



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202303168 中图分类号 X33 文献标识码 A

刘爽, 李沛焯, 陈恺, 等. 原位生物强化好氧稳定化技术在温州市某垃圾填埋场治理工程中的应用[J]. 环境工程学报, 2023, 17(7): 2334-2341. [LIU Shuang, LI Peiye, CHEN Kai, et al. Application of in-situ biological enhanced aerobic stabilization technology in a landfill treatment project in Wenzhou[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(7): 2334-2341.]

# 原位生物强化好氧稳定化技术在温州市某垃圾填埋场治理工程中的应用

刘爽, 李沛焯, 陈恺, 宋慧敏, 田立斌<sup>✉</sup>

中科鼎实环境工程有限公司, 北京 100028

**摘要** 针对目前非正规垃圾填埋场采用的传统原位好氧稳定化技术稳定时间长、效率低的问题, 采用原位生物强化好氧稳定化技术, 在温州市某非正规垃圾填埋场治理中进行中试应用, 并与传统好氧稳定化技术治理效果进行对比试验。研究表明: 原位生物强化好氧稳定化技术可加速有机垃圾的生物降解, 平均沉降量较好氧稳定化处理高 54%; 有机质质量分数较好氧稳定化处理低 33.8%, 提前 5 个月降低至有机质质量分数的修复目标值 16% 以下; 填埋气体 CH<sub>4</sub> 体积分数降低至 1.5% 左右, 较好氧稳定化处理低 28.6%, 且稳定时间缩短了 5 个月; 渗滤液 COD 值较好氧稳定化处理低 32.8%, BOD 值较好氧稳定化处理高 47.5%; 氨氮质量浓度较好氧稳定化处理低 32.7%, 原位生物强化好氧稳定化技术的成功运行, 为填埋场的快速稳定化提供新的思路与技术手段。  
**关键词** 非正规垃圾填埋场; 生物强化; 原位; 好氧稳定

上世纪 90 年代以前, 由于我国城市垃圾处理能力有限, 生活垃圾直接采用倾倒或简单填埋。目前全国范围内规模性的非正规垃圾填埋场已超 3 000 座<sup>[1]</sup>, 不仅占用大量土地资源, 而且垃圾中的有害成分易被渗滤液浸出, 并随着渗滤液在堆体内发生迁移, 造成周边土壤及地下水污染<sup>[2]</sup>。因此, 对其进行稳定化无害处理恢复绿色健康的城市环境迫在眉睫。

目前, 常见的非正规垃圾填埋场治理技术包括: 原位封场技术、整体搬迁减量技术、好氧稳定化技术及开采筛分技术<sup>[3]</sup>。其中好氧稳定化治理技术由于可以加速微生物对垃圾中可生物降解有机物的分解, 并且实现温室气体减排, 因此在非正规垃圾场治理中备受关注<sup>[4-5]</sup>。生物强化技术是在好氧稳定化技术的基础上向自然菌群中投加单一优势菌种或复合高效菌种, 由于复合过程中微生物之间相互作用, 充分发挥协同增效作用, 形成结构稳定、功能更强的微生物菌群, 因此可以提高传统处理系统的降解能力<sup>[6-7]</sup>。

微生物絮凝剂可降低渗滤液中有有机物的浓度, COD 去除率可以达到 80% 以上<sup>[8]</sup>。纤维素降解菌群、渗滤液 COD 降解菌群、絮凝剂产生菌群构成的复合菌系协同作用明显, 能有效激活原填埋体系中土著微生物的活性, 对减少渗滤液产量、降低 COD 和氨氮浓度效果较好<sup>[9]</sup>。目前对于复合菌剂的研究大多集中在渗滤液污染物处理方面, 对其促进填埋垃圾稳定化进程的研究较少, 尤其是在实际的工程应用中<sup>[10]</sup>。本研究在温州市某非正规填埋场中引入纤维素降解菌、高效木质素降

收稿日期: 2023-03-29; 录用日期: 2023-05-29

第一作者: 刘爽 (1981—), 女, 博士, E-mail: 596247381@qq.com; ✉通信作者: 田立斌 (1984—), 男, 博士, E-mail: libini2233@163.com

