

农村生活垃圾生物稳定预处理对渗滤液产生及污染潜力的影响

李俊飞¹, 文国来², 王德汉^{2*}, 胡应成¹, 孙艳军¹

(1.广州市番禺区环境科学研究所, 广州 511400; 2.华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要:为从源头控制垃圾填埋场渗滤液污染,以广州市番禺区猛涌村生活垃圾处理示范基地为研究对象,以猛涌村中转站分选得到的有机垃圾为试验材料,采用生物稳定和淋溶试验研究方法,以未经生物稳定处理的垃圾淋溶试验模拟渗滤液产生为对照(CK),以生物稳定预处理 36 d 的垃圾淋溶试验模拟渗滤液产生为处理 1(T₁),以生物稳定预处理 12 d 的垃圾淋溶试验模拟渗滤液产生为处理 2(T₂)。通过分析渗滤液 pH、氨氮、总磷、COD、水溶性碳等指标的变化,考察生物预处理方法对渗滤液的污染控制效果。结果表明,在 10 d 淋溶试验过程中,T₁、T₂ 渗滤液产量比 CK 分别减少 33%、28%;CK 渗滤液 pH 一直呈酸性,而 T₁、T₂ 介于在 7.0~8.5;T₁、T₂ 渗滤液氨氮、总磷、COD、水溶性碳平均浓度分别比 CK 降低 77%、63%、75%、69%、73%、66%、74%、69%,明显降低了垃圾的污染潜力,垃圾生物稳定程度越高,污染潜力越低。研究成果从生态控制的角度为垃圾填埋场渗滤液污染防治提供了理论依据。

关键词:生活垃圾;生物稳定预处理;渗滤液;污染

中图分类号:X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)04-0774-08

Effect of Biostabilization on the Pollution of Municipal Solid Waste

LI Jun-fei¹, WEN Guo-lai², WANG De-han^{2*}, HU Ying-cheng¹, SUN Yan-jun¹

(1.Environment Research Institute of PanYu, Guangzhou 511400, China; 2.College of Nature Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to reduce the leachate production by land-filling, this study focused on the biostabilization treatment of municipal solid waste (MSW), which was separated from Mengchong municipal solid waste transfer station in Guangzhou. Three treatments were carried out by exaction test: (1) Control (CK), simulated leachate with unbiostabilization MSW; (2) Treatment 1 (T₁), simulated leachate with MSW after 36 days' biostabilization; (3) Treatment 2 (T₂), simulated leachate with MSW after 12 days' biostabilization. Samples were taken and indexes of leachate were analyzed during the process of simulation which lasted 10 days. The results showed that the leachate generation of T₁ was reduced by 33%, and the NH₄⁺-N, TP, COD, WSC was reduced by 77%, 75%, 73%, 74% respectively, compared with control, as well as the reduction by 28%, 63%, 69%, 66%, 69% for T₂. The pH value of CK was lower than 7.0, but the pH value of T₁ and T₂ were both in the range of 7~8.5. The results suggested that the leachate pollution of MSW was significantly reduced by biostabilization, intenser biostabilization, lower leachate pollution, which was important to the control of leachate in MSW landfilling.

Keywords: municipal solid waste (MSW); biostabilization; leachate; pollution

随着社会经济的发展,垃圾产量不断增加,垃圾的有效处理及二次污染防治成为社会关注的焦点。目前垃圾处理方法主要有焚烧、堆肥和填埋等。卫生填埋由于处理量大、成本低廉、技术成熟等优点而被国内外广泛应用^[1]。但填埋场产生的渗滤液含有高浓度

的有机物、氨氮等污染物,处理不当会导致严重的二次污染^[2],且因为氨氮和 COD 浓度高,水质水量变化大等特点,而成为水处理研究领域的难点和热点^[3]。目前国内外对渗滤液的处理方案主要有:排入城市污水厂、向填埋场循环喷洒、单独处理^[4]。处理方法主要有物化法、生物法和联合技术^[5],我国大多采用生物处理法。在实际处理过程中,由于受降水、垃圾特性等影响,渗滤液中污染物浓度高、变化范围很大,对处理工艺要求高,生化处理效果不理想。针对当前渗滤液处理存在的问题,有关专家和学者对处理工艺进行了大

收稿日期:2010-09-27

基金项目:广州市番禺区科技局成果推广项目(2009-T-03-1)

作者简介:李俊飞(1980—),男,重庆人,硕士研究生,主要从事环境影响评价与管理工作。E-mail:lijunfei1018@sohu.com

* 通讯作者:王德汉 E-mail:dehanwang@scau.edu.cn

量探索研究,但大多单纯以渗滤液作为研究对象,存在工艺复杂,投资大等缺陷^[6-8]。相关研究指出,在填埋场垃圾经多年生物稳定后,其可分解有机物已经趋于稳定化,有较高的孔隙率,有较高的吸附和交换能力,渗滤液污染物浓度趋于低水平值,是一种良好的污水生物处理介质^[9-11]。因此,若能加速垃圾的稳定,可在很大程度上降低垃圾的污染潜力,从源头防治垃圾渗滤液环境污染,而目前这方面的研究却鲜有报道。

