

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

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

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 耿耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖晓, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
喹啉降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蚱及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素

吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 为减少生物短程反硝化对外碳源的依赖, 研究了无机环境下 Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化的脱氮效果, 并探究了不同铁碳比及初始 pH 值对系统脱氮效果及 N₂O 释放的影响。结果表明 Fe⁽⁰⁾-活性炭可强化生物短程反硝化, 将亚硝氮去除率由 7.4% 提高到 31.1%。当 $m(\text{铁}):m(\text{碳})$ 由 2:1 降至 1:1 和 1:2 时, 反硝化速率与亚硝氮去除率均呈现先升后降的趋势, $m(\text{铁}):m(\text{碳})$ 为 1:1 时达到最大, 分别为 $5.58 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 与 41.1%, 且此时 N₂O 的释放量较小, 为 0.10 mg。当 pH 值由 6.0 升至 9.0 的过程中, 反硝化速率由 $7.39 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 下降至 $5.96 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, N₂O 的释放量由 0.19 mg 下降至 0.12 mg。以上结果表明, 在 $m(\text{铁}):m(\text{碳})$ 为 1:1 和 pH 为弱酸性的条件下, Fe⁽⁰⁾-活性炭能强化短程反硝化获得较好的脱氮效果, 但低 pH 值会增加 N₂O 的释放量。

关键词: 零价铁; 活性炭; 短程反硝化; 铁碳比; pH

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1991-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611056

Enhanced Short-cut Denitrification by Fe⁽⁰⁾-activated Carbon and Its Influencing Factors

LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, SUN Ting, ZHANG Yao, WANG Lei

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to reduce the carbon source for biological short-cut denitrification, Fe⁽⁰⁾-activated carbon was used to enhance nitrogen removal in the absence of organic carbon, and the influences of the Fe/C mass ratio and initial pH value on the nitrogen removal efficiency were explored. The results showed that the nitrite removal efficiency increased from 7.4% to 31.1% when the Fe⁽⁰⁾-activated carbon was used to enhance short-cut denitrification. When the Fe/C mass ratio was reduced from 2:1 to 1:1 and 1:2, both the denitrification rate and nitrite removal efficiency first increased and then decreased. At a Fe/C mass ratio of 1:1, a maximum denitrification rate of $5.58 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ and a maximum nitrite removal efficiency of 41.1% were achieved, respectively, and 0.1 mg of nitrous oxide was emitted. When the pH value was increased from 6.0 to 9.0, the denitrification rate decreased from 7.39 to 5.96 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, and the nitrous oxide emission decreased from 0.19 to 0.12 mg. Therefore, a higher nitrogen removal efficiency could be achieved by Fe⁽⁰⁾-activated at a Fe/C mass ratio of 1:1 and pH value of 6.0. However, more nitrous oxide would be emitted at a low pH value.

Key words: zero valence iron; activated carbon; short-cut denitrification; Fe/C mass ratio; pH

短程反硝化是指以有机物为电子供体将 NO₂⁻ 还原为 N₂ 的生物反应过程^[1]。某些工业生产废水(如锅炉清洗废水、机械加工废切削液)中含有 NO₂⁻ 而缺乏有机物,若利用短程反硝化处理则需投加外碳源,不仅增加了处理费用,还易造成二次污染。

Fe⁽⁰⁾ 具有较强的还原势能 ($E^0 = -0.44 \text{ V}$), 利用其还原 NO_x⁻ 已被广泛关注^[2~6]。但有研究表明^[7], 常温条件下 Fe⁽⁰⁾ 还原 NO_x⁻ 速率很慢; 且只有在酸性条件下^[8,9], Fe⁽⁰⁾ 才能起到化学还原作用。近年来有学者利用 Fe⁽⁰⁾ 强化微生物反硝化过程^[10,11], 发现反应过程复杂, 至少包括产氨、析氢和反硝化这 3 个反应, 且产生的氨氮需要额外处理。Fe⁽⁰⁾-活性炭之间由于电位差的存在会形成无数原电池系统(在中性和碱性条件下均能形成^[12]), 利用这种电化

