

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)	

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¹, 蒋成爱¹, 吴光学^{2*}, 管运涛²

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055)

摘要: 污水生物反硝化脱氮过程是一氧化二氮(N_2O)的重要释放源之一。试验采用序批式反应器以甲醇为碳源(电子供体), 硝酸盐(NO_3^- -N)为电子受体驯化反硝化菌, 并采用批处理试验研究不同电子受体、不同碳氮(C/N)比和不同初始亚硝酸盐(NO_2^- -N)质量浓度条件下 N_2O 释放情况。在典型周期试验和批处理试验中均能检测到 N_2O 的释放。以 NO_2^- -N为电子受体时会释放较多的 N_2O , 而以 NO_3^- -N为电子受体时释放的 N_2O 相对较少。不同C/N比通过影响反硝化菌的活性进而影响 N_2O 的释放, 反硝化菌的活性和 N_2O 的释放量均随着C/N比的降低而降低。 N_2O 的释放量随着初始 NO_2^- -N质量浓度的增加而增加, 一定浓度范围内的 NO_2^- -N会增强反硝化菌的活性。初始 NO_2^- -N质量浓度与 N_2O 的释放量具有较好的指数相关性。

关键词: 一氧化二氮(N_2O); 温室气体; 反硝化; 碳氮比; 亚硝酸盐

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1421-07

Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon

ZHAI Xiao-feng¹, JIANG Cheng-ai¹, WU Guang-xue², GUAN Yun-tao²

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Denitrification of wastewater is one of the important sources of nitrous oxide (N_2O). In this study, denitrifiers were acclimated in a sequencing batch reactor with methanol and nitrate (NO_3^- -N) as the electron donor and acceptor, respectively. N_2O emission during denitrification was examined both in typical cycles and in batch experiments under conditions of different electron acceptors, carbon/nitrogen (C/N) ratios and initial nitrite (NO_2^- -N) concentrations. With methanol as the organic carbon, the N_2O emission was high with NO_2^- -N as the electron acceptor and the N_2O emission was low with NO_3^- -N as the electron acceptor. The C/N ratios affected the emission of N_2O by affecting activities of denitrifiers, and both the activity of denitrifiers and the emission of N_2O decreased with decreasing C/N ratios. The N_2O emission increased with increasing initial NO_2^- -N concentrations, and a certain range of NO_2^- -N concentrations enhanced the activity of denitrifiers. The N_2O emission could be correlated very well with initial NO_2^- -N concentrations.

Key words: nitrous oxide(N_2O); greenhouse gas; denitrification; C/N ratios; nitrite

一氧化二氮(N_2O)能够强烈吸收红外线,减少地表通过大气向外空的热辐射,从而导致温室效应。 N_2O 的温室效应为二氧化碳的320倍^[1,2],对全球温室效应的贡献率约占5%~6%^[3]; N_2O 在大气对流层中性质十分稳定,生命周期长达120 a,扩散进入平流层后,可通过光化学反应,生成一氧化氮,从而破坏臭氧层^[4,5]。生物反硝化脱氮过程是 N_2O 的重要来源^[6]。为了处理排放量不断增加的生活污水和工业废水及控制日益严重的水体富营养化问题,我国新建污水处理厂数量越来越多,而且增加了污水生物反硝化脱氮工艺,来满足污水低氮排放标准要求。污水生物反硝化脱氮过程会产生 N_2O ^[7],现越来越受到关注。

污水生物反硝化脱氮过程已被广泛研究。实际

反硝化工艺运行过程中,由于原废水中缺少有机碳源,会导致反硝化不完全,所以很多污水处理厂反硝化都需要投加外源碳源。甲醇成本较低且不易产生副产物,所以常作为反硝化阶段的外加碳源。在甲醇长期使用过程中,会驯化出特定的反硝化菌群^[8,9]。在污水处理的不完全反硝化过程中会产生并释放 N_2O 。影响反硝化过程中 N_2O 释放的关键因素包括:碳氮(C/N)比、亚硝酸盐(NO_2^- -N)浓度、

收稿日期: 2012-07-14; 修订日期: 2012-08-29

基金项目: 深圳市科工贸信委基础研究计划项目(JC201006030878A); 深圳市人居环境委员会环境科研基金项目

作者简介: 翟晓峰(1985~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: zxf860327@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wu.guangxue@sz.tsinghua.edu.cn

溶解氧、温度、污泥龄和碳源类型^[10~12]。通常,高 NO_2^- -N浓度、低溶解氧、低 pH 值、低 C/N 比可导致较高 N_2O 的释放^[13~15]。因此,在甲醇驯化基础上,深入研究生物反硝化作用以及反硝化过程中 N_2O 的产生及影响因素,对优化污水生物脱氮工艺,实现 N_2O 在反硝化过程中的减量化排放具有重要现实意义。