本研究针对垃圾填埋场渗滤液产生量大,污染物含量高,污染防治技术要求高的现状,以广州市番禺区大石街猛涌村垃圾处理示范基地垃圾生物稳定系统为技术依托,通过对不同预处理的垃圾进行淋溶试验模拟渗滤液产生,分析渗滤液污染物浓度变化,以期从源头减少渗滤液的产生,降低污染,为渗滤液的实际控制提供理论参考。试验主要选取了 pH、氨氮、总磷、COD 及水溶性碳等指标,分析试验过程中数值的变化,考察生物预处理方法对垃圾污染潜力的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料取自广州市番禺区大石街猛涌村垃圾

中转站,基本物理组成(质量百分比)为:混合物(<10 mm)6.12%,有机动植物 66.28%,木竹 0.98%,纸 5.81%,纺织物 6.92%,塑料橡胶 9.66%,金属 0.09%,玻璃 0.08%,砖瓦 3.95%,电池 0.09%(注:检测方法来自《城市生活垃圾采样和物理分析方法 CJ/T 3039—1995》)。将中转站中塑料、玻璃、砖瓦、金属、纺织物等物质分拣后的垃圾作为原始垃圾,进行生物稳定化预处理 12 d,作为 12 d 产物试验材料;将 12 d 产物进行袋式发酵 24 d 后作为 36 d 稳定产物试验材料。试验材料的理化性质如表 1 所示。

1.2 试验装置

生物稳定化处理装置:根据好氧堆肥原理设计,由堆肥反应仓、抽风机、冷凝塔和生物滤池 4 部分组成。堆肥仓设置了 4 个小仓,小仓长 1.45 m、宽 0.9 m、高 1.2 m,反应过程中堆体高度保持在 1 m。生物滤池内填料为生物吸附材料和活性炭。生物稳定过程中垃圾渗滤液和臭气经管道引至生物滤池处理。整个装置为全密封式。装置示意图见图 1。

渗滤液模拟装置:由垃圾盛装塑料桶、支架和渗滤液接受塑料桶组成,垃圾盛装塑料桶底部钻有小孔,水体可自由流下。装置示意图见图 2。

表 1 试验材料基本理化性质							
Table 1 Physical and chemical indexes of raw rural refuse							
试验材料	含水率/%	pH	有机质/%	E ₄ /E ₆	总氮/%	总磷/%	水溶性碳/%
原始垃圾	71.6	4.52	58.03	4.3	1.6	0.15	7.02
12 d 稳定产物	45.8	8.03	39.49	4.59	1.05	0.18	2.72
36 d 稳定产物	27.6	7.29	35.96	5.99	2.24	0.2	0.45