学作用处理废水的方法称为铁碳微电解法, 该法产生高化学活性的 Fe²⁺ 与 [H] 对有机物的高效去除已被多方证实^[13~16], 但这些产物能否被反硝化细菌利用从而强化 NO₂⁻ 的脱氮性能鲜有报道。此外, 有研究表明与传统反硝化相比, 短程反硝化会释放更多的强温室性中间产物 N₂O^[17], 导致污染物由水环境转移到大气环境, 因此, 脱氮过程中 N₂O 的释放也日益引起人们的关注^[18~21]。

本研究以短程反硝化活性污泥为对象, 首先通过烧杯实验考察了 Fe⁽⁰⁾-活性炭在无机废水中强化

收稿日期: 2016-11-07; 修订日期: 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108367); 陕西省建设厅科技发展计划项目(2015-K61)

作者简介: 吕永涛(1980~), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为污水处理与资源化, E-mail: hybos2000@126.com

NO_2^- 还原的可能性,并利用批式实验研究了不同铁碳比和 pH 值对 $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭强化短程反硝化的性能及气态产物 N_2O 释放的影响. 通过获得 $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭强化微生物短程反硝化的最佳条件,以期为优化短程生物反硝化工艺提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 污泥来源及特性

短程反硝化污泥取自实验室稳定运行的 SBR 反应器,反应器中 MLSS 维持在 $3\,000 \sim 4\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, VSS/SS 约为 0.65,当进水 NO_2^- -N 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 浓度为 $450 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NO_2^- -N 去除率达到 99%, COD 去除率约为 68%, N_2O -N 的转化率为 0.089%,反硝化速率达 $25.55 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,表明该污泥具有较高的反硝化活性.

1.2 实验装置与方案

1.2.1 烧杯实验装置与方案

烧杯实验在 500 mL 烧杯内进行,每个烧杯内都含有 300 mL 脱氧的亚硝酸钠溶液, NO_2^- -N 浓度为 $65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 将 100 mL 反硝化污泥混合液、10 g 铁粉、1 g 活性炭颗粒按照表 1 不同组合方式分别投加进行实验,研究不同组合方式对反硝化的强化效果. 在烧杯内放入转子并用锡箔纸密封,将烧杯放置在磁力搅拌器上,调转速为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,实验时长为 72 h,每隔 24 h 取 10 mL 混合液过滤后测三氮. 烧杯实验在常温常压条件下进行,也不投加任何酸碱调节 pH 值.

表 1 烧杯实验方案
Table 1 Beaker test scheme

编号	$\text{Fe}^{(0)}$ /g	活性炭/g	活性污泥/mL
1	10	0	0
2	0	1	0
3	0	0	100
4	0	1	100
5	10	0	100
6	10	1	0
7	10	1	100

1.2.2 批式实验装置与方案

铁碳比和初始 pH 值影响因素实验在体积为 1 L 的有机玻璃反应器内进行,反应器从底部曝氮气,上部用锥型盖子密封,气体经排气孔通过装有浓硫酸的锥形瓶收集. 实验中所用到的活性炭经过饱和和预处理,具体方法为:将活性炭置于与实验进水同等浓度的亚硝酸钠溶液中,每 12 h 更换一次废水,并在第 3 次换水前后测溶液中的 NO_2^- -N 值无明显变化

(即已吸附饱和)后,在 60°C 下的恒温干燥箱中烘干,烘干后的活性炭称量备用. 铁碳比影响实验中,初始水样不调节 pH 值,固定 $\text{Fe}^{(0)}$ 的质量为 25 g,铁碳比分别为:2:1,1:1,1:2. pH 影响实验中,维持铁碳比均为 1:1,控制初始 pH 值分别为:6.0、7.5、9.0. 反应时间为 120 min,每隔固定的时间测定水样和气体中氮素的浓度.