本研究目的如下:①以甲醇为碳源驯化反硝化菌并研究序批式反应器(SBR)典型周期中 N_2O 的释放特征;②研究不同电子受体对 N_2O 释放的影响;③研究不同 C/N 比对 N_2O 释放的影响;④研究不同初始 NO_2^- -N浓度对 N_2O 释放的影响。

1 材料与方法

1.1 反硝化活性污泥的驯化

试验采用 SBR 反应器,有效容积为 5.4 L,在 $25^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$ 条件下以甲醇为碳源驯化反硝化菌。SBR 反应器每天运行 6 个周期,每个周期包含:进水(20 min),缺氧反应(150 min),曝气(10 min),沉淀(40 min)和排水/闲置(20 min)。缺氧阶段采用机械搅拌器进行搅拌以使溶液处于充分混合状态。曝气阶段主要是吹脱缺氧阶段产生的氮气,以提高活性污泥的沉降性。每个周期用蠕动泵排出处理过的废水,并泵入 1.8 L 人工配制的进水,水力停留时间为 12 h。每天定期在曝气结束前排泥一次,污泥龄控制在 10 d 左右。

进水组分为:0.50 mL $\cdot\text{L}^{-1}$ 的甲醇,607 mg $\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaNO_3 ,10 mg $\cdot\text{L}^{-1}$ 的酵母浸膏,76 mg $\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NH_4Cl ,25 mg $\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Na_2HPO_4 ,90 mg $\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,14 mg $\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。微量元素成分及投加量参见文献[16]。试验接种污泥取自深圳市南山污水处理厂。

1.2 批处理试验

批处理试验用来研究以下各种条件下 N_2O 的释放特征:①硝酸盐(NO_3^- -N)或 NO_2^- -N作为电子受体,甲醇作为电子供体;②不同 C/N 比;③不同初始 NO_2^- -N浓度。每一批试验所用活性污泥混合液均取自 SBR 反应器曝气结束前。取出的污泥经沉淀、离心去除上清液,再用不含甲醇和氨氮(NH_4^+ -N)的配水配成悬浮液。批处理试验采用容积为 500 mL 的封顶玻璃瓶,采用多孔瓶塞并连接多个取样管,分别用于液体采样、气体采样、补偿氮气以平衡瓶内外气压。试验过程中,玻璃瓶中混合液用磁力搅拌器进行搅拌。

不同电子受体对反硝化过程中 N_2O 释放的影响试验:将取自母反应器中的经处理过的污泥混合液分别放入 2 个玻璃瓶中,其中一个玻璃瓶中投加硝酸盐(初始 NO_3^- -N质量浓度为 100 mg $\cdot\text{L}^{-1}$),另一个玻璃瓶中投加亚硝酸盐(初始 NO_2^- -N质量浓度为 50 mg $\cdot\text{L}^{-1}$),然后再往 2 个玻璃瓶中加入甲醇,其碳(CH_3OH -C)质量浓度为 150 mg $\cdot\text{L}^{-1}$ (为方便比较,此处质量浓度指甲醇 TOC 浓度)。

不同 C/N 比对 N_2O 释放的影响试验:活性污泥混合液中加入不同量的甲醇,初始甲醇碳质量浓度分别为 75 mg $\cdot\text{L}^{-1}$ 和 37.5 mg $\cdot\text{L}^{-1}$,初始 NO_3^- -N质量浓度均为 100 mg $\cdot\text{L}^{-1}$ 。

不同初始 NO_2^- -N浓度对 N_2O 释放的影响试验:活性污泥混合液中加入相同量的甲醇(初始甲醇碳质量浓度为 150 mg $\cdot\text{L}^{-1}$)和相同量的硝酸盐(初始 NO_3^- -N质量浓度为 100 mg $\cdot\text{L}^{-1}$),然后再加入不同量的亚硝酸盐(初始 NO_2^- -N质量浓度分别为 0、5、10、20 和 40 mg $\cdot\text{L}^{-1}$)。

在所有的批处理试验中,每隔一定时间分别采集液体样和气体样,测定液体样中的甲醇、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N质量浓度,并测定气体样中的 N_2O 质量浓度。

1.3 分析方法

NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 用 ICS-1500 离子色谱仪(Dionex, USA)测定。悬浮活性污泥(SS)和挥发性悬浮活性污泥(VSS)浓度采用标准方法测定(APHA, 1998)。甲醇浓度采用 COD 快速消解分光光度法(HJ/T, 339-2007)测定。

