

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张杨, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅铋同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)	

内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响

何正坤¹, 宋博宇^{2,3}, 朱南文¹, 董军^{3*}

(1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 轻工业环境保护研究所, 北京 100089; 3. 吉林大学环境与资源学院, 地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130021)

摘要: 为探究内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场内环境和氮组分的长效影响, 特设矿化垃圾 + 重质碳酸钙、矿化垃圾 + 天然沸石这 2 种内环境调节层分别置入模拟反应器 R2 和 R3 中, 同时设 R1 (不含内环境调节层) 作为对照, 监测分析 390 d 内固相垃圾和渗滤液中氮组分的变化。结果表明, R1、R2 和 R3 中 pH、碱度、氧化还原电位 (Eh)、含水率 (MS) 的大小关系分别为 $\text{pH}(\text{R2}) > \text{pH}(\text{R3}) > \text{pH}(\text{R1})$ 、 $\text{碱度}(\text{R2}) > \text{碱度}(\text{R3}) > \text{碱度}(\text{R1})$ 、 $\text{Eh}(\text{R2}) < \text{Eh}(\text{R3}) < \text{Eh}(\text{R1})$ 、 $\text{MS}(\text{R3}) > \text{MS}(\text{R2}) > \text{MS}(\text{R1})$ 。R1、R2 和 R3 中垃圾全氮降解转化率为 79.2%、82.3% 和 88.5%, 氨氮为 48.3%、60.1% 和 67.7%, 硝态氮为 38.5%、44.2% 和 53.4%; 渗滤液中总氮、氨氮和硝态氮的浓度对比分别为 $\text{TN}(\text{R3}) < \text{TN}(\text{R2}) < \text{TN}(\text{R1})$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}(\text{R3}) < \text{NH}_4^+-\text{N}(\text{R1}) < \text{NH}_4^+-\text{N}(\text{R2})$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}(\text{R3}) < \text{NO}_3^--\text{N}(\text{R2}) < \text{NO}_3^--\text{N}(\text{R1})$ 。总体看来, 矿化垃圾 + 重质碳酸钙、矿化垃圾 + 天然沸石组成的内环境调节层均能长期优化内环境, 为氮的降解转化提供有利条件, 而矿化垃圾 + 天然沸石不仅能促进垃圾和渗滤液中氮组分的降解转化, 还能一定程度上控制渗滤液循环造成的氨氮累积。

关键词: 内环境; 调节层; 氮; 厌氧生物反应器填埋场; 转化

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1551-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201606046

Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills

HE Zheng-kun¹, SONG Bo-yu^{2,3}, ZHU Nan-wen¹, DONG Jun^{3*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Environmental Protection Research Institute of Light Industry, Beijing 100089, China; 3. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: To investigate the perennial effect of environment adjustment layers on the interior environment and nitrogen transformation in anaerobic bioreactor landfills, three sets of simulated anaerobic bioreactor landfills and two kinds of environment adjustment layers of mineralized refuse with heavy calcium carbonate (R2) and mineralized refuse with natural zeolites (R3) were designed and established. The degradation and transformation of nitrogen in waste and leachate had been monitored for 390 days. The results showed that, the value orders of pH, alkalinity, oxidation reduction potential and moisture content (MS) were $\text{pH}(\text{R2}) > \text{pH}(\text{R3}) > \text{pH}(\text{R1})$, $\text{alkalinity}(\text{R2}) > \text{alkalinity}(\text{R3}) > \text{alkalinity}(\text{R1})$, $\text{Eh}(\text{R2}) < \text{Eh}(\text{R3}) < \text{Eh}(\text{R1})$ and $\text{MS}(\text{R3}) > \text{MS}(\text{R2}) > \text{MS}(\text{R1})$. In R1, R2 and R3, the degradation rates of total nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen in waste were 79.2%, 82.3% and 88.5%, 48.3%, 60.1% and 67.7%, 38.5%, 44.2% and 53.4%, respectively. Concentration comparison results of total nitrogen, ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in leachate were $\text{TN}(\text{R3}) < \text{TN}(\text{R2}) < \text{TN}(\text{R1})$, $\text{NH}_4^+-\text{N}(\text{R3}) < \text{NH}_4^+-\text{N}(\text{R1}) < \text{NH}_4^+-\text{N}(\text{R2})$ and $\text{NO}_3^--\text{N}(\text{R3}) < \text{NO}_3^--\text{N}(\text{R2}) < \text{NO}_3^--\text{N}(\text{R1})$. Additionally, both of mineralized refuse with heavy calcium carbonate and mineralized refuse with natural zeolites could long-term adjust and optimize the interior environment of anaerobic bioreactor landfills for the degradation and conversion of nitrogen. Mineralized waste with natural zeolite could not only promote the degradation and transformation of nitrogen components in waste and leachate, but also control the accumulation of ammonia nitrogen through leachate recirculation.

