

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, 魏楨, 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, 王朕, 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)

黄河干流宁夏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, 马若琦, 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态氮水特征和成因分析 徐进, 何江涛, 彭颖, 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)

铅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)

洱河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, 曾中, 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, 石炬, 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 Fe³⁺ 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/O² 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 A²/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, 张殿波 (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)

温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响

陈方敏^{1,2,3}, 金润^{1,2,3}, 袁砚^{1,2,3}, 李祥^{1,2,3*}, 黄勇^{1,2,3}, 顾澄伟^{1,2,3}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 苏州 215009; 3. 苏州科技大学环境生物技术研究所, 苏州 215009)

摘要: 近年来, 在厌氧条件下, 以 Fe(III) 作为电子受体氧化氨氮的现象 (Feammox) 逐步受到研究者的关注. 通过对由厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 污泥驯化而来的 Feammox 污泥进行活性恢复, 研究了 pH 值和温度对 Feammox 过程氮素转化的影响. 结果表明, 经过 40 d 运行, Feammox 污泥活性获得恢复, 环境中存在明显的氨氮转化和总氮去除, 产物主要为硝酸盐和大气态氮. 亚硝酸盐一直处于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. pH 值和温度对 Feammox 过程氮素转化的影响很大. Feammox 过程 pH 值 7 和温度为 30°C 时, 总氮去除量相对最高, 去除率均达到 50% 以上. pH 值为 6.5 时, 氨氮的转化量最高为 80.2%. Feammox 反应过程中, 铁离子的化合物沉淀及在污泥表面包裹是导致反应器持续运行和反应机制探索的主要干扰因素.

关键词: Fe(III) 还原氨氧化; 反应特性; pH 值; 温度; 氮素转化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4289-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.201801286

Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process

CHEN Fang-min^{1,2,3}, JIN Run^{1,2,3}, YUAN Yan^{1,2,3}, LI Xiang^{1,2,3*}, HUANG Yong^{1,2,3}, GU Cheng-wei^{1,2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Municipal Sewage Resource Utilization Technology, Suzhou 215009, China; 3. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: In recent years, the oxidation of NH_4^+ using Fe(III) as an electron acceptor under anaerobic conditions (Feammox) has received significant research attention. In this study, the effect of pH and temperature on nitrogen conversion during the Feammox process was studied through activity recovery of Feammox sludge acclimated by anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) sludge. Results showed that after 40 d operation, activity of Feammox sludge was recovered. There was evident ammonia nitrogen conversion and total nitrogen removal from the environment, and the products were mainly nitrate and nitrogen. The concentration of nitrite remained below $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. pH value and temperature significantly influenced nitrogen transformation during the Feammox process. With pH value of 7 and temperature of 30°C during the Feammox process, the removal rate of total nitrogen was relatively high ($> 50\%$). When the pH value was 6.5, the conversion rate of ammonia nitrogen was 80.2%. During the Feammox reaction process, precipitation of iron ion compounds and coating on the sludge surface were the main interference factors leading to continuous operation of the reactor and exploration of the reaction mechanism.

Key words: Fe(III) reduction with ammonia oxidation; reaction characteristics; pH value; temperature; nitrogen conversion

铁几乎是所有微生物生长的重要元素之一, 参与到三羧酸循环, 电子转移, 氨基酸和嘧啶的合成, 与一些重要的蛋白类物质, 血红素、硫铁蛋白有着重要联系^[1]. 近年来, Fe(III) 将氨氮氧化的现象 (Feammox) 在稻田、高原土、河岸湿地等一些富有氨氮和铁的厌氧环境中被发现^[2-4]. 这一现象的发现, 为自然界氮素与铁元素的转化提供了新的认识, 受到研究者的广泛关注. 随后, 一些研究者在自然界原位的环境和实验室小试的装置中进一步证实 Feammox 现象的存在, 并对机制进行深入分析, 推测土壤中大约有 $18 \text{ t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 的氮是由 Feammox 过程转化实现^[5, 6].

厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 菌作为一种厌氧条件下以亚硝酸盐为电子受体氧化氨的新型高效生物脱氮菌种, 受到研究者的广泛关注^[7-9]. Van Niftrik

等^[10]发现 ANAMMOX 菌体内储存大量铁颗粒, 并证实其在 ANAMMOX 反应过程中参与铁蛋白和血红素的组成, 是 ANAMMOX 过程中的重要元素. 随后, 有学者进行了关于 Fe(II) 浓度对 ANAMMOX 菌活性的影响研究, 结果一致表明按照 Strous 等^[11]最早所报道并被广泛运用于 ANAMMOX 菌培养的模拟废水中 Fe(II) 含量明显不足^[12, 13]. 随着 ANAMMOX 微生物生理特征和环境因子研究的不断深入, 人们发现在厌氧的条件下, 不仅仅亚硝酸

收稿日期: 2018-01-30; 修订日期: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51478287, 51408384); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401103); 江苏省特色优势学科二期项目; 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目

作者简介: 陈方敏 (1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染理论与控制, E-mail: 1154696532@qq.com

* 通信作者, E-mail: lixiang@mail.usts.edu.cn

盐可以作为唯一电子受体, Fe(Ⅲ)也可作为电子受体, 将氨氧化为 NO_x 或者 N_2 . Li 等^[14] 接种 ANAMMOX 污泥启动 Feammox 反应器实现了 Fe(Ⅲ)和氨的同步转化. 姚宗豹等^[15] 利用 Fe(Ⅲ)代替亚硝酸盐, 通过接种 ANAMMOX 污泥也成功地实现了 Feammox 反应. 说明 ANAMMOX 污泥中存在着 Feammox 反应, 只要条件适宜即可驯化.

ANAMMOX 菌培养的最适温度为 32°C , 最适 pH 值为 $7.5 \sim 8$ ^[16]. 然而, 铁元素在中性的条件下多以 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 或者 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的形态存在. 这种絮体易沉淀在反应器中, 不易随水流出, 导致 Feammox 反应过程中铁元素的价态及浓度变化很难测定. 目前研究者在不同的 pH ($4.5 \sim 8.5$) 环境中均发现或者实现了 Feammox 反应^[5, 6], 且存在多种不同产物的报道. 然而有关 pH、温度等一些常规控制参数对其影响尚不明确. 这些缺陷限制了人们对 Feammox 机制的深入探索.

因此, 本研究利用前期驯化出的 Feammox 污泥, 通过进出水氮素形态的测定, 探讨 pH、温度的变化对 Feammox 过程氮素转化的影响, 以期为强化 Feammox 过程氮素的转化能力和微生物的富集提供一些技术参考.

1 材料与方 法

1.1 装置与控制条件

采用 1 套带有密封塞的 $1\,000\text{ mL}$ 血清瓶进行 Feammox 污泥活性^[14] 的恢复. 在研究 pH 值对 Feammox 污泥活性影响的过程中, 采用 10 个 100 mL 的同样外形的血清瓶, 将恢复好的 Feammox 污泥均分到各个瓶中, 进入同样的营养液, 控制不同的 pH 值 ($4.5 \sim 9.0$, 以 0.5 作为梯度逐步提高), 温度控制在 32°C . 在研究温度对 Feammox 污泥活性影响的过程中, 采用 9 个相同的装置接种再次恢复活性的 Feammox 污泥, 设定不同的温度 ($5 \sim 45^\circ\text{C}$, 以 5°C 作为梯度逐步上升), 进水 pH 值控制在 7 . 温度通过气浴恒温振荡器或者低温生化培养箱维持. 进水 pH 值通过 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸调节. 水力停留时间 (HRT) 最初均控制在 2 d .

1.2 模拟废水

实验所用废水由人工配置. 废水主要由 NH_4^+-N $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 由 NH_4Cl 配制; Fe(Ⅲ) $50 \sim 60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 由 FeCl_3 配制; NaHCO_3 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; KH_2PO_4 $27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $136\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; MgO $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 微量元素 $1.25\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组成. 微量元素

浓缩液: EDTA $10\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $430\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $240\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $990\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $220\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $190\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaSeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $210\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, H_3BO_4 $14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 废水配置后通过高纯氮气进行 30 min 的曝气, 保证反应器内厌氧的环境.