N_2O 采用 6820 型气相色谱仪(Agilent Technologies, USA)测定。气相色谱采用 ECD 检测器,HP-PLOT/Q 毛细管柱(J&W GC Columns, Agilent Technologies, USA)。 N_2O 色谱条件:进样口温度 50°C ,柱温 50°C ,ECD 检测器温度 300°C 。用氮气作为载气,流量控制在 15 mL $\cdot\text{min}^{-1}$ 。纯 N_2O 气体用做标准气体。为方便比较,所产生的 N_2O 气体均表示为 mg $\cdot\text{L}^{-1}$,代表每 L 活性污泥混合液产生的 N_2O 气体质量(mg)。

2 结果与讨论

2.1 活性污泥驯化及 N_2O 在反应周期中的释放特征

以甲醇为碳源,SBR 反应器连续运行 6 个多月后,驯化得到反硝化菌。反应器进水 NO_3^- -N质量浓度为 100 mg $\cdot\text{L}^{-1}$,出水 NO_3^- -N质量浓度小于 0.1 mg $\cdot\text{L}^{-1}$,未检出 NO_2^- -N。稳定状态下,VSS 维持在

$1\ 200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 活性污泥产率约为 $120\ \text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, 硝态氮去除率可达到 99.9%.

在一个典型的 SBR 反应周期中, 甲醇、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 N_2O 的质量浓度随时间变化如图 1 所示. 在进水阶段, NO_3^- -N 快速消耗, 甲醇消耗较慢, 有少量 NO_2^- -N 积累. 在缺氧反应阶段, NO_3^- -N 在进水结束后 10 min 之内基本消耗完毕, 此时生成的 NO_2^- -N 也被反硝化消耗完毕, 剩余的甲醇缓慢消耗. 进水阶段 NH_4^+ -N 浓度略有升高, 后略微下降. N_2O 仅在进水阶段具有较高的释放量, 后随着反应进行其释放量逐渐降低, 在整个反应过程中, N_2O 的释放量维持在较低水平.

在前 20 min 进水阶段, 试验所测出的 NO_3^- -N 质量浓度很低. 这是因为试验进水是用蠕动泵缓慢泵入 1.8 L 于 5.4 L 的反应器中, 所以存在逐步稀释的过程, 另外进水过程中也同步发生反硝化反应, 故所测出的 NO_3^- -N 质量浓度很低. 在进水阶段反硝化

反应迅速进行, N_2O 具有较高的释放量, 30 min 后, 反硝化反应基本结束, N_2O 浓度逐渐下降, 这是因为碳源和氮源均被利用完, N_2O 释放量逐渐降低.

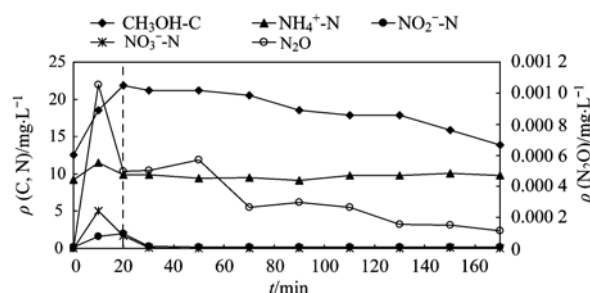


图 1 典型 SBR 反应周期中碳氮变化

Fig. 1 Dynamics of carbon and different forms of nitrogen within a typical SBR cycle

2.2 不同电子受体对 N_2O 释放的影响研究

在批处理试验中, 当以硝酸盐或亚硝酸盐作为电子受体, 甲醇作为电子供体时 N_2O 的释放情况如图 2 所示.

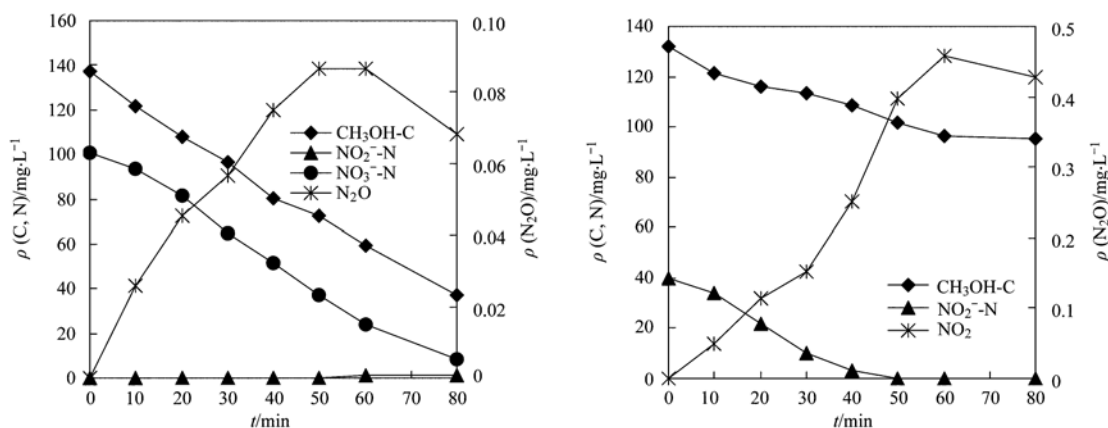


图 2 以硝酸盐或亚硝酸盐为电子受体条件下反硝化过程中碳氮变化

Fig. 2 Dynamics of carbon and nitrogen under conditions with nitrate or nitrite as the electron acceptor

