

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶花香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283)	
《环境科学》征稿简则 (1332)	
信息 (1350, 1509, 1582, 1644)	
专辑征稿通知 (1523)	

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析

袁怡^{1,2}, 黄勇^{2*}, 邓慧萍¹, 盛学敏², 潘杨², 李祥²

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

摘要: 在 SBR 反应器中利用乙酸钠为底物, 研究 C/N(COD/NO₃⁻-N) 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响. 在 SBR 连续运行过程中(HRT 为 6 h), C/N 比为 3 时, 亚硝酸盐积累率可达 45%. 批式处理研究表明, C/N 比为 2.5 和 3.0 时亚硝酸盐的积累率较高, 分别为 47.50% ± 1.005% 和 45.28% ± 5.469%. C/N 比为 2.5 时获得的亚硝酸盐比积累速率为 (30.17 ± 1.70) mg·(g·h)⁻¹, C/N 比为 3 时获得的亚硝酸盐比积累速率为 (29.92 ± 1.90) mg·(g·h)⁻¹. C/N 比在 2.5~4 范围内时, C/N 比对硝酸盐的还原速率基本无影响, 但对亚硝酸盐的积累速率影响显著, C/N 比为 2.5 和 3.0 时有利于亚硝酸盐的积累, C/N 比 ≥ 3.5 时, 亚硝酸盐积累率下降显著.

关键词: 半反硝化; 亚硝酸盐积累; SBR 反应器

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1416-05

Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process

YUAN Yi^{1,2}, HUANG Yong², DENG Hui-ping¹, SHENG Xue-min², PAN Yang², LI Xiang²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: Effect of C/N (COD/NO₃⁻-N) ratio on nitrite accumulation during denitrification process was investigated in a sequencing batch reactor (SBR) with acetic sodium as the electron donor. The nitrite accumulation ratio was 45% at a C/N ratio of 3 during operation in SBR with HRT at 6 h. According to the results of batch experiments, Nitrite accumulation ratios were higher at C/N ratios of 2.5 and 3.0, and the values were 47.50% ± 1.005% and 45.28% ± 5.469%, respectively. The nitrite specific accumulation rate was (30.17 ± 1.70) mg·(g·h)⁻¹ at a C/N ratio of 2.5, and was (29.92 ± 1.90) mg·(g·h)⁻¹ at a C/N ratio of 3.0. C/N ratios of 2.5-4.0 did not affect the nitrate reduction rate but obviously affected the nitrite accumulation rate. C/N ratios of 2.5 and 3.0 were favorable for nitrite accumulation, and a C/N ratio ≥ 3.5 would lead to decrease in nitrite accumulation (SBR).

Key words: partial denitrification; nitrite accumulation; sequencing batch reactor(SBR)

近几年兴起的厌氧氨氧化技术能在无需碳源的前提下, 实现废水的生物脱氮. 其原理是在厌氧条件下, 以亚硝态氮为电子受体, 氨氮为电子供体, 生成氮气. 第一座生产规模的 ANAMMOX 反应器也在荷兰鹿特丹的 Dokhaven 市政污水处理厂运行成功^[1]. 目前该技术的最高氮负荷已达 76 kg·(m³·d)⁻¹^[2], 显示出很好的应用前景. 由于该技术以亚硝态氮为电子受体^[3], 工程师们多采用半亚硝化-ANAMMOX 联合工艺处理低 C/N 比的含氮废水, 如城市垃圾填埋场的垃圾渗滤液^[4,5]、污泥上清液^[6,7]、味精废水^[8]、焦化废水^[9]、养猪场废水^[10]. 但对于同时含有氨氮和硝态氮的低碳废水, 如电镀废水, 关键是需要先将废水中的硝态氮转化为亚硝态氮, 然后利用氨氮作电子供体, 通过厌氧氨氧化途径脱氮.

通常不易发现反硝化过程中的亚硝态氮累积现象. 而反硝化过程是分步进行的: NO₃⁻ → NO₂⁻ → NO → N₂O → N₂, 在某些条件下, 可以观察到亚硝态氮得以累积的现象. 在已有的研究中表

明, 影响反硝化过程中 NO₂⁻-N 积累的因子有微生物种类^[11]、pH 值^[12,13]、碳源种类^[14~18]和 C/N 比^[18,19]等. 因此可以把反硝化控制在半反硝化(亚硝酸盐积累)阶段, 与厌氧氨氧化工艺联合处理同时含氨和硝酸盐的废水, 能实现高效脱氮, 且不需曝气, 能源消耗少, 是低碳的途径.