1.3 水质分析

指标测定方法均按照文献^[17]. 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, Fe(Ⅱ)、Fe(Ⅲ) 采用邻菲罗啉分光光度法, 测定方法稍微做了一些改进, 具体参见文献^[18].

1.4 颗粒污泥表面 EDX 分析

利用 EDX 对最初接种的 ANAMMOX 污泥, 以及经过 40 d 活性恢复的 Feammox 污泥表面进行观察. 样品首先利用 $0.45\ \mu\text{m}$ 的纤维膜进行过滤, 然后放置在 4% 的戊二醛溶液中进行 24 h 固定, 然后利用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷酸缓冲液进行 3 次清洗, 每次时间 15 min . 再利用不同梯度浓度 (20% 、 40% 、 60% 、 80% 和 100%) 的酒精溶液进行脱水, 每个浓度 5 min . 通过临界点干燥仪对脱水的样品进行干燥. 最后利用扫描电镜 (Quetan2500, FEI, USA) 进行观察.

2 结果与讨论

2.1 Feammox 污泥的活性恢复

将前期成熟的 Feammox 污泥接种入反应器内, 进行 40 d 的活性恢复, 结果如图 1 所示. 在反应器启动初期就有明显的 Feammox 现象显现. 在进水氨氮和 Fe(Ⅲ) 浓度分别 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, 出水氨氮最低下降到 $9.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 亚硝酸盐一直处于 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 出水硝酸盐维持在 $6.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 氨氮转化率维持在 70% 左右, 总氮去除率约 40% . 而出水 Fe(Ⅱ) 和 Fe(Ⅲ) 浓度分别维持在 $14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $9.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水总铁明显低于进水, 说明大量的铁离子沉淀在反应器内. 在反应器运行过程中未监测到高浓度的亚硝酸盐主要是因为接种污泥最初是以亚硝酸盐为电子受体的 ANAMMOX 污泥, Feammox 污泥中存在 ANAMMOX 菌 (*Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*、*Candidatus Brocadia sinica* 和 *Candidatus Brocadia fulgida*) 将产

生的亚硝酸盐与剩余的氨转化^[14].

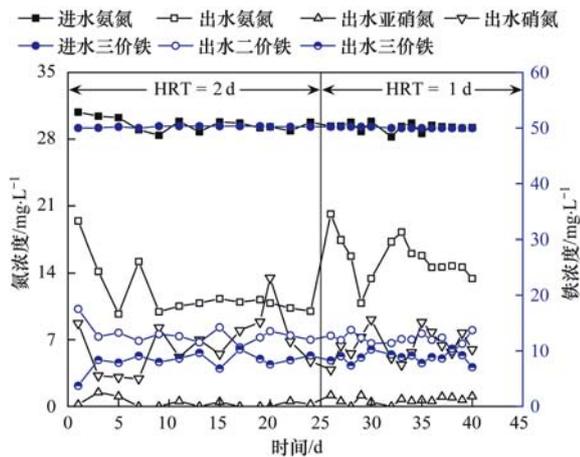


图1 Feammox 污泥活性恢复过程中氮素及铁素的变化

Fig. 1 Changes in nitrogen and iron during recovery of Feammox sludge activity

当反应器运行至 25 d 时, 将 HRT 缩短至 1 d, 经过十多天的运行, 氨氮出水浓度明显提高, 最终稳定在 $14.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 转化率为 50%. 亚硝酸盐出水并未明显增加. 硝酸盐的出水浓度出现波动, 平均浓度约在 $6.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 总氮去除率维持在 25.6%. 出水 $\text{Fe}(\text{II})$ 离子维持在 $9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Fe}(\text{III})$ 离子平均浓度为 $11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 但是 HRT 缩短后, 氨氮转化速率和总氮去除速率获得了明显的提升, 氨氮转化速率由 $9.5 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 上升到 $14.5 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$. 在反应器运行的 40 d, 对污泥中的铁离子形态和浓度进行了监测, 结果表明 1 mL 污泥中 $\text{Fe}(\text{III})$ 浓度达到 $287 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. $\text{Fe}(\text{II})$ 离子浓度达到 $812 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 通过 EDX 分析表明, 最初的 ANAMMOX 污泥中铁离子浓度很低仅 3.2% [图 2 (a)], 而经过 40 d 恢复运行后的污泥中铁离子含量达到 40%, 基本与碳元素等量 [图 2 (b)]. 因此, 出现氨氮转化率的降低, 可能是因为大量的铁离子沉积在污泥中导致微生物很难与基质接触, 甚至可能导致污泥矿化. $\text{Fe}(\text{III})$ 也很容易被吸附在微生物表面参与到电子传递过程^[19]. Oshiki 等^[20] 和 Gao 等^[21] 通过 SEM 观察实验过程中的污泥絮体也发现被一些不规则的粒子覆盖, 他们推测可能是含有被氧化的 Fe 的矿物质. 因此, 在 Feammox 运行过程中如何防止铁离子过度沉积妨碍基质传输将是一个值得探讨的问题.