1.3 水质分析与计算

NO_3^- -N:紫外分光光度法; NO_2^- -N: N -(1-萘基)-乙二胺光度法; NH_4^+ -N:纳氏试剂光度法;MLSS:滤纸重量法;pH:精密酸度计. NO_2^- -N 去除率和 NH_4^+ -N 生成率分别依据式(1)和(2)计算:

$$\text{NO}_2^- \text{-N}_{\text{去除率}} = \frac{\text{NO}_2^- \text{-N}_{\text{进水}} - \text{NO}_2^- \text{-N}_{\text{出水}}}{\text{NO}_2^- \text{-N}_{\text{进水}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{NH}_4^+ \text{-N}_{\text{生成率}} = \frac{\text{NH}_4^+ \text{-N}_{\text{出水}} - \text{NH}_4^+ \text{-N}_{\text{进水}}}{\text{TN}_{\text{进水}}} \times 100\% \quad (2)$$

反硝化速率取线性部分计算,见公式(3)、(4):

$$r = (\text{NO}_2^- \text{-N})/T \quad (3)$$

$$k = r/\text{MLSS} \quad (4)$$

1.4 气态 N_2O 测定与计算

N_2O 测定使用 GE-600 型 (PerkinElmer, Singapore) 气相色谱仪进行分析,利用 $1\,000 \mu\text{L}$ 微量进样器完成手动进样. 色谱柱为 PQ 填充柱 ($4 \text{ m} \times 0.53 \text{ mm} \times 25 \mu\text{m}$),测定 N_2O 条件为:进样口温度 150°C ,炉温箱 50°C ,ECD 检测器 380°C . 气体样品均测定 3 次取平均值.

N_2O 释放速率根据式(5)计算^[22]:

$$w_{\text{N}_2\text{O}} = \frac{Q \cdot c_{\text{N}_2\text{O}} \cdot M_{\text{N}_2\text{O}} \cdot p}{R \cdot T \cdot V_L \cdot \text{MLSS}} \quad (5)$$

式中, $w_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 释放速率 [$\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$], Q 为曝气量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$), $c_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 气体采样含量 ($\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$), $M_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 摩尔质量 ($44.02 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$), p 为大气压强 ($1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$), R 为气体常数 [$8.31 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$], T 为温度 (K), V_L 为反应器体积 (L), MLSS 为混合液悬浮固体浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

N_2O 释放量根据式(6)计算^[23]:

$$m_{\text{N}_2\text{O}} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(w_{\text{N}_2\text{O},n-1} + w_{\text{N}_2\text{O},n})}{2} \cdot \Delta t \cdot V_L \cdot \text{MLSS} \right] \quad (6)$$

式中, $m_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 释放量 (mg), Δt 分别为反应起始

与结束时间的差. $w_{\text{N}_2\text{O}}$ 、 V_L 与 MLSS 意义同式(5).

2 结果与讨论

2.1 $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭对短程反硝化的强化作用

图 1 分别表示了 7 组烧杯实验反应 72 h 过程中亚硝氮的去除及氨氮的生成过程.

由图 1 可知,单独投加 $\text{Fe}^{(0)}$ 时,亚硝氮的去除率仅为 2.6%,产生的氨氮占初始总氮的 1.5%,表明不控制 pH 时 $\text{Fe}^{(0)}$ 动态反应过程缓慢^[24]. 单独

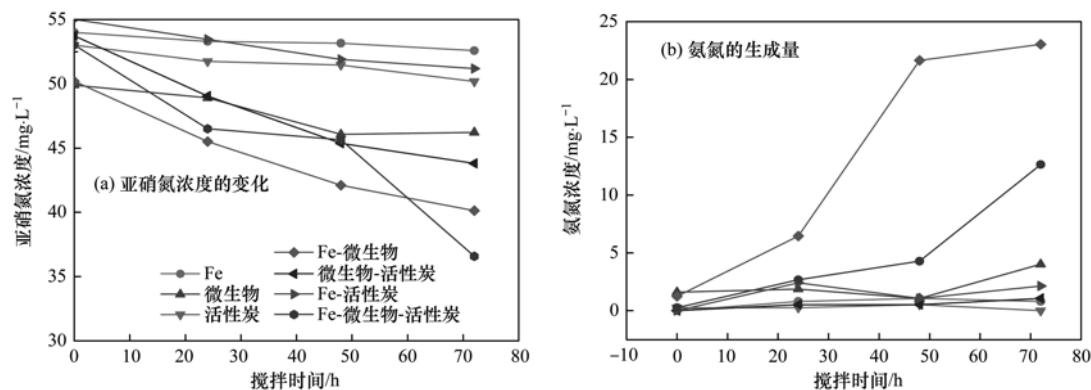


图 1 $\text{Fe}^{(0)}$ 与活性炭强化生物无机反硝化过程中亚硝氮的去除及氨氮的生成

Fig. 1 Nitrite removal and ammonia nitrogen production in the process of biological denitrification with $\text{Fe}^{(0)}$ -activated carbon

