

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 、中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

游离氨(FA)对氨氧化过程氨逃逸影响试验

孙洪伟¹, 于雪¹, 尤永军¹, 彭永臻^{2*}, 王淑莹²

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为探究游离氨(FA)对氨氧化过程氨逃逸的影响. 本试验采用序批式活性污泥反应器(SBR), 以短程硝化污泥为研究对象, 基于批次试验, 考察不同 FA 浓度梯度下, 氨氧化过程氨逃逸的变化规律. 结果表明, 当 $0.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} < \text{FA} < 7.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 水中游离态氨(NH_3)和水分子(H_2O)结合, 生成较稳定的 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 几乎未发生氨逃逸. 当 FA 浓度较高时($\text{FA} > 687.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 氨氮未被氧化成氧化态氮[曝气结束时氧化态氮($\text{NO}_x^- - \text{N}$)浓度 $< 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$], 但总氮(TN)损失量却达到了 $269.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此, $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 通过挥发作用使得 NH_3 从水中逸出. 在较高 FA 浓度条件下, 氨根离子(NH_4^+)会以 NH_3 形式被吹脱, 从而发生氨逃逸. 在 $226.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \leq \text{FA} \leq 711.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 氨逃逸速率(FEV)随着 FA 浓度的增加而增加.

关键词: 游离氨; 氨氧化过程; 短程硝化; 氨逃逸; 氨逃逸速率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5169-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705117

Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process

SUN Hong-wei¹, YU Xue¹, YOU Yong-jun¹, PENG Yong-zhen^{2*}, WANG Shu-ying²

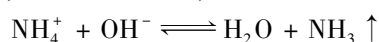
(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: This study used short process nitrification sludge to investigate the effect of high free ammonia (FA) on ammonia escape during ammonia oxidation. A sequencing batch reactor (SBR) was used to study the ammonia escape process under different FA concentrations. The results indicate that FA in water is usually combined with water molecules at lower FA concentrations to produce stable $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ with almost no ammonia escape. With high FA concentration ($\text{FA} > 687.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), ammonia nitrogen is not oxidized to oxidized nitrogen ($\text{NO}_x^- - \text{N}$ concentration is $< 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ at the end of aeration), but the total nitrogen (TN) reached $269.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Therefore, when there is a high FA concentration, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ will evaporate in the form of FA, resulting in ammonia escape. In addition, when $226.6 \leq \text{FA} \leq 711.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the free ammonia escape rate (FEV) grows rapidly with the increase in FA concentration.

Key words: free ammonia; ammonia oxidation process; short-range nitrification; ammonia escape; free ammonia escape rate

高氨氮废水生物脱氮处理过程中, 生化反应基质底物(FA)对硝化反应具有抑制作用^[1,2], 其抑制原理在于: 硝化反应主要涉及两种菌属, 即氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂⁻), FA 既是氨氧化反应的基质, 同时也是亚硝酸盐氧化反应的抑制剂, 对 AOB 和 NO₂⁻ 均存在抑制作用^[3~5]. 有研究表明^[4], FA 对 AOB 的初始抑制浓度为 $10 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而对 NO₂⁻ 的初始抑制浓度为 $0.1 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 相较于 AOB, NO₂⁻ 对 FA 的抑制作用更加明显^[6]. 当 AOB 活性严重受抑制时, 系统硝化反应停止^[7].

水中的氨氮, 大部分以氨离子(NH_4^+)和 FA 的状态存在, 两者保持平衡, 平衡关系为:



这一关系受 pH 值的影响, 当 pH 升高, 平衡向右移动, FA 所占比例增大, 当 pH 降低, 平衡向左移动, NH_4^+ 比例增大. 张亮等^[6]的研究认为在常温(20°C)下, 当 $\text{pH} = 7$ 时, FA 约占氨氮的 1%, 在 $\text{pH} = 8$ 时, 占氨氮的 10%. 城市污水处理厂的进水氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)浓度范围在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右且 pH 值接近中性, 因此, FA 浓度较低, 硝化细菌基本未被抑制. 高氨氮废水(消化污泥脱水液、垃圾渗滤液

收稿日期: 2017-05-12; 修订日期: 2017-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668031); 甘肃省自然科学基金项目(1606RJZA009); 兰州交通大学"百名青年优秀人才培养计划"项目(152022); 甘肃省重点研发计划-工业类项目(17YF1GA009)