2.2 pH 值变化对 Feammox 污泥活性的影响

利用 $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 将驯化后的 Feammox 污泥中铁离子尽可能地洗出, 然后平均封装于 10 个小反应器中, 设定不同的 pH 值 (4.5、5.0、5.5、

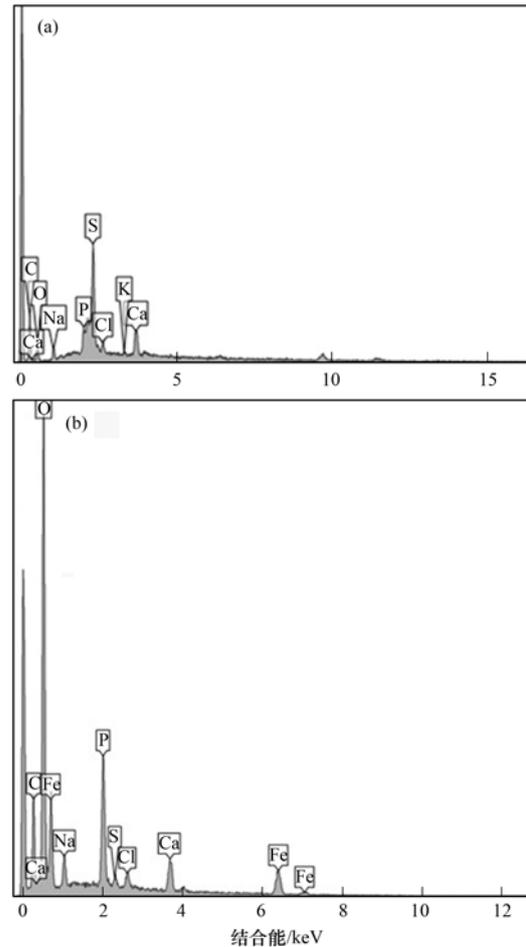


图2 ANAMMOX 污泥与 Feammox 污泥的 EDX 分析

Fig. 2 EDX analysis of ANAMMOX sludge and Feammox sludge

6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0), 经过 2 d 的培养, 其结果如图 3 所示. 当 pH 值为 6.5 时, 出水氨氮的浓度为 $6.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮的转化率最高为 80.2% [图 3 (a)]. 随着 pH 值持续升高或者降低, 出水氨氮的浓度均出现逐步上升. 当 pH 值为 4.5 时, 出水的氨氮浓度为 $12.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 转化率为 60%; 当 pH 值为 9.0 时, 出水氨氮的浓度为 $20.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 转化率为 32.7%. 说明升高 pH 值对氨氮转化率的影响明显大于下降 pH 值的影响. pH 值对硝酸盐产生量的波动较小, pH 值在 7.0~9.0 之间时, 硝酸盐的生成量在 $8.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右波动, 最低值出现在 pH 为 9 时, 浓度为 $7.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. pH 值在 4.5~5.5 时存在少量亚硝酸盐的积累, 约 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但随着 pH 值得升高, 仍处于较低浓度. 从总氮的去除情况看, pH 值 7.0 时最高, 总氮去除达到 $14.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 随着 pH 值得上升或者下降, 总氮去除量呈现出明显的下降趋势. 因此, 从亚硝酸盐累积及总氮的去除量可以推测, 出现该现象主要是因为 Feammox 污泥中的 ANAMMOX 菌在低 pH