Sun 等^[14]认为碳源对半反硝化有重要影响, 乙酸钠为碳源时, 反硝化过程中获得的亚硝酸盐积累浓度最大, 乙醇和甲醇次之; 另外 C/N 比小于 3.75 时, 生物脱氮的反硝化过程中有明显的亚硝态氮积累. 曹相生等^[18]则以甲醇为碳源, 在 C/N 为 0~4 的条件下研究亚硝酸盐的积累, 发现 C/N ≥ 4 时难以获得亚硝酸盐的积累; 当进水 C/N 为 2.4~3.2 之间时, 能获得的亚硝态氮累积率大约为 25%; C/N < 2.4 时, 亚

收稿日期: 2012-07-05; 修订日期: 2012-10-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51008202); 江苏省环境保护厅重大项目(201104)

作者简介: 袁怡(1977~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为废水处理理论与技术, E-mail: yiyuansuzhou@163.com

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

硝酸盐的积累率降低. 因此 C/N 比是影响反硝化进程的另一个重要影响因素. 本研究以乙酸钠为碳源时, 实现高效稳定的 NO_2^- 累积率的最佳 C/N 比, 获得半反硝化工艺控制条件, 以期为同时含氨氮和硝酸盐废水的工程治理提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 试验仪器及设备

半反硝化污泥的培养采用 3.2 L 的圆柱形厌氧 SBR 反应器 (图 1). 反应器的运行模式为: 充水比 1/2; 每天运行 8 个周期; 每个运行周期 $t = 3 \text{ h}$ (也即 $\text{HRT} = 6 \text{ h}$), 其中进水 15 min, 反应 45 min, 沉淀 90 min, 出水 15 min, 排泥 15 min. 反应器置于 30°C 的恒温水浴中, 搅拌速度维持在 $52 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$.

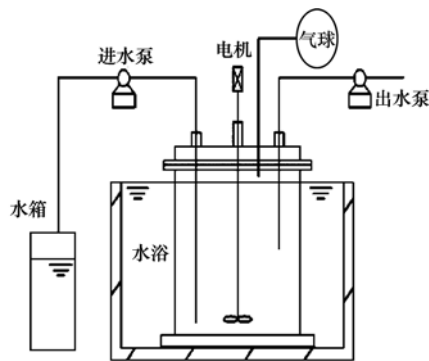


图 1 半反硝化试验装置

Fig. 1 Experimental setup for partial denitrification

1.2 批式试验

硝态氮起始浓度为 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值为 5.5 左右, 分别控制 C/N 比为 2.5:1、3.0:1、3.5:1 和 4.0:1, 研究不同 C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累速率的影响. 将淘洗浓缩后的污泥分装到 18 支 50 mL 比色管中, 使污泥浓度 (MLSS) 为 $3400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 将原水用氮气吹脱 5 min, 然后分别加入 18 支比色管中, 并定容至 50 mL, 迅速将其密封, 横着放入 30°C 的恒温水浴振荡器中进行培养并定时取样.

1.3 接种污泥及人工配水

SBR 反应器的接种污泥取自苏州新区第一污水厂, SBR 反应器的污泥浓度 MLSS 为 $3200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 人工配水的成分为 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$): 硝酸钾和乙酸钠按需投加; 氯化钙 220, 硫酸镁 82, 磷酸二氢钾 5, 碳酸氢钠 300. 微量元素^[3] $1.25 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$.

Abeling 等发现^[20], 当亚硝酸 (HNO_2) 的浓度达到 $0.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 便会抑制反硝化. 因而低的 pH 值能使反硝化过程产生的亚硝酸盐以亚硝酸的形式

存在而抑制反硝化过程, 出现亚硝酸盐的积累. Thomsen 等^[12] 也发现 pH 在 5.5 时, 反硝化过程中有较高的亚硝酸盐积累; 随着 pH 的升高, 亚硝酸盐的积累浓度逐步降低; 当 $\text{pH} = 8.5$ 时, 硝态氮可直接转化为氮气, 无亚硝酸盐的积累. 因而本试验的原水用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 调节 pH 为 5.5~6 之间, 以期获得亚硝酸盐的积累.