单独投加反硝化活性污泥时,亚硝氮的去除率为 7.4%,表明在不添加有机物前提下生物反硝化的代谢活动难以进行;产生的氨氮占初始总氮的百分比为 7.8%,是长时间缺乏碳源引起细胞分解所致. 反硝化污泥-活性炭组实验中亚硝酸盐的去除率为 18.4%,与单独投加二者之和相比并无太大差别,表明活性炭对生物短程反硝化的强化作用有限.

反硝化污泥- $\text{Fe}^{(0)}$ 组实验中,亚硝氮的去除率为 20.2%,而氨氮的产量占初始总氮的百分比高达 44.9%. 因为 $\text{Fe}^{(0)}$ 的腐蚀过程中产生的 H_2 可以作为电子供体促进生物反硝化,但产物中伴有大量的氨氮^[25]. 反硝化污泥- $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭组实验中,亚硝氮的去除率为 31.1%,氨氮的最终产量占初始总氮的百分比为 23.7%,表明 $\text{Fe}^{(0)}$ 至少参与了两个反应过程:一是 $\text{Fe}^{(0)}$ 与活性炭形成微电池,发生了铁碳微电解反应,产生的高化学活性产物 Fe^{2+} 、 $[\text{H}]$ 作为电子供体被反硝化细菌所利用^[27,28],从而促进了生物反硝化脱氮;另外, $\text{Fe}^{(0)}$ 还发生了化学还原反应,体系内的氨氮为 $\text{Fe}^{(0)}$ 还原亚硝氮的部分产物.

以上烧杯实验结果表明在无机环境下,投加 $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭能强化短程反硝化,不仅提高了亚硝氮去除率,还降低了 $\text{Fe}^{(0)}$ 腐蚀过程中产生的氨氮.

投加活性炭时,亚硝氮的去除率为 5.3%,氨氮的产量为 0,此过程中虽然没有产生氨氮,但仅依靠其吸附作用去除亚硝氮的效果并不理想. 同时投加 $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭时,亚硝氮去除率为 7.0%,小于两者单独作用时的叠加,与 Oh 等^[25] 用 $\text{Fe}^{(0)}$ -生物炭去除硝酸盐所得研究结果相似, $\text{Fe}^{(0)}$ 腐蚀过程中会造成体系 pH 值迅速升高,而活性炭的零电荷点为 11.3^[26],pH 值逐渐接近零电荷点会造成活性炭表面所带正电荷减少,导致对阴离子的吸附能力减弱.

2.2 铁碳比对活性污泥- $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭系统 NO_2^- 还原及 N_2O 释放特性的影响

通过批式实验研究了铁碳比分别为 2:1、1:1 和 1:2 对活性污泥- $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭系统反硝化脱氮性能及 N_2O 释放特性,实验运行中反应器内活性污泥浓度为 $1.88 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

由图 2 可以看出,不同铁碳比(质量比)下, NO_2^- -N 的变化趋势大致相同,均随着反硝化的进行浓度在不断降低,并且在降解过程中其浓度与时间的变化呈现较好的线性相关. 但不同的铁碳比影响亚硝氮的去除效果:当铁碳比为 1:1 时,亚硝氮的去除率为 41.1%,氨氮生成率为 4.4%,反硝化速率为 $5.58 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$;铁碳比 2:1 时,亚硝氮的去除率为 30.3%,氨氮生成率为 6.1%,反硝化速率为 $2.98 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$;铁碳比为 1:2 时,亚硝氮的去除率为 33.2%,氨氮生成率为 12.6%,反硝化速率为 $4.48 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$.