环境下不适宜生长, 出现少量亚硝酸盐的积累^[22], 而当 pH 逐步上升时, ANAMMOX 菌的 pH 环境逐步适宜, 可以利用亚硝酸盐氧化氨氮, 所以 pH 值升高时观察不到亚硝酸盐积累. Huang 等^[5]在 pH 值为 4.5 的环境中利用水铁矿和针铁矿作为电子供体氧化氨氮, 结果存在亚硝酸盐的生成, 因此认为氨氮在 Feammox 过程中被氧化为亚硝酸盐. Shrestha 等^[23]在 pH 值为 3.5~4 热带雨林沉积物中观察到 Feammox 现象, 并且氨氮被转化为亚硝酸盐, 未有硝酸盐的产生, 通过同位素示踪实验推测 ANAMMOX 反应将氨氮和亚硝酸盐转化为氮气. Zhou 等^[24]在 pH 值为 6.8~7.2 的高原土壤中发现 Feammox 现象, 氨氮被氧化为硝酸盐和亚硝酸盐, 存在反硝化细菌将硝酸盐或亚硝酸盐转化为氮气. Li 等^[6]利用同位素示踪技术在 pH 值为 8.32~8.46 的湿地中发现 Feammox 过程, 未观察到亚硝酸盐的产生, 认为氨氮被氧化为氮气. 说明 pH 值的变化对 Feammox 过程氨氮转化的产物形态影响较大.

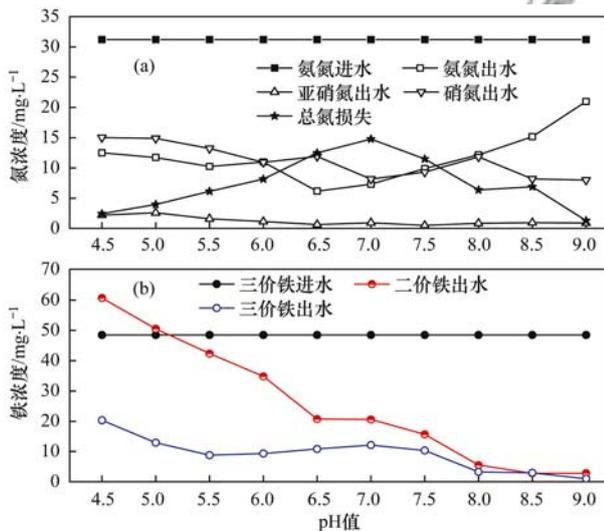


图 3 不同 pH 值对 Feammox 过程氮素及铁离子形态的影响

Fig. 3 Effects of different pH values on nitrogen and iron ion forms in the Feammox process

铁离子的出水浓度随着 pH 的提高, 则出现明显的下降现象[图 3(b)]. 同时在 pH 值为 4.5 时, 出水 Fe(II) 浓度达到 $60.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Fe(III) 浓度为 $20.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 明显高于进水总铁 [Fe(III)] $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 说明低 pH 值下污泥中未完全洗净的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 发生溶解后, 随水流出. 而当 pH 值升高到 9.0 时, 出水 Fe(II) 浓度下降到 $1.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Fe(III) 浓度为 $1.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 说明高 pH 环境下铁离子几乎完全沉淀在污泥中, 不易于 Feammox 反应的长期进行.

