

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康	(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松	(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅	(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经	(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成	(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝	(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠	(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇	(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹	(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪	(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏	(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗	(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹	(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽	(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙	(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远	(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚	(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春	(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海	(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏	(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺	(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪	(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏	(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明	(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽	(1326)
γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静	(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼	(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳	(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪	(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强	(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强	(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博	(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用	(1379)
喹啉降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英	(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建	(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉	(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东	(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰	(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先	(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰	(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春	(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月	(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提	(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞	(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银	(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云	(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐	(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新	(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁	(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭	(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮	(1507)
《环境科学》征订启事		(1216)
《环境科学》征稿简则		(1248)
信息		(1163,1194,1248,1424)

Fe³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N₂O释放的影响

李浩¹, 闫玉洁², 谢慧君³, 贾文林⁴, 胡振^{1*}, 张建¹

(1. 山东大学环境科学与工程学院, 济南 250100; 2. 山东省环境保护科学研究设计院, 济南 250013; 3. 山东大学环境研究院, 济南 250100; 4. 江苏师范大学化学化工学院, 徐州 221116)

摘要: 采用 SBR 反应器, 研究了不同浓度的 Fe³⁺ 对同步硝化反硝化 (simultaneous nitrification denitrification, SND) 过程中氮元素迁移转化去除和 N₂O 释放的影响。结果表明, 在同步硝化反硝化过程中, 系统中 Fe³⁺ 浓度为 20 mg·L⁻¹ 时可以提高系统对氮的去除率, 而 60 mg·L⁻¹ 的 Fe³⁺ 则会对其产生抑制效果。并且, 高浓度的 Fe³⁺ 会刺激 SND 过程中 N₂O 的释放, N₂O 转化率也有所提高。这主要是因为: ①高浓度的 Fe³⁺ 会导致污泥脱氢酶活性降低, 使得 NO₂⁻ 在好氧阶段大量累积; ②高浓度的 Fe³⁺ 减少了 SND 过程前置厌氧阶段胞内聚合物 (polyhydroxybutyrate, PHB) 的含量, 使得后续反硝化过程碳源减少。Fe³⁺ 对 SND 过程中总磷的去除有促进作用, 并且 Fe³⁺ 浓度越高, 总磷去除率越高, 这主要是因为 Fe³⁺ 的存在使系统中发生了化学除磷作用。

关键词: 同步硝化反硝化 (SND); 氮元素迁移转化; N₂O; Fe³⁺; 温室气体

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1392-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.035

Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process

LI Hao¹, YAN Yu-jie², XIE Hui-jun³, JIA Wen-lin⁴, HU Zhen^{1*}, ZHANG Jian¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100, China; 2. Shandong Academy of Environmental Science, Ji'nan 250013, China; 3. Institute of Environment Research, Shandong University, Ji'nan 250100, China; 4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Effect of Fe(III) concentration on nitrogen immigration and transformation and nitrous oxide emission during the simultaneous nitrification denitrification (SND) process was investigated. Higher nitrogen removal efficiency was obtained when the Fe(III) concentration was 20 mg·L⁻¹, while lower nitrogen removal efficiency was observed when the Fe(III) concentration turned to 60 mg·L⁻¹. In addition, higher Fe(III) concentration significantly enhanced the N₂O emission, as well as the N₂O conversion ratio. This was mainly attributed to ① the high concentration of nitrite accumulation during the oxic stage, which was caused by lower dehydrogenase activity at high Fe(III) concentration; ② less PHB production during the anoxic stage, which would lead to shortage of carbon source for denitrification in the following oxic stage. The results also showed that Fe(III) addition could improve the TP removal efficiency. TP removal efficiency increased with increasing Fe(III) concentration, mainly because of extra chemical reaction.

Key words: simultaneous nitrification and denitrification (SND); nitrogen immigration and transformation; N₂O; Fe(III); greenhouse gases

废水生物脱氮过程是氧化亚氮(N₂O)的重要排放源之一,多年来一直被研究者们所重视^[1~3]。N₂O是一种重要的温室气体,也是引起光化学烟雾、破坏臭氧层、导致臭氧层空洞的重要因素之一^[4~6]。同步硝化反硝化(simultaneous nitrification denitrification, SND)工艺因其比传统生物脱氮工艺具有更高的脱氮能力,近年来受到广泛的关注^[7,8]。

然而有研究表明, SND 过程中会产生大量的 N₂O^[9]。由于 SND 工艺的溶解氧浓度比较低,故其微生物活性与传统生物脱氮工艺不同,氨氧化菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)的种类多样性及数量都增加了很多,使得硝化细菌的反硝化作用增