解菌、COD降解菌、微生物絮凝剂产生菌和脱氨除臭菌等功能菌菌株混合培养后得到复合功能菌剂，进行原位生物强化好氧稳定化技术的中试研究，定期评价该技术对填埋场稳定化的处理效果，并与好氧稳定化治理的结果进行对比。研究成果可为非正规填埋场治理方案的优化提供技术支持，对非正规填埋场的治理具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 温州市某非正规垃圾填埋场研究区概况

温州市某非正规垃圾填埋场经现场勘察及取样检测，填埋场占地面积约 100 612.93 m<sup>2</sup>，南北长 200 m，东西宽 430 m，填埋垃圾约 1.7×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>，最高堆填深度 24 m，平均填埋深度 15 m；垃圾堆体内有机质质量分数为 30%~52%，CH<sub>4</sub> 体积分数为 15.00%~31.14%。在堆体填埋较为平整的区域选取 1 000 m<sup>2</sup> 作为中试区域，该区域填埋垃圾均为生活垃圾，填埋时间大于 10 年，填埋深度均在 13~18 m 内。在填埋场中采取阻隔技术，对照区域为 500 m<sup>2</sup> 好氧稳定化治理区域，实验区域为 500 m<sup>2</sup> 添加复合菌剂结合好氧稳定化治理区域。

### 1.2 复合菌剂的制备

本研究供试菌种来源于温州市某非正规垃圾填埋场的渗滤液样品，经进一步筛选后得到功能菌。具体过程先分离菌种，将渗滤液用无菌水稀释成稀释倍数分别为 10、10<sup>2</sup>、10<sup>3</sup>、10<sup>4</sup>、10<sup>5</sup>、10<sup>6</sup> 的系列菌悬液后，各取 0.2 mL 分别接种到 20 mL 的牛肉膏蛋白胨液体培养基中，于 30 ℃、200 r·min<sup>-1</sup> 的摇床上进行培养，第 2、4、6 d 时得到混合菌液。采用形态学和生理生化实验，参照《伯杰细菌手册》(第八版)<sup>[11]</sup> 进行鉴定，经菌株基因组提取、提取基因组的 PCR 扩增、PCR 产物的测序的分子鉴定方法鉴定出高效木质素降解菌<sup>[12]</sup> 及脱氨除臭菌菌种<sup>[13]</sup>；刚果红鉴定培养基进行纤维素降解菌的识别<sup>[14]</sup>；通过采用重铬酸钾法测定 COD<sup>[15]</sup>，选取降解能力强的优势 COD 降解菌；根据发酵液的絮凝活性确定高产絮凝菌株<sup>[16]</sup>。

1) 功能菌的拮抗研究。将筛选出的纤维素降解菌、高效木质素降解菌、COD 降解菌、高产絮凝菌、脱氨除臭菌两两进行拮抗实验<sup>[17]</sup>，以接种针挑取少量菌悬液，接种至固体 LB 培养基平板中，同时将另一种以同样的方法点接至该菌种相邻位置，设置 3 个平行试验，于 37 ℃ 培养箱培养 12~24 h，观察 2 株菌种是否存在明显的无菌带，若存在则表明 2 菌种之间存在拮抗作用，否则无拮抗作用。

2) 复合菌剂修复效果评估。各菌种生长稳定后，混合得到菌种的复合培养物，调节菌悬液的浊度 OD<sub>600</sub> 为 0.8 左右，制成复合微生物菌剂备用，渗滤液回灌量根据垃圾堆体湿度变化而变化，将活化后的菌悬液按回灌液的 2%~4% 的量<sup>[18]</sup>，采用回灌的方式，将其添加至实验区域中，回灌频率为每周 2 次，以添加等体积自来水至对照区域。通过复合菌剂对填埋场中填埋垃圾、渗滤液和臭气去除的效果，最终验证生物强化好氧稳定化技术的治理效果。

### 1.3 原位生物强化好氧稳定化技术系统组成

原位生物强化好氧稳定化技术处理系统由气体系统、液体系统和检测系统组成。其中气体系统包括空气注入系统、填埋气抽出系统、尾气吸收系统；液体系统包括渗滤液抽提系统、渗滤液回灌系统、渗滤液处理系统。系统运行过程中气体系统和液体系统会对垃圾堆体产生主要作用。垃圾堆体的情况主要由监测系统通过压力、流量、堆体沉降、气体成分、渗滤液成分等指标来体现。温州市某非正规垃圾填埋场原位生物强化好氧稳定化治理技术系统见图 1。

