

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                               |                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 京津冀与长三角区域大气 NO <sub>2</sub> 污染特征 .....                                        | 王英, 李令军, 刘阳 (3685)                           |
| 2008~2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析 .....                                            | 杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)                     |
| 沧州市大气污染特征观测研究 .....                                                           | 王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)                  |
| 华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源 .....                                                    | 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)               |
| 广州市交通主干道空气中苯系物的测量 .....                                                       | 叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)      |
| 基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究 .....                                                | 黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)    |
| 柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性 .....                                                   | 胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)                     |
| 九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征 .....                                                      | 余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)             |
| 南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价 .....                                                | 舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)                |
| 天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究 .....                                                        | 李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)                         |
| 北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究 .....                                             | 李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)               |
| 云阳宗海库的分布与来源 .....                                                             | 张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)  |
| 南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究 .....                                             | 孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)                           |
| 三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究 .....                                                      | 张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)             |
| 江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究 .....                                                    | 单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)                          |
| 人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果 .....                                                      | 汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)               |
| 潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响 .....                                                | 魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)                         |
| 人工湿地处理含盐生活污水的特性研究 .....                                                       | 高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)                 |
| 催化湿式氧化法降解水中的 $\beta$ -萘酚 .....                                                | 刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)                     |
| ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究 .....                                          | 孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)       |
| 微波改性 MWNTs/TiO <sub>2</sub> 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究 .....                     | 施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)                   |
| 腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究 .....                                              | 丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)      |
| 臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究 .....                                             | 邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)                      |
| 复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究 .....                                          | 徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)                     |
| 进水比例对水解反应器出水水质的影响研究 .....                                                     | 梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)            |
| 厌氧-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 .....                                          | 韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)                      |
| 我国城市污水处理回用调查研究 .....                                                          | 郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)                         |
| 快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征 .....                                                     | 姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)              |
| 黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探 .....                                                   | 马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)                          |
| 半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应 .....                                                     | 卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)                  |
| 广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素 .....                                                   | 孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)                    |
| 酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究 .....                                                         | 王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)                       |
| 淋洗条件下砂土和粉土盐运移过程的监测研究 .....                                                    | 付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)                     |
| 空气注射修复苯污染地下水模拟研究 .....                                                        | 樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)                 |
| 不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性 .....                                        | 张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)                     |
| 上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应 .....                                              | 陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)                |
| 耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究 .....                                                     | 吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)            |
| 高效降酚菌株 <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究 .....                     | 陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)      |
| 四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究 .....                                                 | 钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)      |
| 长期施用有机和无机肥对黑土 <i>nirS</i> 型反硝化菌种群结构和丰度的影响 .....                               | 尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)        |
| 三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究 .....                                                 | 何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)  |
| 多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因素研究 .....                                                    | 肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)                         |
| 硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响 .....                                             | 刘敬勇, 孙永裕 (3990)                              |
| 关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究 .....                                              | 纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)                      |
| 第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文                                                           |                                              |
| 稻田气溶胶 NH <sub>3</sub> 和气体 NO <sub>x</sub> 排放在线测定研究 .....                      | 龚巍巍, 栾胜基 (4006)                              |
| 一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制 .....                                              | 文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)             |
| 基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究 .....                                          | 孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)                  |
| 涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别 .....                                                   | 丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)                              |
| 人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析 .....                                                      | 曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)                    |
| 基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌 .....                                                 | 林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)                  |
| 消毒副产物生成的温度影响和动力学模型 .....                                                      | 张小璐, 杨宏伟, 王小仵, 付静, 解跃峰 (4046)                |
| 一种厌氧微观定量研究新方法 .....                                                           | 张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)                 |
| 梧桐树叶作为反硝化碳源的研究 .....                                                          | 熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)                      |
| 降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究 .....                                            | 崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062) |
| 《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051) |                                              |

# 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

韩智勇<sup>1</sup>, 刘丹<sup>2</sup>, 李启彬<sup>2</sup>, 陈馨<sup>2</sup>

(1. 农业部沼气科学研究所, 成都 610041; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 610031)

**摘要:** 为了减少生物反应器填埋场投资和运行费用, 实现填埋场的快速稳定化, 将厌氧型生物反应器填埋场 (ANBL) 和准好氧矿化垃圾生物反应床 (SAARB) 串联, 组成新型的厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场 (AN-SABL). 通过研究 AN-SABL 渗滤液水质水量变化规律, 以期为其渗滤液的管理和处理提供理论依据. 实验表明, AN-SABL 具有较好的渗滤液削减作用, 最高削减量可达到  $771 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 而且 AN-SABL 渗滤液水质变化具有明显的阶段性特征, 渗滤液中硝酸盐 (包括亚硝酸盐) 浓度和氨氮浓度分别受 Eh 值和 pH 值影响明显. AN-SABL 能够有效去除渗滤液中的有机物, 实验结束时, AN-SABL2 号和 AN-SABL3 号渗滤液 COD 的去除率分别达到了 98.49% 和 97.98%, 二者的 COD 浓度仅为 ANBL1 号 COD 浓度的 14.5%、21.1%; 同时, AN-SABL 有较好的脱氮作用, AN-SABL2 号和 AN-SABL3 号渗滤液中氨氮浓度分别从最高值  $1452 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1409 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降至  $525 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $459 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 只有 ANBL1 号氨氮浓度的 36.5% 和 31.9%. SAARB 单元的脱氮除碳效果受 TOC/TC 值的影响明显, 当渗滤液中 TOC/TC 下降到 0.2 左右后, SAARB 单元对 COD 和 TN 的去除率分别从 95% 和 93% 以上降到了 35.25% ~ 69.56% 和 64.53% ~ 77.45% 之间.