Key words: interior environment; environment adjustment layers; nitrogen; anaerobic bioreactor landfill; transformation

目前大量的城市生活垃圾主要通过填埋处理^[1], 厌氧生物反应器填埋场能促进垃圾降解^[2], 去除渗滤液中污染物^[3], 加速填埋场的稳定化^[4], 因此得到快速的发展和运用^[5]。氮是垃圾的重要组分^[6], 填埋场中垃圾所含的有机氮经水解氨化等作用转化为氨氮^[7]。在厌氧生物反应器中, 仅有小部分氨氮通过挥发为 NH_3 或经厌氧氨氧化作用生成 N_2 等方式转化去除^[8], 其余大部分仍留在垃圾体和

渗滤液中^[9], 因此, 在渗滤液持续回灌或循环过程中易造成氨氮累积^[10]。大量的氨氮将会和积累的有机酸一起破坏填埋场中的内环境^[11], 抑制微生物

收稿日期: 2016-06-08; 修订日期: 2016-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272253); 环境保护公益性行业科研专项 (2011467010)

作者简介: 何正坤 (1986 ~), 男, 博士, 主要研究方向为固体废物处理与处置, E-mail: hzkunwo@163.com

* 通信作者, E-mail: dongjun@jlu.edu.cn

对垃圾的降解^[12]。一些研究通过添加碱性物质^[13]、提供微氧^[14]和对渗滤液进行异位硝化处理后回灌^[15]等措施来缓解有机酸和氨氮的累积,改善厌氧填埋场的内环境,促进氮的转化和去除,取得了一定的效果。然而这些措施操作较复杂,在持续性和经济实用性等方面也并不理想。为长效、简单地对内环境调节和优化,本研究在固相垃圾体中构建内环境调节层,重点探讨不同内环境调节层对厌氧生物

反应器填埋场中氮转化去除的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 垃圾来源及性质

垃圾采自长春市垃圾中转站,去除金属、橡胶、玻璃和陶瓷等不可降解物质,破碎至 2 cm。预处理后垃圾具体组成见表 1。

表 1 垃圾初始物理组成

Table 1 Initial physical composition of refuse

组成	餐厨	果皮	纸	木材	纺织	沙土	其它混合类
湿重质量分数/%	25.82	35.60	26.70	1.10	2.53	2.31	5.93

垃圾含水率 (moisture content, MS) 为 $(34.97\% \pm 1.33\%)$, 全氮 (total nitrogen of solid waste, TNs) 质量分数为 $(19200.0 \pm 300.0) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)_s 为 $(89.7 \pm 2.8) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)_s 为 $(51.3 \pm 0.8) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.1.2 垃圾渗滤液来源及性质

垃圾渗滤液取自长春市蘑菇沟垃圾填埋场,垃圾填埋龄在 2 a 以下,具体性质见表 2。

1.1.3 内环境调节层材料

采用矿化垃圾、重质碳酸钙和天然沸石作为内

环境调节层材料,具体性质见表 3。

表 2 垃圾渗滤液初始理化性质¹⁾

Table 2 Initial physical and chemical properties of leachate

组分	值	组分	值
pH	5.17	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	812.0
Eh/mV	-189.7	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	381.7
碱度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	7131.8	$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.0
TOC/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	5985.0	$\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.2

1) 渗滤液中总氮、氨氮、硝态氮和亚硝态氮分别表示为 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$;固相垃圾中全氮氨氮、硝态氮和亚硝态氮分别表示为 TN_s、($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)_s、($\text{NO}_3^- - \text{N}$)_s和($\text{NO}_2^- - \text{N}$)_s。

表 3 内环境调节层材料的性质

Table 3 Characteristics of interior environment adjustment layer materials

材料	粒径 /mm	含水率 /%	TN _s / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) _s / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	($\text{NO}_3^- - \text{N}$) _s / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH
矿化垃圾	0.50~2.00	22.3	1300.0	17.6	27.1	8.35
重质碳酸钙	0.50~2.00	0.8	0.0	0.0	0.0	10.62
天然沸石	0.50~2.00	1.2	0.0	0.0	0.0	7.23

1.2 实验设计

1.2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,反应器为有机玻璃槽(40 cm × 30 cm × 40 cm)。垃圾分两层装填到反应器中,单层垃圾质量为 9 kg,高度为 14 cm,密度约为 $550 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。两层垃圾之间为内环境调节层,厚度为 2 cm。R2 内环境控制层为 1 kg 矿化垃圾 + 1 kg 重质碳酸钙,R3 为 1 kg 矿化垃圾 + 1 kg 天然沸石,R1 无。

1.2.2 实验运行

初始运行时,向 3 组反应器各加入 5 L 新鲜垃圾渗滤液,并置于室温下运行 390 d。渗滤液每隔 3 d 循环一次,每 10 d 补充 50 mL 去离子水模拟降水。

