 其它废水配置后通过高纯氮气进行 30 min 的曝气, 使水中的分子氧能够得到去除.

1.4 分析方法

指标测定方法均按照《水和废水监测分析方法》^[15]. NH_4^+-N 采用纳氏分光光度法; 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; pH 采用哈纳 pH211 型酸度计^[19], Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 采用邻菲罗啉分光光度法.

1.5 实验方法

Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 浓度变化分别对厌氧氨氧化污泥脱氮效能的影响实验方法: 为了能够等分含水量较高的厌氧氨氧化湿污泥, 在每批 Fe 离子影响实验前, 将厌氧氨氧化污泥等分为 24 份, 每份污泥湿重 2 g. 在 100 mL 血清瓶中培养 8 h 后, 选取脱氮效能相近 (每批脱氮效能最大差值控制在 5% 以内, 标准偏差分别为 1.25, 1.33, 1.2, 1.28) 的 12 支作为一批, 进行单一价态 Fe 离子的影响实验. 每种价态 Fe 离子影响做 2 批平行实验. 对每批试管分别进入含有不同 Fe^{2+} 或者 Fe^{3+} 浓度的废水 (氨氮和亚硝氮浓度分别为 $94.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $128 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 进行培养, 经过 10 h 培养后, 测定废水中含氮化合物的变化, 评估 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 浓度对厌氧氨氧化污泥脱氮效能的影响, 以氮去除速率表征污泥活性.

Fe 离子价态分别对厌氧氨氧化污泥脱氮效能的影响: 采用 2 个有效体积 500 mL 的血清瓶, 接种 10 g 同样的厌氧氨氧化湿污泥, 分别标记为 R1、R2. R1 进行 Fe^{2+} 长期影响实验, R2 进行 Fe^{3+} 长期影响实验. 每个反应器分别接种厌氧氨氧化湿污泥 10 g, 运行周期设定为 10 h. 在研究 Fe 离子价态对厌氧氨氧化污泥脱氮效能影响的过程中, 随着脱氮效能的提高, 可适当提高进水氨氮和亚硝氮浓度.

2 结果与分析

2.1 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 浓度对厌氧氨氧化菌活性的影响

将含有不同 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 浓度培养后的厌氧氨氧化反应器取出, 测得出水氨氮和亚硝氮浓度变化如图 1 所示 (同一价态两批培养瓶的测定值已作平均). 由图 1(a) 可知, Fe^{2+} 浓度变化对厌氧氨氧化菌脱氮效能显著影响. 随着进水 Fe^{2+} 浓度由 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水氨氮和亚硝氮浓度分别由 $50.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $66.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐下降到 $17.57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $29.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 说明厌氧氨氧化菌的活性受到刺激, 增强了其脱氮效能. 许婷等^[16]研究表明, 当进水中 FeSO_4 浓度为 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Fe^{2+} 浓度为 $5.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, 其出水氮浓度明显低于对照实验. 张蕾等^[12]研究表明, 当进水 Fe 离子浓度

为 $0.075 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($4.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时,厌氧氨氧化反应器最大氮去除速率明显大于进水 Fe 离子浓度 $0.03 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($1.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的反应器,并认为总 Fe 浓度的提高明显增加了氮化合物的转化速度和

转化率. 当进水 Fe^{2+} 浓度由 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到 $65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水氨氮和亚硝氮浓度略有上升,围绕在 $17.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $30.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右波动,未观察到因 Fe 离子浓度过高产生的抑制现象.