**关键词:** 联合型生物反应器填埋场; 厌氧型生物反应器填埋场; 准好氧矿化垃圾生物反应床; 渗滤液; 水量平衡; 水质

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3873-08

## Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill

HAN Zhi-yong<sup>1</sup>, LIU Dan<sup>2</sup>, LI Qi-bin<sup>2</sup>, CHEN Xin<sup>2</sup>

(1. Biogas Institute of Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China; 2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill (AN-SABL) has been devised combining an Anaerobic Bioreactor Landfill (ANBL) with a Semi-aerobic Aged Refuse Biofilter (SAARB) for reducing the investment and the running expense. It was a novel bioreactor landfill which could accelerate the stabilization of waste obviously. The evolution of leachate quantity and quality for the AN-SABL was studied in order to provide a theoretical basis for the management and treatment of leachate. The results indicated that the quantitative reduction of leachate in the AN-SABL was obvious and the highest reduction could reach by  $771 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Moreover, the quality of leachate varied in phases. The concentration of nitrate including nitrite and ammonium was influenced markedly by Eh and pH. At the end of the experiment, the removal rates of COD for the AN-SABL2 and the AN-SABL3 reached by 98.49% and 97.98% and the concentrations of COD were only 14.5% and 21.1% of that in leachate from the ANBL1 respectively. Therefore, the organic matter could be degraded completely with the AN-SABL. Besides, the AN-SABL could remove the nitrogen pollutant effectively as well. The concentrations of ammonium in leachate from the AN-SABL2 and the AN-SABL3 decreased obviously from the maximum of  $1452 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $1409 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  to  $525 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $459 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  respectively which only were 36.5% and 31.9% of that in leachate from the ANBL1. For the SAARB unit, the TOC and TC ratio played a vital influence on the removal efficiency of the organic matter and nitrogen pollutant. After the TOC and TC ratio declined to about 0.2, the removal rate of COD and TN for SAARB decreased from over 95% and over 93% to 35.25% - 69.56% and 64.53% - 77.45% respectively.

**Key words:** hybrid bioreactor landfill (HBL); anaerobic bioreactor landfill (ANBL); semi-aerobic aged refuse biofilter (SAARB); leachate; water balance; water quality

生物反应器填埋场是通过有目的的控制手段, 强化微生物作用过程, 从而加速垃圾中易降解和中等易降解有机组分转化和稳定的一种新型的垃圾填埋场, 可分为厌氧型 (ANBL)、好氧型 (ABL)、准好氧型 (SABL) 等类型. 此外, 有学者提出, 通过回灌经其他生物反应器处理后的渗滤液, 可以从填埋场

顶部到底部逐渐形成有利于产甲烷微生物生长和代

收稿日期: 2012-01-06; 修订日期: 2012-03-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (2010XS36, SWJTU09CX059); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2012ZL004)

作者简介: 韩智勇 (1983 ~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为固体废弃物资源化利用与处理处置, E-mail: zhiyonghan@yahoo.cn

谢的环境<sup>[1]</sup>,促进垃圾降解,从而发展了联合型生物反应器填埋场(HBL)。

对于联合型生物反应器填埋场,当前的研究主要集中在厌氧-厌氧联合型<sup>[1~6]</sup>、厌氧-好氧联合型<sup>[1,6~9]</sup>、厌氧-厌氧-好氧联合型<sup>[5,10,11]</sup>等3种类型。较之传统卫生填埋场和单一的生物反应器填埋场,虽然这些联合型生物反应器填埋场都在不同程度上提高了生活垃圾的稳定化速度,但是仍然存在诸多问题,如厌氧-厌氧联合型生物反应器填埋场的氨氮去除率仍然偏低;厌氧-好氧联合型生物反应器填埋场会增加能耗和建设运行费用,而且抑制甲烷的产生,不利于甲烷的充分回收利用;厌氧-厌氧-好氧联合型生物反应器填埋场因串联单元增多,将明显增加建设和运行费用等。

为了解决这些问题,有学者结合矿化垃圾比表面积大,水力渗透性能较好,富含经高浓度渗滤液长期驯化得到的优势微生物<sup>[12,13]</sup>等特点,构建了矿化垃圾生物反应器处理渗滤液后回灌的思路。其中Long<sup>[5]</sup>和He<sup>[10]</sup>等用矿化垃圾生物反应床与填埋场串联处理渗滤液,取得了良好的有机物去除效果,但

是无法去除氨氮。此后,不少学者发展了塔式矿化垃圾生物反应床<sup>[14]</sup>,二级和三级串联矿化垃圾生物反应床<sup>[15,16]</sup>,准好氧矿化垃圾生物反应床(SAARB)等<sup>[17]</sup>,极大地提高了有机物和氨氮的去除率。

针对当前生物反应器填埋场存在稳定化速度与投资运行费用的矛盾,本研究充分利用ANBL能够转化生物质能和SAARB廉价高效的特点,将ANBL和SAARB进行串联,组成厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场(AN-SABL),研究水质水量的变化规律,以期为其渗滤液的管理和处理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设备

ANBL模型采用 $\phi 800\text{ mm} \times 1\,280\text{ mm}$ 的PVC密封柱,由下到上分别为:底座+200 mm砾石层+土工布+生活垃圾层+50 mm砾石层;SAARB模型采用 $\phi 300\text{ mm} \times 1\,100\text{ mm}$ 的PVC柱,由下到上分别为:底座+200 mm砾石层+土工布+矿化垃圾层,如图1所示。