作者简介: 孙洪伟(1976~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高氨氮污水生物脱氮, E-mail: shw@emails.bjut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

等), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和 pH 值较高, 硝化细菌易受到 FA 的抑制. 温度对微生物的生长也具有重要影响, 温度过高或过低, 均影响硝化菌的活性, 从而降低硝化速率. 温度过低水中的 FA 浓度降低, 从而影响 AOB 对 FA 的降解速率. 温度过高 AOB 中蛋白质受热易变性失去活性, 引起酶反应速率下降, 从而导致 AOB 对 FA 的降解速率下降. Hellinga 等指出^[8], 当温度介于 5 ~ 12℃ 时, NOB 的最大比生长速率大于 AOB. 当温度介于 12 ~ 40℃ 时, AOB 的最大比生长速率大于 NOB 的最大比生长速率. 因此, 在一定范围内升高温度可以增大 NOB 和 AOB 在生长速率上的差距.

目前国内外的研究主要报道高氨氮废水短程硝化中 FA 的抑制作用^[9~19], 针对高氨氮废水中氨逃逸现象报道较少. 卢刚等^[20]对模拟含氨废水采用循环颗粒污泥床短程硝化污泥反应器的研究发现,

通过对生化反应器氮素平衡核算, 反应器氨氧化过程中存在明显的氮损失现象, 认为氨逃逸是导致曝气过程中氮损失的主要原因, 因此本文通过试验考察了不同 FA 浓度梯度下的氨逃逸规律.

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行方式

试验采用有效容积为 5 L 的 SBR 反应器, 其运行方式: 瞬时进水(1 min), 硝化反应(4 h), 缺氧搅拌反硝化(投加乙醇作为碳源), 静置沉淀、排水(5 min). 硝化过程中溶解氧(DO)控制在 2.5 ~ 3.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围, 反硝化时间采用 pH 值实时控制^[21].

1.2 试验用水、接种污泥及水质分析项目

为排除其他微生物的干扰, 试验用水采用去离子水为原水的人工模拟废水, 其水质特性见表 1.

表 1 模拟废水水质特性¹⁾

Table 1 Components of simulated wastewater used in this study

成分	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	成分	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	成分	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
EDTA	10	$\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.12	$\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	10
KI	0.05	$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.15	$\text{ZnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$	0.12
NaHCO_3	-	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	0.12	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.03
NH_4Cl	-	$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	20	$\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.5

1) “-”表示投加量取决于初始 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度

试验接种污泥取自本实验室已实现短程硝化的活性污泥(亚硝态氮的积累率为 99.6%). 试验过程中, 从反应器中取出一定体积泥水混合液, 定性滤纸过滤后测定各项水质指标. 化学需氧量(COD)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、混合液悬浮固体浓度(MLSS)及混合液挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)均采用国家规定的标准方法^[22]. pH 值、DO 和温度采用 WTW-Multi3420 测定.

1.3 试验方案

游离氨(FA)一般采用下式进行计算^[4]:

$$S_{\text{FA}} = \frac{1.214 \times S_{\text{NH}_4^+\text{-N}} \times 10^{\text{pH}}}{e^{6344/(273+T)} \times 10^{\text{pH}}}$$

式中, S_{FA} 为游离氨质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $S_{\text{NH}_4^+\text{-N}}$ 为氨氮质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; T 为温度, °C.

本文通过批次试验, 采用 SBR 反应器, 以短程硝化污泥为研究对象, 通过设定不同初始 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度, pH 值和温度, 以获得不同 FA 浓度梯度, 运行条件见表 2, 基于考察 SBR 系统活性污泥的硝化性能、总氮损失的基础上, 研究 FA 浓度对氨逃逸的影响, 最终建立 FA 和氨逃逸速率的相关规律. 需要说明的是: 为减少试验误差, 即每一 FA 浓度下进行 3 次平行试验, 试验数据取 3 组平行试验平均.