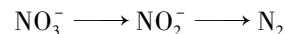
在试验控制的 pH 值范围内, 溶液中的氨氮将以 NH_4^+-N 的形式存在, 不会对微生物产生抑制, 并且其在有机缺氧环境下不会发生氧化反应. 因此在本试验中, 未在原水中添加氨氮, 未考察氨氮对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响.

1.4 试验采用的测量方法

各项指标测定方法均参照文献 [21], 其中 NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法; 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; COD 采用快速消解分光光度法; pH 采用玻璃电极法.

1.5 计算公式

尽管反硝化副产物有 NO、 N_2O 等, 但是 pH 会使硝酸盐和亚硝酸盐的还原过程中的产物发生变化, 因此本文用简化的反硝化模式进行分析:



反硝化的两步反应的比转化速率可描述如下.

硝酸盐的比转化速率:

$$\frac{\gamma_{\text{NO}_3^-}}{X} = -\frac{\Delta \text{NO}_3^--\text{N}}{X \Delta t} \quad (1)$$

亚硝酸盐的比转化速率 (有硝酸盐时):

$$\frac{\gamma_{\text{NO}_2^-}}{X} = -\frac{\Delta \text{NO}_2^--\text{N}}{X \Delta t} \quad (2)$$

亚硝酸盐的比转化速率 (无硝酸盐时):

$$\frac{\gamma_{\text{NO}_2^-}}{X} = -\frac{\Delta \text{NO}_2^--\text{N}}{X \Delta t} \quad (3)$$

式中, $\gamma_{\text{NO}_3^-}$ 为硝酸盐 (以 N 计) 的转化速率 [$\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$]; $\gamma_{\text{NO}_2^-}$ 为亚硝酸盐 (以 N 计) 的转化速率 [$\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$]; X 为污泥浓度, 即 MLSS ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).

2 结果与讨论

2.1 反应器运行试验结果与讨论

反应器运行分为两个阶段. 0~7 d 是反应器启动阶段, 提高污泥的反硝化活性. 第 8~70 d 为半反硝化的条件控制研究阶段, 考察 C/N 比对半反硝化的

影响. 试验结果见图 2. 在反应器的整个运行期间, 氨氮的生成量都低于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (试验结果未列出).

0~7 d 为反应器启动阶段, 反应器进水含 COD 和 NO_3^- -N 分别为 $105\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, C/N 比为 3.5, 进水 pH 值为 7 左右. 除前 3 d 出现不适应低碳源的现象外, 反应器显示出较强的反硝化能力, 没有出现 NO_2^- -N 的积累, NO_3^- -N 全转化为 N_2 .

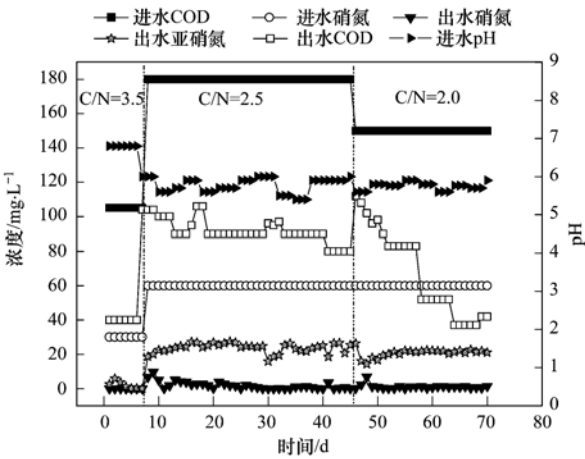


图2 反应器进出水水质变化
Fig. 2 Variation of substrates in SBR reactor

第 8~45 d, 把进水 pH 值降为 5.5 左右, 同时进水 NO_3^- -N 浓度提高至 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 浓度提高至 $180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, C/N 比为 3. 试验期间, 硝酸盐在反硝化过程中几乎全被转化, 而亚硝酸盐开始有明显的积累, 最高达 $27.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2), 积累率达 45% (图 3), 优于曹相生等^[18]的 25% 积累水平. 反应器的出水 COD 由最初的 $92\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 逐渐稳定为 $83\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