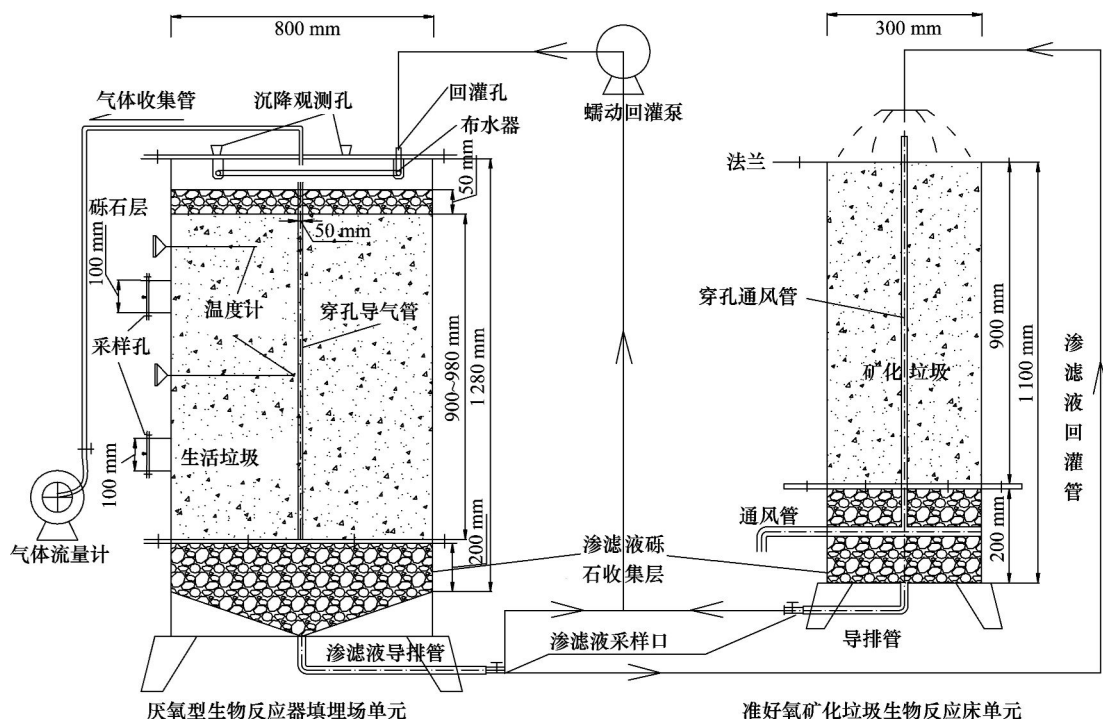


图1 实验装置剖面示意

Fig. 1 Profile of laboratory apparatus

### 1.2 实验材料

ANBL模拟柱中生活垃圾装填密度介于 $762.4 \sim 829.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间;SAARB模拟柱中矿化垃圾装填密度均为 $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,垃圾物化特征见表1所示。

装填的生活垃圾具有含水率高、有机物含量高、渣土含量低的典型燃气生活垃圾特征;矿化垃圾经过孔径为10 mm的筛网筛分后,具有粒度均匀,孔隙率高,含水率较低,有机物含量低等典型的矿化垃圾特征。

表 1 装填垃圾物化特性

Table 1 Physical and chemical characteristics of stuff

| 样品   | 含水率<br>/% | 可燃分(湿)<br>/% | 灰分(湿)<br>/% | BDM<br>/% | 有机质<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 全氮<br>/g·kg <sup>-1</sup> | 铵态氮<br>/mg·kg <sup>-1</sup> | 硝态氮<br>/mg·kg <sup>-1</sup> |
|------|-----------|--------------|-------------|-----------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 矿化垃圾 | 31.84     | 13.74        | 54.42       | 11.08     | 72.84                      | 5.380                     | 22.40                       | 1 062                       |
| 生活垃圾 | 73.37     | 18.89        | 7.74        | 68.82     | 389.46                     | 9.856                     | 44.80                       | 1 954                       |

### 1.3 实验设计

#### 1.3.1 渗滤液回灌设计

实验在室内设置了 1 个 ANBL 模拟柱作为参照,设置了 2 个 AN-SABL 模拟柱,根据刘丹等<sup>[18]</sup>的前期实验研究,采用不同的回灌方式,与 ANBL 模拟

柱进行对比研究,具体实施方案见表 2. 实验启动后,SAARB 模拟柱在室温(12~24℃)下运行 2 个月,后采取了保温措施,此后温度维持在 30℃左右;整个实验期间,ANBL 模拟柱均在室温(8.9~28.5℃)下运行.

表 2 回灌频率及回灌量设计

Table 2 Experimental design of recirculation frequency and volume

| 模型                                            | 厌氧型生物反应器填埋场<br>ANBL1 号                                                                                             |  | 厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场<br>AN-SABL2 号      AN-SABL3 号                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                               |                                                                                                                    |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
| 回灌频率/d·次 <sup>-1</sup>                        | 3                                                                                                                  |  | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| 回灌量/L                                         | 1.6~15.7                                                                                                           |  | 1.0~17.0                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |
| 回灌时间/min                                      | 10~90                                                                                                              |  | ANBL 单元:10~90; SAARB 单元:5                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  |
| 回灌方式                                          | 全回灌                                                                                                                |  | ANBL 单元出水部分经 SAARB 单元处理后再回灌进入 ANBL 单元,剩余部分直接回灌进入 ANBL 单元                                                                                                                                                                                                                                                             |  |
| SAARB 单元启动和驯化阶段<br>(2009-09-19~2009-10-09)    | 回灌 COD 浓度:35 963~62 947 mg·L <sup>-1</sup><br>回灌 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 浓度:149~995 mg·L <sup>-1</sup>     |  | SAARB 单元驯化采用混合培养法,进水量为 1.0 L,进水周期为 12 h,渗滤液与生活污水的混合体积比按(2:8)、(4:6)、(6:4)、(8:2)和(10:0)逐步提高. 其中生活污水 COD 约 445 mg·L <sup>-1</sup> ,NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 约 30 mg·L <sup>-1</sup> ; 渗滤液 COD 介于 23 327~71 712 mg·L <sup>-1</sup> 之间,NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 介于 232~1 170 mg·L <sup>-1</sup> 之间,详见文献[18] |  |
| SAARB 单元最优工况实验研究阶段<br>(2009-10-10~2010-04-07) | 回灌 COD 浓度:50 304~81 672 mg·L <sup>-1</sup><br>回灌 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 浓度:1 197~1 326 mg·L <sup>-1</sup> |  | SAARB 单元最优工况研究采用正交法,进水量为 1~2 L,进水周期为 1~3 d,进水 COD 为 30 000~50 000 mg·L <sup>-1</sup> ,详见文献[17]                                                                                                                                                                                                                       |  |
| SAARB 单元按最优工况运行阶段<br>(2010-04-08~2011-12-21)  | 回灌 COD 浓度:4 292~78 400 mg·L <sup>-1</sup><br>回灌 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 浓度:1 156~1 696 mg·L <sup>-1</sup>  |  | SAARB 单元实验按最优方式运行,进水量 2 L,进水频率与系统回灌频率相同,进水 COD 浓度介于 987~56 640 mg·L <sup>-1</sup> 之间,NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 介于 459~1 259 mg·L <sup>-1</sup> 之间                                                                                                                                                              |  |

#### 1.3.2 模拟降雨量设计

实验启动后,每月月底以成都 2000~2008 年月平均降雨量对厌氧生物反应器填埋场实施模拟降雨. 入渗系数根据渗滤液产生量进行调节,取值介于 0.1~0.3 之间,其中冬季取较大值,夏季取较小值. 模拟降雨量如表 3 所示.

#### 1.3.3 监测方法

实验监测指标,监测频率和监测方法见表 4 所示.

## 2 结果与分析

### 2.1 渗滤液水量平衡分析

ANBL1 号、AN-SABL2 号和 AN-SABL3 号 2009 年 9 月~2010 年 12 月的水量平衡分析见表 5 所示.

