

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ)吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094)	
《环境科学》征订启事 (4126)	
信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N_2O 产生的影响

卞荣星, 孙英杰*, 李晶晶, 张欢欢

(青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266033)

摘要: 异位硝化-原位反硝化是实现填埋场渗滤液脱氮处理的一种有效措施, 但硝化反硝化过程中会产生强温室气体 N_2O 。实验构建了 3 个新鲜垃圾生物反应器填埋场模拟装置, 分别回灌 NO_3^- -N 浓度为 50、100 和 300 $mg \cdot L^{-1}$ 的渗滤液, 考察垃圾原位反硝化过程中 N_2O 产生规律及其影响因素。结果表明, 回灌不同浓度硝酸盐, N_2O 产生量均表现为初期浓度较大-下降-后期升高的规律; N_2O 产生量与回灌 NO_3^- -N 量正相关, 其累积产生量分别为 36 481、44 241、86 264 μg , 但反硝化消耗单位硝酸盐氮产生的 N_2O 量(以 N 计)以及 N_2O 转化率与回灌硝酸盐氮量呈负相关, N_2O 平均转化率分别为 8.84‰、5.68‰和 2.34‰。分析认为, 各反应器垃圾降解后期反硝化碳源不足是 N_2O 产生量高的主要原因。

关键词: 硝酸盐; 生物反应器填埋场; 氧化亚氮; 原位反硝化; C/N

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4371-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.11.046

Impact of Nitrate Continuous Injection on N_2O Releases from Bioreactor Landfill

BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, ZHANG Huan-huan

(Department of Environment and Municipal Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: A combined process comprised of *ex-situ* nitrification and *in-situ* denitrification in different bioreactors is an effective measure to nitrogen removal, but it will cause N_2O , a strong greenhouse gas, emissions. This paper focused on the production characteristics and influencing factors of N_2O by establishing 3 bioreactor landfill units by continuous injected different amount of nitrate leachate (50, 100 and 300 $mg \cdot L^{-1}$), with fresh MSW as material in an experimental scale. Experimental results showed that the production of N_2O had the same regulation with different amount of NO_3^- -N injection, they all showed high at the initial period, then at a lower level, finally at a higher level; The cumulative production is positively correlated with the amount of NO_3^- -N, the total quantity of N_2O are 36 481, 44 241 and 86 264 μg respectively; However, the amount of N_2O by consumption per nitrate nitrogen and N_2O conversion ratio by denitrification is negatively correlation with the amount of NO_3^- -N, the average conversion ratio are 8.84‰, 5.68‰, 2.34‰ respectively; Shortage of carbon source for denitrification is the main reason for the high N_2O production in each reactor in the later period.

Key words: nitrate; bioreactor landfill; nitrous oxide; *in-situ* denitrification; C/N

生物反应器填埋场是一种新型的垃圾卫生填埋技术, 具有加速垃圾稳定化, 减少渗滤液排放量, 增加甲烷气体产率等优势^[1~3]。但是, 传统厌氧生物反应器填埋场渗滤液回灌过程出现高浓度有机酸及氨氮积累的问题, 因此, 脱氮型生物反应器填埋技术成为各国学者的热点^[4~6]。其中, 异位硝化-原位反硝化技术是一种常用的渗滤液脱氮技术, 即渗滤液中氨氮经场外好氧硝化处理后, 硝化渗滤液回灌至垃圾填埋层中, 以富含有机质的填埋层作为反硝化介质实现反硝化脱氮^[7,8]。作为硝化作用的副产物反硝化过程的中间产物—— N_2O 是一种重要的温室气体, 其增温潜势是 CO_2 的 296 ~ 310 倍, 在大气中的停留时间长达 120 a, 且能与平流层的氧原子发生光化学反应破坏臭氧层^[9]。目前已有研究表明垃圾填埋场是一个重要的 N_2O 产生源^[10,11], 填埋场 N_2O 释放约占温室气体排放总量的 3%^[12]。我国对填埋

场 N_2O 的研究主要集中在填埋场覆土以及渗滤液回灌方面, 何晶晶等^[13]研究表明渗滤液灌溉可促进表层土壤 N_2O 的释放, 黏土土质的 N_2O 释放通量是砂土的近 2 倍; 邵立明等^[14]研究表明渗滤液灌溉可促进 N_2O 的生成和释放, 且表层灌溉比深层灌溉 N_2O 生成量高; 张厚虎等^[15]研究了卫生和生物反应器填埋场夏季 N_2O 的产生情况, 发现采用表层覆土的卫生填埋场 N_2O 释放通量是生物反应器填埋场的 3 倍多; 韩志勇等^[16]通过室内模拟研究了厌氧-准好氧生物反应器填埋场的产气规律, 表明 N_2O 产生受季节和填埋方式的影响。 N_2O 是微生物反硝化脱氮过

收稿日期: 2014-03-13; 修订日期: 2014-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178229, 51378268)