第 46~70 d, 原水 NO_3^- -N 浓度仍为 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值为 5.8 左右, 把 COD 浓度降至 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, C/N 比为 2.5, 其它运行条件不变. 试验表明, COD 浓度对反硝化过程中亚硝酸盐的积累有明

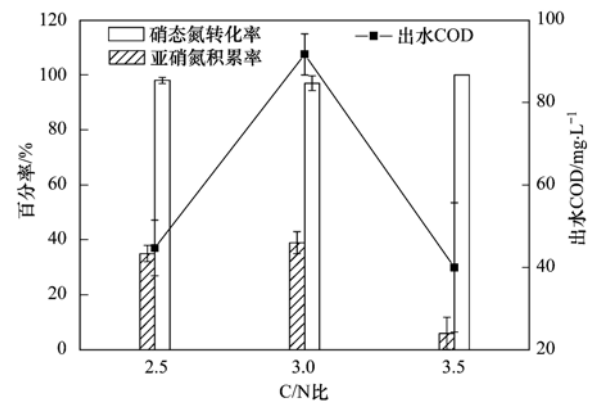


图3 SBR 反应器中 C/N 比对反硝化过程的
亚硝酸盐积累率的影响
Fig. 3 Effect of C/N ratios on nitrite accumulation
during denitrifying process in SBR reactor

显影响. 反硝化过程中硝酸盐几乎全被转化, 而亚硝酸盐的积累率先有所下降, 最低仅为 24%. 随着反应器中污泥对碳源浓度的适应, 亚硝酸盐的积累率有所上升, 最高达 37%, 相应的 NO_2^- -N 出水浓度为 $22.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 COD 为 $42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. SBR 反应器中相应的污泥浓度 (MLSS) 为 $3\,400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

在整个反应期间, 未对 SBR 反应器进行排泥, 而反应器的运行也未出现出水带泥的情况, 静置期的泥面未明显升高. 而 Mateju 等^[22]的研究曾表明, 若把微生物的分子式记为 $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$, 用乙酸进行反硝化时的污泥产率系数为 0.07, 而用典型有机物进行反硝化时的污泥产率系数为 0.11, 用葡萄糖进行反硝化时的污泥产率系数为 0.18; McAdan 等^[23]的研究则表明, 利用乙醇进行反硝化时的污泥产率系数为 0.14 (见表 1). 可见, 用乙酸或乙酸钠进行反硝化时的污泥产量较低, 可以降低剩余污泥的处置费用. 而 ANAMMOX 细菌的世代期长, 若该反应与 ANAMMOX 工艺联用时, 因反硝化细菌生长过快而将 ANAMMOX 菌淘汰的可能性降低.

表 1 反硝化的计量反应方程式
Table 1 Stoichiometries of denitrification reactions

碳源种类	计量反应方程式	文献
乙酸	$0.82\text{CH}_3\text{COOH} + \text{NO}_3^- \longrightarrow 0.07\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2 + \text{HCO}_3^- + 0.30\text{CO}_2 + 0.90\text{H}_2\text{O} + 0.47\text{N}_2$	[22]
典型有机物	$0.3\text{C}_5\text{H}_3\text{NO} + \text{NO}_3^- + \text{H}^+ \longrightarrow 0.11\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2 + 0.95\text{CO}_2 + 1.17\text{H}_2\text{O} + 0.5\text{N}_2 + 0.19\text{NH}_4^+$	[22]
乙醇	$0.69\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{NO}_3^- + \text{H}^+ \longrightarrow 0.14\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2 + 0.67\text{CO}_2 + 2.07\text{H}_2\text{O} + 0.43\text{N}_2$	[23]
葡萄糖	$0.36\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{NO}_3^- + 0.18\text{NH}_4^+ + 0.82\text{H}^+ \longrightarrow 0.18\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2 + 1.25\text{CO}_2 + 2.28\text{H}_2\text{O} + 0.5\text{N}_2$	[22]

2.2 不同 C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响

在批式处理研究中发现, C/N 比为 2.5:1、3.0:1、3.5:1 和 4.0:1 时, 硝酸盐的转化基本都在 45 min

内完成; 而亚硝酸盐都在 45 min 时达到最高值, 随后逐渐下降; pH 值逐步升高; COD 值逐渐下降 (见图 4).