从表 5 可知,AN-SABL2 号的渗滤液产生量最

表 3 实验模拟降雨量

Table 3 Experimental design of simulated rainfall

| 月份 | 平均降雨量/mm | 模拟降雨量/L |
|----|----------|---------|
| 1  | 10.5     | 1.5     |
| 2  | 9.4      | 1.2     |
| 3  | 24.0     | 0.8     |
| 4  | 46.0     | 5       |
| 5  | 82.1     | 5       |
| 6  | 109.0    | 10      |
| 7  | 176.4    | 10      |
| 8  | 194.2    | 8       |
| 9  | 90.3     | 8       |
| 10 | 47.7     | 4       |
| 11 | 14.8     | 2.3     |
| 12 | 5.4      | 0.9     |

大,分别是 ANBL1 号和 AN-SABL3 号渗滤液产生量的 1.84 倍和 2.21 倍. 故在水解酸化阶段,回灌频率为 3 d/次的 AN-SABL 更有利于垃圾水解,可产生更多的渗滤液.

表 4 监测指标及方法一览表

Table 4 Experimental design of monitoring

| 监测指标                                   | 监测频率      | 监测方法                                                |
|----------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------|
| 化学需氧量(COD)                             | 1~2 周 1 次 | 重铬酸钾法(CJ/T 3018. 12-1993)                           |
| 总碳(TC)/总有机碳(TOC)                       | 1~2 周 1 次 | 燃烧氧化-非色散红外吸收法(HJ/T 71-2001)                         |
| 总氮(TN)                                 | 1~2 周 1 次 | 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-1989)                      |
| 氨氮(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N)    | 1~2 周 1 次 | 蒸馏-中和滴定法(CJ/T 3018. 6-1993)和纳氏试剂分光光度计法(HJ 535-2009) |
| 亚硝酸盐氮(NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N) | 1~2 周 1 次 | 分光光度法(GB 7493-87)                                   |
| 硝酸盐氮(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)  | 1~2 周 1 次 | 紫外分光光度法(HJ-T 346-2007)                              |
| 渗滤液产生量                                 | 1 天 1 次   | 直接称量法                                               |

表 5 不同填埋场水平衡(渗滤液/干基)分析/g·kg<sup>-1</sup>Table 5 Analysis of water balance in different kinds of landfills/g·kg<sup>-1</sup>

| 填埋场模型               | ANBL1 号 | AN-SABL2 号 | AN-SABL3 号 |
|---------------------|---------|------------|------------|
| 模拟降雨量               | 650     | 647        | 658        |
| 进水量                 |         |            |            |
| 其他补充量 <sup>1)</sup> | 0       | 131        | 227        |
| 回灌损失量               | 79      | 72         | 137        |
| 漏失量                 | 115     | 49         | 10         |
| 削减量                 |         |            |            |
| SAARB 蒸发量           | 0       | 531        | 634        |
| 其他损失量 <sup>1)</sup> | 154     | 185        | 161        |
| 填埋场实际蓄水量            | 399     | 120        | 24         |
| 填埋场修正后蓄水量           | 668     | 223        | -32        |
| 生活垃圾渗滤液产生量          | 97      | 179        | 81         |

1) 其他补充量包括 SAARB 做最优化实验时配水加入的自来水,以及渗滤液不足时从其他模拟柱借入的渗滤液;其他损失量包括实验采样用量和借出的渗滤液量

在实际运行中,不存在其他补充量和损失量,漏失量也可以忽略. 如果考虑这一情况进行修正,此时 AN-SABL3 号的渗滤液削减量最大,高达 771 g·kg<sup>-1</sup>,分别是 ANBL1 号和 AN-SABL2 号的 9.76 倍和 1.28 倍. 这是因为 AN-SABL3 号回灌频率更大,使其蒸发和损失的渗滤液量更多,因而具有更大的削减能力,可有效减少渗滤液的处理量,节约大量的渗滤液处理费用. 但是,在实验过程中取的入渗系数偏小,模拟降雨量比实际情况要少,故在实际填埋场中,产生的渗滤液量将会更大.

综上所述,AN-SABL 比 ANBL 具有更大的渗滤液削减能力,并未出现如 Reinhart 等<sup>[19]</sup>对生物反应器填埋场研究所观察到的随着渗滤液回灌体积、回灌速率和回灌频率增加,渗滤液产量也随之增加的现象. 相反,提高 AN-SABL 的渗滤液回灌频率,能够通过 SAARB 单元蒸发更多的渗滤液,增加渗滤液的削减量.

## 2.2 主要污染物变化规律分析

### 2.2.1 含碳物质

#### (1) ANBLs 中渗滤液的 COD 浓度

ANBLs 的 COD 浓度变化趋势如图 2 所示.

ANBLs 的稳定化过程先后经历了明显的初始

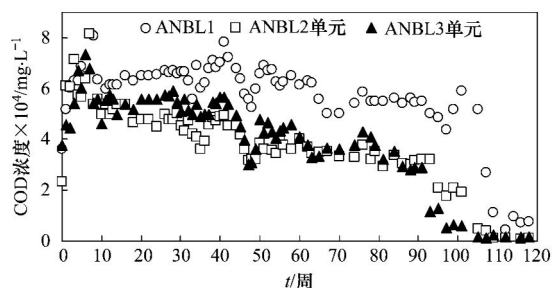


图 2 ANBLs 中渗滤液的 COD 浓度变化趋势

Fig. 2 Variation of COD concentration in leachate from ANBLs

调整阶段(0~6 周)、过渡阶段(7~10 周)、酸化阶段(11~90 周)、甲烷发酵阶段(91~105 周)和成熟阶段(105 周以后).

在初始调整阶段,垃圾在微生物作用下发生了剧烈的生化反应,大量有机物被分解,所以 ANBLs 的 COD 浓度从填埋时的 23 317~35 963 mg·L<sup>-1</sup>,经 6~7 周后快速上升到峰值 73 704~81 672 mg·L<sup>-1</sup>之间,随后进入短暂的过渡阶段.

在此阶段,随着气温的降低,微生物活性受到影响,有机垃圾降解量随之减小,COD 浓度迅速下降.