作者简介: 卞荣星(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固废处置与资源化, E-mail: bianrongxing@126.com

* 通讯联系人, E-mail: yjsun1971@126.com

程的中间产物,且回灌渗滤液中高浓度无机氮以及有机物可促进 N_2O 的产生. Tallec 等^[17]和 Vignerona 等^[18]研究证明向渗滤液中添加 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,可明显增加填埋气中 N_2O 的比例;Chen 等^[19]的研究表明,老龄垃圾填埋场添加硝酸盐氮后,反硝化作用很微弱,且认为 C/N 比是造成 N_2O 大量产生的主要因素.但以上研究均为一次性加入硝酸盐, N_2O 浓度的变化主要是受硝酸盐的影响,因此其变化规律对连续运行的异位脱氮生物反应器填埋场反硝化过程中 N_2O 的产生规律不具有指导意义.垃圾稳定化过程中 N_2O 产生的影响因素较多,硝酸盐浓度、垃圾降解引起 pH、碳源等的变化都会影响 N_2O 的产生^[20].

本研究通过建立 3 个厌氧生物反应器填埋装置,分别连续回灌含有 50、100、300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{NO}_3^- \text{-N}$

的渗滤液,分析生物反应器填埋场垃圾稳定化过程中微生物反硝化产生 N_2O 的变化规律,并初步探讨影响 N_2O 产生的主要因素,以期为填埋场 N_2O 气体减排提供理论指导和技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验垃圾

实验用新鲜垃圾取自青岛理工大学家属院及附近居民小区的生活垃圾,分拣破碎至粒径为 2~4 cm 左右后,按青岛市生活垃圾组成比例(表 1)进行配比并混合均匀后装柱.矿化垃圾取自青岛地铁站,填埋龄长达 8 a,样品风干 48 h,人工分拣出大的玻璃瓶、塑料袋、橡胶、石块等大颗粒物质,过 2 mm 筛后备用.装填垃圾的基本理化性质见表 2.

表 1 青岛市垃圾组成比例(湿重)/%

Table 1 Composition of MSW in Qingdao city(wet weight)/%

成分	厨余	砖瓦	渣土	纸	塑料	织物	金属	玻璃	有害物
比例	69.37	0.28	5.90	7.31	11.08	2.76	0.30	2.94	0.07

表 2 装填垃圾的物化特性

Table 2 Physical and chemical characteristics of fresh and aged refuse

样品	含水率 /%	有机质 /%	TN (以干重计)/%	TP (以 P_2O_5 干重计)/%	装填密度 / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	装填量 /kg
新鲜垃圾	63.70	53.98	2.27	7.05	834.5	20.9
矿化垃圾	10.00	8.98	1.86	2.39	1 093.5	87.5

1.2 实验装置及垃圾装填

实验共采用 4 个有机玻璃柱,其中编号为 1 号、2 号和 3 号的柱子装填新鲜垃圾,模拟厌氧生物反应器填埋场,3 个柱子分别回灌含有 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度为 50、100 和 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的渗滤液.另一个柱子装填矿化垃圾,模拟间歇曝气准好氧反应器,编号为 4 号柱.实验装置如图 1 所示.1、2、3 号柱反应器高度为 1 000 mm,内径 200 mm,壁厚 5 mm,而 4 号柱规格则分别为 1 500、280、5 mm.每个柱体底部均设有 50 mm 的自由空间贮存渗滤液,其上设置布水器,布水器上铺设 50 mm 的砾石层,然后装填垃圾,新鲜垃圾装填高度为 800 mm,4 号柱矿化垃圾装填高度为 1 300 mm,垃圾上层铺设 50 mm 厚的细沙均匀布水,其上预留 50 mm 空间作气室.每个实验装置上部和底部均设有气体收集口和渗滤液排放口.

1.3 运行操作方式

实验操作流程如图 2 所示.实验采用周期进水的方式,周期为 2 d,采用蠕动泵进行回灌,回灌量为 1.5 L,回灌速率为 0.05 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,回灌时间为 30

min.渗滤液回灌后填埋柱密封 23.5 h,排空柱底渗滤液并采样 100 mL 以供渗滤液基本性质的测定,之后闲置填埋柱 24 h 后进行下一次渗滤液回灌.收集的新鲜垃圾柱渗滤液通过矿化垃圾 4 号柱处理后,根据测定的硝酸盐含量用预先配置好的 KNO_3 溶液调节回灌的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度分别为 50、100 和 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.为提高矿化垃圾 4 号柱的处理效率,在 4 号柱闲置时,采用微型鼓风机进行间歇曝气,曝气时间为 2 h,曝气量为 400 L.在实验后期渗滤液回灌量不足 1.5 L 时,补充取自青岛市小涧西垃圾填埋场的渗滤液.为加速垃圾的降解,实验在温度为 25~30℃的室内进行.