不同电子受体条件下反硝化各参数如表 1 所示. 当硝酸盐作为电子受体时, 甲醇和硝酸盐均迅速消耗, 单位 VSS 的甲醇利用速率为 $65.97\ \text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 比反硝化速率为 $66.23\ \text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; 反硝化所需 C/N 比为 0.996, 此值略大于根据 McCarty 等^[17] 采用计量关系式计算所得值 0.926. 反应过程中未发现亚硝酸盐积累现象, 这说明亚硝酸盐反硝化到氮气的速率高于硝酸盐反硝化到亚硝酸盐的速率. 当亚硝酸盐作为电子受体时, 甲醇消耗速率较慢, 亚硝酸盐在 50 min 内消耗完毕, 单位 VSS 的甲醇利用率为 $29.50\ \text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 比反硝化速率为 $45.78\ \text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; 反硝化所需 C/N 比为 0.644, 此值大于 McCarty 等^[17] 得到的计量关系比值 0.574.

以硝酸盐作为电子受体时, N_2O 气体从开始就迅速释放, 到第 60 min 达到最大值 $0.087\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 前 60 min 内单位 VSS 的 N_2O 气体释放速率为 $0.09\ \text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, N_2O 气体最高释放量占反硝化去除 NO_3^- -N 的质量分数为 0.06%. 以亚硝酸盐作为电子受体时, N_2O 气体同样从开始就迅速释放, 到第 60 min 达到最大值 $0.458\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 前 60 min 内单位 VSS 的 N_2O 气体释放速率为 $0.42\ \text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, N_2O 气体最高释放量占反硝化去除 NO_2^- -N 的质量分数为 0.73%.

分析可知, 两种不同电子受体条件下 N_2O 气体释放及变化趋势相同, 但释放量差别很大, 以亚硝酸盐为电子受体时 N_2O 释放量是以硝酸盐为电子受

表 1 不同电子受体条件下的反硝化过程中各参数比较

Table 1 Comparison of denitrification parameters with different electron acceptors						
电子受体	甲醇利用速率 /mg·(g·h) ⁻¹	比反硝化速率 /mg·(g·h) ⁻¹	反硝化所需 C/N 比	N ₂ O 释放速率 /mg·(g·h) ⁻¹	N ₂ O 最高积累量 /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N/NO ₃ ⁻ -N /%
NO ₃ ⁻ -N	65.97	66.23	0.996	0.09	0.087	0.06
NO ₂ ⁻ -N	29.5	45.78	0.644	0.42	0.458	0.73

体时 N₂O 释放量的 5.26 倍. 这与 Zeng 等^[18]的研究结果一致. Zeng 等^[18]在 SNDPR 工艺研究中发现,无论以硝酸盐还是亚硝酸盐作为电子受体,均可产生 N₂O,亚硝酸盐还原过程中 N₂O 的产生量是硝酸盐还原过程中 N₂O 产生量的 5 倍以上. 其主要原因可能是 NO₂⁻-N 对 N₂O 还原酶具有较强的抑制作用^[19]. Schalk-Otte 等^[20]认为,在反硝化阶段,各种还原酶对电子的竞争能力不同,当 NO₂⁻-N 存在并积累时, N₂O 还原酶对电子的亲合力较弱,从而引起系统 N₂O 的积累.

本试验结果表明,甲醇作为有机碳源时,无论以 NO₃⁻-N 还是 NO₂⁻-N 作为电子受体,均可释放 N₂O,但当 NO₂⁻-N 作为电子受体时会释放较多的 N₂O.