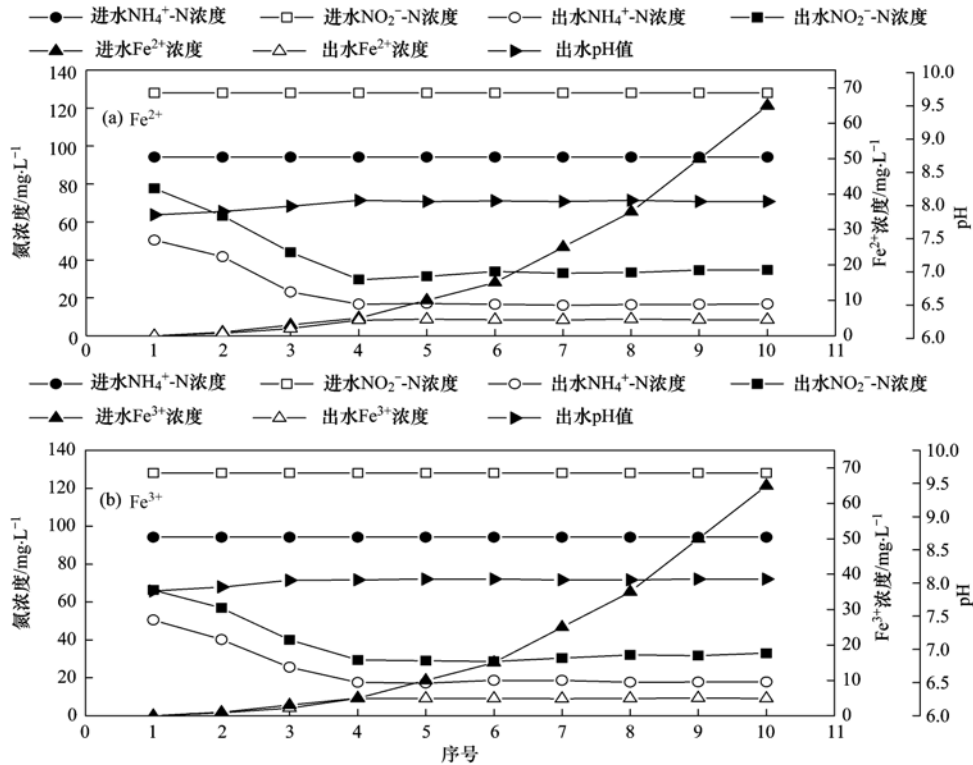


图 1 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 浓度变化对厌氧氨氧化脱氮效能的影响

Fig. 1 Effect of the change in Fe^{2+} and Fe^{3+} concentration on nitrogen removal efficiency of ANAMMOX sludge

Fe^{3+} 浓度变化对厌氧氨氧化菌脱氮效能短期影响基本与 Fe^{2+} 相同,如图 1(b) 所示. 随着进水 Fe^{3+} 浓度由 0 增加到 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水氨氮和亚硝氮浓度分别由 $50.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $66.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐下降到 $16.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $29.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明 Fe^{3+} 浓度的升高也能够对厌氧氨氧化污泥的活性产生刺激. 当进水 Fe^{3+} 浓度由 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到 $65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水氨氮和亚硝氮浓度围绕在 $16.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $33.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右波动,也未观察到因 Fe 离子浓度过高产生的抑制现象.

前期的实验研究表明铜和锌金属离子对厌氧氨氧化污泥活性的影响可分为 3 个阶段,分别为刺激阶段、稳定阶段和抑制阶段^[9]. 而在研究铁离子对厌氧氨氧化活性影响过程中未发现过量的 Fe 离子对厌氧氨氧化污泥活性产生抑制. 通过测定进出水的 Fe 离子浓度后发现,随着进水 Fe 离子浓度的升高,出水 Fe 离子浓度也会相应地升高. 但是当进水 Fe 离子浓度大于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水 Fe 浓度基本不

会增加,维持在 $5 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间. 通过查阅相关文献资料发现, Fe 离子容易产生 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 或者 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 沉淀 [$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 溶度积为 2.64×10^{-39}]. 同时厌氧氨氧化过程是一个产生 OH^- 的过程,所以当 pH 值达到一定浓度后,更易形成氢氧化物沉淀. 从而避免了高浓度 Fe 离子对厌氧氨氧化污泥活性的影响. 说明在短时间内 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 浓度变化对氨氧化污泥的影响基本相同,未因价态差异发生显著变化.