1) 气体与液体系统参数设计。气体系统是填埋场好氧稳定化治理工艺系统中的重要组成部分，主要包含注气系统、抽气系统、尾气吸收系统以及相应的控制系统。根据填埋场现场情况对照区域和实验区域各设置 2 眼注汽井，好氧反应器抽出的气体量大约为 11 000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>，由于气量波

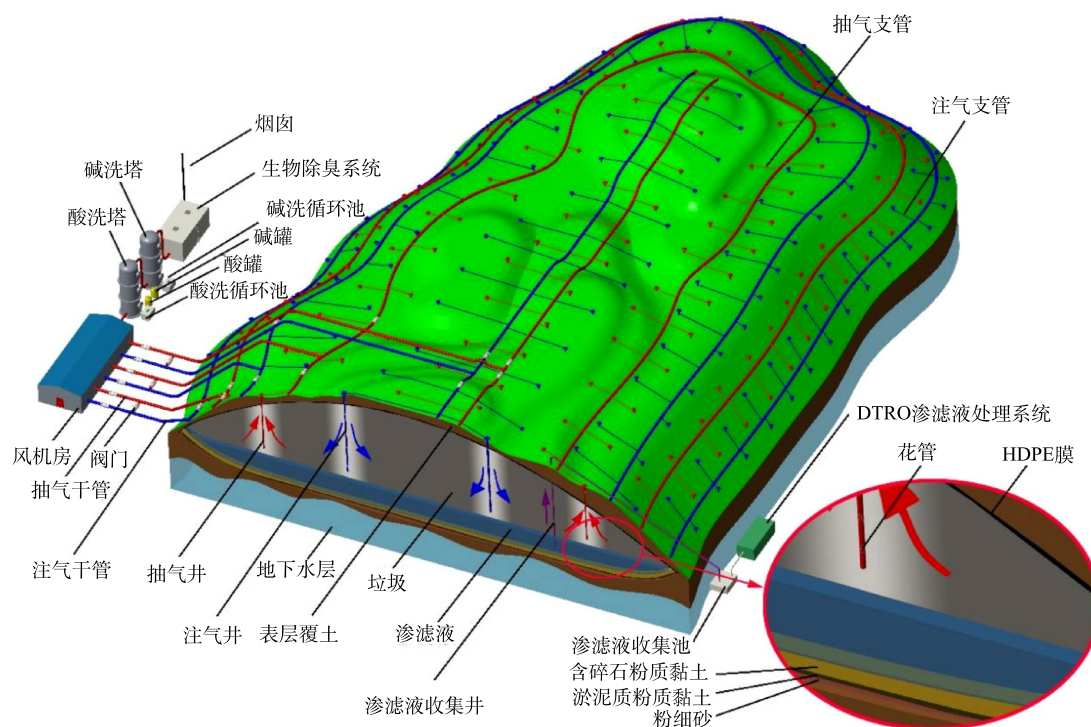


图1 温州市某非正规垃圾填埋场原位生物强化好氧稳定化治理系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of in-situ biological enhanced aerobic stabilization treatment system for an informal landfill in Wenzhou

动，实验区域与对照区域各采用1套处理能力为 $12\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的末端除臭设备，除臭系统采用化学酸洗+化学碱洗+恶臭气体处理成套设备(植物液洗涤+植物液气相吸收+气雾分离组合)工艺。液体系统主要由渗滤液收集系统、注水系统、渗滤液处理系统以及相应的控制系统组成，根据实际情况进行参数设置。

2) 监测系统参数设计。温州市某非正规垃圾填埋场研究区的数据监测系统包括地表沉降监测、垃圾气体检测系统、地下水检测系统3个部分。通过监测好氧稳定化治理前、治理过程中垃圾堆体沉降、渗滤液、填埋气等变化情况，来综合判断修复治理效果。

