

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

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

进水渗滤液总氮和 BOD_5/TN 对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响

杨盈盈, 陈奕, 李明杰, 谢冰*

(华东师范大学生态与环境科学学院, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241)

摘要: 晚期垃圾渗滤液具有氨氮浓度较高、碳氮比(C/N)较低和可生化性差的特点, 生物脱氮较困难. 本文研究了改变进水总氮负荷和 BOD_5/TN 比值对填埋场生物反应器处理垃圾渗滤液的脱氮效果的影响. 结果表明, 总氮负荷为 $15 \sim 25 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的范围内时, 总氮去除负荷稳定为 $10 \sim 12 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 但是总氮去除率随着负荷的增加从 67.7% 下降至 60.2%, 说明在一定范围总氮负荷的增加会降低总氮去除率, 但不会影响去除负荷. 当改变进水的 BOD_5/TN 从 0.3 提高到 0.4 后, 总氮负荷为 $9 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时的厌氧、准好氧反应器, 总氮去除率可从 79.9% 分别提高到 89.9% 和 86.2%, 表明提高 BOD_5/TN 能够有效促进填埋场生物反应器对总氮污染物的去除, 并且厌氧条件下效果更好. 脱氮途径分析表明, 填埋场生物反应器中厌氧氨氧化和反硝化作用可以协同脱氮.

关键词: 填埋场生物反应器; 晚期垃圾渗滤液; 总氮负荷; BOD_5/TN ; 脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1412-05 DOI: 10.13227/j.hjkk.2015.04.038

Effects of Total Nitrogen and BOD_5/TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor

YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, XIE Bing*

(Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, School of Ecology and Environment Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Mature landfill leachate, featured with high ammonium (NH_4^+) content and low biodegrade ability (low BOD_5/COD ratio), is hard to be treated. This study mainly focused on the effects of influent TN (total nitrogen) loading and BOD_5/TN ratios on the nitrogen removal efficiency of landfill leachate by landfill bioreactors. The results showed that when the influent total nitrogen loading was in the range of $15 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ to $25 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, the TN removal loading could remain stable between $10 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ and $12 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, while the TN removal efficiency decreased from 67.7% to 60.2% with the increasing loading. Therefore, TN loading shocks would lower the bioreactor's TN removal rate, but would not affect its TN removal loading. When the influent BOD_5/TN ratio was increased from 0.3 to 0.4 and the TN loading was controlled at $9 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, the TN removal rates were increased from 79.9% to 89.9% and 86.2% in anaerobic and aerobic, respectively. This implied that properly enhancing BOD_5/TN ratio could significantly increase the TN removal efficiency of the bioreactor, and the effect was more significant under anaerobic condition. Analysis of nitrogen removal pathways showed that denitrification and anammox could take place synergistically in landfill bioreactor.

Key words: landfill bioreactor; mature landfill leachate; TN loading; BOD_5/TN ; nitrogen removal

填埋场生物反应器 (landfill bioreactor) 是一种新型的原位垃圾渗滤液处理技术, 这种技术将垃圾填埋场比拟成一座巨大的生物反应器, 通过技术手段调控填埋场内生物降解作用, 对渗滤液中的污染物, 包括氮污染物都具有理想的去除效果^[1]. 垃圾渗滤液是固体垃圾在填埋过程中产生的一种成分复杂的废水, 其中含有大量的有机化合物、营养物质、矿物质和重金属^[2]. 而晚期成熟垃圾渗滤液 (mature landfill leachate) 中的大部分有机物被降解, 剩余的为难降解有机物及无机还原物质, 较难处理^[3], 且由于填埋场产生的渗滤液水质水量变化较

大^[4], 因此要求处理垃圾渗滤液的原位生物反应器具有一定的耐冲击负荷能力. 近年来, 随着以厌氧氨氧化反应为代表的新型脱氮途径的发现, 解决了传统硝化反硝化碳源不足的束缚, 提高了脱氮效率的同时降低了处理成本, 在以高氨氮、低碳氮比为特征的成熟垃圾渗滤液处理中越来越受到重视^[5]. 本课题组已有的研究表明, 在填埋场生物反应器处

收稿日期: 2014-09-14; 修订日期: 2014-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31370510, 31411130123); 上海市科委国际合作项目 (13520720600)

作者简介: 杨盈盈 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染控制技术, E-mail: yingying9931@163.com