1.4 气体和渗滤液分析方法

实验每 2 d 采集渗滤液和气体样品,渗滤液性质分析指标和方法具体见表 3.渗滤液回灌后密闭 23.5 h,厌氧阶段产生的气体经干燥后采集于气体采样袋内,气体体积用湿式气体流量计测定. N_2O 使用 Shimaduz GC2010Plus 气相色谱仪分析,色谱柱为 Porapak Q (30 m×0.53 mm×20 μm),监测器为

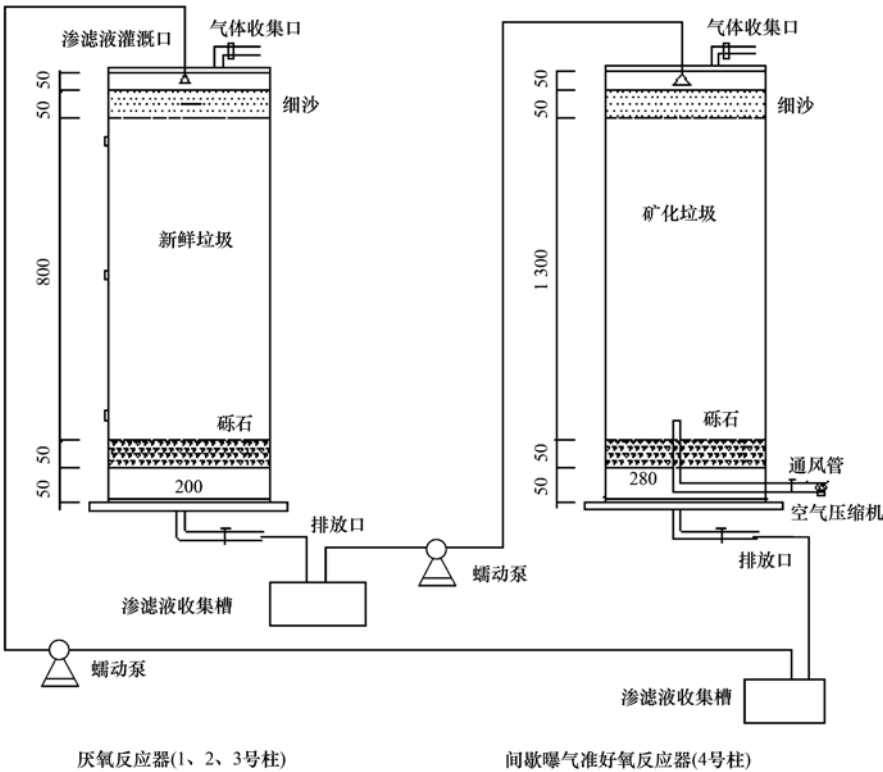


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

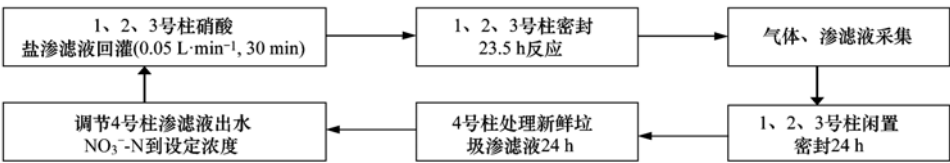


图 2 实验操作流程

Fig. 2 Experimental operation process during a single cycle

电子捕获监测器 ECD, 载气为 99.99% 的高纯氮气. 柱流量 $1.0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 分流比为 20, 柱温 60°C , SPL 操作参数为: 定量六通阀进样, 进样量 1 mL , 进样口温度 150°C , ECD 检测器温度 340°C .

表 3 渗滤液监测指标及方法

Table 3 Monitoring indexes and methods					
监测指标	COD	pH	氨氮 (NH_4^+-N)	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$
检测方法	重铬酸钾法	玻璃电极法	纳氏试剂分光光法	离子色谱法	可见分光光度法
国家标准	CJ/T 3018. 12-1993	GB/T 6920-1986	HJ 535-2009	GB/T 5750. 5-2006	GB 7493-87

2 结果与讨论

2.1 N₂O 产生规律

各生物反应器内 N₂O 气体产生变化规律及累计产生量如图 3 和 4 所示. 由图 3 可以看出, 3 个模拟反应柱 N₂O 产生变化趋势基本一致, 各反应器在初次回灌后, 均出现 N₂O 产生量较高的现象; 之后, 在较长一段时间内, N₂O 产生量维持在较低的水平;

随着垃圾的不断降解, 后期, N₂O 的产生量开始逐渐升高. 由于 3 个柱子分别添加不同浓度的硝酸盐, 其 N₂O 产生量呈现差异性, 各反应柱在第一次回灌后 N₂O 产生量较大, 密闭 24 h 后的 N₂O 产生量分别为 2 592.9、4 945.9 和 12 865.9 μg . 随着渗滤液的连续回灌, 各模拟反应柱在一段时间内, N₂O 产生维持在一个较低的相对稳定状态, 1 号柱在 7 ~ 156 d, N₂O 产生量在 ND ~ 619.7 μg 之间波动, 其平均产生