2 结果与讨论

2.1 FA 对 SBR 系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的影响

图 1 为不同 FA 浓度条件下, 曝气开始、结束时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度、去除量及去除率(ARE)变化规律. 为了提高进水 FA 浓度, 试验过程中, 人为增加

表 2 SBR 反应器运行条件

Table 2 Operating conditions for the SBR reactor

试验批次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\text{FA}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.6	3.4	5.6	10.5	16.7	50.2	83.0	143.5	180.8	224.7	311.5	390.4	543.4	574.8	681.1
$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	38.8	75.8	86.4	107.7	132.8	235.2	351.8	541.2	644.2	694.2	853.9	1070.3	1346.1	1418.8	1520.0
$T/^\circ\text{C}$	20.0	21.9	24.1	27.3	28.0	29.8	30.0	31.1	31.9	33.0	33.8	33.8	35.5	36.1	36.5
pH	7.50	7.91	8.02	8.10	8.20	8.41	8.46	8.49	8.50	8.55	8.60	8.60	8.61	8.60	8.66

进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 ($28.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \rightarrow 1443.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、温度 ($20^\circ\text{C} \rightarrow 36.5^\circ\text{C}$) 以及 pH ($7.5 \rightarrow 8.66$) 值。随着运行周期的增加, 曝气开始和结束时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均呈现增加的趋势[图 1(a)]。这是由于相同硝化反应时间内随着进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度增加导致曝气结束时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 未反应完全。从图 1(b) 可以看出, 随着 FA 浓度的增加, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除量同时逐渐增加。在 FA 浓度逐渐增加的整个过程中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率随着 FA 浓度的升高而下降, 当 FA 浓度增加到 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率开始下降。表明 FA 对 AOB 的活性开始产生抑制, 而文献资料报道^[4], 能够抑制 AOB 的 FA 浓度的抑制范围是 $10 \sim 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 因此支持本现象。不同 FA 浓度条件下, 去除率(ARE)变化显著, 表明 FA 浓度对 ARE 产生显著影响, 且具有明显的分段现象。当 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \leq \text{FA} \leq 143.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 两者相关性符合线性关系, 可通过拟合直线方程 $y = -0.5x + 85.5$ 来表示, 随着 FA 浓度的增加, ARE 快速下降。当 $143.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \leq \text{FA} \leq 681.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 两者相关性也可通过拟合的直线方程 $y = -0.01x + 21.3$ 来表示, 此时随着 FA 浓度增加, ARE 处于略微降低的趋势, 其平均值为 17.1%。此时硝化开始的 FA 浓度已远远超过 FA 对 AOB 和 NOB 的初始抑制浓度, 即 AOB 活性受到严重抑制。

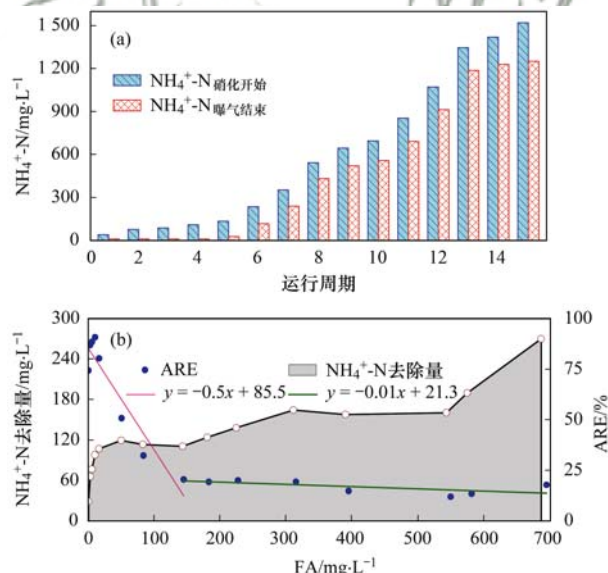


图1 不同FA浓度条件下, 系统内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除特性

Fig. 1 Ammonia removal characteristics under different FA conditions in the system

2.2 FA对氨氧化过程 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 产生量的影响

亚硝态氮是氨氧化菌氧化氨氮的主要产物, 是衡量短程硝化的主要指标。由图2(a)可以看出, 硝

化结束时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 作为主要的硝化产物, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度始终低于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 因此, 短程硝化是本试验中氨氧化的主导反应。基于 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度的变化趋势可以看出, 随着反应的进行, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 产生量呈现出先增加后降低的变化规律, 即 $19.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (第1周期) $\rightarrow 110.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (第6周期) $\rightarrow 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (第15周期)。