1.3 指标分析

垃圾通过前后 4 个采样孔(如图 1)采集,立即

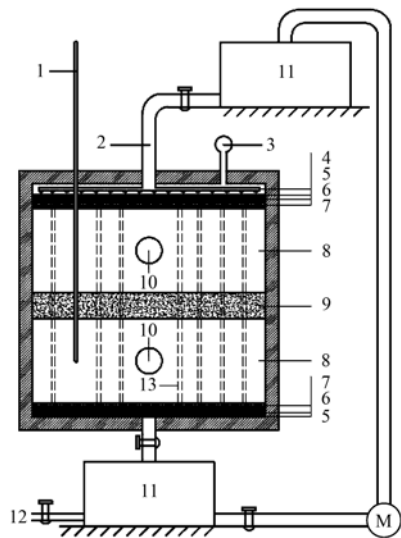
采用烘干法(CJ/T 313-2009)测定含水率,其后粉碎并混合均匀,采用四分法取样并用半微量开氏法(CJ T 103-1999)测定 TN_s、($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)_s和($\text{NO}_3^- - \text{N}$)_s等。

渗滤液通过下方渗滤液取样口采集,并按照文献[16]规定的方法测定 pH、碱度、氧化还原电位(Eh)、总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)和亚硝态氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)等指标。

2 结果与分析

2.1 内环境参数

由图 2 可见,R1、R2 和 R3 中 pH 和碱度在初始 10 d 迅速下降到最小值,分别为 3.77、3.20、3.27 和 1332.2、1276.4、1122.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这主要是由于垃圾中大量有机酸溶入渗滤液中造成^[17]。



1. 温度计; 2. 渗滤液循环孔; 3. 真空集气袋; 4. 布水管; 5. 钢丝网; 6. 石英砂; 7. 细碎石; 8. 垃圾层; 9. 内环境调控层; 10. 垃圾取样孔; 11. 集水槽; 12. 渗滤液取样口; 13. 液/气流管

图 1 厌氧生物反应器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of anaerobic bioreactor

10~60 d, 由于微生物对有机酸的降解, pH 和碱度升高到最大值, 分别为 6.42、6.32、6.36 和

7 784.6、8 445.7、7 465.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 此后, 反应器内氧气耗尽, 厌氧微生物开始水解酸化垃圾中有机物, pH 和碱度逐渐下降, 150 d 后趋于稳定. 实验结束时, R1、R2 和 R3 中 pH 和碱度分别为 5.48、5.79、5.59 和 4 267.5、5 198.8、4 689.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Eh 初始阶段, R1、R2 和 R3 中 Eh 均迅速升高, 均在第 30 d 分别达到最大值 122.9、163.7 和 179.7 mV, 这是由在垃圾的装填过程中携带进入的氧气造成. 30 d 后, Eh 不断下降, 3 组反应器逐渐进入厌氧状态. 150 d 后, R1、R2 和 R3 中 Eh 均在 -50 mV 以下且持续下降, 实验结束时分别为 -106.2、-140.3 和 -126.1 mV.

渗滤液开始循环后, 垃圾体 MS 逐渐升高, 分别在 120 d、120 d 和 60 d 达到最大值 58.0%、67.4% 和 62.3%. 此后由于蒸发和微生物利用等因素^[18], 3 组反应器中的 MS 均有不同程度下降, 150 d 后基本处于稳定. 实验结束时, R1、R2 和 R3 中的 MS 分别为 46.5%、51.9% 和 61.8%.