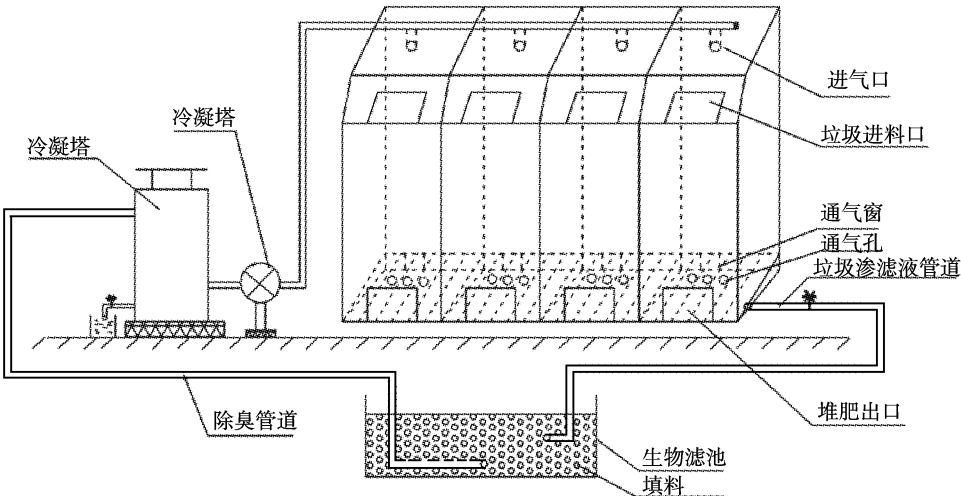


图 1 生物稳定化处理装置示意图

Figure 1 Biostabilization equipments

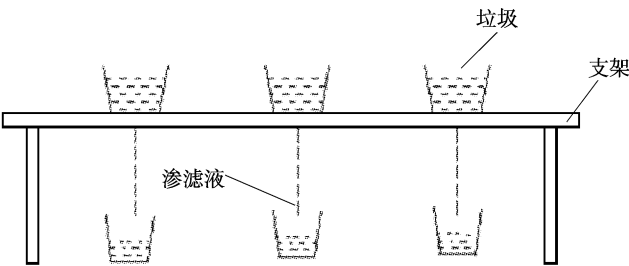


图 2 垃圾淋溶模拟装置示意图
Figure 2 Leachate eluviate experiment equipment

1.3 试验方法

设置 3 个处理。CK:取原始垃圾 10 kg,装入塑料桶内,表面覆土压实,每日淋水 750 mL,渗滤液自然流下,用塑料小桶接收; T_1 :取生物稳定 36 d 产物 10 kg,装入塑料桶内,表面覆土压实,每日淋水 750 mL,渗滤液自然流下,用塑料小桶接收; T_2 :取生物稳定 12 d 产物 10 kg,装入塑料桶内,表面覆土压实,每日淋水 750 mL,渗滤液自然流下,用塑料小桶接收。

1.4 测定指标及方法

每日取渗滤液 100 mL 进行测定,测试的指标及方法为:pH 值用玻璃电极法(GB 6920—1986); NH_4^+-N 用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009);TP 用钼酸铵分光光度法(GB 3838—2002);COD 用快速消解分光光度法(HJ/T 399—2007);WSC 用重铬酸钾容量法-外加热法(土壤农化分析第三版)。

本试验材料为生活垃圾,有毒有害成分很少,且试验前将金属等剔除,因此试验中没有考虑渗滤液重金属浓度指标。

2 结果与讨论

2.1 淋溶过程垃圾渗滤液体积变化

各处理每日模拟降水 750 mL,产生的渗滤液量如表 2 所示。

经生物稳定预处理,垃圾中的腐殖质类物质增加,生物稳定程度越高,腐殖质含量越高^[12],该类物质呈疏松多孔结构,具有较大阳离子交换能力,对水分有较强的吸附能力^[13]。同时,稳定过程中微生物的活

动也会消耗部分水分体,导致垃圾含水率的降低^[14]。从表 2 可以看出,3 个处理每日渗滤液产生量平稳,CK 渗滤液产生量最多,历时 10 d 共产生 6.49 L 渗滤液; T_2 次之; T_1 产生量最少,为 4.38 L, T_1 、 T_2 分别比 CK 减少 33%、28%。试验前期, T_1 、 T_2 渗滤液减少以腐殖质吸附为主,后期由于吸附饱和,渗滤液产生量开始增加。可见,垃圾生物稳定处理有助于渗滤液的减少,随着生物稳定进程的推进,腐殖质类物质的增加,对水体的吸附能力更强,进一步减少了渗滤液的排放。

2.2 淋溶过程垃圾渗滤液 pH 值的变化

垃圾渗滤液中有有机物含量高,一般呈酸性,进入环境对地表和地下水影响较大。垃圾经生物稳定处理,有机酸等酸性物质被分解代谢,对垃圾渗滤液 pH 产生较大影响。从图 3 可以看出,CK 渗滤液呈酸性,pH 值最低达到 3.79,波动较大,这是由原始垃圾中较高含量的酸性物质造成的。垃圾经过生物稳定处理后达到腐熟特征^[15],导致 T_1 、 T_2 渗滤液呈中性 pH 值变化平缓,介于 7~8.5 之间,符合《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)规定的要求。表明生活垃圾经生物稳定处理后,呈酸性的渗滤液得到很大程度的改善。

2.3 淋溶过程中渗滤液氨氮(NH_4^+-N)含量变化

垃圾渗滤液具有氨氮含量高的特点^[6],氨氮是《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)中规定的检测指标之一。淋溶过程中 3 个处理的渗滤液氨氮浓度变化如图 4(a)所示,生物稳定预处理对氨氮的去除率如图 4(b)所示。

总体上,3 个处理氨氮含量随淋溶试验的进行呈现下降趋势,其中 CK 前 4 d 下降,后有一定幅度波动,这可能是由于主导氨氮流失的控制因素不同导致。试验前期,氨氮的下降主要是氨氮受淋溶水的流过以物理流失为主,而试验后期原始垃圾在间歇与淋水交替过程中出现消化与反消化的生化过程,在一定程度上影响了渗滤液中氨氮浓度^[16]。 T_1 、 T_2 渗滤液中氨氮含量从第 2 d 开始一直呈下降趋势,第 5 d 后变化平缓。垃圾生物稳定过程中,氮素受环境 pH、温度

表 2 垃圾渗滤液体积(mL)
Table 2 The volume of landfill leachate(mL)

处理	合计	处理时间/d									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CK	6 490	760	650	650	630	645	625	700	600	610	620
T_1	4 375	455	420	450	425	430	425	420	400	440	510
T_2	4 700	475	480	460	455	460	470	470	450	460	520