图2(b)反映了FA对氨氧化过程 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 产生量的影响。可以看出, 当 $0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} < \text{FA} < 50.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随着FA浓度增加, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 产生量迅速增加。当 $50.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} < \text{FA} < 681.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 产生量急剧降低, 这充分表明FA浓度对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 产生量具有重要影响, 其本质原因在于FA对AOB活性产生了抑制作用。生化反应动力学能够较好地描述基质降解和反应物生成速率变化的关系。1970年, Edwards^[23]建立了基质抑制动力学模型, 由于FA既是AOB的基质底物, 同时也是抑制剂, FA对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 产生量的影响间接反映了AOB的活性, 因此, 基于Edwards模型, 可以从动力学角度较好地模拟试验数据, 描述FA对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 产生量的影响。即当FA浓度介于 $0.6 \sim 42.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围之内, 随着FA浓度的增加, 为AOB提供了更为充足的基质底物, 使得AOB活性逐渐增强, 导致反应速率逐渐增加。当 $\text{FA} > 42.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随着FA浓度增加, AOB活性逐渐降低, 说明在此FA浓度范围内, FA对AOB活性产生抑制作用。当FA浓度达到最大值 $681.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时系统的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 产生量仅为 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 充分表明在此FA浓度条件下, AOB活性几乎受到完全抑制, 未将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 氧化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。

2.3 FA对系统TN损失的影响

TN为衡量硝化反应过程氮转化途径的重要指标, 图3表明系统进、出水TN浓度变化情况。整个试验过程中, 系统进、出水TN浓度由于进水氨氮浓度的增加而增加。此外, 总氮损失量(进、出水TN差值)从第1周期的 $9.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到第15周期的 $269.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。综合图2和图3, 可以清楚地反映出, 在第15周期时AOB的活性几乎受到完全抑制, 此时可以确定系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除主要由FA逃逸导致。

2.4 FA对氨逃逸的影响

目前关于氨逃逸速率(FEV)测定主要有两种方法: ①在生物反应器中直接加入一定量的解偶联剂

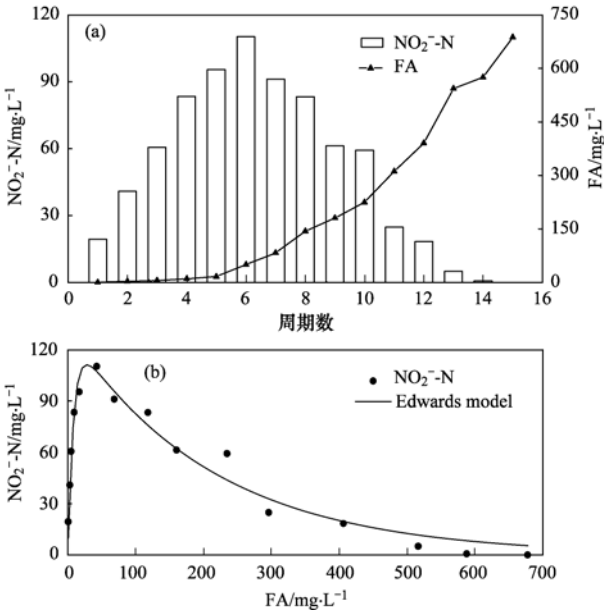


图2 系统 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 产生量变化规律

Fig. 2 Variations of nitrite in the system

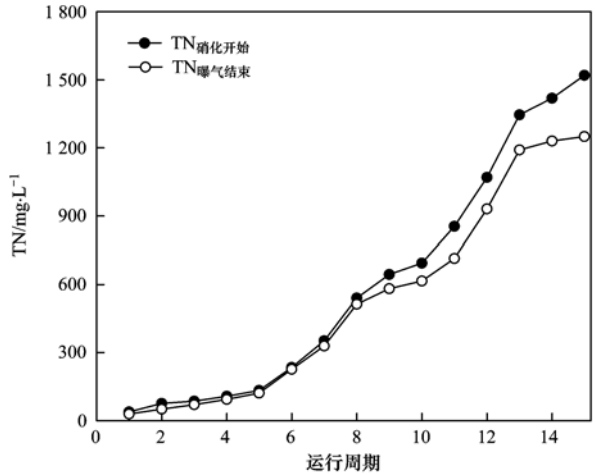


图3 不同 FA 条件下, 系统 TN 的转化规律

Fig. 3 Evolutions of TN under the different

FA conditions in the system

(2,4-二硝基酚)以抑制微生物反应,测定无生物反应影响下的氨逃逸量与时间的关系;②在相同试验条件下,在无生物的反应器中直接加入水和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在同等 T 、曝气等条件测定氨逃逸量与时间的关系. 本试验采用方法②测定氨逃逸速率. 具体如下:本试验基于无活性反应器试验获得,选取与试验过程相同的 SBR 反应器,在设定相同的 FA 浓度、曝气强度、进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度、温度、pH 以及配水等条件下,测定无微生物反应时系统不同曝气时间下的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度与曝气时间的关系,通过线性回归分析,求得不同 FA 浓度下 NH_3 的逃逸速率.