2.2 固相垃圾中氮组分的变化

图 3 显示了 R1、R2 和 R3 固相垃圾中 TN_s 的

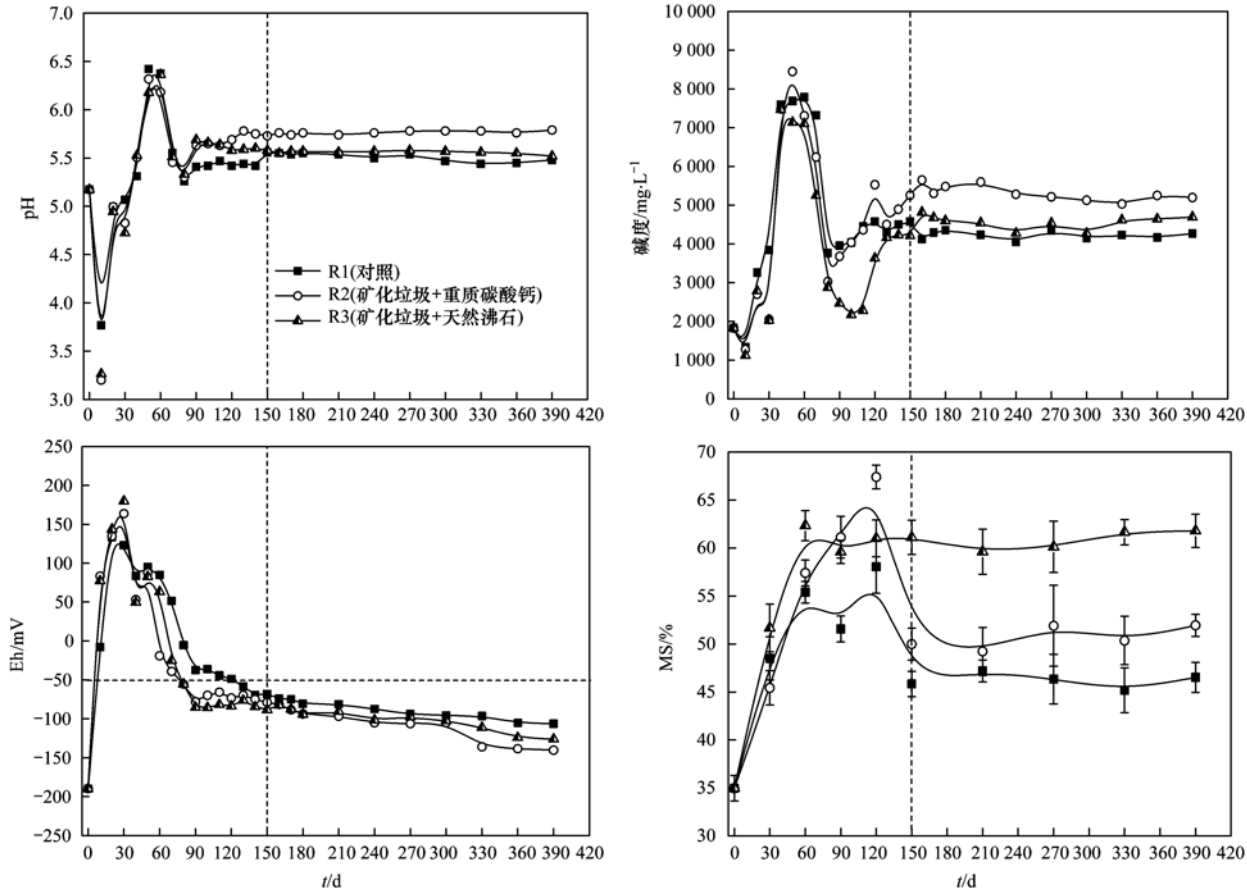


图 2 反应器中内环境指标随时间的变化

Fig. 2 Variations of interior environment indicators over time in reactors

含量在整个 390 d 内不断下降,分别由初始值 $19\,200.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $4\,000.0$ 、 $3\,400.0$ 和 $2\,200.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. $(\text{NH}_4^+-\text{N})_s$ 的含量也分别由 $89.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 持续下降到 46.3 、 35.8 和 $28.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 由于垃圾装填过程中携带了一定量氧气进入反应器中,因此可以发现 60 d 前 R1、R2 和 R3 中 $(\text{NO}_3^--\text{N})_s$ 的含量分别从 $51.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 升高到 82.6 、 87.4 和 $85.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,此后厌氧环境开始形成, $(\text{NO}_3^--\text{N})_s$ 经反硝化作用转化,含量不断降低,实验结束时分别为 31.6 、 28.6 和 $23.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

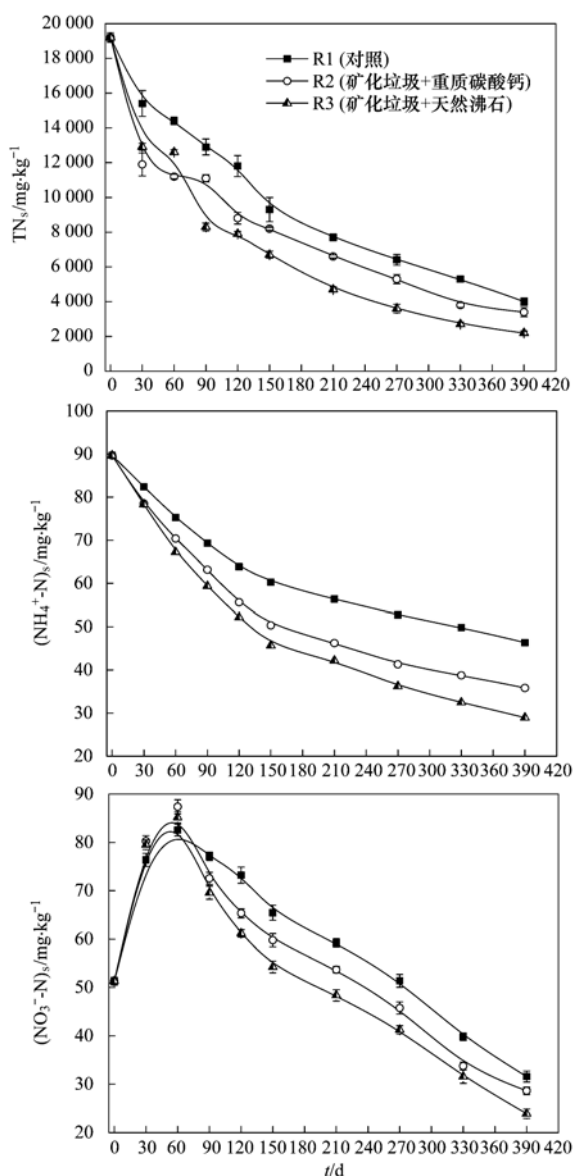


图3 固相垃圾中氮组分随时间的变化

Fig. 3 Variations of nitrogen compounds over time in solid waste

2.3 渗滤液中氮组分的变化

3 组模拟反应器渗滤液中氮组分的变化趋势如图4所示. 在 1~60 d 内,垃圾中易降解含氮有机物

被好氧微生物快速降解转化进入渗滤液,使得 R1、R2 和 R3 渗滤液中 TN 的浓度分别从初始 $812.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到最大值 $5\,331.0$ 、 $4\,497.0$ 和 $3\,957.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 60~120 d,由于反硝化等作用,渗滤液中 TN 持续下降,120 d 后 TN 浓度变化趋于稳定,实验结束时,分别为 $3\,261.0$ 、 $2\,745.0$ 和 $2\,465.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