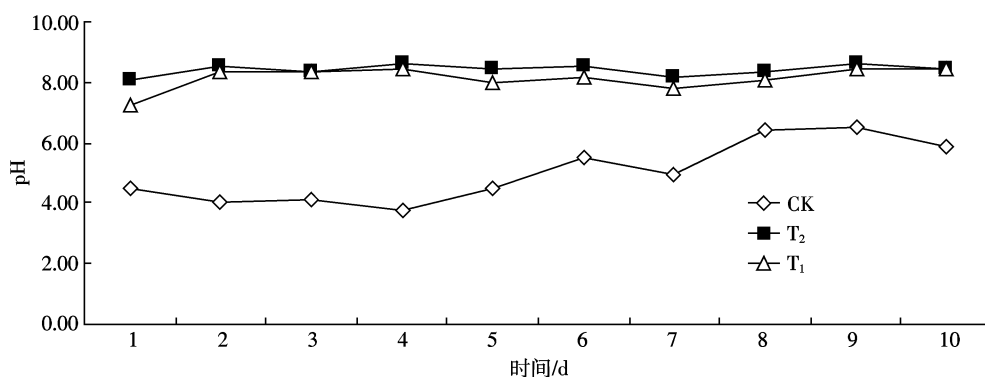
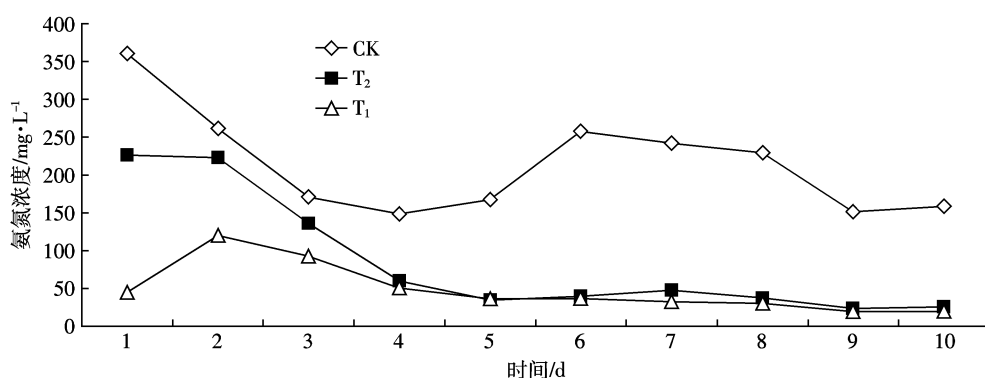
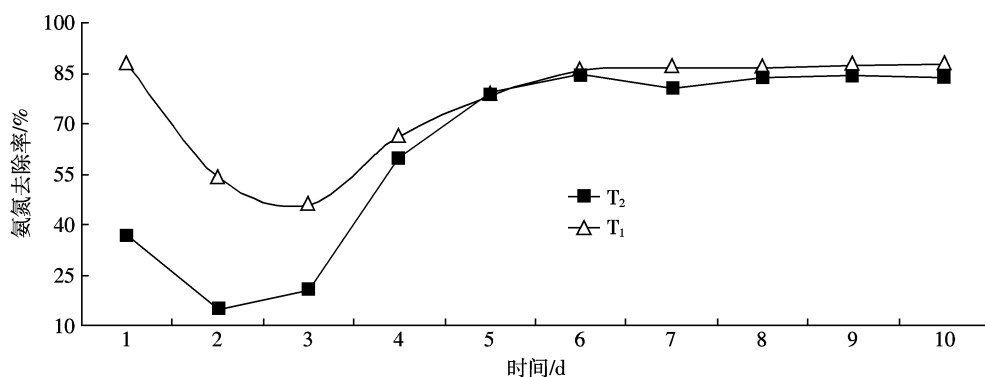


图3 垃圾渗滤液 pH 值的变化

Figure 3 pH variation with time in leachate



(a) 淋溶过程氨氮浓度变化



(b) 生物稳定预处理对氨氮的去除率

图4 生物稳定预处理对渗滤液氨氮的影响

Figure 4 $\text{NH}_4\text{-N}$ variation and removal rate through pretreatment or well-composted

等因素的影响,不稳定形态氮素流失或转变为稳定的形态,如硝化作用导致 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量下降^[7],使 T_1 、 T_2 渗滤液中氨氮逐渐降低。淋溶过程中氨氮含量大小顺序为 $\text{CK} > \text{T}_2 > \text{T}_1$, CK 明显高于其他处理,试验第 10 d, CK、 T_1 、 T_2 氨氮含量分别为 158.4、19.35、25.82 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。以 CK 产生的氨氮浓度作为垃圾渗滤液中氨氮初始值,可得到 T_1 氨氮平均去除率为 77%,最高达 88%, T_2 平均浓度去除率 63%,最高达 85%。与《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)中控制浓度