①地表沉降监测系统：由沉降观测点组成，对照区域和实验区域各设置2处沉降观测点。

②填埋气体监测：本方案利用抽气井和综合监测井进行气体监测。每4眼抽气井设置1个DN10球阀作为气体采样口，共设置2个。每个综合监测井设置1个气体采样口，共设置2个。

③地下水监测系统：本系统由地下水监测井组成。对照区域和实验区域各选择了1处作为地下水的监测点，定期监测垃圾渗滤液对地下水的影响情况。

④气象监测站：设计1套多功能气象监测站，用于记录天气条件，包括温度、风速、雨量等。

#### 1.4 原位生物强化好氧稳定化技术治理监测方案

在原位生物强化好氧稳定化技术治理前、治理过程中及治理后监测各项指标，并将场地分为对照区域和实验区域进行相关指标监测来评价原位生物强化好氧稳定化技术的修复效果。

1) 监测指标与频率。温州市某非正规垃圾填埋场治理系统运行12个月，前3个月为试运行期，后9个月为稳定运行期。需要监测沉降、有机质、填埋气体成分、渗滤液成分等，详细监测参数、监测频率、监测方式和参考标准见表1。



表1 监测项目及监测方式  
Table 1 Monitoring items and monitoring methods

监测项目	监测参数	监测频率	监测方式	标准方法
沉降	堆体标高值或沉降值	每周监测1次	现场自检	无
垃圾成分	有机质质量分数	本底值监测1次、运行中期监测1次	委托第三方检测	《生活垃圾化学特性通用检测方法》(CJ/T 96-2013) <sup>[19]</sup> 《生活垃圾采样和分析方法》(CJ/T 313-2009) <sup>[20]</sup>
填埋气成分	甲烷、氧气	全天开启, 全天监测	气体成分检测系统自动在线监测	无
渗滤液成分	化学需氧量、生化需氧量、氨氮、硝态氮	每月监测1次	委托第三方检测	《水质5日生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )的测定稀释与接种》(HJ 505-2009) <sup>[21]</sup>

## 2 结果与讨论

利用复合功能菌剂形成生物强化好氧稳定化处理技术, 应用于温州市某非正规垃圾填埋场, 对比好氧稳定化处理技术治理下的有机质、填埋气体成分、渗滤液成分等指标, 验证原位生物强化好氧稳定化技术对非正规垃圾填埋场的治理效果。

### 2.1 复合功能菌剂培养结果

经筛选、分离和鉴定后获得纤维素降解菌、高效木质素降解菌、COD降解菌、微生物絮凝剂产生菌和脱氨除臭菌等功能菌的菌株, 将各功能菌种两两进行拮抗试验后, 得出各功能菌种之间均无拮抗作用。因此, 由各株高效功能菌种等体积混合培养后得到复合功能菌剂, 各功能菌种具有协同作用, 复合功能菌剂具有综合治理效果。

### 2.2 填埋垃圾堆体沉降特征

垃圾堆体的沉降情况是反映好氧稳定化治理效果的重要指标, 在对照区域与实验区域内各设置了2个沉降监测点, 根据监测点的测量, 运行期对照区域2个沉降监测点位平均沉降11.3 cm, 最大沉降量达25.7 cm。实验区域垃圾堆体沉降更为明显, 2个沉降监测点位平均沉降17.4 cm, 最大沉降量达33.9 cm, 较对照区域高54.0%。唐建等<sup>[22]</sup>通过模拟填埋场的实验方法得到相同的结论, 研究发现投加优势复合微生物菌剂后垃圾堆体沉降率为71.3%, 对照组沉降率为63.0%, 这充分说明了结合生物强化技术好氧治理对垃圾堆体的降解效果良好, 故产生了如此明显的沉降变化。