2.3 不同 C/N 比对 N₂O 释放的影响研究

不同 C/N 比对 N₂O 释放的影响如图 3 所示. 在甲醇碳质量浓度分别为 150 mg·L⁻¹ (图 2)、75 mg·L⁻¹ (图 3)、37.5 mg·L⁻¹ (图 3) 时,得到相同的甲醇、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 N₂O 随时间变化的趋势图. 不同 C/N 比条件下的各种参数比较见表 2. 初始甲醇碳质量浓度为 150 mg·L⁻¹ 时, NO₃⁻-N 反硝化完全, 80 min 后 NO₃⁻-N 去除率达到 91.86%, 单位 VSS 的甲醇利用速率为 65.97 mg·(g·h)⁻¹, 比反硝化速率为 66.23 mg·(g·h)⁻¹; N₂O 的释放量非常低, 前 60 min 单位 VSS 的 N₂O 气体释放速率为 0.09 mg·(g·h)⁻¹, 其最高积累量占反硝化去除 NO₃⁻-N 的质量分数为 0.06%. 当初始甲醇碳质量浓度为 75 mg·L⁻¹ 时, NO₃⁻-N 反硝化不完全, 80 min 后 NO₃⁻-N 去除率为 64.26%; 碳源在 60 min 后基本耗尽, 单位 VSS 的甲醇利用速率为 47.31 mg·(g·h)⁻¹, 前 60 min 的反硝化速率较高, 比反硝化速率为 50.09 mg·(g·h)⁻¹, 此后 20 min 的反硝化速率显著下降; N₂O 气体的释放量也很低, 第 40

min 达到最大值, 后逐渐下降, 前 40 min 单位 VSS 的 N₂O 气体释放速率为 0.055 mg·(g·h)⁻¹, 其最高积累量占反硝化去除 NO₃⁻-N 的质量分数为 0.045%. 当初始甲醇碳质量浓度为 37.5 mg·L⁻¹ 时, NO₃⁻-N 仅发生部分反硝化, 80 min 后 NO₃⁻-N 去除率仅为 29.87%; 碳源快速耗尽, 单位 VSS 的甲醇利用速率为 39.54 mg·(g·h)⁻¹, 前 30 min 的反硝化速率较高, 比反硝化速率为 44.81 mg·(g·h)⁻¹, 此后 50 min 仅发生微弱反硝化; N₂O 气体的释放量较低, 反应到第 30 min 达到最大值, 后逐渐下降, 前 30 min 单位 VSS 的 N₂O 气体的释放速率为 0.032 mg·(g·h)⁻¹, 其最高积累量占反硝化去除 NO₃⁻-N 的质量分数为 0.043%.

通常, 由于有限有机碳和亚硝酸盐积累限制或抑制, N₂O 的释放量会随着 C/N 比的降低而增加^[21]. 然而, 在本研究中, N₂O 的释放率随 C/N 比的降低而下降, 且 3 种不同 C/N 比条件下均未出现 NO₂⁻-N 积累的现象. 本试验结果同时表明, 碳源利用速率和比反硝化速率均随着 C/N 比的降低而降低 (表 2), 这说明反硝化菌的活性也随着 C/N 比的降低而降低. N₂O 的释放率随 C/N 比的降低而下降可能与反硝化活性降低有关^[22,23]. 彭永臻等^[24]的研究也表明反硝化菌的活性和 N₂O 的产量均会随着 C/N 比的升高而升高. Li 等^[25]也在相关研究中发现随着 C/N 比的升高, 反硝化菌的活性和 N₂O 的释放率均相应升高. 对比不同 C/N 比条件下的 N₂O 释放趋势可知, N₂O 释放主要发生在前 30~50 min, 后面略有下降; 而前 30~50 min 内反硝化菌的活性比较高, 与以上解释吻合.

由以上分析可知, 当甲醇作为有机碳源, NO₃⁻-N 作为电子受体时, 不同 C/N 比会影响反硝化菌的活性和 N₂O 的释放量, 反硝化菌的活性和 N₂O 的释放

表 2 不同 C/N 比条件下的反硝化过程中各参数比较

Table 2 Comparison of denitrification parameters with different C/N ratios						
C/N 比	甲醇利用速率 /mg·(g·h) ⁻¹	比反硝化速率 /mg·(g·h) ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N 去除率/%	N ₂ O 释放速率/mg·(g·h) ⁻¹	N ₂ O 最高积累量 /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N/NO ₃ ⁻ -N /%
1.5	65.97	66.23	91.86	0.09	0.087	0.06
0.75	47.31	50.09	64.26	0.055	0.047	0.045
0.375	39.54	44.81	29.87	0.032	0.022	0.043