图4描述了FA对FEV的影响.将FA分段,可以通过线性正相关清楚地描述FA浓度对FEV的影响程度(表3).可以看出:不同FA浓度条件下,FEV变化显著,表明FA浓度对FEV产生显著的影响.当 $0.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \leq \text{FA} \leq 7.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,由于FA浓度较低,FA对FEV几乎不产生影响,即可认为此FA浓度阶段不发生氨逃逸;当 $7.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \leq \text{FA} \leq 226.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,随着FA浓度的增大,FEV增长较缓慢,且两者相关性符合线性关系,可通过拟合直线方程 $y = 0.035x + 0.78$ 来表示[当 $\text{FA} = 226.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{FEV} = 7.58 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$].当 $226.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \leq \text{FA} \leq 711.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,随着FA浓度的增大,FEV增长较快,两者的相关性可通过拟合直线方程 $y = 0.112x - 18.6$ 来表示[当 $\text{FA} = 711.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{FEV} = 65.9 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$].

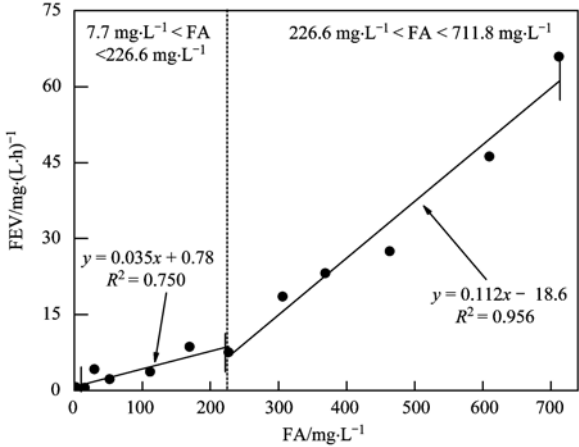


图4 FA对FEV的影响

Fig. 4 Effect of FA on ammonia escape

表3 FA浓度对FEV的影响

Table 3 Effect of free ammonia concentration on free ammonia escape velocity

FA 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	回归方程	是否发生逃逸	氨逃逸程度
$0.62 < \text{FA} < 7.7$	—	否	不显著
$7.7 < \text{FA} < 226.6$	$y = 0.035x + 0.78$	是	显著
$226.6 < \text{FA} < 711.8$	$y = 0.112x - 18.6$	是	非常显著

3 结论

(1)随着运行周期FA浓度的增加($0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \rightarrow 681.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除量逐渐增加($28.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \rightarrow 269.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),当 $\text{FA} > 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率随着FA浓度的升高开始下降,表明在此浓度下AOB的活性逐渐被抑制.

(2)基于Edwards动力学模型,可以从动力学角度描述FA对 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 产生量的影响,通过对试验

数据的非线性拟合, 当 $FA = 42.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NO_2^- -N 产生量最大, 然后逐渐降低, 当 FA 浓度达到 $681.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时系统的 NO_2^- -N 产生量仅为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明在此 FA 浓度条件下, AOB 活性几乎受到完全抑制。

(3) 各运行周期总氮(TN)损失量随着 FA 浓度逐渐增加而增加。在较高 FA 浓度 ($FA > 226.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件下, 系统中 NH_4^+ -N 以游离氨形式被吹脱出去, 其逃逸速率与 FA 浓度呈正相关, 且存在明显的分段现象, 因此 FA 浓度是影响氨逃逸量的最主要因素之一。

参考文献:

- [1] 王宝贞, 王琳. 城市固体废物渗滤液处理与处置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 孙洪伟, 尤永军, 赵华南, 等. 游离氨对硝化菌活性的抑制及可逆性影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 95-100.
Sun H W, You Y J, Zhao H N, *et al.* Inhibitory effect of free ammonia on the activity of nitrifying bacteria and recoverability [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(1): 95-100.
- [3] Zeng W, Zhang Y, Li L, *et al.* Control and optimization of nitrifying communities for nitrification from domestic wastewater at room temperatures [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2009, **45**(3): 226-232.
- [4] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid [J]. Journal-Water Pollution Control Federation, 1976, **48**(5): 835-852.
- [5] 张宇坤, 王淑莹, 董怡君, 等. 游离氨和游离亚硝酸对亚硝态氮氧化菌活性的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(5): 1242-1247.
Zhang Y K, Wang S Y, Dong Y J, *et al.* Effect of FA and FNA on activity of nitrite-oxidising bacteria [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(5): 1242-1247.
- [6] 张亮, 张树军, 彭永臻. 污水处理中游离氨对硝化作用抑制影响研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, **44**(2): 75-79.
Zhang L, Zhang S J, Peng Y Z. Review of study on the effects of free ammonia inhibitions on nitrifying bacteria in wastewater treatment [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, **44**(2): 75-79.
- [7] Fux C, Bohler M, Huber P, *et al.* Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant [J]. Journal of Biotechnology, 2002, **99**(3): 295-306.
- [8] Hellinga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The Sharon process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water [J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(9): 135-142.
- [9] 吴莉娜, 彭永臻, 王淑莹, 等. 游离氨对城市生活垃圾渗滤液短程硝化的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3428-3432.
Wu L N, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Effect of free ammonia on the short-cut nitrification of the municipal landfill leachate [J]. Environmental Science, 2008, **29**(12): 3428-3432.
- [10] 魏琛, 罗固源. 游离氨对稳定生物亚硝化的影响分析[J]. 重庆环境科学, 2003, **25**(12): 50-52.
Wei C, Luo G Y. The influence of free ammonium on stable short-cut nitrifying system [J]. Chongqing Environmental Science, 2003, **25**(12): 50-52.
- [11] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia and free nitrous acid concentration on the anabolic and catabolic processes of an enriched *Nitrosomonas* culture [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2006, **95**(5): 830-839.
- [12] Yang S F, Tay J H, Liu Y. Inhibition of free ammonia to the formation of aerobic granules [J]. Biochemical Engineering Journal, 2004, **17**(1): 41-48.
- [13] Kim D J, Chang J S, Lee D I, *et al.* Nitrification of high strength ammonia wastewater and nitrite accumulation characteristics [J]. Water Science and Technology, 2003, **47**(11): 45-51.
- [14] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture [J]. Water Research, 2007, **41**(4): 826-834.
- [15] Park S, Bae W, Rittmann B E. Operational boundaries for nitrite accumulation in nitrification based on minimum/maximum substrate concentrations that include effects of oxygen limitation, pH, and free ammonia and free nitrous acid inhibition [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(1): 335-342.
- [16] Wett B, Rauch W. The role of inorganic carbon limitation in biological nitrogen removal of extremely ammonia concentrated wastewater [J]. Water Research, 2003, **37**(5): 1100-1110.
- [17] Gil K I, Choi E. Modelling of inhibition of nitrite oxidation in biological nitrification processes by free ammonia [J]. Biotechnology Letters, 2001, **23**(24): 2021-2026.
- [18] 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 等. 游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1075-1081.
Sun H W, Lü X T, Wei X F, *et al.* Synergetic inhibitory effect of free ammonia and aeration phase length control on the activity of nitrifying bacteria [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1075-1081.
- [19] 季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 等. 高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 260-268.
Ji M, Liu L J, Zhai H Y, *et al.* Mechanism for effects of high free ammonia loadings on biological nitrification [J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 260-268.
- [20] 卢刚, 郑平. 内循环好氧颗粒污泥床硝化反应器氮亏损研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, **36**(2): 36-40.
Lu G, Zheng P. Nitrogen loss in internal-loop aerobic granular sludge bed nitrifying reactor [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2004, **36**(2): 36-40.
- [21] Peng Y Z, Chen Y, Peng C Y, *et al.* Nitrite accumulation by aeration controlled in sequencing batch reactors treating domestic wastewater [J]. Water Science and Technology, 2004, **50**(10): 35-43.
- [22] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 252-272.
- [23] Edwards V H. The influence of high substrate concentrations on microbial kinetics [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1970, **12**(5): 679-712.

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)