从第 10 周开始,进入酸化阶段. 微生物逐渐适应了较为寒冷的冬季,COD 浓度变化趋缓,pH 值维

持在 5.5 左右. 由于各 ANBL 模拟柱的操作不同, COD 浓度的变化差异逐渐显现. 其中 ANBL1 号的 COD 浓度在经历缓慢的积累后, 维持在  $60\ 700\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 而 ANBL2 单元和 ANBL3 单元因串联了 SAARB 单元, 使有机物降解更快, COD 浓度从  $55\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右缓慢下降到  $30\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右. 此阶段回灌频率为 3 d/次的 ANBL2 单元的 COD 浓度一直处于最低水平, 在前 35 周尤为明显. 在进入夏季, 气温升高后, 3 个模拟柱均经历了短暂的酸化产甲烷阶段 (40 ~ 50 周). 此阶段渗滤液 pH 值依旧维持在 5.5 ~ 5.6 之间, 填埋气中甲烷所占体积分数一度超过 60%, 但随后随气温的下降而回落, COD 浓度在此阶段出现了显著下降.

90 周以后, 填埋场先后进入甲烷发酵阶段. 在产甲烷细菌的作用下, 渗滤液 pH 值开始迅速升至 7.0 以上, 填埋气中甲烷体积分数也从 24.2% 快速上升至 72.4%, ANBL1 号、ANBL2 单元、ANBL3 单元的 COD 浓度也分别从 58 984、33 840、42 864  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  迅速下降到 4 292、1 331、1 616  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . ANBL3 单元和 ANBL2 单元的渗滤液 COD 浓度随时间衰减的拟合公式分别见式(1)和式(2)所示.

$$\rho_{\text{ANBL3}} = 6 \times 10^8 e^{-0.1105t} \quad (1)$$

$$\rho_{\text{ANBL2}} = 1 \times 10^8 e^{-0.1008t} \quad (2)$$

式中,  $\rho_{\text{ANBL3}}$  为 ANBL3 单元的 COD 浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $\rho_{\text{ANBL2}}$  为 ANBL2 单元的 COD 浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $t$  为时间(d). 式(1)和式(2)显示, 在此阶段, 回灌频率为 1 d 1 次的 ANBL3 单元 COD 浓度的衰减系数超过了回灌频率为 3 d 1 次的 ANBL2 单元的衰减系数.

在进入成熟阶段后, COD 浓度分别稳定在 8 105、1 177、1 714  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右. 在实验期间, COD 的去除率分别达到了 90.41%、98.49%、97.98%.

由上分析可知, 与 ANBL 相比, AN-SABL 因串联了 SAARB, 表现出更强的有机物去除能力; 同时, 在酸化阶段, 较低的回灌频率有利于有机物的降解, 在产甲烷阶段, 较高的回灌频率更加有利.

## (2) TOC/TC 值

ANBLs 中渗滤液的 TOC/TC 值的变化趋势见图 3.

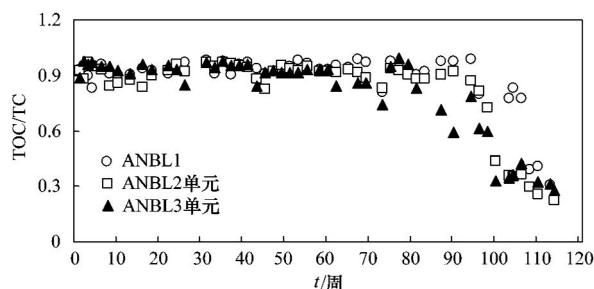


图3 ANBLs 中渗滤液的 TOC/TC 值变化趋势

Fig. 3 Variation of TOC-TC ratio in leachate from ANBLs

在实验期间, ANBLs 中渗滤液的 TC、TOC 浓度, SAARB 的 TC、TOC 去除率变化趋势和 COD 的变化趋势相似. 在甲烷发酵阶段前, ANBLs 渗滤液的 TOC/TC 值一直维持在 0.8 以上, 可生化性很好; 但是进入甲烷发酵阶段后, TOC/TC 值迅速下降至 0.2 左右, 这严重影响了 SAARB 对有机物的去除效果.

## (3) SAARB 出水中的 COD 浓度和去除率

SAARB 出水 COD 浓度及去除率变化趋势如图 4 所示.

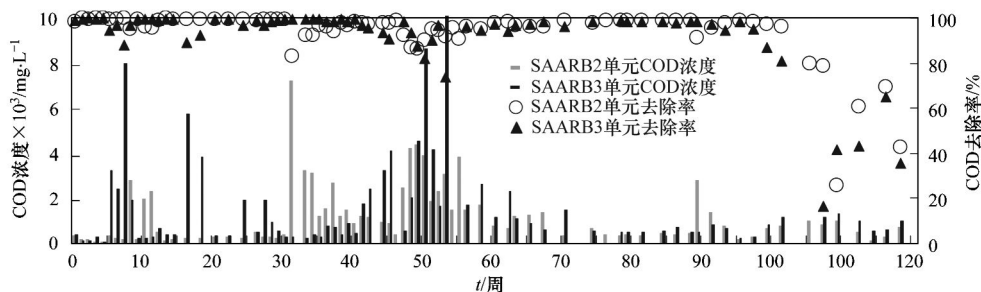


图4 SAARBs 的 COD 去除率和出水浓度变化趋势

Fig. 4 Variation of COD removal rate for SAARBs and COD concentration in effluent

由图 4 可以看出, 在前 100 周内, SAARB 对 COD 的处理效果除个别时段因设备故障导致其严重恶化外(在第 46 周因为 SAARB 单元重新翻填驯化, 表现尤为明显), 大部分时间均表现出强大而稳定的有机物去除能力, 其平均去除率达到了 95% 以

上. 由于 SAARB 内外温差, 导致了空气自然流动动力的变化, 使冬季的去除效果优于夏季, 冬季大部分时间均达到了 99% 以上<sup>[20]</sup>.

根据 Long 等<sup>[21]</sup> 对厌氧矿化垃圾生物反应床 (anaerobic aged refuse biofilter, ANARB) 的研究表

明,在填埋初期,ANARB 对有机物的去除率能达到 99.5% 以上,随着渗滤液中无机碳和难降解有机碳含量的增加,其去除率逐渐下降,最后介于 65.4% ~ 78.0% 之间. 由于 SAARB 与 ANARB 均主要依靠生物作用去除污染物,因此对有机物去除率的变化规律相似. 在后期,SAARB 受渗滤液中 TOC/TC 迅速减小的影响,微生物尚未适应新的环境,其去除率迅速下降,在 35.25% ~ 69.56% 之间波动.