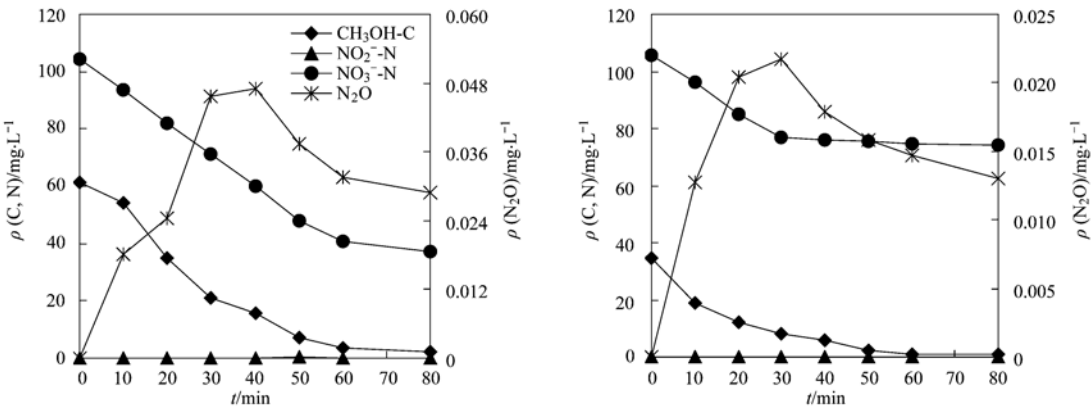


图3 不同 C/N 比条件下反硝化过程中碳氮变化
Fig. 3 Dynamics of carbon and nitrogen with different C/N ratios

量均随着 C/N 比的降低而降低. 这也说明在反硝化系统中,碳源充足可以提高反硝化效率,但碳源过高就会造成碳源的浪费和 N_2O 释放量的增加,更进一步说明控制适当的 C/N 比是提高反硝化效率和减少反硝化过程中 N_2O 释放的重要措施. 在实际运行的反硝化工艺中,选择适当的 C/N 比,可在保证反硝化速率的同时控制 N_2O 的释放.

2.4 不同初始 NO_2^- -N质量浓度对 N_2O 释放的影响研究

N_2O 在不同初始 NO_2^- -N质量浓度条件下的变化趋势如图 4 所示. 试验结果表明, N_2O 的释放量随着初始 NO_2^- -N质量浓度的增加而增加,与以往研究结果一致^[26,27]. 如表 3 所示,初始 NO_2^- -N质量浓度从 0 提高到 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, N_2O 的最高释放量从 $0.089\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $3.748\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 其最高释放量占反硝化去除的 NO_3^- -N的质量分数从 0.076% 增加到 2.57%. 当初始 NO_2^- -N浓度低于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,对 N_2O 释放量的影响比较小,当初始 NO_2^- -N质量浓度

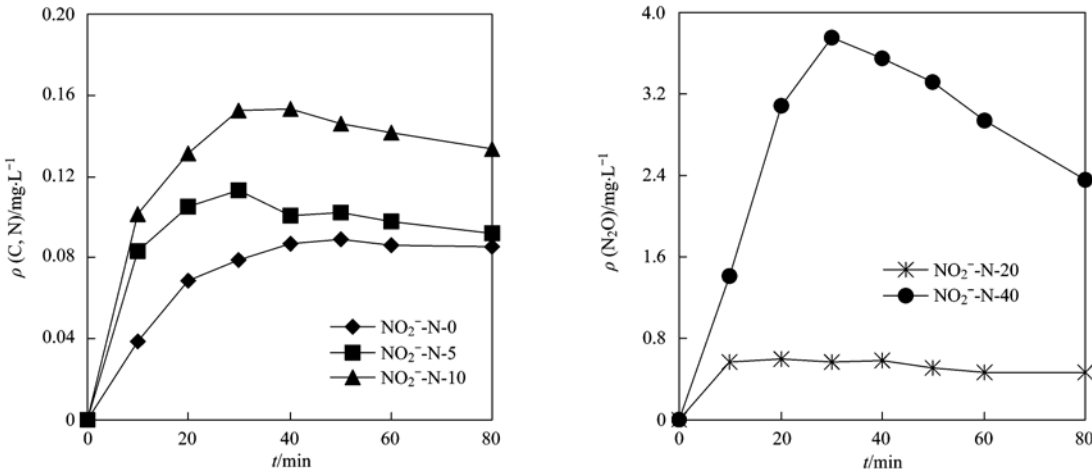


图4 不同初始 NO_2^- -N质量浓度对 N_2O 释放的影响
Fig. 4 Dynamics of N_2O with different initial nitrite concentrations

表 3 不同初始 NO_2^- -N质量浓度下反硝化过程中各参数比较

Table 3 Comparison of denitrification parameters with different initial nitrite concentrations

项目	初始 NO_2^- -N质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				
	0	5	10	20	40
甲醇利用率/ $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	42.87	45.98	49.78	53.13	63.19
比反硝化速率/ $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	45.15	46.04	51.73	61.19	68.73
N_2O -N/ NO_3^- -N/%	0.076	0.10	0.12	0.42	2.57

大于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, N_2O 的释放量显著增加。

不同初始 NO_2^- -N 质量浓度对甲醇利用速率和比反硝化速率的影响如表 3 所示。分析可知, 甲醇利用速率和比反硝化速率均随着初始亚硝酸盐质量浓度的增加而增加, 这说明在反硝化过程中, 一定浓度范围内的亚硝酸盐会增强反硝化菌的活性, 进而引起 N_2O 释放量的增加。