量为 123.9 μg ; 2 号柱在 4 ~ 156 d, N_2O 产生量在 ND ~ 814.0 μg 之间波动, 其平均量为 144.2 μg ; 而 3 号柱相对稳定期较短, 稳定时间在 7 ~ 117 d, N_2O 产生量在 ND ~ 1 230 μg 之间波动, 平均产生量为 324.1 μg . 实验后期, N_2O 产生量呈现显著升高的趋势, 1 号、2 号、3 号柱最高产生量分别为 3 356.5、3 289.4 和 4 799.2 μg . 在垃圾降解整个过程中, 3 个反应柱 N_2O 累计产生量分别是 36 481、44 241、86 264 μg , 表明 N_2O 产生总量与回灌硝酸盐量呈正相关.

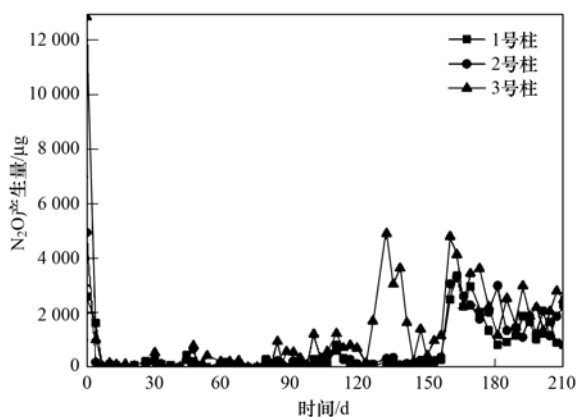


图 3 N_2O 产生量随时间变化趋势

Fig. 3 Production of N_2O as a function of time

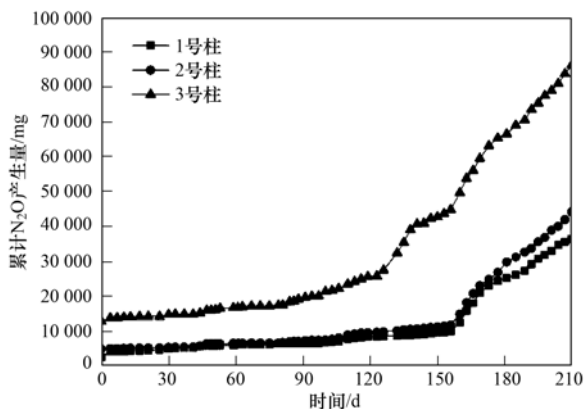


图 4 N_2O 累计产生量随时间变化趋势

Fig. 4 Cumulative production of N_2O as a function of time

2.2 添加硝酸盐后渗滤液中 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 的变化特性

1、2 和 3 号柱连续添加 NO_3^- -N 后, 主要发生反硝化反应, 各垃圾柱出水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 的变化趋势如图 5、6 所示.

由图 5 可以看出, 各反应柱在初期 (1 ~ 33 d), 渗滤液出水中多次检测出含有 NO_3^- -N, 之后各柱分别在 35 ~ 110 d、35 ~ 110 d 和 35 ~ 88 d 内出水