可见,SAARB 对可生化性较好的渗滤液具有高效稳定的去除率. 但是在处理 ANBL 稳定阶段的渗滤液时,需补充碳源,或者增加深度处理,方可实现 SAARB 对渗滤液的高效稳定处理.

## 2.2.2 含氮物质

### (1) TN

图 5 显示了 ANBLs 渗滤液中 TN 浓度的变化趋势.

在初始调整和过渡阶段,有机氮大量被降解,因此 ANBL 渗滤液中的 TN 浓度迅速增加. 到第 12 周,ANBL1 号、ANBL2 单元、ANBL3 单元中渗滤液的 TN 浓度分别达到了 2 070、1 893、2 070  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

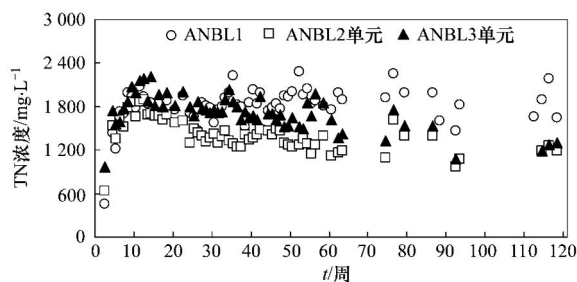


图 5 ANBLs 中渗滤液的 TN 浓度变化趋势

Fig. 5 Variation of TN concentration in leachate from ANBLs

随后 ANBL1 号的 TN 浓度大部分在 1 600 ~ 2 000  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  内波动,在夏季因为有机氮大量降解,其浓度略有积累. ANBL2 单元和 ANBL3 单元渗滤液中的 TN 在 SAARB 单元中得以高效去除,故其浓度一直持续缓慢下降,到实验结束时, TN 浓度下降至 1 200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右.

可见,AN-SABL 能缓解 ANBL 所面临的氮素积累难题,其 TN 的去除主要是依靠 SAARB 进行生物脱氮. SAARB 出水 TN 浓度和去除率的变化趋势如图 6 所示.

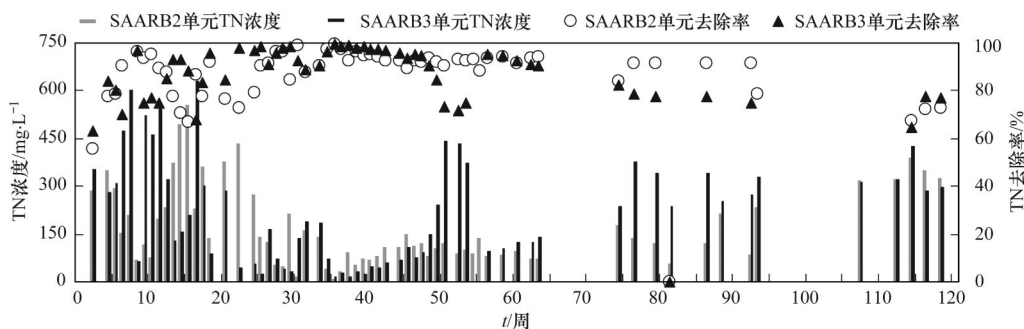


图 6 SAARBs 的 TN 去除率和出水浓度变化趋势

Fig. 6 Variation of TN removal rate for SAARBs and TN concentration in effluent

图 6 中显示,SAARBs 对 TN 的去除率在 30 周之前波动较大,介于 55.6% ~ 98.5% 之间,这主要是由于前 30 周一直在进行微生物驯化以及 SAARB 最优工况的实验,因此不同的回灌操作和水质水量变化导致 TN 去除率变化较大; 30 周以后按照最佳工况运行,去除率明显提高并稳定. SAARB3 单元在 48 周因温控故障,使微生物全部被烧死而重新翻堆驯化,导致其 TN 去除率迅速下降,但随后又恢复良好状态. 实验结果表明,SAARB 在最优工况下,对 TN 具有高效且稳定的去除效果,去除率均在 93% 以上. 这与 Onay 等<sup>[22]</sup>以堆肥垃圾作为基质,通过通风设施在填埋场中从上到下依次形成兼氧、厌氧、好氧环境实现 95% 的氮转化率相当. 但是由

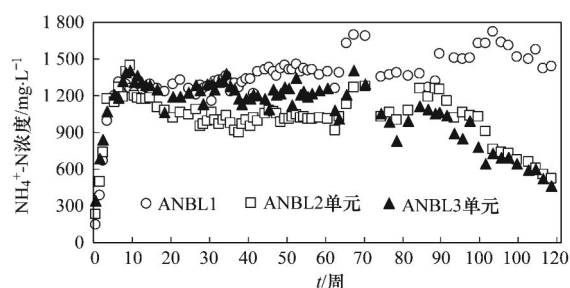
于在甲烷发酵阶段渗滤液中碳源明显减少,抑制了 SAARB 中的反硝化作用,因此 TN 的去除率持续下降,进入成熟阶段后, TN 去除率有所回升,徘徊在 64.53% ~ 77.45% 之间.

上述表明,因为 AN-SABL 中串联了 SAARB 单元,所以与 ANBL 相比,具有明显的脱氮优势. 尤其是在填埋初期和中期,当渗滤液中含有充足的易降解碳源时,SAARB 中矿化垃圾具有很高的反硝化效率<sup>[23]</sup>.

### (2) $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

ANBLs 中渗滤液的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度如图 7 所示.

在初始调整、过渡和酸化阶段,渗滤液中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$  值均在 0.6 ~ 0.9 之间波动,这说明

图7 ANBLs 中渗滤液的 $\text{NH}_4^+$ -N浓度变化趋势Fig. 7 Variation of  $\text{NH}_4^+$ -N concentration in leachate from ANBLs

$\text{NH}_4^+$ -N 是 TN 的主要构成成分, 故 ANBLs 和 SAARBs 的 $\text{NH}_4^+$ -N浓度和去除率变化趋势与 TN 的变化趋势相似. 但是 $\text{NH}_4^+$ -N浓度受 pH 值的影响显著, 随着 ANBL1、ANBL2 单元、ANBL3 单元中渗滤液 pH 值先后上升到 7.0 以后,  $\text{NH}_4^+$ -N浓度分别从第 103 周、第 88 周、第 84 周开始出现明显的下降趋势. 其中 ANBL2 单元和 ANBL3 单元的 $\text{NH}_4^+$ -N浓度分别从最高值 $1452 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1409 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至成熟期的 $525 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $459 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而且 $\text{NH}_4^+$ -N/TN 值也迅速下降到 0.4 左右. 这一方面是由于 SAARB 单元的脱氮作用, 另一方面也是由于在碱性环境中, 大量 $\text{NH}_4^+$ 转化成 $\text{NH}_3$ 挥发所致. 但是 ANBL1 号由于 pH 上升时间滞后, 加之没有 SAARB 的脱氮作用,  $\text{NH}_4^+$ -N浓度仍然高达 $1437 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+$ -N/TN 值也未发生明显变化.