反硝化过程的半反应方程式如式 (4) 和式 (5)

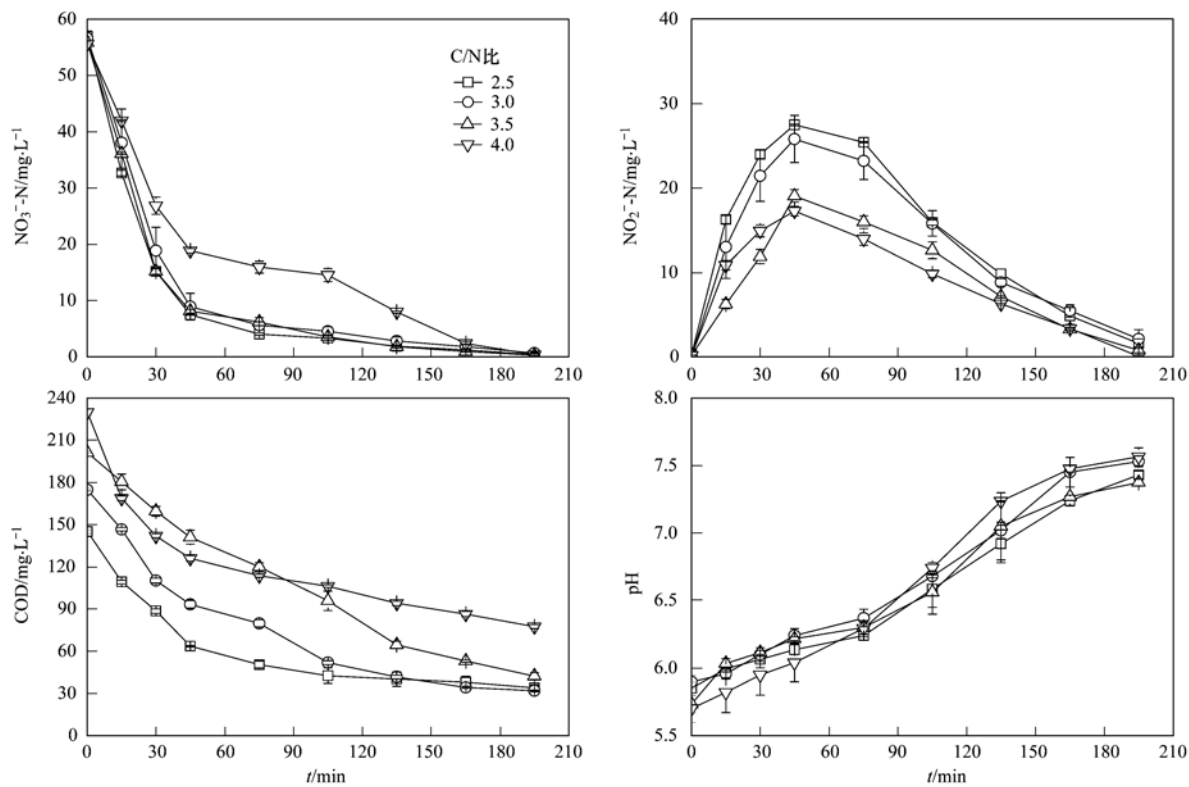
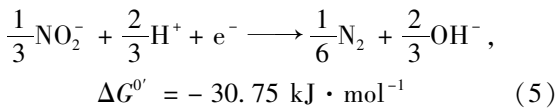
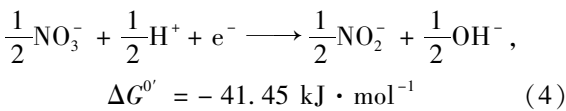


图 4 不同 C/N 时各底物的变化

Fig. 4 Variation of substrates during denitrification at different initial C/N ratios in batch experiment

所示^[24]:



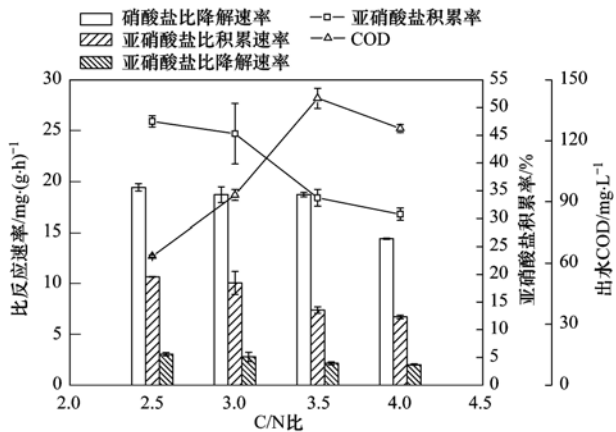
式中, $\Delta G^{0'}$ 为标准状态和 pH = 7 时, 反应释放的自由能.

由式(4)和式(5)可以看出, 获得单位摩尔的电子当量, 硝酸盐还原比亚硝酸盐还原释放更多的自由能. 因此在相同条件下, 硝酸盐的还原过程比亚硝酸盐的还原更易发生, 适当的反应时间可导致亚硝酸盐的积累.

有类似研究表明, 当 *Paracoccus denitrificans* 和 *Pseudomonas fluorescens* 纯培养菌在进行硝酸盐和亚硝酸盐的还原时, 若基质所提供的电子有限时, 则存在对底物电子的竞争, 硝酸盐比亚硝酸更容易作为电子受体^[12,25].

C/N 为 2.5、3.0 和 3.5 时获得的硝酸盐比转化速率相近, C/N 比为 4.0 时的略低 (见图 5), 说明 C/N 为 2.5 ~ 4.0 时, 对硝酸盐的转化基本无影响.

而研究报道, 只有当硝酸盐的浓度低于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反硝化速率才会受到抑制^[26]. 本研究中, C/N 为 2.5 以上, 碳源充足, 因此微生物的生长仅与电子受体硝酸盐的浓度有关.



COD 为亚硝酸盐积累浓度最大时的剩余浓度

图 5 不同 C/N 比对反硝化速率的影响

Fig. 5 Effect of C/N ratios on denitrification rates in batch experiment

C/N 比为 2.5 和 3.0 时的亚硝酸盐比积累速率相近, 分别为 $(30.17 \pm 1.70) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(29.92 \pm 1.90) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 相应亚硝酸盐的积累率分别为 $47.50\% \pm 1.005\%$ 和 $45.28\% \pm 5.469\%$. 而 C/N

比为 3.5 和 4.0 时的亚硝酸盐比转化速率和亚硝酸盐的比积累速率下降明显,亚硝酸盐的积累率也随之分别下降至 $33.70\% \pm 1.496\%$ 和 $30.75\% \pm 1.107\%$ 。说明 C/N 比对亚硝酸盐的积累有较大影响,C/N 比为 2.5~3.0 有利于亚硝酸盐的积累。

虽然 C/N 比 2.5 和 3.0 时的亚硝酸盐积累率相近,但是 C/N 比为 2.5 条件下,当亚硝酸盐积累浓度达到最高时的剩余 COD 浓度低于 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,一方面可减少反硝化过程的外加碳源量而减少药剂费用的支出,另外也可减少对 COD 的后续处理费用,降低有机物对 ANAMMOX 过程的不利影响。

3 结论

(1)在 SBR 运行过程中,C/N 为 3 时,获得的亚硝酸盐积累率可达 45%。

(2)SBR 连续试验和批式试验都表明,MLSS 为 $3.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,反应 45 min 时可获得最大的亚硝酸盐积累率。