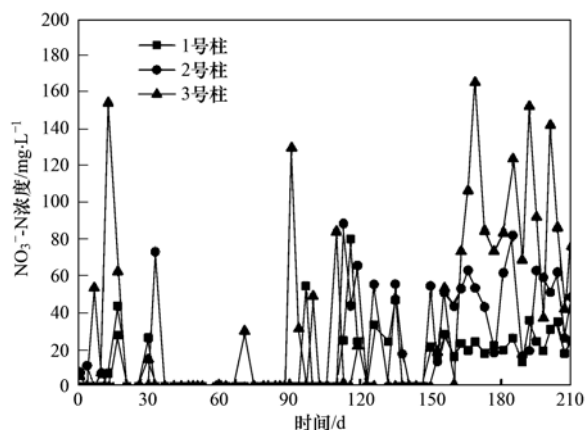


图 5 NO_3^- -N 随时间变化趋势

Fig. 5 NO_3^- -N concentration of leachate as a function of time

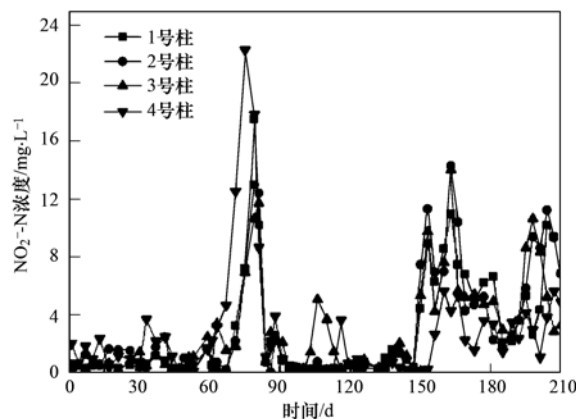


图 6 NO_2^- -N 随时间变化趋势

Fig. 6 NO_2^- -N concentration of leachate as a function of time

NO_3^- -N 未检出. 初期渗滤液出水含有 NO_3^- -N, 可能原因是: ①实验初期反硝化微生物并未大量增殖, 反硝化能力有限; ②垃圾装填过程中混杂有大量氧气, 微生物硝化反应生成了部分硝酸盐, 而反硝化又因溶解氧的限制而受到抑制, 因此导致前期有硝酸盐的溶出. 之后各反应柱在很长一段时间内出水 NO_3^- -N 未检出, 可能是由于溶解氧耗尽, 厌氧环境形成, 加之反硝化微生物大量增殖, 反硝化能力旺盛对回灌的硝酸盐氮有充足的反硝化负荷, 因此各模拟反应柱有一段时间出水硝酸盐氮未检出. 在实验后期由于反硝化碳源不足反硝化不充分导致出水含有硝酸盐. 回灌高浓度 NO_3^- -N 的 3 号柱渗滤液出水出现硝酸盐时间早于 1、2 号柱, 主要原因为 3 号柱生物反应器在垃圾降解过程中, 首先会出现碳源不足的情况, 反硝化碳源不足导致反硝化负荷降低, 因而 3 号柱出水较早出现 NO_3^- -N. 在 123 ~ 150 d, 3 号柱出水硝酸盐未检出, 原因可能为在高浓度硝酸盐回

灌条件下,3号柱反硝化微生物大量增殖,增加了反硝化负荷导致的。

NO_2^- -N 是反硝化反应的中间产物,由图 6 可以看出各模拟反应柱出水 NO_2^- -N 变化趋势基本相同。在 0~70 d 内出水较稳定,在 $ND \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动。在 71~81 d 出水亚硝酸盐有个明显的积累过程,但此时反硝化较彻底,出水基本不含硝酸盐,这是因为经场外矿化垃圾 4 号柱处理回灌的渗滤液由于硝化不彻底产生了大量的亚硝酸盐,在回灌回新鲜垃圾反应器后,硝酸盐还原酶比亚硝酸盐还原酶更容易得到电子供体,因此 NO_3^- -N 优先被还原, NO_2^- -N 还原滞后,在渗滤液流经垃圾体后随渗滤液流出^[21]。随着矿化垃圾出水稳定,亚硝酸盐降到正常水平后,各新鲜垃圾反应器出水 NO_2^- -N 又降低到较低的水平。实验后期(150 d 后)由于新鲜垃圾降解基本趋于稳定,新鲜垃圾反应器产生的含氮渗滤液在经过 4 号柱矿化垃圾反应器处理过程中,由于碳源的不足导致反硝化受抑制,造成 NO_2^- -N 的积累,同时含有 NO_2^- -N 的渗滤液在回灌回新鲜垃圾反应器后,在新鲜垃圾反应器垃圾自身降解碳源不足的情况下, NO_3^- -N 优先被还原,同时受碳源的抑制也会产生部分 NO_2^- -N, NO_2^- -N 渗滤液在回灌不同反应器后由于得不到降解,从而造成了不同程度的积累。

2.3 N_2O 产生影响因素分析

2.3.1 渗滤液 COD 及 C/N 对 N_2O 产生的影响

COD 及 C/N 比与 N_2O 变化关系见图 7~10。

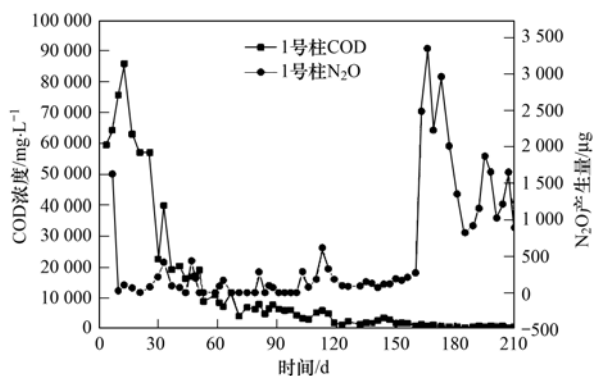


图 7 1 号柱 COD 与 N_2O 变化关系

Fig. 7 NO.1 COD concentration and N_2O production as a function of time

由图 7~10 可以看出在垃圾降解前、中时期,此时渗滤液出水 COD 较高, C/N 比大于 10, N_2O 产生量较低; 在实验后期各反应器进水 COD/NO_3^- -N < 2, 出水渗滤液 COD/TN < 10, 此时 N_2O 产生量增大。由此可以看出反硝化碳源是影响 N_2O 产生的关