### (3) $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N

$\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N受 Eh 值的影响明显. 在整个实验期间, 由于 ANBLs 内部呈厌氧环境, 渗滤液中的 $\text{NO}_2^-$ -N浓度一直低于检测限. 但是在 ANBLs 中存在氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌<sup>[21]</sup>, 故 $\text{NO}_3^-$ -N仍然被检测到. 在甲烷发酵阶段之前, 渗滤液的 Eh 值大部分介于 $-100 \sim -150 \text{ mV}$ 之间, 渗滤液中 $\text{NO}_3^-$ -N浓度绝大多数都在 $50 \sim 120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动; 在进入甲烷发酵阶段后, Eh 值迅速下降至 $-300 \text{ mV}$ 以下, 渗滤液中 $\text{NO}_3^-$ -N浓度明显下降, 大部分低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

实验中 SAARBs 一直保持较高的温度, 氨氧化菌的生长率要比亚硝酸盐氧化菌的生长率更高<sup>[24,25]</sup>, 故 SAARBs 中出现了不同程度的 $\text{NO}_2^-$ -N积累, 但对氨氮的去除率非常高. 在前期驯化和优化实验中(30 周之前), 因操作条件和水质水量变动较大, 矿化垃圾通透性较好, 故 SAARBs 出水的 $\text{NO}_3^-$ -N浓度较高,  $\text{NO}_2^-$ -N浓度也在介于检测限以下至 $25.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之

间波动. 按照最优工况运行后, 大部分时间段 $\text{NO}_3^-$ -N浓度小于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_2^-$ -N浓度也均小于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 在进入甲烷发酵阶段后,  $\text{NO}_3^-$ -N浓度回升到 $100 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间;  $\text{NO}_2^-$ -N浓度出现轻微上升, 在 $1.04 \sim 2.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动.

## 3 结论

(1) AN-SABL 具有明显的渗滤液减量化效果, 主要是依靠 SAARB 单元的蒸发作用; 增大回灌频率, 可增加渗滤液的削减量.

(2) AN-SABL 渗滤液的污染物变化规律与传统卫生填埋场类似, 呈现出显著的阶段化特征, 可分为初始调整、过渡、酸化、甲烷发酵和成熟等 5 个阶段.

(3) AN-SABL 表现出更强的有机物降解能力. 而且在酸化阶段, 较低的回灌频率有利于有机物的降解, 在产甲烷阶段, 较高的回灌频率更加有利.

(4) AN-SABL 具有一定的脱氮能力, 能缓解填埋场中氮素的积累现象. 在初始调整、过渡和酸化阶段, 主要依靠 SAARB 单元的脱氮作用, 在产甲烷阶段和成熟阶段, 氨挥发也是脱氮的途径之一.

(5) AN-SABL 中 $\text{NO}_3^-$ -N浓度受内部厌氧环境影响明显. 渗滤液中 $\text{NO}_3^-$ -N浓度在甲烷发酵阶段之前, 介于 $50 \sim 120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 之后大部分低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

(6) SAARB 具有高效而稳定的除碳脱氮效果, 但是受 TOC/TC 值的影响明显, 在甲烷发酵阶段后期和成熟阶段, 需要补充碳源, 或增加深度处理单元, 方可达到良好的渗滤液处理效果.