* 通讯联系人, E-mail: bxie@des.ecnu.edu.cn

理垃圾渗滤液的过程中,存在厌氧氨氧化脱氮途径^[6, 7];但是对于运行条件和水质变化对成熟渗滤液脱氮及其机制的研究鲜有报道。

本研究在实验室条件下构建模拟填埋场生物反应器,通过分析不同总氮负荷和水质条件下总氮去除率的变化,探讨填埋场生物反应器耐负荷冲击能力,研究不同 BOD₅/TN 对填埋场生物反应器脱氮处理的影响并进行脱氮途径分析,以期为填埋场生物反应器的优化运行提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与方法

本试验构建的填埋场生物反应器装置(图 1)为有机玻璃圆柱形反应器,内径 16 cm,高 100 cm,有效容积 20 L。反应器底部设有出水阀,采用带有定时功能的蠕动泵进水。为研究总氮负荷对填埋场生物反应器脱氮影响,在实验室条件下模拟厌氧氨氧化条件稳定运行 2 a 以上的反应器顶部设置液封厌氧,一个反应器按梯度运行 3 个不同的总氮工况。为研究不同 BOD₅/TN 的影响,设置了 A、B、C 这 3 个平行运行的反应器,A、B 反应器设置液封厌氧运行,C 反应器上端敞开兼氧运行,A、B、C 反应器经数月的驯化,出水水质稳定后提取数据。

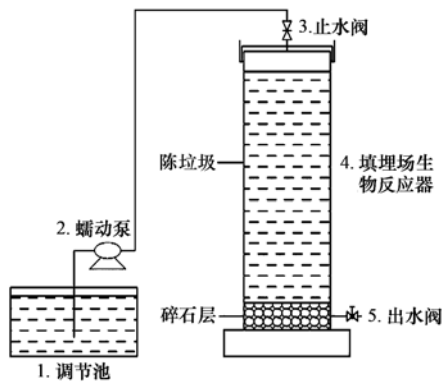


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

填埋场生物反应器底部填有 5 cm 左右的碎石子防治出水口堵塞,其余部分均填装老港垃圾填埋场填埋龄 10 a 以上的陈垃圾,陈垃圾性状见文献[8],反应器放置 25℃ 环境下遮光运行。

1.2 渗滤液原水水质

第一部分试验(试验一)研究不同总氮负荷对氮污染物去除效果的影响。所用进水由上海老港生活垃圾填埋场调节池出水调节而成。第二部分试验(试验二)研究不同 BOD₅/TN 下反应器的脱氮效

果。BOD₅/TN 是通过加入上海市某垃圾中转站新鲜渗滤液实现调节。两部分试验采用的渗滤液原水水质见表 1。为研究反应器中厌氧氨氧化作用,在反应器进水中投加亚硝酸盐,使得进水亚硝氮与氨氮浓度比例保持在 1:1~1:1.32 之间。

表 1 渗滤液原水水质

Table 1 Water quality of the leachate in this study				
试验	COD/mg·L ⁻¹	BOD/mg·L ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹
一	2 000~2 600	340~520	1 100~1 350	850~1 100
二	856~896	140~180	580~620	289~297

1.3 试验方法

1.3.1 试验运行方式

试验一研究不同总氮负荷对反应器处理效果的影响。设计工况如下。工况 1:进水总氮浓度 600 mg·L⁻¹左右,水力负荷 25 L·(m³·d)⁻¹,总氮负荷 15.4 g·(m³·d)⁻¹。工况 2:进水总氮浓度 800 mg·L⁻¹左右,水力负荷 25 L·(m³·d)⁻¹,总氮负荷 20.1 g·(m³·d)⁻¹。工况 3:进水总氮浓度 600 mg·L⁻¹左右,水力负荷 35 mg·L⁻¹,总氮负荷 22.0 g·(m³·d)⁻¹。

试验二研究不同 BOD₅/TN 对反应器处理效果的影响。设计工况如下:反应器 A、B 顶部液封,为厌氧状态运行;反应器 C 上端敞开,为准好氧运行。其中,A 反应器的 BOD₅/TN 为 0.3,B 和 C 进水 BOD₅/TN 提高至 0.4。A、B、C 反应器进水水力负荷相同,均为 15 L·(m³·d)⁻¹,总氮负荷 9 g·(m³·d)⁻¹。试验一、二进水时间均为 0.5 h。