限制 25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 相比,CK 超标最严重,最高达 13 倍,而 T_1 、 T_2 最高分别为 4 倍和 8 倍,在试验后期, T_1 、 T_2 氨氮含量较低,部分甚至低于 25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。表明生物稳定预处理能够有效降低垃圾渗滤液中氨氮含量,稳定程度越高,渗滤液中氨氮下降越明显。

2.4 淋溶过程中渗滤液总磷含量变化

磷是生物生长必需的元素之一,但水体中磷的含量过高(超过 0.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),会造成藻类的过度繁殖,水质恶化,因此总磷是评价水质的重要指标之一。

淋溶过程中 3 个处理总磷浓度变化如图 5(a)所示,生物稳定预处理对总磷的去除率如图 5(b)所示。

3 个处理渗滤液中总磷浓度随淋溶试验的进行逐渐降低,CK 浓度变化波动较大,第 2 d 出现最大值 $85.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,第 10 d 出现最小值 $25.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, T_1 、 T_2 总磷浓度变化平缓,3 个处理总磷浓度大小为 $\text{CK} > T_2 > T_1$,CK 明显高于其他处理。虽然生物稳定过程具有“聚集效应”,能提高稳定产物总磷含量,对磷具有一定活化作用^[18],但垃圾经生化稳定后,具有磷吸附容量大和吸附态磷解吸率低的特点^[19],对磷的吸持能力强,因此 T_1 、 T_2 总磷浓度下降。以 CK 产生的总磷浓度作为垃圾渗滤液中总磷初始值,可得到 T_1 总磷平均去除率为 75%,最高达 92%, T_2 平均浓度去除率 69%,最高达 85%。与《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)中总磷控制浓度限制 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 相比,各处理都超标,其中 CK 渗滤液超标最严重,最高达 27 倍,而 T_1 、 T_2 最高分别为 4 倍和 7 倍,在试验后期, T_1 、 T_2 渗滤液中总磷含量较低,最低达 $5.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超标程度较低。可见,经生物稳定处理,垃圾渗滤液中总磷浓度得到很大程度的减少,生物稳定程度越

高,渗滤液中总磷浓度相对越低。

2.5 淋溶过程中渗滤液 COD 含量变化

COD 含量高是填埋场垃圾渗滤液的主要特征,也是造成环境污染的重要原因。垃圾生物稳定过程中,微生物以有机碳为能源和碳源,将易腐蚀有机物分解代谢,形成更为稳定的腐殖质,使得垃圾有机碳含量降低,垃圾性质变得更加稳定^[20]。从图 6(a)可以看出,总体上 3 个处理渗滤液中 COD 呈下降趋势。CK 渗滤液 COD 浓度变化大,最高达 $16\,586.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,试验结束时为 $3\,221.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, T_1 和 T_2 渗滤液 COD 变化范围分别为 $993.33 \sim 4\,528 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $980 \sim 5\,930 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,浓度值变化较平稳,试验进入第 4 d 后, T_1 和 T_2 的 COD 浓度相差无明显。以 CK 产生的 COD 浓度作为垃圾渗滤液初始值,可得到 T_1 的 COD 平均去除率为 73%,最高达 88%, T_2 平均去除率为 66%,最高达 75%,生物稳定处理大大降低了垃圾渗滤液 COD 浓度。