2.2 Fe^{2+} 对厌氧氨氧化菌活性的影响

为研究 Fe^{2+} 对厌氧氨氧化污泥脱氮效能影响,实验过程中将进水 Fe^{2+} 浓度设定在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,为防止 Fe^{2+} 被氧化,废水中投加了少量铁粉,最终测定进水中 Fe^{2+} 浓度为 $5.05 \sim 5.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间. 由图 2 可知,在反应器 R1 运行初期,进水氨氮和亚硝氮浓度分别为 $100.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $128 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最高出水氨氮和亚硝氮浓度分别为 $46.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $54.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,脱氮效能大约 $0.28 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 随着反

反应器 R1 运行时间的延长,出水氨氮和亚硝氮的浓度逐渐下降。当反应器 R1 运行到 35 个周期时,氨氮和亚硝氮去除率达到 98% 以上,脱氮效能升高到 $0.47 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。为了进一步增加反应器脱氮效能,在反应器 R1 运行的第 36 个周期,增加进水氨氮和亚硝氮浓度分别为 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水氨氮和亚硝氮浓度略有升高,但是经过数周期培养后很快就降低到 $2.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,脱氮效能稳定在 $0.56 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。在反应器 R1 运行的第 60 个周期再次增加进水氨氮和亚硝氮浓度分别至 $140 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氮负荷增加到 $0.76 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。又经过 12 个周期的培养,出水氨氮和亚硝氮浓度降低到 $6.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,出水硝酸盐浓度增加到 $29.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,脱氮效能最终稳定在 $0.65 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

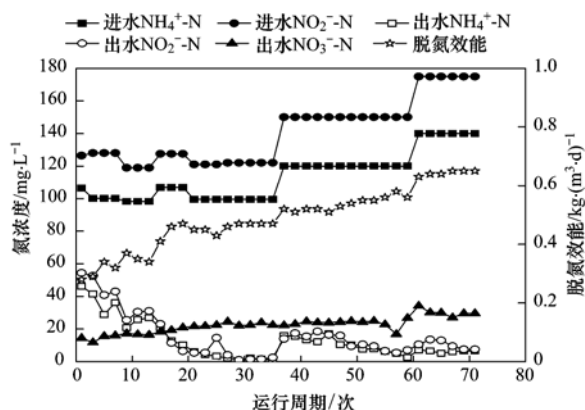


图2 Fe^{2+} 对厌氧氨氧化菌脱氮的长期影响

Fig. 2 Long-time effect of Fe^{2+} on nitrogen removal efficiency of ANAMMOX

2.3 Fe^{3+} 对厌氧氨氧化菌活性的影响

在研究 Fe^{3+} 浓度对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长期影响的实验过程中将进水 Fe^{3+} 浓度设定在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。如图 3 所示,初始进水氨氮和亚硝氮浓度分别为 $100.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $128 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,相应地初期出水氨氮和亚硝氮最高浓度为 $46.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $66.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,脱氮效能为 $0.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。经过 57 个周期的运行,反应器 R2 的脱氮效能逐步得到提高,当进水氨氮和亚硝氮浓度分别为 $95.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $122 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水浓度相应降低到 $7.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $16.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此时脱氮效能为 $0.43 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。在反应器 R2 运行的第 58 个周期,进一步增加进水氨氮和亚硝氮浓度至 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氮容积负荷增加到 $0.65 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。当反应器 R2 运行至 71 个周期时,出水氨氮和亚硝氮浓度下降到

$12.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $23.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,脱氮效能稳定在 $0.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,是反应器 R1 脱氮效能的 0.78 倍。说明 Fe^{3+} 对厌氧氨氧化污泥活性的刺激作用明显低于 Fe^{2+} 。