### 参考文献:

- [1] He P J, Qu X, Shao L M, *et al.* Leachate pretreatment for enhancing organic matter conversion in landfill bioreactor[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **142**(1-2): 288-296.
- [2] Fang C R, Long Y Y, Wang W, *et al.* Behavior of dibutyl phthalate in a simulated landfill bioreactor[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **167**(1-3): 186-192.
- [3] He R, Shen D S, Wang J Q, *et al.* Biological degradation of MSW in a methanogenic reactor using treated leachate recirculation[J]. Process Biochemistry, 2005, **40**(12): 3660-3666.
- [4] Noparatana A, Clarke W P, Pullammanappallil P C, *et al.* Evaluation of methanogenic activities during anaerobic digestion of municipal solid waste[J]. Bioresource Technology, 1998, **64**(3): 169-174.
- [5] 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.
- [6] He P J, Shao L M, Qu X, *et al.* Effects of feed solutions on refuse hydrolysis and landfill leachate characteristics [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(6): 837-844.
- [7] Zhong Q, Li D P, Tao Y, *et al.* Nitrogen removal from landfill leachate via *ex situ* nitrification and sequential *in situ* denitrification[J]. *Waste Management*, 2009, **29**(4): 1347-1353.
- [8] Prantl R, Tesar M, Huber-Humer M, *et al.* Changes in carbon and nitrogen pool during *in-situ* aeration of old landfills under varying conditions[J]. *Waste Management*, 2006, **26**(4): 373-380.
- [9] Long Y, Hua L F, Shen D S. Nitrogen transformation in the hybrid bioreactor landfill [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(9): 2527-2533.
- [10] 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.
- [11] He R, Liu X W, Zhang Z J, *et al.* Characteristics of the bioreactor landfill system using anaerobic-aerobic process for nitrogen removal[J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(13): 2526-2532.
- [12] 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): 1361-1363.
- [13] 石磊, 张全, 牛冬杰, 等. 矿化垃圾反应床处理渗滤液的微生物学特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, **35**(8): 1085-1089.
- [14] 何岩, 赵由才, 柴晓利, 等. 塔式矿化垃圾生物反应床处理垃圾填埋场渗滤液的效能研究[J]. 环境污染与防治, 2007, **29**(7): 502-509.
- [15] 陶正望, 夏立江, 王进安. 矿化垃圾生物反应床处理垃圾渗滤液的效果[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(1): 213-216.
- [16] Li H J, Zhao Y C, Shi L, *et al.* Three-stage aged refuse biofilter for the treatment of landfill leachate [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(1): 70-75.
- [17] Han Z Y, Liu D, Li Q B, *et al.* A novel technique of semi-aerobic aged refuse biofilter for leachate treatment[J]. *Waste Management*, 2011, **31**(8): 1827-1832.
- [18] 刘丹, 张爱平, 陈锦文. 准好氧生物反应器处理渗滤液系统的驯化研究[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(19): 80-82.
- [19] Reinhart D R, Al-Yousfi A B. The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics[J]. *Waste Management and Research*, 1996, **14**(4): 337-346.
- [20] 刘丹, 韩智勇, 李启彬, 等. 一种处理高浓度渗滤液的新工艺研究[J]. 世界科技研究与发展, 2011, **33**(5): 795-789.
- [21] Long Y, Guo Q W, Fang C R, *et al.* *In situ* nitrogen removal in phase-separate bioreactor landfill [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(13): 5352-5361.
- [22] Onay T T, Pohland F G. *In site* nitrogen management in controlled bioreactor landfills [J]. *Water Research*, 1998, **32**(5): 1383-1392.
- [23] 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.
- [24] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. *Journal Water Pollution Control Federation*, 1976, **48**(5): 835-852.
- [25] Beccari M, Marani D, Ramadori R. A critical analysis of nitrification alternatives [J]. *Water Research*, 1979, **13**(2): 185-192.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                |                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Characteristics of Atmospheric NO <sub>2</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations                                   | ··· WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang ( 3685 )                                 |
| Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011                                                                                       | ····· YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> ( 3693 )        |
| Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou                                                                                                                                          | ····· WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> ( 3705 )              |
| Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China                                                               | ····· LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> ( 3712 )           |
| BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou                                                                                                                                           | ····· YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> ( 3718 )               |
| Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information                                                                                                | ····· HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> ( 3725 )          |
| Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends                                                                          | ····· HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> ( 3733 )          |
| Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary                                                                                              | ····· YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> ( 3739 )             |
| Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi                                                                                             | ····· SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 3748 )             |
| Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed                                                                                                                 | ····· LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng ( 3753 )                          |
| Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing                                                                                                   | ····· LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> ( 3760 )           |
| Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China                                                                                                                                 | ····· ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> ( 3768 )        |
| Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China                                                                                                  | ····· SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua ( 3778 )                                  |
| Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir                                                                                                        | ····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> ( 3787 )     |
| Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants                                                                                  | ····· SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong ( 3797 )                          |
| Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems                                                                                                                      | ····· WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> ( 3804 ) |
| Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater                     | ····· WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming ( 3812 )                       |
| Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland                                                                                                                 | ····· GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> ( 3820 )                |
| Degradation of $\beta$ -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation                                                                                                                                | ····· LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> ( 3826 )            |
| Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System                                                                                                                   | ····· SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> ( 3833 )            |
| Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO <sub>2</sub> Composite                                                                            | ····· SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> ( 3840 )                 |
| Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid                                                                                                         | ····· DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> ( 3847 )    |
| Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process                                                                                                   | ····· XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> ( 3854 )       |
| Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment                                                                         | ····· XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> ( 3859 )       |
| Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor                                                                                                | ····· LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> ( 3868 )         |
| Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill                                                                                                    | ····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> ( 3873 )                |
| National Survey of Urban Sewage Reuse in China                                                                                                                                                 | ····· GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min ( 3881 )                       |
| Sorption and Desorption of 17 $\alpha$ -Ethinyl Estradiol and 4- <i>n</i> -Nonylphenol in Soil                                                                                                 | ····· JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> ( 3885 )            |
| Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China                                                               | ····· MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai ( 3893 )                            |
| Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area                                                                                                                   | ····· WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> ( 3901 )                  |
| Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China                                               | ····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> ( 3905 ) |
| Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions                                                                                                                             | ····· WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> ( 3916 )                 |
| Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process                                                                                                      | ····· FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> ( 3922 )             |
| Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging                                                                                                                  | ····· FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> ( 3927 )              |
| Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints                                                           | ····· ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> ( 3935 )        |
| Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai                                                                       | ····· CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> ( 3941 )        |
| Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria                                                                                                    | ····· WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> ( 3949 )                  |
| Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10                                                                                       | ····· CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> ( 3956 )            |
| Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation                                                                                                          | ····· QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> ( 3962 )          |
| Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil                                      | ····· YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> ( 3967 )           |
| Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types                                                                                                | ····· HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> ( 3976 )              |
| Degradation of Carbendazim in Paddy Soil and the Influencing Factors                                                                                                                           | ····· XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang ( 3983 )                       |
| Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature | ····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu ( 3990 )                                     |
| Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere                                                                                                    | ····· JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU Xu, <i>et al.</i> ( 3999 )                 |
| Hourly Measurement on Aerosol NH <sub>3</sub> and Gas NO <sub>x</sub> Emission in the Rice Field                                                                                               | ····· GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji ( 4006 )                                    |
| Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloroalkane and Chloroalkene                                                                                             | ····· WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> ( 4012 )               |
| Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling                                                                         | ····· SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> ( 4018 )                   |
| Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujian Watershed                                                                        | ····· DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao ( 4025 )                                   |
| Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland                                                                                                                     | ····· CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> ( 4033 )      |
| Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR                                                                                        | ····· LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> ( 4040 )                   |
| Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling                                                                                                                 | ····· ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> ( 4046 )     |
| A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale                                                                                                                | ····· ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> ( 4052 )      |
| Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification                                                                                                                  | ····· XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> ( 4057 )               |
| Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene                                                                   | ····· CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> ( 4062 )        |

# 《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)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

|       |                                                                                                                                                                     |                 |    |                                                                                                                                                                                                                     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored    | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市 2871 信箱(海淀区双清路<br>18 号, 邮政编码: 100085)<br>电话: 010-62941102, 010-62849343<br>传真: 010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees.ac.cn<br>http://www.hjkx.ac.cn | Edited          | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees.ac.cn<br>http://www.hjkx.ac.cn |
| 出 版   | 科学出版社<br>北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码: 100717                                                                                                                              | Published       | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话: 010-64017032<br>E-mail: journal@mail.sciencep.com                                                                                                      | Distributed     | by | Science Press<br>Tel: 010-64017032<br>E-mail: journal@mail.sciencep.com                                                                                                                                             |
| 订 购 处 | 全国各地邮局                                                                                                                                                              | Domestic        |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                     |
| 国外总发行 | 中国国际图书贸易总公司<br>(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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