2.6 淋溶过程中渗滤液水溶性碳含量变化

CH_4 是垃圾填埋场主要排放气体,其危害在于可能给填埋场带来火灾隐患,也是温室气体之一。水溶性碳是垃圾成分中各种微生物优先利用的碳源,在厌

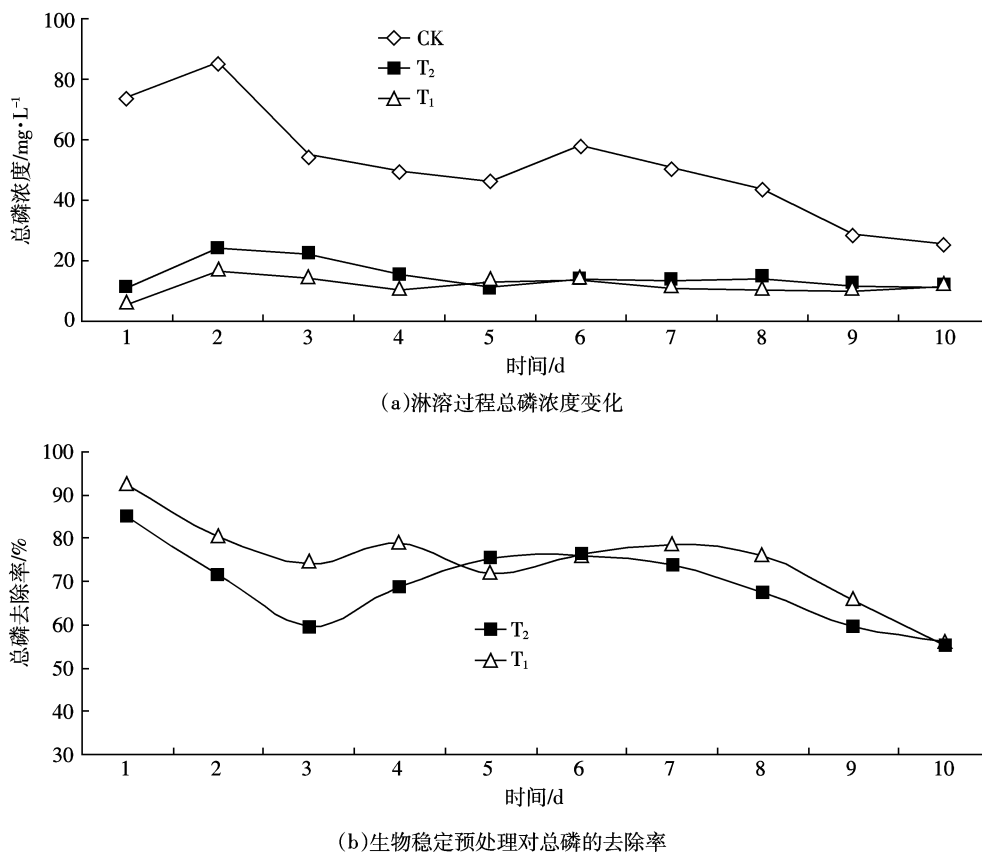


图 5 生物稳定预处理对渗滤液总磷的影响

Figure 5 TP variation and removal rate through pretreatment or well-composted

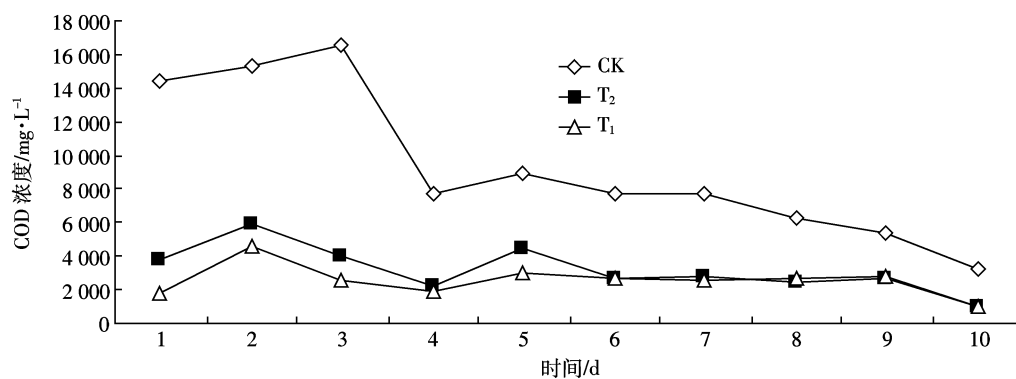
氧和高含量水溶性碳条件下,厌氧菌的活动将产生大量 CH_4 。有报道指出,垃圾经生物稳定化处理,可有效降低水溶性碳含量,减少 CH_4 的产生^[11,21-22]。从图7可以看出,3个处理垃圾渗滤液中水溶性碳含量呈下降趋势,CK变化最明显,从最高的 $6\,600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $985\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而 T_1 和 T_2 由于生物稳定过程使得垃圾中水溶性碳含量下降至较低水平,导致渗滤液中水溶性碳浓度较低且变化平缓,平均浓度分别比CK降低