初始 NO_2^- -N 质量浓度分别与 N_2O 最高释放量、 N_2O 最高释放量所占去除 NO_3^- -N 的质量分数的拟合

曲线如图 5 所示, 分析可知, 初始 NO_2^- -N 浓度与对应条件下 N_2O 释放量及与 N_2O 最高释放量所占去除 NO_3^- -N 的质量分数的拟合曲线均符合指数关系。Park 等^[28]研究表明 N_2O 的释放量与 NO_2^- -N 质量浓度具有良好的相关性。本试验也表明较高浓度的 NO_2^- -N 会显著促进 N_2O 的释放, 这可能是因为较高的 NO_2^- -N 浓度抑制了氧化亚氮还原酶的活性^[29], 导致反硝化生成的 N_2O 无法及时还原成 N_2 , 从而释放到大气中。

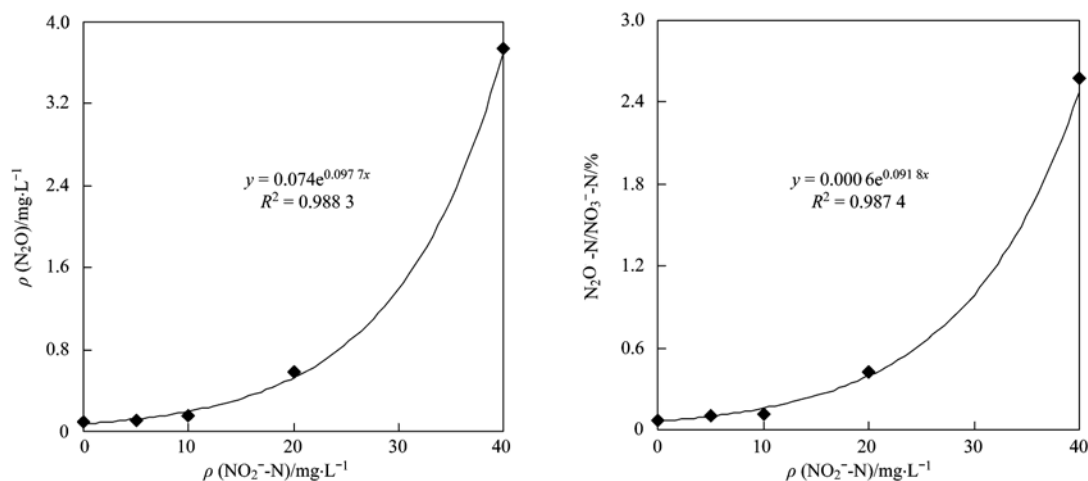


图 5 N_2O 最高释放量或 N_2O 最高释放量所占去除的 NO_3^- -N 的质量分数与初始亚硝酸盐质量浓度关系

Fig. 5 Relationship between the maximum N_2O yield or the percentage of N_2O production in the removed NO_3^- -N and the initial nitrite concentrations

3 结论

(1) N_2O 的释放主要受 NO_2^- -N 的影响, 甲醇作为有机碳源时, 无论以 NO_3^- -N 还是 NO_2^- -N 作为电子受体, 均可释放 N_2O , 但只有当 NO_2^- -N 作为电子受体时才会有较多的 N_2O 释放。

(2) 当甲醇作为有机碳源, NO_3^- -N 作为电子受体时, 反硝化菌的活性和 N_2O 的释放量均随着 C/N 比的降低而降低。

(3) N_2O 的释放量随着初始 NO_2^- -N 质量浓度的增加而增加, 一定浓度范围内的 NO_2^- -N 会增强反硝化菌的活性。初始 NO_2^- -N 质量浓度与 N_2O 的释放量具有较好的指数相关性。

参考文献:

- [1] 王淑莹, 张静蓉, 尚会来, 等. 生物膜同步硝化反硝化脱氮过程中 N_2O 的产生量及机理分析[J]. 北京工业大学学报, 2011, **37**(9): 1400-1406.
- [2] 刘秀红, 鞠然, 刘立超, 等. 生活污水短程生物脱氮过程中 N_2O 的产生与控制方法[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(S1): 30-34.