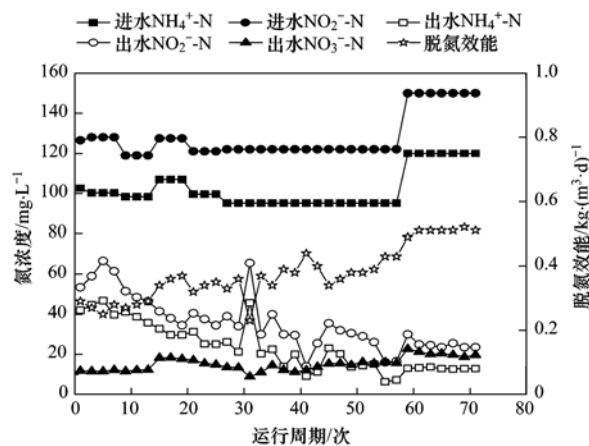


图3 Fe^{3+} 离子对厌氧氨氧化菌脱氮的长期影响

Fig. 3 Long-term effect of Fe^{3+} on nitrogen removal efficiency of ANAMMOX

3 讨论

3.1 不同价态 Fe 离子对厌氧氨氧化过程氮转化的影响

Stours 等^[13]最早通过物料守恒计算出厌氧氨氧化过程亚硝氮与氨氮的转化比为 1.32,硝态氮与氨氮的转化比为 0.26,因此众多研究者在厌氧氨氧化菌富集培养过程中将氮素转化比作为厌氧氨氧化反应特性的重要评价指标^[17]。 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 对厌氧氨氧化反应过程氮转化比的影响如图 4 所示。在进入含 Fe^{2+} 的反应器 R1 中,亚硝态氮与氨氮的平均转化比为 1.24,硝态氮与氨氮的平均转化比为 0.22,均低于 Strous 所报道的计量比^[18]。这与众多研究者的研究结果相似^[19,20]。在含 Fe^{3+} 的反应器 R2 中,亚硝态氮与氨氮的平均转化比为 1.17,硝态氮与氨氮的平均转化比为 0.19。含有 Fe^{3+} 反应器 R2 中的亚硝氮与氨氮转化比明显低于含有 Fe^{2+} 的反应器 R1。张蕾等^[12]研究表明,添加过量的 Fe^{2+} 之后,反应消耗的氨氮多于理论计量值,亚硝态氮与氨氮的平均值分别为 1.02~1.15,小于理论计量值。但是未对原因进行详细分析。从张蕾的实验材料与方法看出,在研究两个 Fe^{2+} 浓度对厌氧氨氧化污泥活性影响的过程中,未对废水进行特别处理。因此,进入反应器内的 Fe^{2+} 很容易被氧化为 Fe^{3+} ,所以观察到过量的氨氮被转化的现象可能是 Fe^{3+} 引起的。Shrestha 等^[21]通过湿地土壤实验室模拟和自然环境

中湿地土壤的原位验证研究发现,在湿地厌氧环境中 NH_4^+ 与 Fe^{3+} 可以进行反应,同时有 N_2 产生的现象. 进入到反应器 R2 的所有废水均进行了除氧处理,所以在厌氧氨氧化过程中不可能存在分子氧将氨氮氧化的亚硝化过程. 反应器 R2 也可能存在某种微生物能够利用 Fe^{3+} 与氨氮进行氧化还原反应,相关研究还需进一步深入分析.

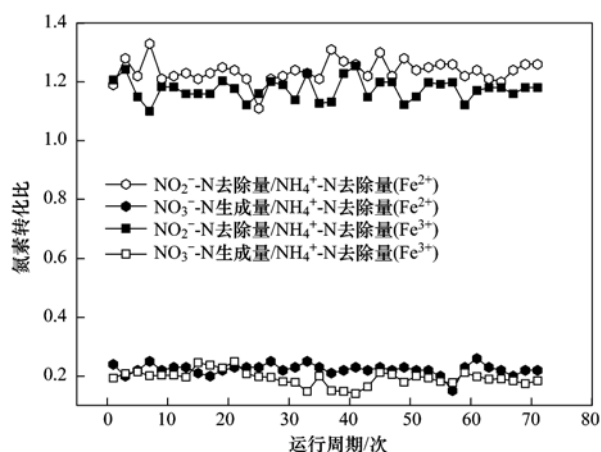


图4 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 离子对厌氧氨氧化过程氮转化比的影响

Fig. 4 Effect of Fe^{2+} and Fe^{3+} on nitrogen conversion ratio of ANAMMOX

3.2 厌氧氨氧化反应器脱氮效能提高过程中 Fe 离子形态重要性

Fe 是生物的重要微量元素之一,同时也是血红蛋白的主要成分. 其浓度不足必然会影响到微生物体内的血红素合成或者能量的传递. Zhu 等^[22]证明,铁离子浓度不足时,光合产氢菌 (*Rhodospira rubra*) 的活性会受到限制,铁离子浓度为 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其产氢量升至最大值. Wei 等^[23]利用充足和缺乏 Fe^{3+} 的培养基分别培养氨氧化细菌,在 Fe^{3+} 充足的培养基中生物量较大,是缺乏 Fe^{3+} 培养基生物量的 1.6 ~ 3.3 倍,同时前者的血红素 C 含量也远远高于后者.