74%、67%。表明生活垃圾经生物稳定预处理,能有效降低 CH_4 等温室气体的排放潜力。

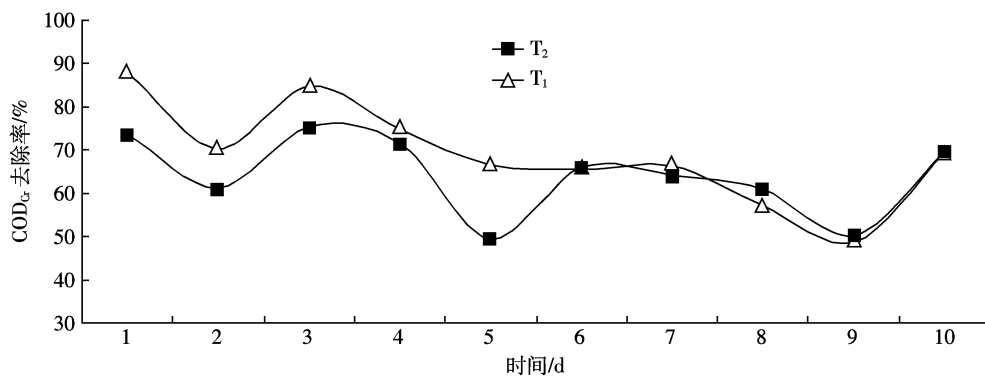
3 结论

(1)生物稳定预处理能明显减少垃圾渗滤液的产生量,经生物稳定预处理36 d,垃圾渗滤液产生量减少33%。

(2)生物稳定预处理后,渗滤液 pH 介于在 7~8.5,



(a)淋溶过程 COD 含量变化



(b)腐熟和预处理对 COD 的去除率

图6 COD 含量变化和腐熟与预处理对 COD 的去除率

Figure 6 COD variation and removal rate through pretreatment or well-composted

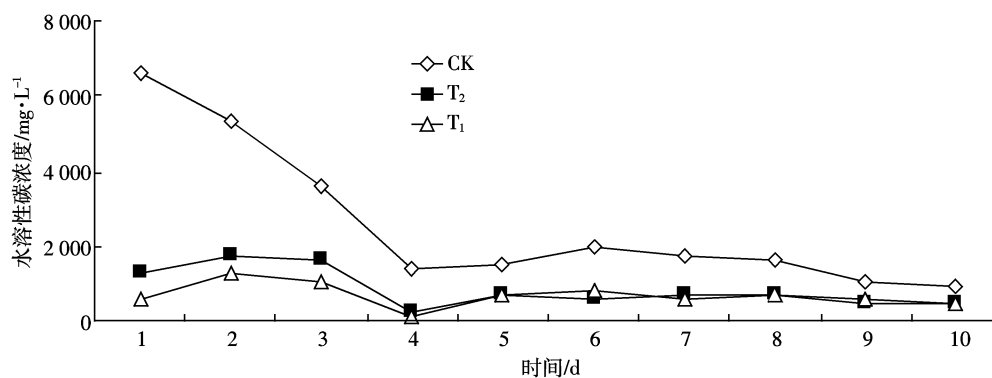


图7 淋溶过程水溶性碳变化

Figure 7 WSC variation during the process of eluviation

达到《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)规定的要求,生物稳定36 d产物的渗滤液氨氮、总磷、COD、水溶性碳平均浓度分别比原始垃圾平均下降77%、75%、73%、74%,大大减少了渗滤液中污染物含量,明显降低了填埋垃圾的污染潜力。

(3)生物稳定程度越高,垃圾污染潜力越低。生物稳定12 d与36 d产物渗滤液污染物浓度变化趋势相似,浓度相差不大,但都可有效降低垃圾污染潜力。可结合垃圾处理效率、经济等因素,选择适宜的生物稳定预处理时间。