1.3.2 分析方法

两部分试验运行期间,进出水水质指标一周检测两次。具体指标有总氮(过硫酸钾氧化-紫外分光光度法)、氨氮(纳氏试剂比色法)、硝氮(酚二磺酸分光光度法)、亚硝氮[N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法]、COD(重铬酸钾法)、BOD₅(稀释与接种法)等,具体分析方法参照文献[9]。

2 结果与分析

2.1 总氮负荷对氮污染物去除的影响

如图 2 所示,工况 1 总氮负荷为 15.4 g·(m³·d)⁻¹,其运行期间出水总氮浓度平均为 206.9 mg·L⁻¹,去除率为 67.7%;工况 2 总氮负荷提升至 20.1 g·(m³·d)⁻¹,出水总氮浓度前期与工况 1 相差不大,12 d 后升高至 350.6 mg·L⁻¹,去除率下降至 60.2%;工况 3 总氮负荷上升至 22 g·(m³·d)⁻¹,其出水总氮平均浓度为 349.7

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总氮去除率为 45.3%。3 个工况中工况 1 去除率最高, 其次为工况 2、工况 3, 说明提高进水总氮负荷会降低其去除率。

另外, 工况 1、2、3 的总氮去除负荷分别为 10.8、12.2、10.1 $\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 可以得出, 总氮负荷提高的工况 2、3 去除总氮的负荷(绝对量)平均值并没有下降, 甚至工况 2 还有所上升。

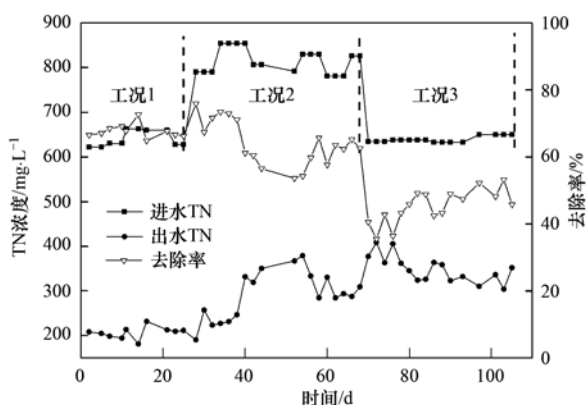


图2 不同进水总氮负荷下出水总氮变化情况

Fig. 2 Variation of effluent TN under various total nitrogen loading

工况 1 进水亚硝氮平均浓度 282 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水亚硝氮平均浓度 71 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水氨氮平均浓度为 110 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 工况 2 进水亚硝氮平均浓度 401 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水亚硝氮平均浓度 66 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水氨氮平均浓度为 220 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 工况 3 进水亚硝氮平均浓度 307 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水亚硝氮平均浓度 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水氨氮浓度为 175 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 图 3 为不同总氮负荷下亚硝氮氨氮去除比, 工况 1 中亚硝氮氨氮去除比为 1 左右; 工况 2 中去除比波动较大且比值大多高于 2.5, 最高可到 3.8; 工况 3 去除比比值在 1.3 左右, 低于工况 2 却高于工况 1。

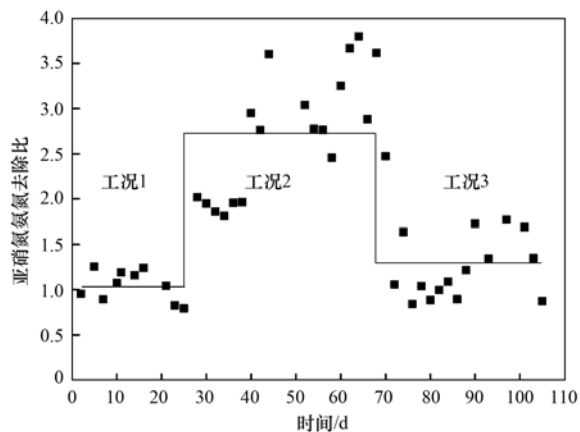


图3 不同总氮负荷下亚硝氮氨氮去除比

Fig. 3 Removal ratio of nitrite nitrogen and ammonia under various total nitrogen loading

2.2 不同 BOD_5/TN 对氮污染物去除的影响

图 4 为不同进水 BOD_5/TN 时 3 个反应器总氮去除情况。其中 A、B 反应器厌氧运行, B 提高了进水 BOD_5/TN , C 反应器与 B 的进水相同, 但是准好氧运行。3 个反应器的进水总氮浓度范围为 612 ~ 620 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应器 A 的出水总氮浓度范围为 108 ~ 131 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 79.9%; B、C 分别为 42 ~ 90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 64 ~ 109 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率为 89.9%、86.1%。3 个反应器中, B 的去除率最高, 其次为反应器 C, 反应器 A 最低, A、B、C 的去量在 $P < 0.05$ 的水平上有显著差异。