强,其 N₂O 的释放规律也与传统工艺有很大区别^[10],与传统生物脱氮工艺相比 SND 工艺中释放的 N₂O 增加了近四倍^[9]。如何控制 SND 过程中 N₂O 的释放,成为限制 SND 工艺广泛应用的一个难题。

铁是微生物活动所必需的元素,是废水生物脱氮过程中不可少的元素之一^[11,12],同时, Fe³⁺ 还是好氧条件下生物化学反应的重要氧化剂^[13,14]。但是,过多的 Fe³⁺ 可能会导致 N₂O 的大量释放^[15]。有

收稿日期: 2014-12-09; 修订日期: 2015-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177075); 山东大学基本科研业务费专项(2014TB003)

作者简介: 李浩(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: lihao1990200888@126.com

* 通讯联系人, E-mail: huzhen885@sdu.edu.cn

研究表明,与普通活性污泥相比,复合铁酶促活性污泥在硝化反硝化和除磷效果上都更有优势^[16]。然而迄今为止,关于 Fe^{3+} 对 SND 过程氮元素迁移转化及 N_2O 释放的研究却相对较少。

本研究采用实验室规模 SBR 反应器,来探究 Fe^{3+} 对 SND 过程中氮元素迁移转化及 N_2O 释放的影响。

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验采用的 SBR 反应器如图 1 所示。

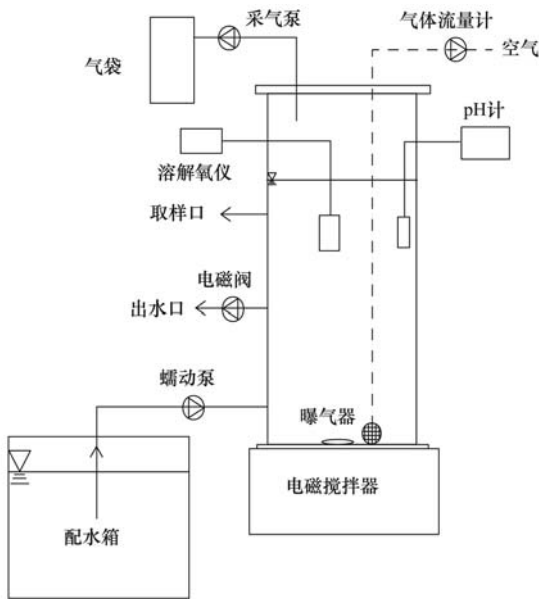


图 1 实验装置示意
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

本装置由时间程序控制器控制进水(5 min)、缺氧搅拌(1.5 h)、曝气(3 h)、静沉(75 min)、出水(10 min)过程,反应器不间歇式循环运行,每周运行时间为 6 h。通过鼓风曝气,并由磁力搅拌器搅拌以保证曝气及反应均匀。反应器规格为:内径 25 cm,有效容积为 5 L,排水比 0.5。污泥停留时间为 20 d,实验过程中控制温度为 25℃。

1.2 接种污泥及进水组成

实验接种污泥来自实验室运行良好的同步硝化反硝化反应器^[10]。该反应器已稳定运行一年多, SND 率在 90% 以上,同步硝化反硝化率高,脱氮效果稳定。

本实验采用人工配置的模拟污水,理论进水中 $\text{COD} = 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N} = 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TP} = 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,每周期进水 2.5 L。配水方案如表 1 所示。

表 1 模拟废水组分^[10]

Table 1 Composition of synthetic waste-water			
成分	用量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	成分	用量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	260.2	$\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	18
$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	260.2	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	10
NH_4Cl	191	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	10
NaHCO_3	200	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	10
KH_2PO_4	11	* 微量元素 ¹⁾	1

1) 微量元素组分(每 L): 0.15 g H_3BO_3 ; 0.03 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; 0.18 g KI ; 0.12 g $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 0.06 g $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 0.12 g $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0.15 g $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 10 g EDTA

1.3 实验方案

1.3.1 短期实验方案(Fe^{3+} 投加量的优化)

取 1.2 节所述同步硝化反硝化污泥于 7 个有效容积为 1 L 的小型 SBR 反应器中以,按照 1.1 节所述周期设置运行。在进水阶段结束后,向各反应器内投加不同浓度的 FeCl_3 溶液,使得各反应器内 Fe^{3+} 浓度分别为 0、5、10、15、20 和 40、60 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每隔 30 min 取一次水样,每隔 15 min 取一次气样,跟踪监测投加 Fe^{3+} 后各反应器缺氧好氧阶段(共 270 min)氮元素迁移转化以及 N_2O 释放的规律,通过对比分析,初步确定投加 Fe^{3+} 对 SND 过程污染物去除及 N_2O 释放的短期影响,并为下一阶段长期实验方案的设计提供数据支持。