### 2.3 填埋垃圾有机质特征

填埋垃圾中有机质的质量分数反映垃圾的生物降解的程度。在好氧稳定化运行之前, 温州市某非正规垃圾填埋场垃圾有机质质量分数达到30%~52%, 说明此时垃圾堆体整体含有较高的可生物降解成分。好氧稳定化运行期间有机质含量逐步降低, 运行1年后, 实验区域与对照区域垃圾有机质质量分数均低于《生活垃圾填埋场稳定化场地利用技术要求》(GB/T-25179-2010)<sup>[23]</sup>规定的中度利用垃圾有机质质量分数要求的16%, 达到治理目的。2区域对比来看, 实验区域仅运行5个月便降解到15.7%, 最终降至10.4%, 接近高度利用要求, 而对照区域运行10个月才降解至16%以下, 实验区域较对照区域低33.8%。邱忠平等<sup>[14]</sup>在微生物菌剂对好氧填埋垃圾稳定过程的影响研究中也发现, 微生物菌剂可以加速填埋垃圾有机质的降解, 至实验结束时总有机质质量分数较对照组低8.82%。这证明了原位好氧稳定化技术结合生物强化技术在温州市某非正规垃圾填埋场的处理中取得了良好的修复效果。温州市某非正规垃圾填埋场原位生物强化好氧稳定化运行过程中有机质变化见图2。

## 2.4 填埋气体成分特征

填埋气体的主要成分是  $\text{CH}_4$  和  $\text{O}_2$ 。  $\text{O}_2$  体积分数水平决定了垃圾场中好氧和厌氧微生物的活跃状态, 用来衡量有机物的分解效果。修复前  $\text{CH}_4$  体积分数高,  $\text{O}_2$  体积分数低。在温州市某非正规垃圾填埋场处理过程的第一阶段(试运行前3个月), 实验区域  $\text{CH}_4$  体积分数在运行第3个月时显著下降到4%左右, 之后稳定在1.5%左右,  $\text{O}_2$  体积分数从0迅速上升到18%左右。对照区域  $\text{CH}_4$  体积分数在运行第8个月时下降到5%以下, 在第10个月时稳定在2.1%左右,  $\text{O}_2$  体积分数在运行第10个月时从0上升到18%左右。2种气体在稳定阶段基本保持不变, 整个运行系统都处于好氧状态。通过2个区域之间的结果对比可以发现, 在生物强化好氧稳定化治理下, 最终排放的  $\text{CH}_4$  体积分数更低, 较对照区域低28.6%, 且稳定时间缩短了5个月。马先芮等<sup>[24]</sup>发现瑞安东山垃圾填埋场好氧稳定化系统运行14个月后,  $\text{CH}_4$  浓度下降到5%以下, 相较之下, 温州市某非正规垃圾填埋场采用生物强化好氧稳定化技术能更快促进稳定化进程。温州市某非正规垃圾填埋场生物强化好氧稳定化运行过程中填埋气体成分变化见图3。

## 2.5 渗滤液成分特征

温州市某非正规垃圾填埋场未处理的渗滤液 pH 范围为 7.7~8.3, 呈弱碱性, COD 和 BOD 值分别维持在  $2410$  和  $299 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。氨氮体积分数较高, 属于典型的填埋龄较高的垃圾填埋场, BOD/COD 为 0.12, 比值低说明渗滤液中可生物降解的物质含量低<sup>[25]</sup>。

1) COD 和 BOD 的变化。对照区域 COD 值在好氧稳定化系统运行 10 个月后下降到  $513 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 并达到一个相对稳定的状态。实验区域 COD 值随着生物强化好氧过程发展 3 个月内大幅度下降至  $523 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 之后在  $350 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右小幅波动, 较对照组低 32.8%。对照区域在系统运行的整个过程中 BOD 值无较大差异, 变化趋势较稳定, 在  $300\sim 320 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  内略有波动。实验区域在运行第五个月后 BOD 值稳步上升最终至  $453 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 较对照区域高 47.5%。邱忠平等<sup>[14]</sup>在相似的研究中发现, 微生物菌剂可加速有机垃圾的生物降解, 降低填埋场 COD 的污染负荷, 使整个填埋周期所产渗滤液 COD 的总量较对照组低 20.2%。而渗滤液 BOD 值上升的现象也同样出现在德国某垃圾填埋场好氧治理期间<sup>[26]</sup>。这可能是由于投加复合菌剂后微生物生长快, 且部分难降解的物质随着好氧稳定化系统的运行而变成了易被降解的物质, 所以导致 BOD 值升高。由此可见, 生物强化好氧稳定化治理对降低垃圾填埋场渗滤液 COD 有较好的效果。温州市某非正规垃圾填埋场生物强化好氧稳定化运行过程中渗滤液 COD 和 BOD 变化见图 4。