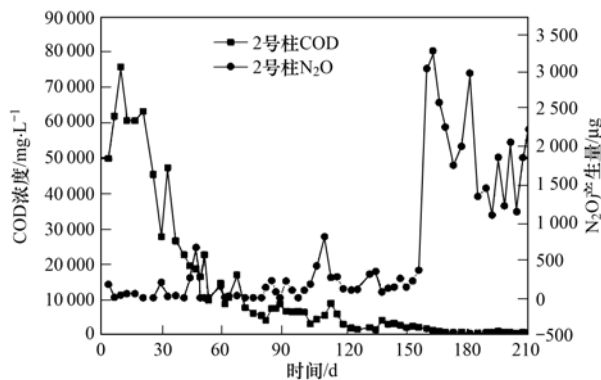


图 8 2 号柱 COD 与 N_2O 变化关系

Fig. 8 NO.2 COD concentration and N_2O production as a function of time

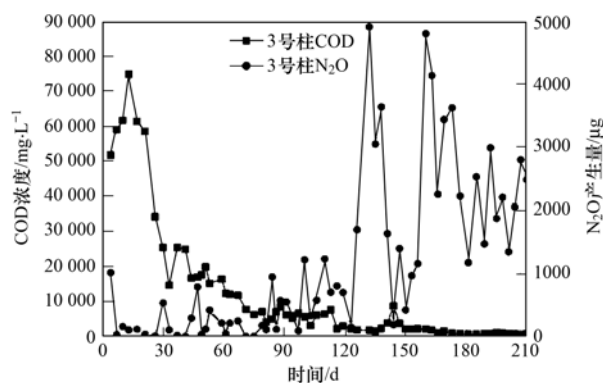


图 9 3 号柱 COD 与 N_2O 随时间变化趋势

Fig. 9 NO.3 COD concentration and N_2O production as a function of time

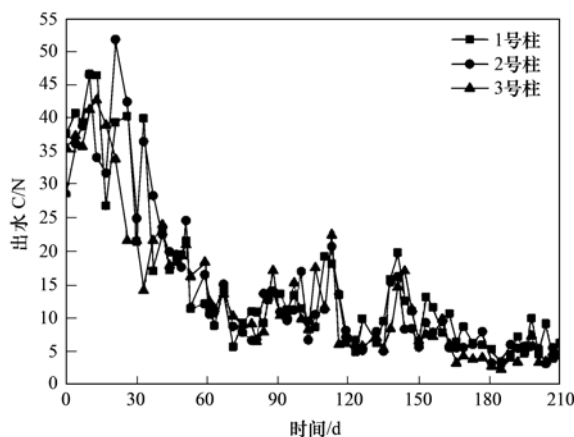


图 10 C/N 比随时间变化趋势

Fig. 10 C/N of the leachate as a function of time

键因素。在前期,垃圾降解产生的有机物充足,回灌硝酸盐在反硝化碳源充足的情况下,完全反应,中间产物 N_2O 产生量小; 在垃圾降解后期,垃圾自身有机物降解已基本完全,加之回灌渗滤液经矿化垃圾处理后可生化组分较低,反硝化碳源严重不足导致

了N₂O的大量产生. 碳源不足导致N₂O产生量增大的原因可能是在碳源不足情况下,电子供体匮乏,而N₂O还原酶竞争电子的能力最弱,因此反硝化产生的N₂O进一步还原受到抑制,从而不断积累释放;同时反硝化碳源不足也是亚硝酸盐积累的主要原因,反硝化碳源不足,反硝化不彻底,导致亚硝酸盐积累,而高浓度亚硝酸盐对氧化亚氮还原酶有毒害作用,抑制N₂O还原酶的活性.

2.3.2 NO₃⁻-N对N₂O的影响

N₂O作为反硝化的中间产物,其产生量必然和底物NO₃⁻-N浓度相关,通过图 2 可以看出,回灌 50、100、300 mg·L⁻¹的NO₃⁻-N在整个实验期间内的累积N₂O产生量为36 481、44 241、86 264 μg,表明N₂O产生量与底物浓度NO₃⁻-N呈显著正相关. 为更好地表现N₂O产生与反硝化所消耗硝酸盐量的关系,引入N₂O产率的公式:

$$f = 28 \cdot V \cdot c \cdot P \cdot R^{-1} \cdot T^{-1} \cdot M^{-1} \tag{1}$$

式中, *f* 为N₂O产率(以 N 计),单位为μg·mg⁻¹; *V* 为一个周期内的气体体积(L); *c* 为气体N₂O浓度(体积分数); *P* 为大气压力(atm); *T* 为温度(K); *M* 为消耗硝酸盐氮量,单位为 mg; *R* 为理想气体常数[0.082 L·atm·(K·mol)⁻¹]; 28 为N₂O含氮分子量(g·mol⁻¹).

通过计算得出不同生物反应器在每一个回灌周期内的N₂O单位产生率变化趋势如图 11 所示.