当活性炭颗粒质量过小时,一方面微电解形成的电池总量少,可被微生物利用的 Fe^{2+} 、 $[\text{H}]$ 总量低,故系统的亚硝氮去除效果较差;另一方面,过量的铁粉会单独起到化学还原作用,在腐蚀过程中导致氨氮产生量增加. 随着活性炭质量的增多,系统

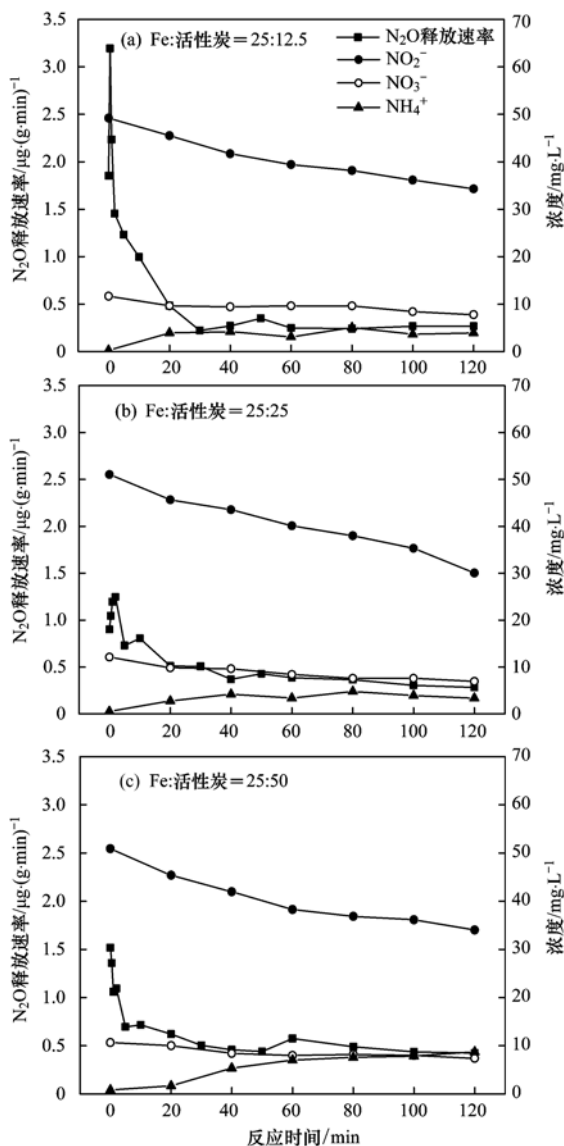


图2 不同铁碳比下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 N_2O 随时间的变化

Fig. 2 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, N_2O in the process with different iron carbon mass ratio

微电池数量也增多,微电解活性产物数量升高意味着反硝化菌能利用的电子数量增多,从而提高了去除率.当铁碳比例为1:1时,亚硝氮的去除效果达到最佳水平,不仅氨氮产量低且反硝化速率也最高.继续增加活性炭的质量,过量的活性炭颗粒覆着在铁粉的表面,减少了微电池的形成数量,从而影响系统亚硝氮的脱氮效果.因此,过高或过低的铁碳比均不利于脱氮反应的进行.

铁碳比的不同不仅会影响亚硝氮的去除和氨氮的生成,也会造成脱氮气态产物 N_2O 的释放速率及释放量有所不同.3组实验中 N_2O 的释放速率都是在曝气初期出现一个峰值,然后迅速下降.铁碳比

为2:1时, N_2O 的释放速率在30 s时达到最大为 $3.19 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$,整个反应过程中释放的 N_2O 总量为0.09 mg.铁碳比为1:1时, N_2O 的释放速率在1 min时达到最大为 $1.20 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$,整个反应过程中释放的 N_2O 总量为0.10 mg.铁碳比为1:2时, N_2O 的释放速率在0 min时达到最大为 $1.51 \mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$,整个反应过程中释放的 N_2O 总量为0.12 mg.虽然铁碳比2:1时, N_2O 的释放速率峰值会出现大于其他两组的情况,但是从 N_2O 在整个反应过程中的累积量来看,反而出现了最小值.主要是因为铁粉过量时,化学还原作用会增加 N_2O 的释放量,而零价铁与活性炭形成的微电池数量少,故微电解作用提供给反硝化菌的电子供体数量不足,生物反硝化能力减弱,因生物反硝化作用生成的 N_2O 总量减少,两部分作用的效果叠加,就会出现反应初期 N_2O 释放速率峰值迅速增大而后一直处于较低水平的情况.