2.3 温度对 Feammox 污泥活性的影响

目前有关 Feammox 现象的研究基本在 25°C 左右的常温条件下进行的, 鲜见不同温度对 Feammox 影响的对比分析. 本研究在进水氨氮和 Fe(III) 浓度分别为 $31.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $48.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, 不同温度 (5°C 、 10°C 、 15°C 、 20°C 、 25°C 、 30°C 、 35°C 、 40°C 、 45°C) 对 Feammox 过程影响如图 4(a) 所示. 当温度为 30°C 时, 反应器中氨氮的转化速率最高, 出水氨氮浓度为 $8.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 转化率为 72.4%. 随着温度逐步的升高或者降低, 出水的氨氮浓度都会逐步增加. 当温度为 5°C 时, 出水氨氮浓度达到 $28.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 转化率为 8%, 几乎未发生转化. 当温度升高至 45°C 时, 出水氨氮浓度为 $22.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 转化率为 28.5%. 因亚硝酸盐产量较低, 所以温度对其影响几乎不明显. 而温度对硝酸盐的产量产生明显的影响, 当温度从 5°C 开始逐渐上升到 25°C 时, 硝酸盐的产量逐步升高. 当温度大于 25°C 时, 温度对硝酸盐的影响变得不明显, 出水硝酸盐浓度基本维持在 $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Park 等^[3]利用活性污泥富集培养 Feammox 微生物, 将 pH 控制在 6.8, 温度控制在 35°C , 也发现氨氮转化的产物主要为硝酸盐. 温度在 30°C 时, 总氮的去除率最大, 去除量达到 $15.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 50.3%. 随着温度的逐步上升或者下降, 反应器的总氮去除速率开始逐步下降. 当温度下降到 5°C 时, 出水总氮浓度反而升高, 可能是此温度下部分微生物因无法生长出现了内源消化.

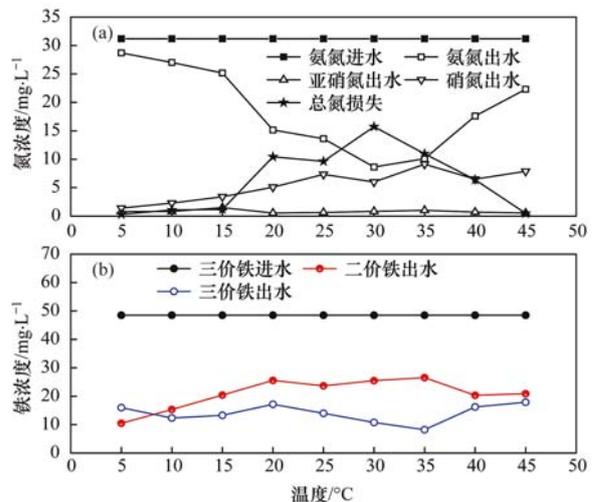


图 4 温度对 Feammox 过程氮素及铁离子形态的影响

Fig. 4 Effects of temperature change on nitrogen and iron ion forms in the Feammox process

在不同温度下, 反应器出水 Fe(III) 浓度基本随着氨氮浓度的下降而下降[图 4(b)], 在温度 35°C 时, 出水 Fe(III) 浓度下降到 $8.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 出水

Fe(II) 浓度与 Fe(III) 趋势相反, 高浓度 $20 \sim 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 出现在温度为 $20 \sim 35^\circ\text{C}$, 此时反应器脱氮能力处于一个相对较高的水平。

3 结论

(1) pH 值变化对 Feammox 过程氨氮转化的产物形态影响较大。当 pH 值为 6.5 时, 出水氨氮的浓度最低为 $6.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮的转化率为 80.2%。当 pH 值 7.0 时, 总氮去除最高达到 $14.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。随着 pH 值的上升或者下降, 总氮去除量呈现出明显的下降趋势。

(2) 温度在 30°C 时, 氨氮的转化速率和总氮的去除率都最高, 出水氨氮浓度为 $8.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除量达 $15.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。随着温度逐步上升或下降, 反应器氨氮的转化速率和总氮去除速率都逐步下降。

参考文献:

- [1] Su J F, Cheng C, Huang T L, *et al.* Performance of the dominant bacterial species and microbial community in autotrophic denitrification coupled with iron cycle in immobilized systems[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **117**(1-2): 88-97.
- [2] Ding B J, Li Z K, Qin Y B. Nitrogen loss from anaerobic ammonium oxidation-coupled to Iron(III) reduction in a riparian zone[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**(Pt 1): 379-386.
- [3] Park W, Nam Y K, Lee M J, *et al.* Anaerobic ammonia-oxidation coupled with Fe^{3+} reduction by an anaerobic culture from a piggery wastewater acclimated to $\text{NH}_4^+/\text{Fe}^{3+}$ medium[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2009, **14**(5): 680-685.
- [4] Clément J C, Shrestha J, Ehrenfeld J G, *et al.* Ammonium oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron under anaerobic conditions in wetland soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(12): 2323-2328.
- [5] Huang S, Jaffé P R. Characterization of incubation experiments and development of an enrichment culture capable of ammonium oxidation under iron-reducing conditions [J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(3): 769-779.
- [6] Li X F, Hou L J, Liu M, *et al.* Evidence of nitrogen loss from anaerobic ammonium oxidation coupled with ferric iron reduction in an intertidal wetland [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(19): 11560-11568.
- [7] Gonzalez-Silva B M, Rønning A J, Andreassen I K, *et al.* Changes in the microbial community of an anammox consortium during adaptation to marine conditions revealed by 454 pyrosequencing[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, **101**(12): 5149-5162.
- [8] Trojanowicz K, Plaza E, Trela J. Pilot scale studies on nitrification-anammox process for mainstream wastewater at low temperature[J]. *Water Science and Technology*, 2016, **73**(4): 761-768.
- [9] Guillén J A S, Vazquez C M L, De Oliveira Cruz L M, *et al.* Long-term performance of the anammox process under low nitrogen sludge loading rate and moderate to low temperature[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **110**: 95-106.
- [10] Van Niftrik L, 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.
- [11] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [12] Shu D T, He Y L, Yue H, *et al.* Effects of Fe(II) on microbial communities, nitrogen transformation pathways and iron cycling in the anammox process: kinetics, quantitative molecular mechanism and metagenomic analysis [J]. *RSC Advances*, 2016, **6**(72): 68005-68016.
- [13] 李祥, 黄勇, 巫川, 等. Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4224-4229.
- [13] Li X, Huang Y, Wu C, *et al.* Effect of Fe^{2+} and Fe^{3+} on the activity of ANAMMOX [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4224-4229.
- [14] Li X, Huang Y, Liu H W, *et al.* Simultaneous Fe(III) reduction and ammonia oxidation process in anammox sludge[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **64**: 42-50.
- [15] 姚宗豹. Anammox 新体系: 外加 N_2H_4 的影响、NO 的脱出和 Fe(III) 氧化 NH_4^+ [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [15] Yao Z B. Novel Anammox systems; effect of hydrazine addition, removal of NO and ferric ammonium oxidation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [16] Tomaszewski M, Cema G, Ziemińska-Buczyńska A. Influence of temperature and pH on the anammox process: a review and meta-analysis[J]. *Chemosphere*, 2017, **182**: 203-214.
- [17] 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.
- [18] 杨朋兵, 林兴, 李祥, 等. 邻菲罗啉分光光度法测定含 EDTA 溶液中 Fe^{3+} 的改进[J]. *实验室研究与探索*, 2016, **35**(12): 22-25.
- [18] Yang P B, Lin X, Li X, *et al.* Improvement on determination of Fe^{3+} with the solution containing EDTA by phenanthroline spectrophotometry [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2016, **35**(12): 22-25.
- [19] Melton E D, Swanner E D, Behrens S, *et al.* The interplay of microbially mediated and abiotic reactions in the biogeochemical Fe cycle [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2014, **12**(12): 797-808.
- [20] Oshiki M, Ishii S, Yoshida K, *et al.* Nitrate-dependent ferrous iron oxidation by anaerobic ammonium oxidation (Anammox) bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, **79**(13): 4087-4093.
- [21] Gao F, Zhang H M, Yang F L, *et al.* The effects of zero-valent iron (ZVI) and ferrous oxide (Fe_3O_4) on anammox activity and granulation in anaerobic continuously stirred tank reactors (CSTR) [J]. *Process Biochemistry*, 2014, **49**(11): 1970-1978.
- [22] He S L, Zhang Y L, Niu Q G, *et al.* Operation stability and recovery performance in an anammox EGSB reactor after pH shock [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **90**: 50-56.
- [23] Shrestha J, Rich J J, Ehrenfeld J G, *et al.* Oxidation of ammonium to nitrite under iron-reducing conditions in wetland soils: laboratory, field demonstrations, and push-pull rate determination [J]. *Soil Science*, 2009, **174**(3): 156-164.
- [24] Zhou G W, Yang X R, Li H, *et al.* Electron shuttles enhance anaerobic ammonium oxidation coupled to iron(III) reduction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(17): 9298-9307.

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-jiang, <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 Extract 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)