R1、R2 和 R3 渗滤液中 NH_4^+-N 浓度均呈现波动上升趋势,实验结束时,分别从初始的 $381.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 $1\,914.6$ 、 $2\,152.4$ 和 $1\,541.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在 1~40 d 内,R1、R2 和 R3 渗滤液中 NO_3^--N 浓度分别从初始值 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 252.9 、 214.0 和 $180.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这主要由硝化细菌利用反应器中残留氧气将 NH_4^+-N 转化而来^[19]. 40 d 后, NO_3^--N 波动下降,实验结束时,R1、R2 和 R3 中渗滤液的 NO_3^--N 浓度分别为 32.2 、 18.6 和 $10.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. NO_2^--N 的稳定性不如 NO_3^--N ,能优先被反硝化菌利用,因此其浓度远低于 NO_3^--N . 1~50 d, NO_2^--N 在 3 组反应器中的浓度分别从 $0.16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 4.72 、 5.78 和 $5.90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 50~80 d, NO_2^--N 被反硝化细菌快速利用,其浓度又迅速下降到 0.21 、 0.20 和 $0.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 80 d 后,3 个反应器渗滤液中 NO_2^--N 趋于稳定,且浓度极小.

3 讨论

3.1 内环境调节层对内环境的调节作用

150 d 后,R1、R2 和 R3 内环境参数稳定,反应器进入稳定的厌氧状态,对比发现 $\text{pH}(\text{R2}) > \text{pH}(\text{R3}) > \text{pH}(\text{R1})$ 、碱度 $(\text{R2}) > \text{碱度}(\text{R3}) > \text{碱度}(\text{R1})$ 、 $\text{Eh}(\text{R2}) < \text{Eh}(\text{R3}) < \text{Eh}(\text{R1})$ 、 $\text{MS}(\text{R3}) > \text{MS}(\text{R2}) > \text{MS}(\text{R1})$. pH 和碱度是厌氧生物反应器填埋场内环境的重要参数,碱度还是微生物生长所必须的物质^[20],其影响填埋场内微生物的生长状态,进而影响氮的降解、迁移和转化^[21]. 研究表明,矿化垃圾具有较好的酸性有机物缓冲能力^[22],能提供一定的碱度^[23],因此 R2 和 R3 中 pH、碱度均高于 R1. 另外重质碳酸钙本来就是一种碱性物质,其缓慢溶解后能直接中和有机酸,提高反应器的 pH 和碱度,因此 R2 中 pH 和碱度最高,最适于微生物的生长. 厌氧微生物对 Eh 较敏感,特别是产甲烷菌是严格厌氧微生物^[24],因此 Eh 的高低,决定着微生物的生长状态和垃圾降解的速度^[25]. 在实验运行初期,矿化垃圾和重质碳酸钙能接种微生物,优化反应器 pH,从而使为好氧微生物能