2.3 初始 pH 对活性污泥- $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭系统 NO_2^- 还原及 N_2O 释放特性的影响

通过批式实验研究了初始 pH 值分别为6.0、7.5和9.0对活性污泥- $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭系统反硝化脱氮性能及 N_2O 释放特性,实验运行中反应器内活性污泥浓度为 $1.98 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

如图3所示,不同 pH 值条件下,3组实验表现出相似的降解趋势,随着反应时间的延长,亚硝氮的浓度逐渐减少.实验运行中反应器内活性污泥浓度为 $1.98 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.在不同的 pH 下亚硝氮的去除效果不同.当 pH 为6.0时,亚硝氮的去除率为56.0%,氨氮生成率为1.8%,反硝化速率为 $7.39 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; pH 为7.5时,亚硝氮的去除率为47.7%,氨氮生成率为1.8%,反硝化速率为 $6.29 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; pH 为9.0时,亚硝氮的去除率为44.7%,氨氮生成率为2.2%,反硝化速率为 $5.96 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$.这些结果表明,随着体系 pH 值的增加,相应的亚硝氮去除速率和反应速率呈下降趋势,而氨氮的生成率却并无太大差异.造成这些现象的原因是 pH 较高时,一方面会使铁粉表面沉积铁的氧化物和氢氧化物,造成铁粉表面钝化而影响铁粉的活性,另一方面 pH 为9.0已超出反硝化细菌的最适生存环境6.5~7.5,故生物的反硝化能力被削弱,从而降低了体系的脱氮性能.过酸或过碱的环境条件都会对反硝化细菌的代谢作用产生不利影响,但是酸性条件却会加速零价铁的化学还原作用.由于系统中没有外加有机物,当化学作用的强度大

于反硝化细菌的生物作用强度,就会出现酸性环境中的反应速率与亚硝氮的去除率大于碱性与近中性环境。

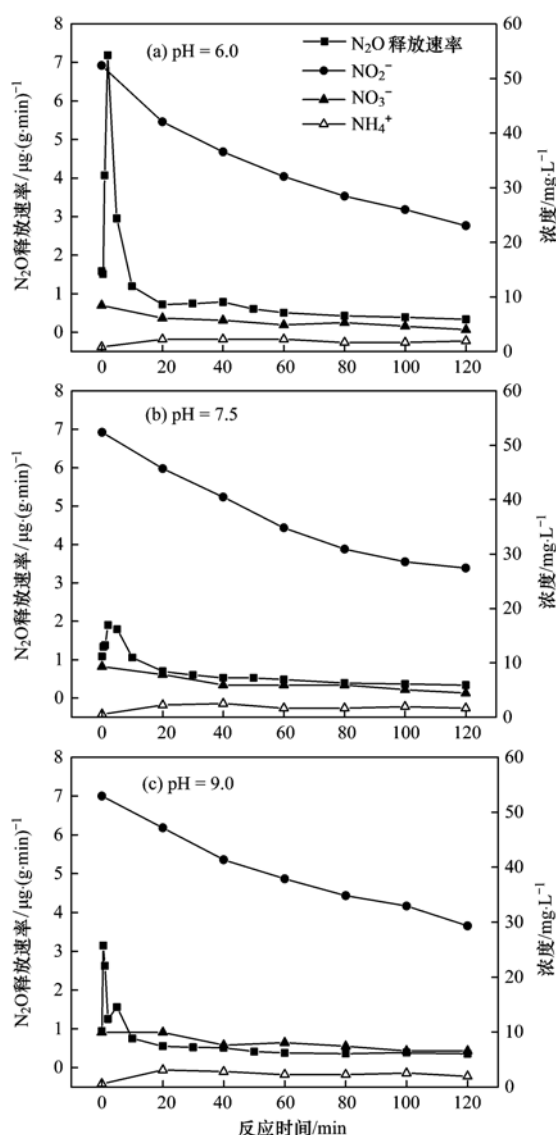


图3 不同 pH 下, NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 N_2O 随时间的变化

Fig. 3 Changes of NH_4^+ -N, NO_2^- -N, NO_3^- -N, N_2O in the process with different pH