1.3.2 长期实验方案

取 1.2 节所述同步硝化反硝化污泥于 A、B、C 共 3 个有效容积为 5 L 的 SBR 反应器中(如图 1)。待反应器运行稳定后,根据 1.3.1 节中确定的 Fe^{3+} 浓度,分别向 B、C 两个反应器中连续投加 FeCl_3 溶液,A 反应器作为空白对照。

稳定运行 3 个污泥龄后(60 d),跟踪监测周期内氮、磷等元素及 N_2O 的变化情况,同时进行污泥性能测试,研究不同浓度 Fe^{3+} 对 SND 过程氮元素迁移转化及 N_2O 释放的影响。

1.4 分析项目及测定方法

1.4.1 水质测试方法

本实验主要分析的水质项目包括: pH、溶解氧(DO)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、亚硝氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、硝氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、总氮(TN)^[17]。氨氮、亚硝氮、硝氮、总氮、总磷的测定均按照文献[18]的方法。pH 使用 pH 计(PHS-3C, 中国)测定; DO 使用溶解氧仪(HQ30d53LDO, 美国)进行测定。

水体中 Fe^{3+} 浓度的测定采用邻菲罗啉-分光光度法^[18],污泥中 Fe^{3+} 含量测定则是将污泥利用硝酸-高氯酸消解后^[19],采用邻菲罗啉-分光光度法测

定溶液中铁,从而计算出反应器中 Fe^{3+} 含量.

1.4.2 污泥性能测试方法

污泥脱氢酶活性测定方法为 TTC 比色法^[20],胞内聚合物 (polyhydroxybutyrate, PHB) 的分析测定采用的是气相色谱法^[21],污泥体积指数 (sludge volume index, SVI) 测定方法为量筒法.

1.4.3 N_2O 的收集与测定方法

在密闭 SBR 反应器内,每间隔 15 min 利用气体采样泵采集气样于气袋中,利用 GC-ECD (SP-3410, 北京瑞利分析仪器公司) 检测 N_2O 浓度,色谱柱为

Poropak Q 填充柱,色谱条件为:进样口温度为 50°C ,柱温为 50°C ,检测器温度为 390°C ^[22]. 采集的样品在 24 h 内进行分析. N_2O 转化率通过 N_2O 的生产量与 TN 消耗量的比值来计算^[23].

2 结果与讨论

2.1 不同 Fe^{3+} 浓度对 SND 过程的短期影响

向 SND 反应器中投加 Fe^{3+} 至不同浓度,结果发现,不同 Fe^{3+} 浓度下氮的迁移转化规律基本一致,如图 2 所示.