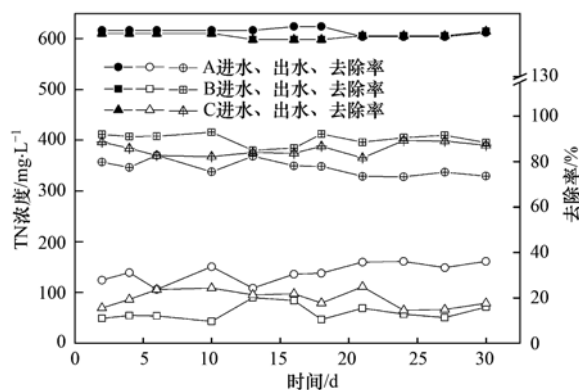


图4 不同 BOD_5/TN 和运行条件下出水总氮变化情况

Fig. 4 Variation of effluent TN under various BOD_5/TN and operating conditions

A、B、C 反应器进水亚硝氮均为 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。A 反应器的出水亚硝氮范围为 14 ~ 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水氨氮为 80 ~ 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; B、C 反应器出水亚硝氮范围均为 2 ~ 6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, B 反应器出水氨氮为 20 ~ 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, C 反应器出水氨氮为 40 ~ 60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。图 5 为上述反应器 A、B、C 的亚硝氮氨氮去除比, 从中可以看出, A 反应器的去除比为 1.38 ~ 1.65, 平均值比厌氧氨氧化理论值的 1.32 略高; B 反应器的去除比为 1.12 ~ 1.4, 平均值比 1.32 略低; 而 C 反应器的去除比为 1.18 ~ 1.45, 平均值与 1.32 最

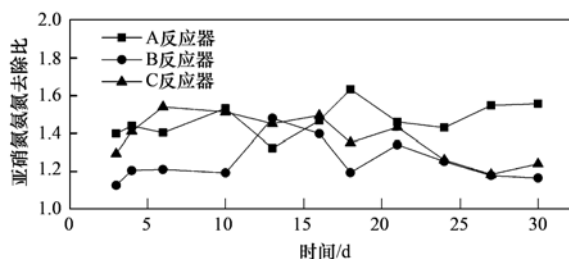


图5 不同 BOD_5/TN 和运行条件下亚硝氮与氨氮去除比值

Fig. 5 Removal ratio of nitrite nitrogen and ammonia under various BOD_5/TN and operating conditions

接近. 3 个反应器中, B 的亚硝氮氨氮去除比低于反应器 C, B、C 的去除比在 $P < 0.05$ 的水平上存在显著差异; 同时, B 的亚硝氮氨氮去除比也低于反应器 A, B、A 的去除比在 $P < 0.05$ 的水平上存在显著差异.

3 讨论

3.1 不同总氮负荷和有机物浓度下氮污染物去除分析

从图 2 可以看出, 反应器的总氮负荷增加后, 出水总氮浓度明显上升, 出水水质恶化, 去除率下降. 与工况 1 对比, 工况 2 平均去除率下降 7.5%, 工况 3 平均去除率下降 22.5%, 其中工况 2 去除率下降较少, 是因为工况 2 是通过增加进水总氮浓度的方式改变总氮负荷, 没有增加进水负荷对反应器内微生物数量造成冲击^[10]. 因此, 从出水总氮浓度和去除率方面看, 无论增加进水浓度还是提高进水量增加总氮负荷, 都会导致填埋场生物反应器出水水质的恶化^[11].

但是, 总氮负荷提高后, 工况 2、3 总氮去除的绝对量并没有下降, 甚至工况 2 还略有上升. 即, 总氮负荷为 $15.4 \sim 22.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 范围内, 增加进水总氮负荷, 尽管去除率会下降, 总氮去除负荷量却可以保持稳定, 表明反应器系统具有一定的抵御总氮负荷冲击的能力, 原因可能是填埋场生物反应器内存在多种脱氮途径, 微生物群落结构丰富, 能够抵御一定的环境冲击^[12].