在 3 组实验中氧化亚氮的释放速率都是在曝气初期出现一个峰值,然后迅速下降。pH 为 6.0 时, N_2O 的释放速率在 2 min 时达到最大为 $7.19 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$,整个反应过程中释放的 N_2O 总量为 0.19 mg。pH 为 7.5 时, N_2O 的释放速率在 2 min 时达到最大为 $1.90 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$,整个反应过程中释放的 N_2O 总量为 0.14 mg。pH 为 9.0 时, N_2O 的释放速率在 0.5 min 时达到最大为 $3.15 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$,整个反应过程中释放的 N_2O 总量为

0.12 mg。3 组实验比较来看,酸性环境产生的 N_2O 的总量最多,且出现的 N_2O 释放速率的峰值最大。主要因为生物反硝化过程中,较低的 pH 值抑制了氧化亚氮还原酶的酶活,从而导致 N_2O 释放量的增加;此外,酸性条件强化了化学反硝化作用,也增加了 N_2O 的产生。

3 结论

(1)在无机环境下, $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭能够强化生物短程反硝化的去除效果,使亚硝氮去除率由 7.4% 提高至 31.1%。

(2)当铁碳比由 2:1 降至 1:1 和 1:2 时, $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭-活性污泥系统中脱氮效果呈先升后降的趋势;铁碳比为 1:1 时,反硝化速率与亚硝氮去除率达到最大值,分别为 $5.58 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 41.1%。

(3)随着 pH 值由 6.0 升至 7.5 和 9.0, $\text{Fe}^{(0)}$ -活性炭-活性污泥系统中的反硝化速率、亚硝氮去除率和 N_2O 的释放量均呈下降趋势。

参考文献:

- [1] Matějů V, Āžinská S, Krejčí J, *et al.* Biological water denitrification—a review[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 1992, **14**(3): 170-183.
- [2] Vodyanitskii Y N, Mineev V G. Degradation of nitrates with the participation of $\text{Fe}(\text{II})$ and $\text{Fe}(\text{0})$ in groundwater: a review [J]. *Eurasian Soil Science*, 2015, **48**(2): 139-147.
- [3] Wang H Y, Zhang S L, Chen D, *et al.* Nitrate removal from groundwater by nanoscale zero-valent iron (nzvi) coupling autohydrogenotrophic denitrification [A]. In: *International Conference on Education, Management, Computer and Society* [C]. Shenyang: Atlantis Press, 2016.
- [4] Liu Y, Lee J, Zhao Y H, *et al.* A novel preparation approach and denitrification performance of TiO_2/Fe photocatalysts [J]. *Desalination & Water Treatment*, 2014, **57**(7): 3125-3131.
- [5] Siciliano A. Use of nanoscale zero-valent iron (NZVI) particles for chemical denitrification under different operating conditions [J]. *Metals-Open Access Metallurgy Journal*, 2015, **5**(3): 1507-1519.
- [6] Lubphoo Y, Chyan J M, Grisdanurak N, *et al.* Nitrogen gas selectivity enhancement on nitrate denitrification using nanoscale zero-valent iron supported palladium/copper catalysts [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2015, **57**: 143-153.
- [7] 王弘宇, 张惠宁, 吕斌, 等. 铁基质自养反硝化去除水中硝酸盐污染物的研究[J]. *中国农村水利水电*, 2014, (11): 59-62.
- [8] Wang H Y, Zhang H N, Lv B, *et al.* Research on nitrate removal by Fe-dependent autotrophic denitrification bacteria[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014, (11): 59-62.
- [8] Fan X M, Guan X H, Jun M A. Mechanisms and affecting factors of nitrate reduction by zero-valent Iron [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, **24**(14): 5-9.