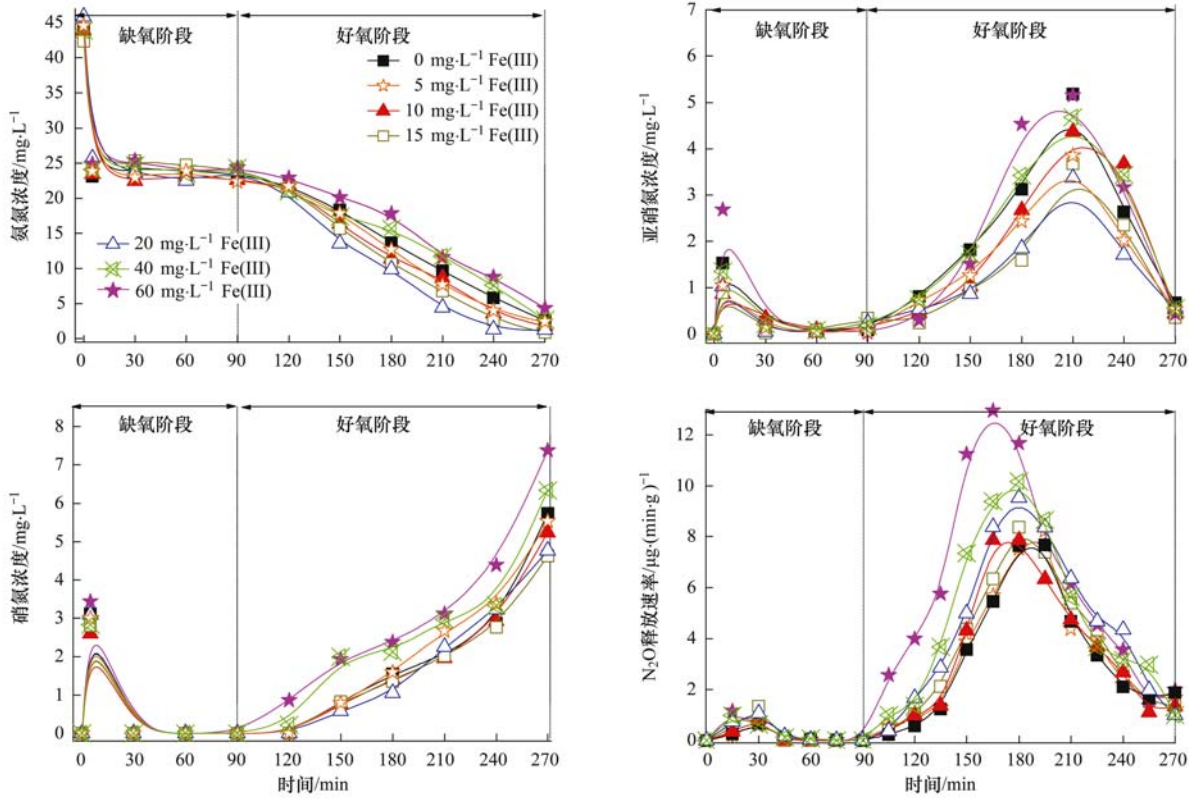


图 2 不同 Fe^{3+} 浓度对 SND 过程的短期影响

Fig. 2 Short-term effect of Fe^{3+} concentration on the performance of SND process

Fe^{3+} 浓度在 $0 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 区间时, Fe^{3+} 浓度越高,氨氮的转化速率越快,并且硝氮和亚硝氮的积累速率也越慢,而在更高的浓度区间内, Fe^{3+} 浓度的升高却导致氨氮去除率下降了 $2\% \sim 5\%$,硝氮的积累量增加了 $10\% \sim 30\%$,同时也导致了更多 N_2O 的释放. 根据实验结果,在上述两个不同的 Fe^{3+} 浓度区间内分别选择 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 作为 B、C 反应器内 Fe^{3+} 浓度,进行下一步研究,详细分析 Fe^{3+} 对 SND 过程中氮迁移转化和 N_2O 释放的影响.

2.2 Fe^{3+} 对 SND 过程中污染物去除及污泥性能的影响

2.2.1 污染物去除

连续投加 Fe^{3+} 使得各反应器中 Fe^{3+} 浓度稳定两个月后,测得 A、B、C 这 3 个反应器出水中各污染物的去除情况如表 2 所示.

表 2 Fe^{3+} 对污染物去除率的影响/%

Table 2 Effect of Fe^{3+} on the pollutant removal rate/%			
项目	反应器 A	反应器 B	反应器 C
COD	92.25 ± 0.05	94.55 ± 0.04	89.91 ± 0.08
氨氮	98.79 ± 0.10	99.10 ± 0.09	98.90 ± 0.12
总氮	86.52 ± 2.31	92.80 ± 2.54	60.79 ± 2.13
总磷	62.38 ± 4.32	70.64 ± 5.21	99.13 ± 2.63

与对照组相比, B 反应器的污染物去除率均有所增加,而 C 反应器的 COD 和总氮去除率有所减

少,但总磷的去除率大大升高,接近完全去除的水平. 这说明, Fe^{3+} 的存在对磷的去除有显著的促进作用,较低浓度的 Fe^{3+} 会促进 COD 和氮的去除,而过高浓度的 Fe^{3+} 则会抑制该过程.

2.2.2 污泥性能

在好氧段末期,分别从 3 个反应器中去污泥测试其 SVI 及脱氢酶活性,结果如表 3 所示.

表 3 Fe^{3+} 对污泥性能的影响

项目	反应器 A	反应器 B	反应器 C
SVI/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	51.32 ± 0.32	38.22 ± 0.28	39.06 ± 0.35
脱氢酶活性/ $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$	38.18 ± 1.13	54.02 ± 1.26	36.54 ± 3.16

可以发现, Fe^{3+} 对反应器内活性污泥的脱氢酶活性及 SVI 均有明显影响. Fe^{3+} 对污泥沉降性能有明显的改善作用,主要是因为 FeCl_3 作为常用的絮凝剂,能够对反应器内活性污泥起到絮凝作用. 与对照组相比, Fe^{3+} 浓度为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 B 反应器的脱氢酶活性得到了显著的增强,达到了 $54.02\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$,而更高浓度的 C 反应器活性却有所减弱,只有 $36.54\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 而生物体的脱氢酶活性在很大程度上反映了生物体的活性,而且直接表示生物细胞对其基质降解能力的强弱^[24,25]. 由此可

见适宜浓度的 Fe^{3+} 可以提高 SND 过程中污泥系统的活性,但是过高浓度的 Fe^{3+} 却会对其产生抑制作用.