2) 氨氮和硝态氮的变化。对照区域测定结果显示, 随着运行进程氨氮质量浓度从运行初期的

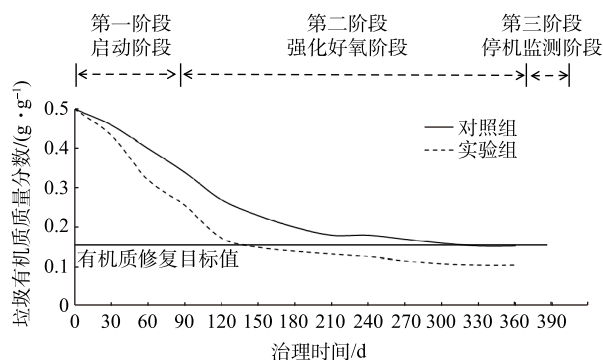


图2 温州市某非正规垃圾填埋场有机质变化  
Fig. 2 Changes of organic matter in an informal landfill in Wenzhou

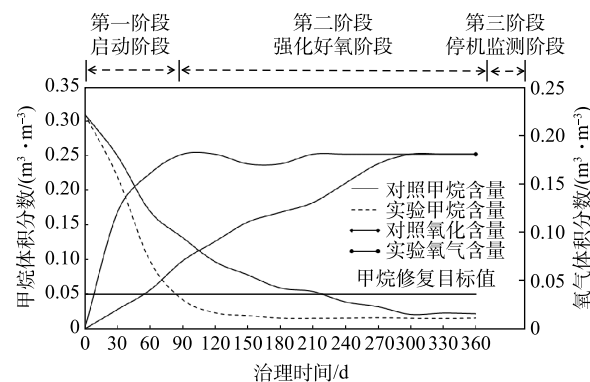


图3 温州市某非正规垃圾填埋场填埋气体成分变化  
Fig. 3 Changes of landfill gas composition in an informal landfill in Wenzhou

918 mg·L<sup>-1</sup> 在系统运行 10 个月后下降到 357 mg·L<sup>-1</sup>, 然后在 300~400 mg·L<sup>-1</sup> 波动。实验区域氨氮质量浓度从运行初期的 918 mg·L<sup>-1</sup> 下降到 240 mg·L<sup>-1</sup>, 之后趋于稳定。相比之下, 生物强化好氧稳定化处理对降低垃圾渗滤液中的氨氮质量浓度效果更好, 较对照区域低 32.7%。唐建等<sup>[15]</sup> 同样发现投加优势复合微生物菌剂后氨氮质量浓度比对照组氨氮质量浓度低 77.78 mg·L<sup>-1</sup>, 说明投加优势复合微生物菌剂有利于加快渗滤液中氨氮稳定。而 2 个区域硝态氮质量浓度的变化相对稳定, 对照区域在 0~100 mg·L<sup>-1</sup> 波动, 实验区域在 0~50 mg·L<sup>-1</sup> 波动。这与田立斌等<sup>[27]</sup> 在北京某垃圾填埋场好氧稳定化降解过程中渗滤液硝态氮变化情况一致。由此可以得出生物强化好氧稳定化处理对降低垃圾渗滤液中的氨氮质量浓度效果更好, 但对硝态氮的影响不明显的结论。温州市某非正规垃圾填埋场治理后渗滤液中氨氮和硝态氮变化见图 5。

### 3 结论

1) 原位生物强化好氧稳定化处理垃圾堆体沉降效果较好氧稳定化处理效果好。

2) 原位生物强化好氧稳定化处理有机质质量分数最终达到生活垃圾填埋场稳定化场地利用的高度利用要求, 较好氧稳定化处理区域质量分数低, 且能够提前 5 个月达到稳定化。

3) 原位生物强化好氧稳定化处理下 CH<sub>4</sub> 的体积分数较好氧稳定化处理的低, 稳定时间缩短了 5 个月, 碳排放潜力减少, 实现削减填埋场封场后温室气体无组织排放的效果。