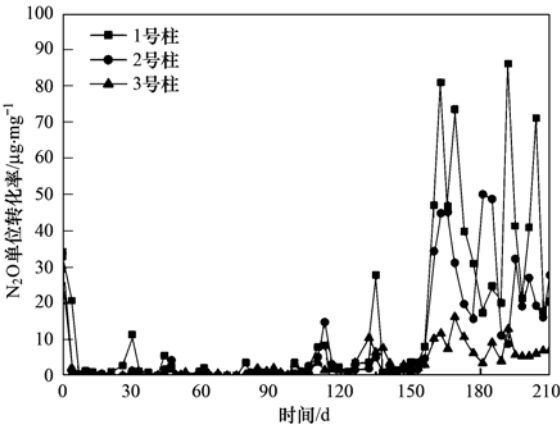


图 11 N₂O单位产生率变化趋势

Fig. 11 Unit production rate of N₂O as a function of time

由图 11 可以看出,各反应器初次回灌每消耗单位质量(mg)NO₃⁻-N产生的N₂O量(以 N 计)较大,分别为 33.0、34.0 和 27.8 μg·mg⁻¹; 在反硝化率维持在 100% 高水平的条件下(图 4,其中 1 号柱为 30 ~ 110 d, 2 号柱为 30 ~ 110 d, 3 号柱为 30 ~ 90 d),

各模拟反应柱单位N₂O产生量维持在较低水平,其平均产生率分别为 1.06、0.52、0.96 μg·mg⁻¹; 当系统反硝化率下降时,单位N₂O产生速率明显升高,此时的平均产率分别为 16.8、10.97、4.95 μg·mg⁻¹,分别是反硝化充分时期的 15.8、21.1 和 5.2 倍. 在整个实验过程中,平均单位N₂O产生量分别为 8.84、5.68、2.34 μg·mg⁻¹. 从单位N₂O产生量可以看出,反应器无论是在反硝化完全时期还是不完全时期,其与回灌硝酸盐氮量呈显著负相关.

通过数理统计分析,将硝酸盐在密闭 24 h 内完全反应和未完全反应进行分类统计分析,结果见表 4. 在整个反应过程中,回灌不同浓度的NO₃⁻-N的反应柱,其N₂O转化率存在差异,N₂O转化率与连续回灌NO₃⁻-N浓度呈负相关. 此外,当回灌NO₃⁻-N在 24 h 内完全反应时,N₂O转化率要明显低于未完全反应时的转化率.

表 4 N₂O产生量及转化率

Table 4 Production and conversion ratio of N ₂ O			
序号	分类	N ₂ O-N 产生量 /mg	N ₂ O-N 转化率 /%
1 号柱	整个过程 (<i>n</i> = 65)	23.22	8.84
	完全反应 (<i>n</i> = 36)	5.04	1.87
	不完全反应 (<i>n</i> = 29)	18.18	18.76
2 号柱	整个过程 (<i>n</i> = 65)	28.15	5.68
	完全反应 (<i>n</i> = 35)	3.00	0.57
	不完全反应 (<i>n</i> = 30)	25.16	10.1
3 号柱	整个过程 (<i>n</i> = 65)	54.90	2.34
	完全反应 (<i>n</i> = 34)	7.80	0.51
	不完全反应 (<i>n</i> = 31)	47.1	3.67

无论是从消耗单位NO₃⁻-N的N₂O产率,还是统计分析得出的结果都表明N₂O产生量与连续回灌的NO₃⁻-N量呈显著负相关,原因可能是长期回灌高浓度的硝酸盐,模拟反应柱垃圾堆体中反硝化微生物数量差异引起的. Price 等^[22]研究结果表明,添加硝酸盐的垃圾堆体反硝化微生物数量比未添加硝酸盐的堆体高 5 个数量级. 长期连续回灌高浓度的硝酸盐氮的反应器反硝化菌增殖迅速,反硝化菌数量多为优势菌群,垃圾堆体降解主要以反硝化为主,反硝化进行较充分,在前期条件适宜的情况下反硝化中间产物N₂O产生量及转化率较小. 而回灌低浓度的硝酸盐的反应器,垃圾堆体主要微生物以厌氧发酵菌为主,反硝化微生物数量少,持续回灌NO₃⁻-N渗滤液,在前期条件适宜的情况下,由于反硝化微生物与其他厌氧微生物的竞争作用不明显, N₂O产生量较低,但转化率相对较高. 而在后期反硝化不彻底,

N_2O 产生量及转化率出现了较大幅度的增长,主要是由于反硝化碳源不足造成的。在后期,垃圾渗滤液出水 COD 在 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,在有限的碳源条件下,不同回灌浓度的反应器内优先起作用的微生物不同,高浓度 NO_3^- -N 回灌的 3 号柱,反硝化微生物在有限碳源的竞争中处于优势地位,优先进行反硝化反应,反硝化反应进行相对彻底,因而消耗单位质量 NO_3^- -N 产生的 N_2O 低。而回灌低浓度的 1 号和 2 号柱恰恰相反,由于回灌浓度低,反硝化反应在整个过程中不是主要的反应。在后期碳源不足的情况下,反硝化微生物对碳源的竞争处于不利地位,从而导致反硝化不彻底,导致 N_2O 相对产生量偏高。