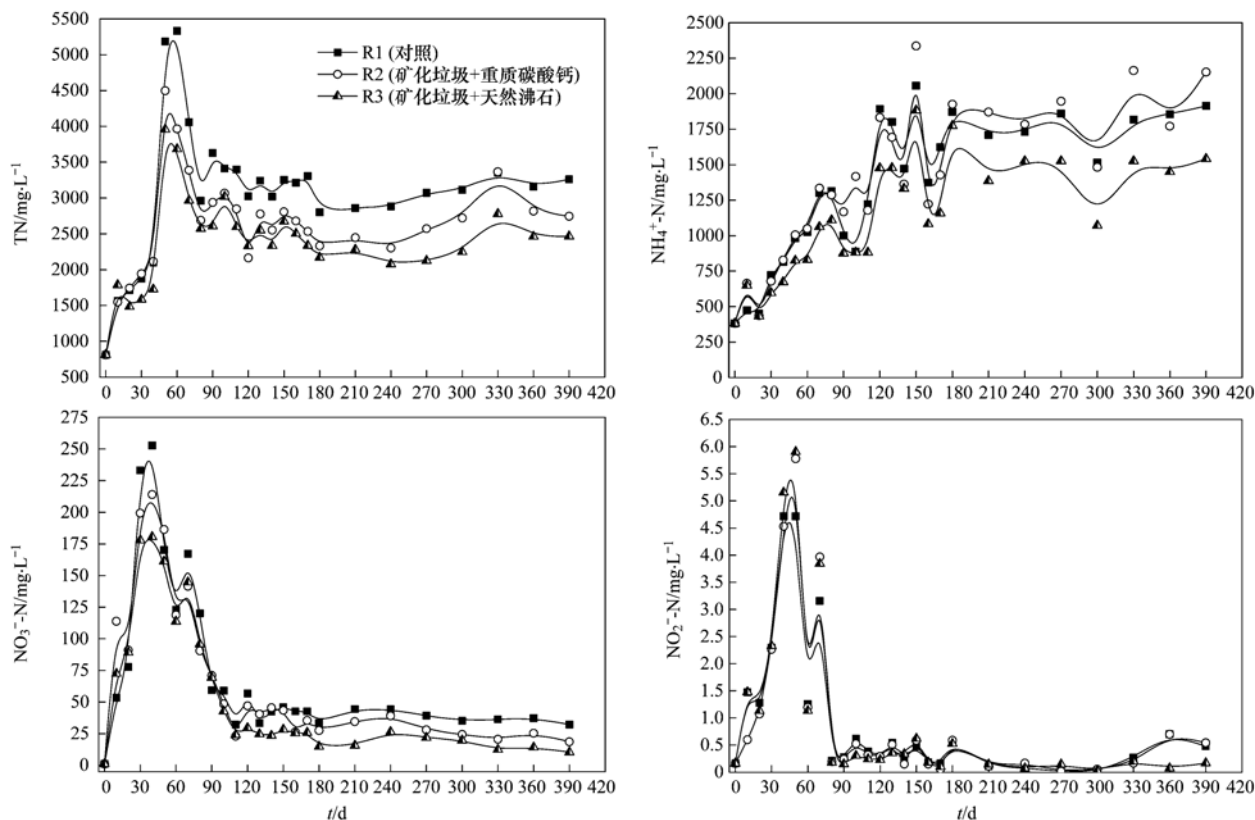


图4 渗滤液中氮组分随时间的变化

Fig. 4 Variations of nitrogen compounds over time in leachate

迅速利用垃圾装填过程中残留的氧气,因此 R2 最快进入厌氧环境,并持续保持 Eh 最低。此外,厌氧反应器填埋场的核心就是利用渗滤液循环技术^[26],增加垃圾体的含水率,从而为微生物活动提供良好的环境^[27]。R2 和 R3 中 MS 能长期保持在 50% ~ 60% 的有利范围^[28],这可能与内环境调节层的添加使布水更加均匀和垃圾随着降解过程的持水能力变化有关系。综合考虑 pH、碱度、Eh 和 MS 的变化,可以认为矿化垃圾 + 重质碳酸钙、矿化垃圾 + 天然沸石这两种内环境调节层均能长期优化反应器的内环境,为微生物的生长提供较有利的条件,从而促进垃圾和渗滤液中氮组分的降解转化。

3.2 内环境调节层对氮转化去除的作用

R1、R2 和 R3 中固相垃圾 TN_s 、 $(\text{NH}_4^+\text{-N})_s$ 和 $(\text{NO}_3^-\text{-N})_s$ 均持续下降,其降解转化率分别为 79.2%、82.3%、88.5%, 48.3%、60.1%、67.7% 和 38.5%、44.2%、53.4%。固相垃圾氮降解转化率 $\text{R3} > \text{R2} > \text{R1}$,说明矿化垃圾 + 天然沸石、矿化垃圾 + 重质碳酸钙组成的内环境调节层有利于促进固相垃圾中氮的迁移转化。矿化垃圾含有丰富的微生物^[29]和有机酸缓冲物质^[30],其能促进微生物对垃

圾中含氮有机物的降解。同时,天然沸石能吸附氨氮^[31~33],促进氨氮的转化^[34,35],因此,矿化垃圾 + 天然沸石组成的内环境调节层能更好地促进固相垃圾中氮的降解转化。渗滤液中 $\text{TN}(\text{R3}) < \text{TN}(\text{R2}) < \text{TN}(\text{R1})$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}(\text{R3}) < \text{NO}_3^-\text{-N}(\text{R2}) < \text{NO}_3^-\text{-N}(\text{R1})$,可见添加矿化垃圾 + 重质碳酸钙、矿化垃圾 + 天然沸石这 2 种内环境调节层后,确实能通过优化填埋场内 pH、碱度、Eh 和 MS 等内环境参数,接种大量微生物来促进微生物对渗滤液中 TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的降解转化。另一方面,渗滤液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}(\text{R3}) < \text{NH}_4^+\text{-N}(\text{R1}) < \text{NH}_4^+\text{-N}(\text{R2})$,可以看出矿化垃圾 + 天然沸石组成的调节层能较好地控制渗滤液中氨氮的累积,促进渗滤液中氨氮的降解转化,而矿化垃圾 + 重质碳酸钙则相反,这一差别主要是因为天然沸石具有吸附、固定和促进氨氮转化的能力^[36~38],而重质碳酸钙虽然能提供碱度,缓解有机酸的累积,一定程度上促进垃圾的降解^[39],但是不能促进渗滤液中氨氮的转化。综合固相垃圾和渗滤液中氮组分的变化可以发现在矿化垃圾和天然沸石的双重作用下,反应器内环境得到优化,氨氮累积得到缓解,从而有利于微生物对含氮物质的降解转化。