- [9] Whittleston R A, Stewart D I, Mortimer R J G, *et al.* Enhancing microbial iron reduction in hyperalkaline, chromium contaminated sediments by pH amendment [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, **28**: 135-144.
- [10] Yang G C C, Lee H L. Chemical reduction of nitrate by nanosized iron: kinetics and pathways [J]. *Water Research*, 2005, **39**(5): 884-894.
- [11] Shin K H, Cha D K. Microbial reduction of nitrate in the presence of nanoscale zero-valent iron[J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(2): 257-262.
- [12] Deng S H, Li D S, Yang X, *et al.* Biological denitrification process based on the Fe(0)-carbon micro-electrolysis for simultaneous ammonia and nitrate removal from low organic carbon water under a microaerobic condition [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **219**: 677-686.
- [13] Santos E A, Ortega P F R, Lavall R L, *et al.* Use of biodiesel press cake waste to prepare Fe/carbon reactive composites for environmental applications: removal of hazardous CrVI contaminants [J]. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2015, **26**(10): 740-744.
- [14] 杨欣, 武福平, 马国纲, 等. 铁碳微电解与生物接触氧化法联用处理涂料废水[J]. *城市道桥与防洪*, 2015, (12): 74-76.
- Yang X, Wu F P, Ma G G, *et al.* Paint wastewater treated by combined process of iron carbon micro electrolysis and biological contact oxidation [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2015, (12): 74-76.
- [15] 陈国强. 次氯酸钠-铁碳微电解联用处理炼油厂 RO 浓水实验研究[J]. *价值工程*, 2015, (11): 98-100.
- Chen G Q. Experimental study on the use of sodium hypochlorite-iron-carbon micro-electrolysis in refinery RO thick water treatment [J]. *Value Engineering*, 2015, (11): 98-100.
- [16] 张维涛. 铁碳微电解预处理硝基苯废水工艺研究进展[J]. *广州化工*, 2015, **43**(6): 39-41.
- Zhang W T. Progress on Treatment technique of iron-carbon micro-electrolysis for nitrobenzene waste-water [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2015, **43**(6): 39-41.
- [17] Hassan J, Qu Z, Bergaust L L, *et al.* Transient accumulation of NO_2^- and N_2O during denitrification explained by assuming cell diversification by stochastic transcription of denitrification genes [J]. *PLoS Computational Biology*, 2016, **12**(1): e1004621.
- [18] Wang Q L, Jiang G M, Liu Y, *et al.* Heterotrophic denitrification plays an important role in N_2O production from nitrification reactors treating anaerobic sludge digestion liquor [J]. *Water Research*, 2014, **62**: 202-210.
- [19] Zheng M S, He D, Ma T, *et al.* Reducing NO and N_2O emission during aerobic denitrification by newly isolated *Pseudomonas stutzeri* PCN-1 [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **162**: 80-88.
- [20] Wei W, Isobe K, Shiratori Y, *et al.* N_2O emission from cropland field soil through fungal denitrification after surface applications of organic fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **69**: 157-167.
- [21] Wu G X, Zheng D R, Xing L Z. Nitrification and N_2O Emission in a denitrification and nitrification two-sludge system treating high ammonium containing wastewater [J]. *Water*, 2014, **6**(10): 2978-2992.
- [22] Kimochi Y, Inamori Y, Mizuochi M, *et al.* Nitrogen removal and N_2O emission in a full-scale domestic wastewater treatment plant with intermittent aeration [J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1998, **86**(2): 202-206.
- [23] Kong Q, Liang S, Zhang J, *et al.* N_2O emission in a partial nitrification system: dynamic emission characteristics and the ammonium-oxidizing bacteria community [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **127**: 400-406.
- [24] Su C M, Puls R W. Nitrate Reduction by zerovalent iron: effects of formate, oxalate, citrate, chloride, sulfate, borate, and phosphate [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(9): 2715-2720.
- [25] Oh S Y, Seo Y D, Kim B, *et al.* Microbial reduction of nitrate in the presence of zero-valent iron and biochar [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **200**: 891-896.
- [26] Oh S Y, Seo Y D. Factors affecting sorption of nitro explosives to biochar: pyrolysis temperature, surface treatment, competition, and dissolved metals [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, **44**(3): 833-840.
- [27] Zhang H N, Wang H Y, Yang K, *et al.* Nitrate removal by a novel autotrophic denitrifier (*Microbacterium* sp.) using Fe(II) as electron donor [J]. *Annals of Microbiology*, 2015, **65**(2): 1069-1078.
- [28] Deng S H, Li D S, Yang X, *et al.* Process of nitrogen transformation and microbial community structure in the Fe(0)-carbon-based bio-carrier filled in biological aerated filter [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(7): 6621-6630.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark ...	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)