3 结论

(1) 回灌不同浓度硝酸盐,生物反应器填埋场在垃圾稳定化过程中 N_2O 产生具有波动性。在垃圾降解反硝化碳源充足的情况下,反硝化产生的 N_2O 浓度较低,波动性不大。在垃圾降解反硝化碳源不足的情况下,反硝化不彻底导致 N_2O 大量产生。在整个垃圾稳定化过程中,累积 N_2O 产生量与硝酸盐浓度呈正比,但单位反硝化产生的 N_2O 量及 N_2O 转化率与回灌硝酸盐呈反比。

(2) 在垃圾稳定化过程中, N_2O 的产生归根结底是反硝化底物硝酸盐和反硝化碳源作用的结果。在连续回灌相同浓度硝酸盐氮的情况下,反硝化碳源是影响 N_2O 产生的主要因素。由此在实际填埋过程中对垃圾已趋于稳定化的填埋场可通过覆盖新垃圾层,补充新鲜渗滤液等措施提高 C/N 比以减少温室气体 N_2O 产生。

参考文献:

- [1] 韩志勇, 刘丹, 李启彬, 等. 厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3873-3880.
- [2] 薛玉伟, 刘建国, 岳东北, 等. 填埋方式对生活垃圾填埋处理产物及稳定性的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, **52**(2): 216-222.
- [3] 王亚楠, 孙英杰, 吴昊, 等. 厌氧与准好氧生物反应器填埋场渗滤液水质变化及脱氮特性对比研究[J]. 环境污染与防治, 2013, **35**(10): 5-11.
- [4] Sun F Q, Sun B, Li Q, *et al.* Pilot-scale nitrogen removal from leachate by ex situ nitrification and in situ denitrification in a landfill bioreactor[J]. Chemosphere, 2014, **101**: 77-85.
- [5] 霍守亮, 席北斗, 樊石磊, 等. 序批式生物反应器填埋场的脱氮特性[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(4): 106-110.
- [6] 何若, 沈东升, 戴海广, 等. 生物反应器填埋场系统中城市生活垃圾原位脱氮研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 604-608.
- [7] Huo S L, Xi B D, Yu H C, *et al.* In situ simultaneous organics and nitrogen removal from recycled landfill leachate using an anaerobic-aerobic process [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(14): 6456-6463.
- [8] He P J, Shao L M, Guo H D, *et al.* Nitrogen removal from recycled landfill leachate by ex-situ nitrification and in situ denitrification [J]. Waste Management, 2006, **26**(8): 838-845.
- [9] Delgado J A, Mosier A R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux[J]. Journal of Environmental Quality, 1996, **25**(5): 1105-1111.
- [10] Harborth P, Fuß R, Münnich K, *et al.* Spatial variability of nitrous oxide and methane emissions from an MBT landfill in operation: Strong N_2O hotspots at the working face[J]. Waste Management, 2013, **33**(10): 2099-2107.
- [11] Powell J, Jain P, Kim H, *et al.* Changes in landfill gas quality as a result of controlled air injection[J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(3): 1029-1034.
- [12] Rinne J, Pihlatie M, Lohila A, *et al.* Nitrous oxide emissions from a municipal landfill [J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(20): 7790-7793.
- [13] 何品晶, 陈森, 张后虎, 等. 垃圾填埋场渗滤液灌溉及覆土土质对填埋场氧化亚氮释放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(7): 1591-1596.
- [14] 邵立明, 孔祥锐, 张后虎, 等. 渗滤液负荷和灌溉深度对土壤氧化亚氮与二氧化碳释放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(10): 2265-2270.
- [15] 张厚虎, 何品晶, 瞿贤, 等. 卫生和生物反应器填埋场夏季 N_2O 释放的研究[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(3): 108-112.
- [16] 韩志勇, 刘丹, 李启彬. 厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 2118-2124.
- [17] Tallec G, Bureau C, Peu P, *et al.* Impact of nitrate-enhanced leachate recirculation on gaseous releases from a landfill bioreactor cell[J]. Waste Management, 2009, **29**(7): 2078-2084.
- [18] Vigneron V, Ponthieua M, Barina G, *et al.* Nitrate and nitrite injection during municipal solid waste anaerobic biodegradation [J]. Waste Management, 2007, **27**(6): 778-791.
- [19] Chen Y X, Wu S W, Wu W X, *et al.* Denitrification capacity of bioreactors filled with refuse at different landfill ages[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **172**(1): 159-165.
- [20] Sun Y J, Wang Y N, Sun X J, *et al.* Production characteristics of N_2O during stabilization of municipal solid waste in an intermittent aerated semi-aerobic bioreactor landfill [J]. Waste Management, 2013, **33**(12): 2729-2736.
- [21] Rivett M O, Buss S R, Morgan P, *et al.* Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes [J]. Water Research, 2008, **42**(16): 4215-4232.
- [22] Price G A, Barlaz M A, Hater G R. Nitrogen management in bioreactor landfills[J]. Waste Management, 2003, **23**(7): 675-688.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI ^{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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