4) 原位生物强化好氧稳定化处理下 COD 值较好氧稳定化处理低, BOD 值较好氧稳定化处理高, 有利于加快渗滤液中氨氮稳定, 对降低垃圾渗滤液中的氨氮质量浓度效果更好, 对硝态氮的影响不明显。

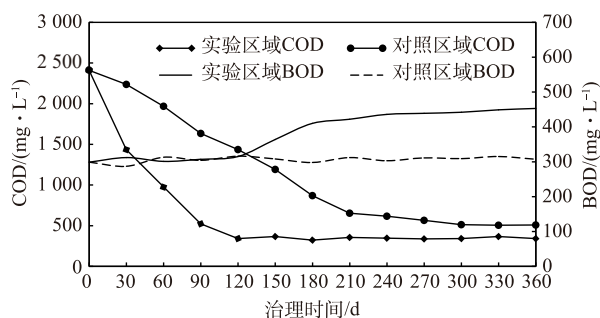


图 4 温州市某非正规垃圾填埋场渗滤液 COD、BOD 值变化

Fig. 4 Changes of COD and BOD values of leachate in an informal landfill in Wenzhou

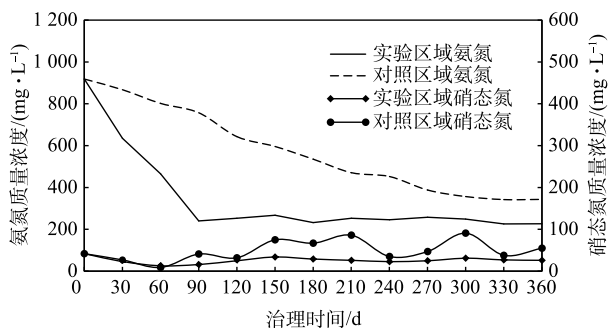


图 5 温州市某非正规垃圾填埋场渗滤液氨氮和硝态氮值变化

Fig. 5 Changes of Ammonia Nitrogen and Nitrate Nitrogen of leachate in an Informal Landfill in Wenzhou