4 结论

(1) 矿化垃圾 + 重质碳酸钙、矿化垃圾 + 天然沸石这 2 种内环境调节层均能在一定程度上优化反应器的内环境,为微生物降解转化氮提供有利条件。

(2) 矿化垃圾 + 天然沸石组成的内环境调节层能促进垃圾和渗滤液中氮组分的降解转化,在一定程度上控制渗滤液循环造成的氨氮累积效应。

参考文献:

- [1] Mian M M, Zeng X L, Nasry A N B, *et al.* Municipal solid waste management in China: a comparative analysis[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2016, doi: 10.1007/s10163-016-0509-9.
- [2] Reinhart D R, McCreanor P T, Townsend T. The bioreactor landfill: its status and future [J]. *Waste Management & Research*, 2002, **20**(2): 172-186.
- [3] Kumar S, Chiemchaisri C, Mudhoo A. Bioreactor landfill technology in municipal solid waste treatment: an overview[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2011, **31**(1): 77-97.
- [4] Slezak R, Krzystek L, Ledakowicz S. Degradation of municipal solid waste in simulated landfill bioreactors under aerobic conditions[J]. *Waste Management*, 2015, **43**: 293-299.
- [5] 张超平, 冯勇, 罗鹏. 生物反应器填埋场的发展及应用研究[J]. *环境工程*, 2012, **30**(1): 95-99.
- Zhang C P, Feng Y, Luo P. Research on development and application of bioreactor landfill technology[J]. *Environmental Engineering*, 2012, **30**(1): 95-99.
- [6] Berge N D, Reinhart D R, Townsend T G. The fate of nitrogen in bioreactor landfills[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2005, **35**(4): 365-399.
- [7] 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.
- He R, Sheng D S, Dai H G, *et al.* Study on in situ nitrogen removal from municipal refuse in bioreactor landfill systems[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(3): 604-608.
- [8] 杨盈盈, 陈奕, 李明杰, 等. 进水渗滤液总氮和 BOD₅/TN 对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1412-1416.
- Yang Y Y, Chen Y, Li M J, *et al.* Effects of total nitrogen and BOD₅/TN on anaerobic ammonium oxidation-denitrification synergistic interaction of mature landfill leachate in aged refuse bioreactor[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1412-1416.
- [9] He P J, Yang N, Gu H L, *et al.* N₂O and NH₃ emissions from a bioreactor landfill operated under limited aerobic degradation conditions[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(6): 1011-1019.
- [10] Liu S, Zhang Z B, Li Y, *et al.* Study on the treatment effect of ammonia in landfill leachate by recirculation [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, **365**: 396-402.
- [11] 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.
- [12] Long Y, Lao H M, Hu L F, *et al.* Effects of in situ nitrogen removal on degradation/stabilization of MSW in bioreactor landfill [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(8): 2787-2794.
- [13] 江娟, 詹爱平, 冯斌. 调节渗沥液 pH 回灌对厌氧填埋的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(10): 2450-2506.
- Jiang J, Zhan A P, Feng B. Effects of the leachate recirculation with pH adjusted on anaerobic landfill [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(10): 2450-2506.
- [14] Shao L M, He P J, Li G J. In situ nitrogen removal from leachate by bioreactor landfill with limited aeration [J]. *Waste Management*, 2008, **28**(6): 1000-1007.
- [15] 钟琦, 张杰, 李大平, 等. 垃圾渗滤液原位反硝化研究[J]. *应用与环境生物学报*, 2009, **15**(2): 240-244.
- Zhong Q, Zhang J, Li D P, *et al.* In situ denitrification of landfill leachate [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2009, **15**(2): 240-244.
- [16] 国家环境保护总局. 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, 2013.
- [17] Erses A S, Onay T T, Yenigun O. Comparison of aerobic and anaerobic degradation of municipal solid waste in bioreactor landfills[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(13): 5418-5426.
- [18] 李睿, 刘建国, 薛玉伟, 等. 生活垃圾填埋过程含水率变化研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 804-809.
- Li R, Liu J G, Xue Y W, *et al.* Research of moisture content variation in MSW landfill[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 804-809.
- [19] 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.
- [20] 江娟, 谢文刚, 刘婷, 等. 生物反应器渗滤液回灌中加入碱度的影响分析[J]. *实验室研究与探索*, 2009, **28**(9): 43-46.
- Jiang J, Xie W G, Liu T, *et al.* Effect of alkalinity variations on recirculated anaerobic bioreactor landfill [J]. *Research and exploration in laboratory*, 2009, **28**(9): 43-46.
- [21] Dong J, Zhao Y S, Hong M, *et al.* Influence of alkalinity on the stabilization of municipal solid waste in anaerobic simulated bioreactor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **163**(2-3): 717-722.
- [22] 赵由才, 柴晓利, 牛冬杰. 矿化垃圾基本特性研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2006, **34**(10): 1360-1364.