由图 3 可以看出, 增加 BOD_5/TN , 总氮的去除率有一定的提高; 同样 BOD_5/TN 条件下, 厌氧反应器的脱氮效果比准好氧要高, 说明 BOD_5/TN 的提高能够促进填埋场生物反应器对总氮污染物的去除, 并且厌氧条件下效果更好, 这符合废水生物处理反硝化反应的特性^[13]. 虽然有厌氧氨氧化等其他的脱氮途径, 但是在有机物充足的情况下, 反硝化过程是优先的^[14, 15]. 因此, 在一定的范围内, 提高渗滤液进水的 BOD_5/TN 可以增强反硝化反应, 提高填埋场反应器的总氮去除率^[16].

3.2 氮污染物去除途径分析

废水中氨氮的去除途径有氨挥发、硝化反应和厌氧氨氧化反应等. 晚期垃圾渗滤液的 pH 值为 7.8, 通过挥发损失的氨氮可以忽略不计^[17, 18]; 鉴于反硝化过程和厌氧氨氧化过程不同的底物代谢情况, 通过分析反应器中亚硝氮和氨氮去除比来推测反应器的脱氮途径^[19]. 在本试验中, 由于进水总氮

是由氨氮和亚硝氮构成, 在第二部分中, 亚硝氮的去除量大于 $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 根据 1 g 亚硝氮进行反硝化需要消耗 $1.72 \text{ g } BOD_5$ 计算^[20], 考虑到进水 BOD_5 只有 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即使全部的 BOD_5 用来进行反硝化过程, 最多也只能去除 50% 亚硝氮, 何况反应器内微生物的合成代谢也需要消耗部分 BOD_5 . 所以, 反应器对渗滤液中氮的去除不可能只有反硝化这一条途径. 以往的研究表明, 填埋场反应器中存在着厌氧氨氧化过程, 并且对总氮的去除有一定的贡献^[21].

研究认为, 厌氧氨氧化过程亚硝氮氨氮的理论去除比值为 1.32, 反应器在工况 1 下的亚硝氮氨氮污染物去除比值在 1:10 ~ 1.52, 接近厌氧氨氧化理论值, 可以认为在这两个工况中存在厌氧氨氧化途径, 在本课题组以往的研究中均有证明^[23]. 工况 2 中, 亚硝氮氨氮的去除比值较大, 最高时达到 3.8, 最低时为 1.86, 比文献报道的 1.32 大为增加. 说明反应器中亚硝氮的转化较氨氮的转化量大. 可能是因为提高进水的总氮负荷, 进水中较高的亚硝氮抑制了亚硝化作用, 使得氨氮的转化率降低 (进水中含有溶解氧), 同时, 过高浓度的亚硝氮浓度也会抑制厌氧氨氧化菌^[24, 25], 导致亚硝氮氨氮去除比提高. 进入工况 3, 其负荷和工况 2 接近, 但是进水水力负荷增加, 水力冲刷作用使得总氮的去除率下降, 尽管其亚硝氮比氨氮数值与理论值更接近.

试验二中 3 个反应器中的亚硝氮与氨氮的比值均在 1.2 ~ 1.5 之间波动, 反应器 B 相比 A 的亚硝氮与氨氮去除比较低, 说明在亚硝氮去除的同时, 氨氮也有较大的消减. 其可能的原因是随着有机物浓度的升高, 反硝化作用增强, 同时也增加了其它氨氮利用菌的如自养硝化和厌氧氨氧化菌的作用, 尽管亚硝酸盐消耗殆尽, 氨氮也可以通过其他代谢途径降解, 所以 B 反应器的氨氮的去除绝对量也能增加, 从而使得反应器 B 比 A 的亚硝氮与氨氮比值更低. 另外, 准好氧反应器 C 的去除比大于厌氧反应器 B 的原因可能是, 反应器 C 为准好氧运行状态, 反应器顶部开放, 反应器表层的氨氧化细菌会利用空气中的氧硝化部分氨氮成为亚硝氮, 而整个试验阶段出水硝氮含量均低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 故亚硝氮与氨氮比值比 B 要高, 表明准好氧没有厌氧条件有利于反应器的反硝化和对总氮的去除. 以上亚硝氮与氨氮分析说明了, 反应器在反硝化脱氮过程中存在厌氧氨氧化的脱氮途径.