## 参考文献

- [1] 李玲, 喻晓, 王颀军, 等. 武汉市某简易垃圾填埋场稳定化评价研究[J]. 环境工程学报, 2015, 33(11): 129-132.
- [2] 叶舒帆, 郭永生, 潘霞, 等. 某非正规垃圾填埋场场地调查与污染评价[J]. 环境工程学报, 2021, 39(3): 214-219.
- [3] 葛恩燕, 胡超. 生活垃圾填埋场开采筛分处置技术研究——以卧旗山垃圾填埋场为例[J]. 环境卫生工程, 2022, 30(5): 88-93.
- [4] 冯杨, 刘志刚, 王保军. 好氧稳定化处理技术在垃圾填埋场的应用[J]. 东北水利水电, 2015, 33(8): 49-51.
- [5] 张可, 龙吉生, 刘义行, 等. 填埋场好氧修复过程碳排放特征及削减研究[J]. 环境工程学报, 2022, 40(12): 17-21.
- [6] BASRI D R H, MOHAMED A A K, AZIZ HA. The effectiveness of cockle shells in treating leachate organic pollutants ' in ISWA international symposium and exhibition on waste management in Asian Cities[C]. Hong Kong: Hong Kong Convention and Exhibition Centre, 2000: 23-25.
- [7] 成璐瑶, 李娟, 王良杰, 等. 基于文献计量的废水生物强化处理领域发展态势分析[J]. 环境工程学报, 2021, 39(3): 40-47.
- [8] 李剑锋. 微生物净化技术在染料废水中的应用分析[J]. 环境与发展, 2020, 32(3): 92-93.
- [9] 邱忠平, 江海涛, 王倩, 等. 加速填埋场稳定化进程复合菌系的构建[J]. 中国环境科学, 2012, 32(3): 492-498.
- [10] 高宇轩, 靳静晨, 高雅娟, 等. 异养硝化-好氧反硝化复合菌剂在垃圾渗滤液处理中的应用[J]. 生物技术进展, 2022, 12(4): 630-637.
- [11] BUEHANAN R. E. et al. : Bergey 's Manual of Determinative Baoteriology(Eihgh Edition), 1974.
- [12] 燕红, 苏俊, 于彩莲, 等. 高效木质素降解菌株的分离筛选[J]. 浙江大学学报, 2011, 37(3): 259-262.
- [13] 尚明慧, 王志刚, 郑永杰, 等. 一株脱氨除臭菌的分离鉴定及在鸡粪中的脱氮特性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2515-2521.
- [14] 周俊强, 邱忠平, 韩云平, 等. 纤维素降解菌的筛选及其产酶特性[J]. 环境工程学报, 2010, 4(3): 705-708.
- [15] 邱忠平, 杨立中, 刘丹. 垃圾渗滤液COD降解菌株的筛选及其降解特性初探[J]. 四川环境, 2007, 26(1): 5-8.
- [16] 邱忠平, 茆灿泉, 刘源月, 等. 微生物絮凝剂产生菌的筛选及其絮凝特性[J]. 环境工程学报, 2009, 3(7): 1185-1188.
- [17] 吴颖, 侯璐丹, 张杰. 复合微生物菌剂中各菌株间的拮抗试验及培养条件的筛选[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(5): 820-827.
- [18] 邱忠平, 刘志刚, 海维燕, 等. 微生物菌剂对好氧填埋垃圾稳定过程的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(4): 1327-1330.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾化学特性通用检测方法: CJ/T 96-2013[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾采样和分析方法: CJ/T 313-2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [21] 中华人民共和国环境保护部. 水质五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)的测定 稀释与接种法: GB HJ 505-2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [22] 唐建, 唐恒军, 司马卫平, 等. 复合菌剂促进生物反应器填埋场稳定化研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(5): 53-60.
- [23] 中华人民共和国国家标准. 生活垃圾填埋场稳定化场地利用技术要求: GB/T-25179-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [24] 马先芮. 原位好氧稳定化技术治理垃圾填埋场施工要点分析[J]. 绿色科技, 2019(18): 141-145.
- [25] WEI P, ALBERTO P, MARIA C L, et al. Digestate application in landfill bioreactors to remove nitrogen of old landfill leachate[J]. Waste Management, 2018, 74: 335-346.
- [26] OENCUE G, REISER M, KRANERT M. Aerobic in situ stabilization of Landfill Konstanz Dorfweiher: Leachate quality after 1 year of operation[J]. Waste Management, 2012, 32(12): 2374-2384.
- [27] 田立斌, 王海东, 杨勇, 等. 原位好氧稳定化技术在非正规垃圾填埋场修复治理中的应用[J]. 环境工程学报, 2019, 37: 940-945.

(责任编辑: 金曙光)

## Application of in-situ biological enhanced aerobic stabilization technology in a landfill treatment project in Wenzhou

LIU Shuang, LI Peiye, CHEN Kai, SONG Huimin, TIAN Libin\*

Zhongke Dingshi Environmental Engineering Co. Ltd, Beijing100028, China

\*Corresponding author, E-mail: libini2233@163.com

**Abstract** In order to solve the problems of long stabilization time and low efficiency of the traditional in-situ aerobic stabilization technology used in informal landfill, the in-situ biological enhanced aerobic stabilization technology was used in a pilot-scale application of an informal landfill in Wenzhou, and the treatment effect was compared with that of the traditional aerobic stabilization technology. The results showed that in-situ bio-enhanced aerobic stabilization technology can accelerate the biodegradation of organic waste, and the average settlement was 54% higher than that of aerobic stabilization treatment. The mass fraction of organic matter was 33.8% lower than that of aerobic stabilization treatment, and it was reduced to below 16% of the remediation target value of organic matter five months in advance. The volume fraction of CH<sub>4</sub> in landfill gas decreased to about 1.5%, which was 28.6% lower than that in aerobic stabilization treatment, and the stabilization time was shortened by 5 months. The COD value of leachate was 32.8% lower than that of aerobic stabilization treatment, and the BOD value was 47.5% higher than that of aerobic stabilization treatment. The mass concentration of ammonia nitrogen was 32.7% lower than that of aerobic stabilization treatment. The successful operation of in-situ biological enhanced aerobic stabilization technology provides new ideas and technical means for the rapid stabilization of landfill.

**Keywords** informal landfill site; biological reinforcement; in-situ; aerobic stabilization