- Zhao Y C, Chai X L, Niu D J. Characteristics of aged refuse in closed refuse landfill in Shanghai [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2006, **34**(10): 1360-1364.
- [23] Sun X J, Sun Y J, Zhao Y C, *et al.* Leachate recirculation between alternating aged refuse bioreactors and its effect on refuse decomposition[J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(7): 799-807.
- [24] 姬晓燕, 桑树勋, 周效志, 等. 间歇式生物反应器填埋结构对渗滤液水质的影响研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(10): 2199-2203.
- Ji X Y, Sang S X, Zhou X Z, *et al.* Effect of batch bioreactor landfill structure on water quality of leachate [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5**(10): 2199-2203.
- [25] 韩智勇, 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.
- Han Z Y, Liu D, Li Q B, *et al.* Evolution of leachate quantity and quality in the anaerobic-semiaerobic bioreactor landfill[J]. Environmental Science, 2012, **33**(11): 3873-3880.
- [26] Warith M. Bioreactor landfills: experimental and field results[J]. Waste Management, 2002, **22**(1): 7-17.
- [27] Jiang J G, Yang G D, Deng Z, *et al.* Pilot-scale experiment on anaerobic bioreactor landfills in China[J]. Waste Management, 2007, **27**(7): 893-901.
- [28] 邓舟, 蒋建国, 杨国栋, 等. 渗滤液回灌量对其特性及填埋场稳定化的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(1): 184-188.
- Deng Z, Jiang J G, Yang G D, *et al.* Effects of leachate recirculation volume on its characteristic and landfill stabilization rate[J]. Environmental Science, 2006, **27**(1): 184-188.
- [29] 孙英杰, 杨强, 卞荣星, 等. 矿化垃圾生物反应器中的细菌多样性分析[J]. 环境工程, 2016, **34**(3): 142-146.
- Sun Y J, Yang Q, Bian R X, *et al.* Analysis on the bacterial diversity in a bioreactor for aged refuse[J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(3): 142-146.
- [30] 李明, 赵由才, 徐迪民. 矿化垃圾与碱性添加剂对餐厨垃圾发酵产氢的影响[J]. 中国给水排水, 2008, **24**(3): 49-52.
- Li M, Zhao Y C, Xu D M. Effects of aged refuse and alkali additive on fermentative hydrogen production from kitchen waste[J]. China Water & Wastewater, 2008, **24**(3): 49-52.
- [31] 张翠玲, 常青, 张家利, 等. 天然沸石对农田退水中氨氮的去除[J]. 环境化学, 2015, **31**(7): 1063-1068.
- Zhang C L, Chang Q, Zhang J L, *et al.* Removal of ammonium-nitrogen from irrigation drainage by the natural zeolite[J]. Environmental Chemistry, 2015, **31**(7): 1063-1068.
- [32] 宋珩, 魏刚, 樊保民, 等. 天然沸石在高温氨氮废水中的吸附特性研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2013, **40**(6): 62-66.
- Song H, Wei G, Fan B M, *et al.* Adsorptivity of natural zeolite towards ammonia from sewage at high temperatures[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2013, **40**(6): 62-66.
- [33] 安莹, 王志伟, 张一帆, 等. 天然沸石吸附氨氮的影响因素[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(10): 3927-3932.
- An Y, Wang Z W, Zhang Y F, *et al.* Factors influencing ammonium removal by natural zeolite as adsorbent[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, **7**(10): 3927-3932.
- [34] 张佳, 张倩, 赵可玉, 等. 天然沸石对氨氮的动态去除过程研究[J]. 环境工程, 2014, **32**(11): 64-68.
- Zhang J, Zhang Q, Zhao K Y, *et al.* Research on the process of dynamic removal of ammonia nitrogen by natural zeolite[J]. Environmental Engineering, 2014, **32**(11): 64-68.
- [35] Markou G, Vandamme D, Muylaert K. Using natural zeolite for ammonia sorption from wastewater and as nitrogen releaser for the cultivation of *Arthrospira platensis*[J]. Bioresource Technology, 2014, **155**: 373-378.
- [36] Chan M T, Selvam A, Wong J W C. Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment[J]. Bioresource Technology, 2016, **200**: 838-844.
- [37] 林海, 杨苏, 张文通, 等. 微波改造沸石环境材料的表征与脱氮效果[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, **36**(1): 129-133.
- Lin H, Yang S, Zhang W T, *et al.* Characterization and denitrifying effect of microwave modified zeolite ecomaterials[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, **36**(1): 129-133.
- [38] 董颖博, 林海, 刘泉利. 化学改性对沸石去除水中碳、氮污染物的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, **47**(3): 193-199.
- Dong Y B, Lin H, Liu Q L. Effects of chemical modification on removal of pollutants with carbon and nitrogen from aqueous solution by zeolite[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, **47**(3): 193-199.
- [39] 何正坤, 董军, 王敏, 等. 中间覆盖层对厌氧生物反应器填埋场中有机物降解的作用[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(1): 141-148.
- He Z K, Dong J, Wang M, *et al.* Effects of intermediate covers on organics degradation in anaerobic bioreactor landfills[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(1): 141-148.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Fouling Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₂ ⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)