与传统的活性污泥不同,厌氧氨氧化污泥的外观颜色为红色,一般通过观察表面颜色就能比较出厌氧氨氧化污泥活性的高低. 其主要原因就是厌氧氨氧化污泥中含有大量的血红素. 例如,每个羟氨氧化酶含有 26 个血红素,每个联氨氧化酶含有 8 个血红素等^[24,25]. 因此,在厌氧氨氧化的富集培养过程中,Fe 元素很有可能成为限制因子. Zhang 等^[26]利用铁电极研究其对厌氧氨氧化污泥活性的影响,发现电极产生的 Fe^{2+} 对厌氧氨氧化污泥具有较强的刺激作用. 随着电压的提高,出水 Fe^{2+} 浓度也相

应提高,促使厌氧氨氧化污泥的活性大幅提高. 由本实验可知,随着进水 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 离子浓度的提高,厌氧氨氧化污泥的活性逐步提高. 当进水铁离子浓度达到 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时厌氧氨氧化污泥的活性达到最大. 而 Strous 等^[18]营养盐配方中铁离子浓度才 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,明显不能满足厌氧氨氧化菌的需求. 由于厌氧氨氧化反应过程中 pH 值变化导致溶解性 Fe 离子浓度降低,阻止了厌氧氨氧化污泥活性的进一步提高. 但同时厌氧氨氧化体系的碱性环境,很好地防御了过多的 Fe 离子对微生物活性产生抑制作用.

Fe^{2+} 在水中易氧化为 Fe^{3+} ,根据本课题组长期观察可知进入到厌氧氨氧化装置的模拟废水中 Fe 离子基本为 Fe^{3+} . 另一方面,亚硝化作为厌氧氨氧化的前置装置,是一个好氧环境,必然导致进入到厌氧氨氧化体系的 Fe 离子以 Fe^{3+} 形态存在. 由本实验可知, Fe^{2+} 比 Fe^{3+} 更有利于厌氧氨氧化菌的快速富集. 因此可以建议在厌氧氨氧化反应器内增加适量的铁块,使得进入反应器内的 Fe^{3+} 转化为 Fe^{2+} ,将更有利于厌氧氨氧化菌的繁殖.

4 结论

(1) Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 离子浓度变化对厌氧氨氧化菌脱氮效能影响研究表明,不同价态的 Fe 离子对厌氧氨氧化污泥脱氮效能影响没有显著性差异. 当 Fe 离子浓度由 0 增加到 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,厌氧氨氧化污泥的活性受到刺激,脱氮效能增加. 当进水 Fe 离子浓度大于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,由于厌氧氨氧化反应产生 OH^- ,Fe 离子会形成氢氧化物沉淀,从而避免了 Fe 离子的毒性抑制.

(2) 不同 Fe 离子价态对厌氧氨氧化菌脱氮效能影响研究表明,经过 71 个周期的培养 Fe^{2+} 反应器的脱氮效能由 $0.28 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 上升至 $0.65 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,亚硝氮、硝氮与氨氮的转化比分别为 1.24 和 0.22; Fe^{3+} 反应器的脱氮效能由 $0.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 上升至 $0.51 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,亚硝氮、硝氮与氨氮的转化比分别为 1.17 和 0.19. 说明 Fe^{2+} 更适合于厌氧氨氧化菌生长的需求.

参考文献:

- [1] 王元月,魏源送,张树军. 厌氧氨氧化技术处理高浓度氨氮工业废水的可行性分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2359-2368.
- [2] 李祥,黄勇,袁怡,等. 高脱氮效能厌氧氨氧化反应器颗粒污泥特性及控制[J]. 高校化学工程学报, 2013, 27(6): 1078-1083.