2.3 Fe^{3+} 对 SND 过程氮元素迁移转化的影响

图 3 为长期实验中不同浓度 Fe^{3+} 对 SND 过程氮元素迁移转化的影响. 在进水之后,由于稀释作用, NH_4^+-N 含量急剧降低,同时 NO_3^--N 和 NO_2^--N 浓度由于进水过程中短暂的硝化作用而有些许的升高,然后又迅速降为 0,之后反应器中各类含氮污染物的含量趋向于稳定. 在 90 min 进入好氧阶段后, NH_4^+-N 含量逐渐减少, NO_3^--N 和 NO_2^--N 含量都有所增加,此时系统开始进行硝化作用^[26]. 同时,由于溶解氧浓度仍然较低,局部厌氧环境也诱导了反硝化作用的进行. 而在 210 min 之后 NO_2^--N 浓度开始下降,这是因为 NH_4^+-N 已经渐渐被耗尽,硝化作用逐渐减弱,而 NO_2^--N 含量则因为反硝化作用的进行逐渐减少. 最终 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 含量都非常低,说明硝化反应进行的很彻底,而 NO_3^--N 因为反硝化作用的不完全而有些许的积累^[26].

相比于对照组, B 反应器总氮的去除率提高了 8.3%,主要是由于适量浓度 Fe^{3+} 的存在使得反应器出水中硝氮的含量下降,而且出水中氨氮的去除率也比对照组稍高,相比之下, C 反应器由于好氧阶

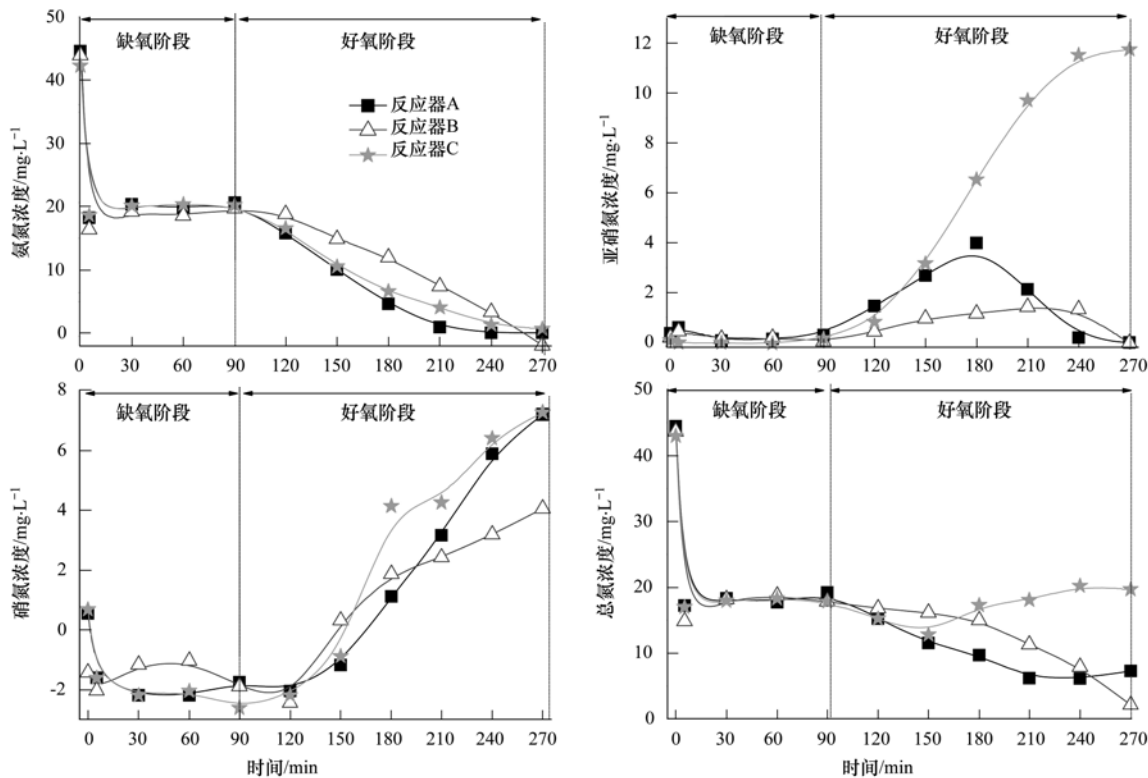


图 3 Fe^{3+} 对 SND 过程中氮元素迁移转化的影响

Fig. 3 Effect of Fe^{3+} on nitrogen immigration and transformation during SND processes