综上所述, 在填埋场生物反应器处理晚期渗滤

液的过程中,进水中如果存在一定浓度的亚硝酸盐,反应器中的脱氮作用主要是反硝化,厌氧氨氧化作用可以协同脱氮。

4 结论

(1)稳定运行的填埋场厌氧生物反应器,进水总氮负荷从 $15.4 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 调整到 $22.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 后,总氮去除率随着负荷的增加略有降低,但是未影响反应器的总氮去除负荷。

(2)当进水 BOD_5/TN 从 0.3 提高到 0.4 后,厌氧反应器总氮去除率从 79.9% 提高至 89.9%,同样进水负荷,准好氧反应器的总氮去除率提高至 86.2%。说明有机负荷的提高能够促进填埋场生物反应器反硝化脱氮。

(3)反应器亚硝氮氨氮去除比在 1.12 ~ 1.6 之间,推测主要脱氮途径为反硝化,厌氧氨氧化可与其共存脱氮。

参考文献:

- [1] Berge N D, Reinhart D R, Dietz J, *et al.* In situ ammonia removal in bioreactor landfill leachate[J]. *Waste Management*, 2006, **26**(4): 334-343.
- [2] 刘婷,陈朱蕾,唐素琴,等. 不同填埋时间、不同季节的垃圾渗滤液生物毒性[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 541-546.
- [3] Xie B, Lü Z, Hu C, *et al.* Nitrogen removal through different pathways in an aged refuse bioreactor treating mature landfill leachate[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, **97**(20): 9225-9234.
- [4] Ragle N, Kissel J, Ongerth J E, *et al.* Composition and variability of leachate from recent and aged areas within a municipal landfill[J]. *Water Environment Research*, 1995, **67**(2): 238-243.
- [5] Hippen A, Helmer C, Kunst S, *et al.* Six years' practical experience with aerobic/anoxic deammonification in biofilm systems[J]. *Water Science & Technology*, 2001, **44**(2-3): 39-48.
- [6] Wang C, Zhao Y C, Xie B, *et al.* Nitrogen removal pathway of anaerobic ammonium oxidation in on-site aged refuse bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **159**: 266-271.
- [7] Hassan M, Xie B. Use of aged refuse-based bioreactor/biofilter for landfill leachate treatment[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **98**(15): 6543-6553.
- [8] 杨学志. 生化+高级氧化技术对晚期垃圾渗滤液中污染物去除效果研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [10] 何义亮,吴志超,李春杰,等. 厌氧膜生物反应器处理高浓度食品废水的应用[J]. *环境科学*, 1999, **20**(6): 53-55.
- [11] 吕绛. ANAMMOX 与反硝化协同反应器运行特性及处理垃圾渗滤液研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [12] 张斌,孙宝盛,刘慧娜,等. 处理不同废水 MBR 系统中微生物群落结构的比较[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 44-49.
- [13] 谢冰,徐亚同. 废水生物处理原理和方法[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- [14] Jetten M S M, Strous M, van de Pas-Schoonen K T, *et al.* The anaerobic oxidation of ammonium [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 1998, **22**(5): 421-437.
- [15] Molinuevo B, García M C, Karakashev D, *et al.* Anammox for ammonia removal from pig manure effluents: effect of organic matter content on process performance [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(7): 2171-2175.
- [16] 杨洋,左剑恶,沈平,等. 温度、pH 值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 691-695.
- [17] Jayaweera G R, Mikkelsen D S. Assessment of ammonia volatilization from flooded soil systems [J]. *Advances in Agronomy*, 1991, **45**(3): 303-356.
- [18] Vymazal J, Brix H, Cooper P F, *et al.* Removal mechanisms and types of constructed wetlands [M]. Europe Leiden: Backhuys Publishers, 1998. 17-66.
- [19] 周少奇,张鸿郭. 垃圾渗滤液厌氧氨氧化与反硝化的协同作用[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2008, **36**(3): 73-76.
- [20] 叶建锋. 废水生物脱氮处理新技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [21] Wang C, Xie B, Han L, *et al.* Study of anaerobic ammonium oxidation bacterial community in the aged refuse bioreactor with 16S rRNA gene library technique[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **145**: 65-70.
- [22] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [23] 王洁. 高通量测序等分子生物学技术研究填埋场生物反应器脱氮微生物群落变化[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [24] Jin R C, Yang G F, Yu J J, *et al.* The inhibition of the Anammox process: A review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **197**: 67-79.
- [25] 张树德,李捷,杨宏,等. 亚硝酸盐对厌氧氨氧化的影响研究[J]. *环境污染与防治*. 2005, **27**(5): 324-326.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行