(4)生物稳定预处理减少了垃圾中化学物质向外界的释放,实现了渗滤液污染的源头控制,从生态控制的角度为垃圾填埋场渗滤液污染防治提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 吴楠楠,郭楚文,夏爽.垃圾填埋场渗滤液运移规律分析与模拟[J].环境工程学报,2009,3(9):1602-1606.
WU Nan-nan, GUO Chu-wen, XIA Shuang. Analysis and numerical simulation on leachate transport in municipal solid waste landfill[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(9):1602-1606.
- [2] 闵海华,杜昱,刘淑玲,等.MBR/RO工艺处理垃圾渗滤液[J].中国给水排水,2010,26(4):64-66.
MIN Hai-hua, DU Yu, LIU Shu-ling, et al. MBR/RO process for treatment of landfill leachate[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(4):64-66.
- [3] 石明岩,冯兆继,余建恒,等.城市污水混合垃圾渗滤液脱氮试验研究[J].环境工程,2010,28(5):39-43.
SHI Ming-yan, FENG Zhao-ji, YU Jian-heng, et al. Experimental study on nitrogen removal of landfill leachate and urban wastewater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 28(5):39-43.
- [4] 熊鸿斌,谷良平,张正.UASB-FEO-氨吹脱-CASS工艺在垃圾渗滤液处理中的应用[J].环境工程学报,2010,4(1):39-43.
XIONG Hong-bin, GU Liang-ping, ZHANG Zheng. Application of UASB-FEO-ammonia stripping-CASS process in treatment of landfill leachate[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(1):39-43.
- [5] 高慧,王敏.垃圾渗滤液处理技术现状及展望[J].环境科学与技术,2010,33(6E):198-201.
GAO Hui, WANG Min. Status and prospects of landfill leachate treatment technology[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 33(6E):198-201.
- [6] 苗国斌.垃圾渗滤液的污染现状与防治对策[J].山西化工,2010,30(1):64-67.
MIAO Guo-bin. Present situation and technical strategy of environmental contamination aroused by municipal landfill leachate[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2010, 30(1):64-67.
- [7] 蔡涛,王丹,宋志祥,等.垃圾渗滤液的处理技术及其国内研究进展[J].化工中间体,2010(1):1-5.
CAI Tao, WANG Dan, SONG Zhi-xiang, et al. Treatment technology of landfill leachate and its domestic research progress[J]. *Chemical Intermediate*, 2010(1):1-5.
- [8] 李敬苗,李春阳,王刚,等.电凝聚法对垃圾渗滤液中总磷去除的研究[J].工业安全与环保,2005,31(12):20-21.
LI Jing-miao, LI Chun-yang, WANG Gang, et al. Researches on electro-coagulation's effect of total phosphate's removal in landfill leachate[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2005, 31(12):20-21.
- [9] 邵芳,张鼎国,赵由才.矿化垃圾生物反应床处理畜禽废水的试验研究[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(2):32-36.
SHAO Fang, ZHANG Ding-guo, ZHAO You-cai. Experimental study on livestock and poultry wastewater treatment by aged-refuse-based bio-reactor[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(2):32-36.
- [10] 褚衍洋,徐迪民.矿化垃圾床+SBR工艺处理渗滤液的论证及研究[J].污染防治技术,2003,16(3):33-35.
CHU Yan-yang, XU Di-min. Demonstration and research on landfill leachate treatment by the process of mineralized refuse bed and SBR[J]. *Pollution Control Technology*, 2003, 16(3):33-35.
- [11] 王敏,赵由才.矿化垃圾生物反应床处理焦化废水研究[J].环境技术,2004(1):25-28.
WANG Min, ZHAO You-cai. Treatment of coke plant-waste water using aged-refuse-based bioreactor[J]. *Environmental Technology*, 2004(1):25-28.
- [12] 王玉军,窦森,张晋京,等.农业废弃物堆肥过程中腐殖质组成变化[J].东北林业大学学报,2009,37(8):79-81.
WANG Yu-jun, DOU Sen, ZHANG Jin-jing, et al. Changes of humic components during agricultural waste composting[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(8):79-81.
- [13] 陈兰,唐晓红,魏朝富.土壤腐殖质结构的光谱学研究进展[J].中国农学通报,2007,23(8):233-239.
CHEN Lan, TANG Xiao-hong, WEI Chao-fu. Spectroscopies of soil humic substances: A review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(8):233-239.
- [14] 王艳,沈春红,李国学,等.倒仓破碎对缩短发酵周期后生活垃圾堆肥腐熟度的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(5):1053-1059.
WANG Yan, SHEN Chun-hong, LI Guo-xue, et al. The effects of pile turning and crushing on municipal solid waste compost maturity after shortening composting periods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5):1053-1059.
- [15] GaberZayed, HebaAbdel-Motaal. Bio-reduction of compost with low pH and high soluble phosphorus from sugar cane bagasse enriched with rock phosphate[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2005, 21(5):747-752.
- [16] 李俊飞,王德汉,刘承昊,等.堆肥基质生物滤池处理生活垃圾湿法分选废水的试验研究[J].环境卫生工程,2007,15(2):25-28.
LI Jun-fei, WANG De-han, LIU Cheng-hao, et al. Experimental study

- on treatment urban domestic waste wet process sexecting waste water by compost biological filter[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2007, 15(2):25-28.
- [17] 贾 程, 张增强, 张永涛. 污泥堆肥过程中氮素形态的变化[J]. 环境科学学报, 2008, 28(11):2269-2276.
- JIA Chen, ZHANG Zeng-qiang, ZHANG Yong-tao. Transformation of nitrogen forms during co-composting of sewage sludge and wheat straw [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(11):2269-2276.
- [18] 常勤学, 魏源送, 刘俊新. 通风控制方式对动物粪便堆肥过程中氮、磷变化的影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(5):732-738.
- CHANG Qin-xue, WEI Yuan-song, LIU Jun-xin. Changes of nitrogen and phosphorus in animal manure composting with different aeration control modes [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(5):732-738.
- [19] 杨玉江, 赵由才, 边炳鑫. 垃圾填埋场矿化垃圾对废水中磷的吸附特性研究[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2004, 17(1):1-5.
- YANG Yu-jiang, ZHAO You-cai, BIAN Bing-xin. Phosphate adsorption and desorption in aged refuse[J]. *J of University of Science and Technology of Suzhou(Engineering and Technology)*, 2004, 17(1):1-5.
- [20] 魏自民, 王世平, 席北斗, 等. 生活垃圾堆肥过程中腐殖质及有机态氮组分的变化[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2):235-240.
- WEI Zi-min, WANG Shi-ping, XI Bei-dou, et al. Changes of humic substances and organic nitrogen forms during municipal solid waste composting[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2):235-240.
- [21] Zmora-Nahum S, Markovitch O, Tarchitzky J, et al. Dissolved organic carbon(DOC) as a parameter of compost maturity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(11):2109-2116.
- [22] 何晶晶, 邵正浩, 张冬青, 等. 垃圾生物稳定化预处理中填埋污染潜力的变化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(6):791-795.
- HE Pin-jing, SHAO Zheng-hao, ZHANG Dong-qing, et al. Changes of pollution potential during biostabilization of municipal solid waste as pretreatment prior to landfill[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2009, 37(6):791-795.