段亚硝氮的积累,导致总氮去除率降低了 18.9%。分析原因主要在于低浓度的 Fe^{3+} 能强化污泥的反硝化速率,污泥的硝化、反硝化能力均得到了提高^[16]。B 反应器加入了适量的 Fe^{3+} ,拥有特殊的污泥结构,为保持较高的污泥活性和生物量创造条件,系统的硝化效能得到较大的提高。而且铁元素是微生物呼吸代谢过程中的电子链传递的重要影响因素^[16], Fe^{3+} 的投加也会增强系统中反硝化菌的活性,因此 B 反应器好氧段末期硝氮的积累量低于对照组。然而,由于微生物对 Fe^{3+} 的需求是微量的,由 2.2.2 节实验可知,适量的 Fe^{3+} 投加会增强脱氢酶活性,而随着 Fe^{3+} 浓度的升高,脱氢酶活性明显又受到了抑制,因此过量的 Fe^{3+} 会导致脱氢酶活性降低,也在一定程度上减少了相应硝化细菌和反硝化细菌的种类和数量^[27],使得生物体活性下降,最终导致污染物的去除效果降低。由此可以看出, Fe^{3+} 对污泥的强化作用是有局限性的,投加高浓度的 Fe^{3+} 不但没有促进效果反而会抑制污泥的处理效果。所以,添加适量的 Fe^{3+} 对污水生物脱氮而言,可以取得较传统活性污泥更好的硝化和反硝化效果。

2.4 Fe^{3+} 对 N_2O 释放的影响

由图 4 中可以看出,长期 Fe^{3+} 投加对 SND 过程中 N_2O 释放的影响与短期实验的结果相似。缺氧阶段 N_2O 释放量很低,是因为系统采用的前置反硝化工艺,反应器中还残留有上个周期的硝酸盐,而且有有机物浓度较高,使得反硝化反应比较彻底, N_2O 被迅速还原为 N_2 。进入好氧阶段后, N_2O 释放速率急剧升高,此时系统同时进行硝化和反硝化作用,同时产生大量的 N_2O 。3 组反应器的 N_2O 释放量分别为 $(31.21 \pm 3.67) \text{ mg}$ 、 $(30.29 \pm 3.19) \text{ mg}$ 、 $(45.26 \pm 4.26) \text{ mg}$, N_2O 转化率分别为 6.85%、6.65%、

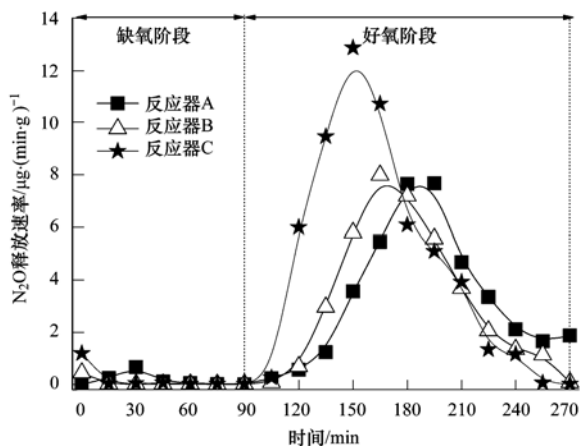


图 4 Fe^{3+} 对 SND 过程中 N_2O 释放的影响

Fig. 4 Effect of Fe^{3+} on N_2O emission during SND processes

9.93%,高浓度 Fe^{3+} 下 N_2O 释放速率与另外两组相比有明显的增加。这可能是因为较高的 Fe^{3+} 对微生物产生了一定的毒害作用,降低了脱氢酶等酶活性,使得生物活性大大降低,从而导致硝化或反硝化反应的不完全,因此好氧阶段后期有大量 NO_2^- 的积累,而有研究表明,当 NO_2^- 浓度出现积累时,会刺激 N_2O 的产生^[5,28]。因此,高浓度的 Fe^{3+} 会诱导大量的 N_2O 释放出来。

另外,过量的 Fe^{3+} 会导致缺氧阶段磷的快速化学去除,从而微生物合成的胞内碳源 PHB 含量降低,异养反硝化过程对碳源的竞争更加激烈,也会导致 N_2O 的释放大量增加。TP 和 PHB 的含量变化如图 5 所示,3 个反应器的总磷曲线变化规律有较大差异,而在好氧阶段,PHB 作为反硝化作用的主要碳源,也是反硝化作用速率的限制因素。