(3)C/N 为 2.5~4.0 时,对硝酸盐的转化速率基本无影响,但对亚硝酸盐的积累速率影响显著,C/N 为 2.5 和 3.0 时有利于亚硝酸盐的积累,C/N ≥ 3.5 时,亚硝酸盐积累率下降显著。C/N 为 2.5 和 3 时,亚硝酸盐积累率分别为 $47.50\% \pm 1.005\%$ 和 $45.28\% \pm 5.469\%$,亚硝酸盐比积累速率分别为 $(30.17 \pm 1.70) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(29.92 \pm 1.90) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] Van der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [2] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 135-144.
- [3] Van de Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Metabolic pathway of anaerobic ammonium oxidation on the basis of ^{15}N studies in a fluidized bed reactor [J]. *Microbiology*, 1997, **143**(7): 2415-2421.
- [4] Liang Z, Liu J X. Landfill leachate treatment with a novel process: anaerobic ammonium oxidation (Anammox) combined with soil infiltration system[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **151**(1): 202-212.
- [5] 李伙生,周少奇,孙艳波. 2 种 UASB 的 ANAMMOX 与反硝化协同作用对比研究[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(2): 247-252.
- [6] Ahn Y H, Choi H C. Autotrophic nitrogen removal from sludge digester liquids in upflow sludge bed reactor with external aeration [J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**(9): 1945-1950.
- [7] 马富国,张树军,曹相生,等. 部分亚硝化-厌氧氨氧化耦合工艺处理污泥脱水液[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(2): 219-224.
- [8] 陈旭良,郑平,金仁村,等. 味精废水厌氧氨氧化生物脱氮的研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(5): 747-751.
- [9] 吕艳丽,单明军,王旭,等. 短程硝化-厌氧氨氧化处理焦化废水的研究[J]. *冶金能源*, 2007, **16**(5): 55-58.
- [10] 何鉴尧,黄瑞敏,郭嘉,等. 亚硝化/厌氧氨氧化一体化反应器的启动特性分析[J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(17): 10-19.
- [11] Lazarova V, Capdeville B, Nikolov L. Influence of seeding conditions on nitrite accumulation in a denitrifying fluidized bed reactor[J]. *Water Research*, 1994, **28**(5): 1189-1197.
- [12] Thomsen J K, Geest T, Raymond P C. Mass spectrometric studies of the effect of pH on the accumulation of intermediates in denitrification by *Paracoccus denitrificans* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, **60**(2): 536-541.
- [13] 王燕,王淑莹,孙洪伟,等. pH 和 MLSS 对短程反硝化过程 NO_2^- 还原速率的影响[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(13): 25-27.
- [14] Sun H W, Yang Q, Peng Y Z, *et al.* Nitrite accumulation during the denitrification process in SBR for the treatment of pre-treated landfill leachate[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2009, **17**(6): 1027-1031.
- [15] 孙洪伟,王淑莹,王希明,等. 低温 SBR 反硝化过程亚硝酸盐氮积累试验研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3620-3623.
- [16] 孙洪伟,彭永臻,魏东洋,等. 低温 SBR 反硝化过程亚硝酸盐氮积累的动力学研究[J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(5): 99-104.
- [17] 田建强,李咏梅. 以喹啉或吡啶为单一碳源时反硝化过程中亚硝酸盐的积累[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(1): 68-74.
- [18] 曹相生,付昆明,钱栋,等. 甲醇为碳源时 C/N 对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响[J]. *化工学报*, 2010, **61**(11): 2938-2943.
- [19] 葛士建,王淑莹,杨岸明,等. 反硝化过程中亚硝酸盐积累特性分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, **33**(1): 140-146.
- [20] Abeling U, Seyfried C F. Anaerobic-aerobic treatment of high-strength ammonium wastewater-nitrogen removal via nitrite[J]. *Water Science and Technology*, 1992, **26**(5-6): 1007-1015.
- [21] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002. 258-282.
- [22] Matxéjn V, Čížinská S, Krejčí J, *et al.* Biological water denitrification-a review [J]. *Enzyme Microbial Technology*, 1992, **14**(3): 170-183.
- [23] McAdan E J, Judd S J. A review of membrane bioreactor potential for nitrate removal from drinking water [J]. *Desalination*, 2006, **196**(1-3): 135-148.
- [24] Rittmann B E, McCarty P L. *Environmental biotechnology: principles and applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 59-135.
- [25] Almeida J S, Reis M A N, Carrondo M J T. Competition between nitrate and nitrite reduction in denitrification by *Pseudomonas fluorescens* [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1995, **46**(5): 476-484.
- [26] Moore S F, Schroeder E D. The effect of nitrate feed rate on denitrification[J]. *Water Research*, 1971, **5**(7): 445-452.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行