- [3] Li H S, Zhou S Q, Ma W H, *et al.* Fast start-up of ANAMMOX reactor: Operational strategy and some characteristics as indicators of reactor performance[J]. *Desalination*, 2011, **286**: 436-441.
- [4] Lv Y T, Wang L, Wang X D, *et al.* Macroscale and microscale analysis of ANAMMOX in anaerobic rotating biological contactor [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(10): 1679-1683.
- [5] Lotti T, van der Star W R L, Kleerebezem R, *et al.* The effect of nitrite inhibition on the ANAMMOX process [J]. *Water Research*, 2012, **46**(8): 2559-2569.
- [6] Chen J W, Zheng P, Tang C J, *et al.* Effect of low pH on the performance of high-loaded ANAMMOX reactor[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2010, **24**(2): 320-324.
- [7] Jung J Y, Kang S H, Chung Y C, *et al.* Factors affecting the activity of anammox bacteria during start up in the continuous culture reactor[J]. *Water Science and Technology*, 2007, **55**(1-2): 459-468.
- [8] Tao W D, He Y L, Wang Z Y, *et al.* Effects of pH and temperature on coupling nitrification and anammox in biofilters treating dairy wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2012, **47**: 76-82.
- [9] 李祥, 黄勇, 刘福鑫, 等. 铜、锌离子对厌氧氨氧化污泥脱氮效能的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 259-265.
- [10] de Graaff M S, Temmink H, Zeeman G, *et al.* Autotrophic nitrogen removal from black water: calcium addition as a requirement for settle ability [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 63-74.
- [11] van Niftrik L A, Geerts W J C, van Donselaar E G, *et al.* Combined structural and chemical analysis of the anammoxosome: a membrane-bounded intracytoplasmic compartment in anammox bacteria[J]. *Journal of Structural Biology*, 2008, **161**(3): 401-410.
- [12] 张蕾, 郑平, 胡安辉. 铁离子对厌氧氨氧化反应器性能的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(8): 1629-1634.
- [13] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation [J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [14] 李祥, 黄勇, 袁怡. 生物膜反应器厌氧氨氧化脱氮效能研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(11): 133-137.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 258-282.
- [16] 许婷, 梁延周, 杜兵. FeSO_4 对厌氧氨氧化微生物活性影响[J]. *环境工程*, 2013, **31**(S1): 8-11.
- [17] 李祥, 黄勇, 袁怡. DO 在厌氧序批式生物膜反应器中对厌氧氨氧化反应启动的影响[J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(10): 43-47.
- [18] Strous M, Jetten M S M. Anaerobic oxidation of methane and ammonium [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2004, **58**: 99-117.
- [19] Hu A H, Zheng P, Mahmood Q, *et al.* Characteristics of nitrogenous substrate conversion by anammox enrichment [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 536-542.
- [20] Tao Y, Gao D W, Wang H Y, *et al.* Ecological characteristics of seeding sludge triggering a prompt start-up of anammox [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **133**(3): 475-481.
- [21] Shrestha J, Rich J J, Ehrenfeld J G, *et al.* Oxidation of ammonium to nitrite under iron-reducing conditions in wetland soils[J]. *Soil Science*, 2009, **174**(3): 156-164.
- [22] Zhu H, Fang H H P, Zhang T, *et al.* Effect of ferrous ion on photo heterotrophic hydrogen production by *Rhodobacter sphaeroids*[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, **32**(17): 4112-4118.
- [23] Wei X M, Vajrala N, Hauser L, *et al.* Iron nutrition and physiological responses to iron stress in *Nitrosomonas europaea* [J]. *Archives of Microbiology*, 2006, **186**(2): 107-118.
- [24] Cirpus I E Y, de Been M, Op den Camp H J M, *et al.* A new soluble 10 kDa monoheme cytochrome *c*-552 from the anammox bacterium *Candidatus "Kuenenia stuttgartiensis"* [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2005, **252**(2): 273-278.
- [25] Shimamura M, Nishiyama T, Shigetomo H, *et al.* Isolation of a multiheme protein with features of a hydrazine-oxidizing enzyme from an anaerobic ammonium oxidizing enrichment culture[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(4): 1065-1072.
- [26] Zhang J X, Zhang Y B, Li Y, *et al.* Enhancement of nitrogen removal in a novel anammox reactor packed with Fe electrode [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 102-108.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(Ⅲ) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryIAc Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行