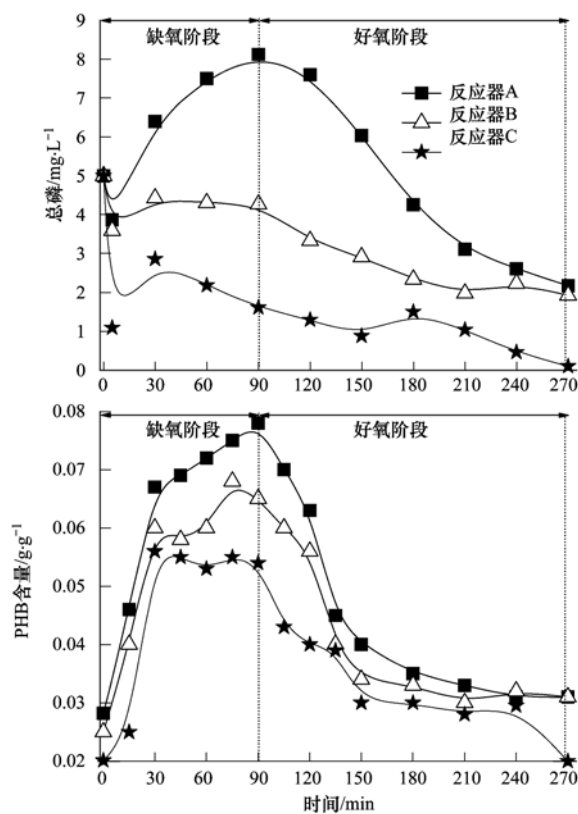


图 5 Fe^{3+} 对 SND 过程中总磷和 PHB 的影响

Fig. 5 Effect of Fe^{3+} on TP and PHB during SND processes

如图 5 中 A 反应器,在厌氧条件下聚磷菌可以将磷酸盐水解,释放出能量,并将其中一部分能量以 PHB 的形式储存于菌体内,同时分解后的无机磷酸盐则会被释放到体外,即聚磷菌的厌氧释磷,而好氧条件下聚磷菌将储存的 PHB 分解,释放出能量用于聚磷菌的好氧吸磷,最终达到除磷的目的^[26]。而加

入 Fe^{3+} 的反应器中该现象却受到明显的抑制, B、C 反应器污泥系统 TP 的峰值也有不同程度的降低. 一般情况下认为聚磷菌的释磷作用越强则反应器中 TP 的去除率越高^[26], 但加入 Fe^{3+} 后 TP 的去除率比对照组提高了 5% ~ 30%, 这主要是因为加入 Fe^{3+} 后会进行化学除磷, Fe^{3+} 可以与磷酸根结合生成难溶的磷酸铁, 从而提高了总磷去除率^[29]. 还有可能是因为 Fe^{3+} 可以促进聚磷菌的好氧聚磷作用, 在好氧阶段会吸附更多的磷酸根, 因此反应器系统中总磷含量较低.

从 3 条 PHB 变化曲线看出, B、C 反应器中 PHB 含量相比对照组有所下降, 而在低碳氮比的条件下, 由于外加碳源不足, 导致生物体依靠胞内碳源作为生长基质^[30], 因此 PHB 的减少就使得反硝化作用中各种反硝化酶相互之间竞争电子供体, 使 NO 还原酶的活性要高于 N_2O 还原酶, 从而导致了 N_2O 的积累.

3 结论

(1) 适宜浓度的 Fe^{3+} 可以提高 SND 过程中 COD 及氮的去除率, 但过高浓度的 Fe^{3+} 对 SND 过程有抑制效果.

(2) $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Fe^{3+} 会刺激 SND 过程中 N_2O 的释放, 主要体现在高浓度的 Fe^{3+} 会导致污泥脱氢酶活性降低, 从而降低生物活性, 导致亚硝酸盐的积累, 造成了 N_2O 的积累. 而且高浓度的 Fe^{3+} 会导致 PHB 的含量降低, 从而导致各种酶之间竞争电子供体, 加速了 N_2O 的积累.

(3) Fe^{3+} 对于 SND 过程中总磷的去除有很大影响, 因为增加了化学除磷的效果, 总磷的去除率提高了 5% ~ 30%.

参考文献:

- [1] Jia W L, Zhang J, Li P Z, *et al.* Nitrous oxide emissions from surface flow and subsurface flow constructed wetland microcosms: Effect of feeding strategies[J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(11): 1815-1821.
- [2] Collivignarelli C, Bertanza G. Simultaneous nitrification-denitrification processes in activated sludge plants: performance and applicability[J]. *Water Science and Technology*, 1999, **40**(4-5): 187-194.
- [3] Kampschreur M J, Temmink H, Kleerebezem R, *et al.* Nitrous oxide emission during wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2009, **43**(17): 4093-4103.
- [4] Shoji M, Hanaoka K, Kondo D, *et al.* A QM/MM study of nitric oxide reductase-catalysed N_2O formation[J]. *Molecular Physics*, 2014, **112**(3-4): 393-397.
- [5] Tallec G, Garnier J, Billen G, *et al.* Nitrous oxide emissions from denitrifying activated sludge of urban wastewater treatment plants, under anoxia and low oxygenation[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(7): 2200-2209.
- [6] 张静蓉, 王淑莹, 尚会来, 等. 污水短程硝化反硝化和同步硝化反硝化生物脱氮中 N_2O 释放量及控制策略[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3624-3629.
- [7] 吕锡武, 稻森悠平, 水落元之. 同步硝化反硝化脱氮及处理过程中 N_2O 的控制研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2001, **31**(1): 95-99.
- [8] Fu B, Liao X Y, Ding L L, *et al.* Characterization of microbial community in an aerobic moving bed biofilm reactor applied for simultaneous nitrification and denitrification[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2010, **26**(11): 1981-1990.
- [9] Jia W L, Liang S, Zhang J, *et al.* Nitrous oxide emission in low-oxygen simultaneous nitrification and denitrification process: Sources and mechanisms[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **136**: 444-451.
- [10] 闫玉洁, 张建, 贾文林, 等. 同步硝化反硝化过程中污染物的去除及温室气体的释放[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(11): 1979-1983.
- [11] Weber K A, Achenbach L A, Coates J D. Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2006, **4**(10): 752-764.
- [12] Liu S W, Zhang L, Liu Q H, *et al.* $\text{Fe}(\text{III})$ fertilization mitigating net global warming potential and greenhouse gas intensity in paddy rice-wheat rotation systems in China[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **164**: 73-80.
- [13] Kampschreur M J, Kleerebezem R, De Vet W W J M, *et al.* Reduced iron induced nitric oxide and nitrous oxide emission[J]. *Water Research*, 2011, **45**(18): 5945-5952.
- [14] Nielsen J L, Nielsen P H. Microbial nitrate-dependent oxidation of ferrous iron in activated sludge[J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, **32**(22): 3556-3561.
- [15] Liu T X, Li X M, Zhang W, *et al.* $\text{Fe}(\text{III})$ oxides accelerate microbial nitrate reduction and electricity generation by *Klebsiella pneumoniae* L17[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2014, **423**: 25-32.
- [16] 任雪锋, 毕学军, 程丽华, 等. 复合铁酶促活性污泥强化生物脱氮除磷研究[J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(3): 24-28.
- [17] 刘秀红, 杨庆, 吴昌永, 等. 不同污水生物脱氮工艺中 N_2O 释放量及影响因素[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(12): 1940-1947.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 200-284.
- [19] 伏小勇, 许生辉, 杨柳, 等. 城市污泥中重金属消解方法的比较试验研究[J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(15): 97-99.
- [20] Yin J, Tan X J, Ren N Q, *et al.* Evaluation of heavy metal inhibition of activated sludge by TTC and INT-electron transport system activity tests[J]. *Water Science and Technology*, 2005, **52**(8): 231-239.
- [21] Jiang Y M, Chen Y G, Zheng X. Efficient polyhydroxyalkanoates

- production from a waste-activated sludge alkaline fermentation liquid by activated sludge submitted to the aerobic feeding and discharge process [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(20): 7734-7741.
- [22] Wu J, Zhang J, Jia W L, *et al.* Impact of COD/N ratio on nitrous oxide emission from microcosm wetlands and their performance in removing nitrogen from wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(12): 2910-2917.
- [23] 李一冉, 张建, 胡振, 等. 以化学抑制法研究污水生物处理过程中 N_2O 的释放源[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(9): 1438-1443.
- [24] Pino-Jelicic S A, Hong S M, Park J K. Enhanced anaerobic biodegradability and inactivation of fecal coliforms and salmonella spp. in wastewater sludge by using microwaves [J]. *Water Environment Research*, 2006, **78**(2): 209-216.
- [25] Wlodarczyk T, Stepniewski W, Brzezinska M. Dehydrogenase activity, redox potential, and emissions of carbon dioxide and nitrous oxide from Cambisols under flooding conditions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **36**(3): 200-206.
- [26] Jia W L, Liang S, Ngo H H, *et al.* Effect of phosphorus load on nutrients removal and N_2O emission during low-oxygen simultaneous nitrification and denitrification process [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **141**: 123-130.
- [27] Dollhopf S L, Hyun J H, Smith A C, *et al.* Quantification of ammonia-oxidizing bacteria and factors controlling nitrification in salt marsh sediments [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(1): 240-246.
- [28] Rajagopal R, Béline F. Nitrogen removal via nitrite pathway and the related nitrous oxide emission during piggery wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(5): 4042-4046.
- [29] 李润祺, 张刚, 胡晓东, 等. 铁、锰和硼元素对厌氧微生物脱氮除磷的影响[J]. *广东微量元素科学*, 2009, **16**(2): 30-35.
- [30] Jia W L, Zhang J, Xie H J, *et al.* Effect of PHB and oxygen uptake rate on nitrous oxide emission during simultaneous nitrification denitrification process[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **113**: 232-238.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行