- [3] 巩有奎, 王淑莹, 彭永臻, 等. 低氧条件下生物反硝化过程中 N_2O 的产量[J]. 化工学报, 2011, **62**(6): 1688-1692.
- [4] 李莎, 宫飞蓬, 齐飞, 等. 污水生化处理过程中 N_2O 的产生特征研究进展[J]. 安全与环境学报, 2012, **12**(1): 75-80.
- [5] 曾巍, 高大文. 不同碳源对颗粒污泥反硝化过程中 N_2O 产生量的影响[J]. 森林工程, 2011, **27**(4): 7-9.
- [6] 朴哲, 陈新兵, 赵秀锦, 等. 不同 SBR 系统 N_2O 排放及微生物群落比较[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(6): 698-703.
- [7] 胡振, 张建, 谢慧君, 等. 污水生物脱氮过程中 N_2O 的产生与控制研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(12): 95-100.
- [8] Hagman M, Nielsen J L, Nielsen P H, et al. Mixed carbon sources for nitrate reduction in activated sludge identification of bacteria and process activity studies[J]. Water Research, 2008, **42**(6-7): 1539-1546.
- [9] 王淑莹, 殷芳芳, 侯红勋, 等. 以甲醇作为外碳源的生物反硝化[J]. 北京工业大学学报, 2009, **35**(11): 1521-1526.
- [10] 陈庆伟, 郑涛, 李玲. 反硝化过程中温室气体 N_2O 产生和积累的影响因素[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(19): 11667-11668.
- [11] 孙英杰, 吴昊, 王亚楠. 硝化反硝化过程中 N_2O 释放影响因素[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(2): 384-388.
- [12] 朱萍萍, 李平, 吴锦华, 等. SBR 生物脱氮过程中 N_2O 释放

- 的影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(9): 18-21.
- [13] Adouani N, Lendormi T, Limousy L, *et al.* Effect of the carbon source on N_2O emissions during biological denitrification[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, **54**(5): 299-302.
- [14] Hanaki K, Hong Z, Matsuo T. Production of nitrous oxide gas during denitrification of wastewater[J]. Water Science and Technology, 1992, **26**(5-6): 1027-1036.
- [15] Kampschreur M J, Temmink H, Kleerebezem R, *et al.* Nitrous oxide emission during wastewater treatment[J]. Water Research, 2009, **43**(17): 4093-4103.
- [16] Smolders G J F, Van der Meij J, Van Loosdrecht, M C M, *et al.* Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: Stoichiometry and pH influence [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1994, **43**(6): 461-470.
- [17] McCarty P L, Beck L, Amant P S. Biological denitrification of wastewaters by addition of organic materials [A]. In: Proceedings of the 24th Industrial Waste Conference [C]. Indiana: Purdue University, 1969. 1271-1285.
- [18] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z G, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, **84**(2): 170-178.
- [19] 王莎莎, 彭永臻, 巩有奎, 等. 不同电子受体低氧条件下生物反硝化过程中氧化亚氮产量[J]. 水处理技术, 2011, **37**(8): 58-60.
- [20] Schalk-Otte S, Seviour R J, Kuenen J G, *et al.* Nitrous oxide (N_2O) production by *Alcaligenes faecalis* during feast and famine regimes[J]. Water Research, 2000, **34**(7): 2080-2088.
- [21] Kishida N, Kim J H, Kimochi Y, *et al.* Effect of C/N ratio on nitrous oxide emission from swine wastewater treatment process [J]. Water Science and Technology, 2004, **49**(5-6): 359-365.
- [22] 张苗, 黄少斌, 肖先念. C/N 和 pH 值对高温好氧反硝化菌产 N_2O 的影响研究[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(1): 275-279.
- [23] 尚会来, 彭永臻, 张静蓉, 等. 不同电子受体反硝化过程中 C/N 对 N_2O 产量的影响 [J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 2007-2012.
- [24] 彭永臻, 尚会来, 张静蓉, 等. $p(C)/p(N)$ 对污水反硝化过程中 N_2O 产生的影响 [J]. 北京工业大学学报, 2010, **36**(4): 517-522.
- [25] Li Q H, Li P, Zhu P P, *et al.* Effects of exogenous organic carbon substrates on nitrous oxide emissions during the denitrification process of sequence batch reactors [J]. Environmental Engineering Science, 2008, **25**(8): 1221-1228.
- [26] 阮文权, 陈坚. 好氧颗粒污泥同步硝化反硝化脱氮过程中 N_2O 的产生[J]. 无锡轻工大学学报, 2004, **23**(4): 37-40, 64.
- [27] Wunderlin P, Mohn J, Joss A, *et al.* Mechanisms of N_2O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions [J]. Water Research, 2012, **46**(4): 1027-1037.
- [28] Park K Y, Lee J W, Inamori Y, *et al.* Effects of fill modes on N_2O emission from the SBR treating domestic wastewater [J]. Water Science and Technology, 2001, **43**(3): 147-150.
- [29] Alinsafi A, Adouani N, Béline F, *et al.* Nitrite effect on nitrous oxide emission from denitrifying activated sludge [J]. Process Biochemistry, 2008, **43**(6): 683-689.

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