

准好氧和厌氧填埋陈腐垃圾的稳定化特性

张 维^{1,2}, 岳 波², 张增强¹, 黄泽春², 黄启飞², 王 琪²

(1. 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨陵 712100;

2. 中国环境科学研究院 固体废物污染控制技术研究所, 北京 100012)

摘 要: 比较了 5 a 填埋龄准好氧和厌氧填埋体陈腐垃圾的挥发性固体(VS)、有机碳(TOC)和腐殖质等降解及稳定化指标。结果表明,陈腐垃圾中 VS 和 TOC 含量较新鲜垃圾显著降低,准好氧填埋体陈腐垃圾的 VS 和 TOC 含量低于厌氧填埋体 1%~2%,但差异不显著;准好氧填埋体的表面沉降量显著高于厌氧填埋体($P < 0.05$),存在一定的负相关关系。渗滤液和清水回灌引起陈腐垃圾 VS 含量的差异不明显,但造成了填埋体表面明显的不均匀沉降。准好氧填埋体陈腐垃圾的 BDM 值与厌氧填埋体相近,且随距离导气管距离和填埋深度的增加逐渐升高,距离导气管距离越大,层间 BDM 值差异越大。此外,准好氧和厌氧填埋体陈腐垃圾的腐殖质提取率与 HA/FA 差异不明显。

关键词: 陈腐垃圾; VS; 沉降量; BDM; 腐殖质

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)04-0118-07

Stabilization Properties of Aged-refuse in Semi-aerobic and Anaerobic Landfills

ZHANG Wei^{1,2}, YUE Bo², ZHANG Zeng-qiang¹, HUANG Ze-chun², HUANG Qi-fei², WANG Qi²

(1. Life Sciences College, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shanxi, P. R. China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P. R. China;)

Abstract: The stabilization properties of aged-refuse in five-year-old semi-aerobic and anaerobic landfills were compared, such as volatile solid (VS), total organic carbon content (TOC), humic matters, and so on. It was found that VS and TOC content in aged-refuse were obviously lower than those in fresh refuse after five years disposal. However, the VS and TOC content of aged-refuse in semi-aerobic landfill were slightly lower than anaerobic ones, whilst the difference was not significant. Surface settlements of semi-aerobic landfills were higher than that of anaerobic ones ($P < 0.05$). Moreover, there was negative correlation between VS content and surface settlements. Both leachate and water recycling methods did not lead to significant VS content difference, while leachate recycling would cause obviously uneven surface settlement. Biological degradable materials (BDM) value of aged-refuse in semi-aerobic landfill and anaerobic one was similar. Furthermore, BDM value increased with the increase of air pipe distance and depth. The greater the air pipe distance is, the bigger the difference of BDM value between the layers is. In addition, total extraction ratios of humic matters and HA/FA in semi-aerobic and anaerobic landfill aged-refuse had no significant differences.

Key words: Aged-refuse; Volatile Solid; Surface Settlement; Biological Degradable Materials; Humic

收稿日期: 2009-12-29

基金项目: 中国环境科学研究院中央级公益性科研院所基本业务专项基金(2007KYYW24); 自然科学基金资助项目(50908220)

作者简介: 张维(1981), 女, 博士生, 主要从事固体废物生物处理方面研究, (E-mail) zhangwei_vicky@sina.com。

岳波(联系人), 男, 助理研究员, 中国环境科学研究固体废物污染与控制研究所 205, (E-mail) yuebo@craes.org.cn。

Matters

据国家统计局数据,2007年中国约80.9%的清运城市生活垃圾进入卫生填埋场进行处置。这些生活垃圾填埋场存在的环境污染风险能够持续上百年^[1]。因此,研究其稳定化特征对于掌握填埋场的稳定化进程,有效控制其环境危害,保证其安全运行和再利用等方面具有重要意义。

目前,填埋场稳定化的研究主要集中于填埋气的组成和产气量、渗滤液水量和水质、填埋场表面沉降量和陈腐垃圾成分等指标。William等^[2]开展生活垃圾的CH₄产率与填埋场稳定化进程关系研究后指出,垃圾中生物可降解物(Biologically Degradable Matter,缩写为BDM)的成分含量显著影响CH₄产生。Calace等^[3]研究新老填埋场渗滤液的成分发现,老填埋场渗滤液的分子量比新填埋场渗滤液高且分布范围广。

垃圾的组分变化是反映填埋场稳定化的重要指标之一,国内外学者广泛开展了垃圾降解特性的研究^[4-7]。王罗春等^[8]研究指出,BDM含量变化可以较好地反映垃圾的稳定化进程。贾传兴等^[9]也指出,填埋过程中易降解有机物在微生物的作用下矿化为简单的有机物和无机物,而部分难降解有机物则腐殖化形成腐殖质。矿化作用在垃圾降解中占主导,其中BDM是垃圾中微生物的主要降解对象,其含量高低可以判定填埋场的稳定化进程。赵由才等^[10]研究了陈腐垃圾有机质和BDM含量与填埋时

间之间的关系,描述了陈腐垃圾的矿化程度,并由此推断上海老港垃圾填埋场的稳定化时间约为22~23年。

大量研究已证明了准好氧填埋工艺在加速填埋场稳定化,减排温室气体和改善渗滤液水质等方面的优势^[11-14]。目前,中国山东潍坊、云南蒙自、河北廊坊和涿州等中小城市已新建或投入运行了数十座准好氧填埋场,同时最近设计和新建的填埋场多采用准好氧填埋工艺。但是,长期以来,相关学者对生活垃圾本身的变化研究甚少,而中国开展准好氧填埋研究的时间相对较短,对长时间尺度下准好氧和厌氧填埋体内陈腐垃圾稳定化特性的研究,为掌握实际准好氧填埋场运行的长期稳定化特征提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与保存

试验于2003年10月在江西省九江市城市生活垃圾填埋场开展,供试生活垃圾的组成如表1。填埋试验规模为21×3.8×6.0 m,分为4个填埋处理(表2),每个填埋处理填埋垃圾量为250 t,垃圾填埋容重约为0.52×10³ kg/m³。

表1 原始试验垃圾样品成分分析

成份	厨余	草木	纸类	布类	塑料	金属	砖瓦玻璃	灰土
质量百分含量/%	50.8	2.3	4.6	1.2	8.7	0.2	5.4	26.8

表2 填埋实验控制条件

填埋体编号	填埋结构	回流液	回流量/m ³	回流频率/(次·周 ⁻¹)
A [#]	准好氧	清水	1	1
B [#]	准好氧	自身渗滤液	1	1
C [#]	厌氧	清水	1	1
D [#]	厌氧	自身渗滤液	1	1

陈腐垃圾的采样时间为2008年11月,填埋龄为5 a。分别对A[#]、B[#]、C[#]和D[#]的陈腐垃圾样品进行分层采样,样品采用多点混合的采集方法,取样量约为500 g。准好氧和厌氧填埋体陈腐垃圾采样点的剖面分布示意图如图1所示,其中准好氧填埋体以导气管为中心,分4层采样,每层4个采样点;厌氧填埋体分为4层采样,每层3个采样点。对样品进行密封冷藏保存,并带回实验室进行后续预处

理。

1.2 分析方法

1.2.1 鲜样测定及样品预处理 采用陈腐垃圾鲜样测定pH值(玻璃电极法)、电导率(DDS-11A型电导率仪)和含水率(烘干法)等指标。然后风干部分样品,剔除无机废物(如金属、砖瓦和玻璃等)和难降解有机废物(如橡胶和塑料等),剩余物磨至20目以备后续分析。

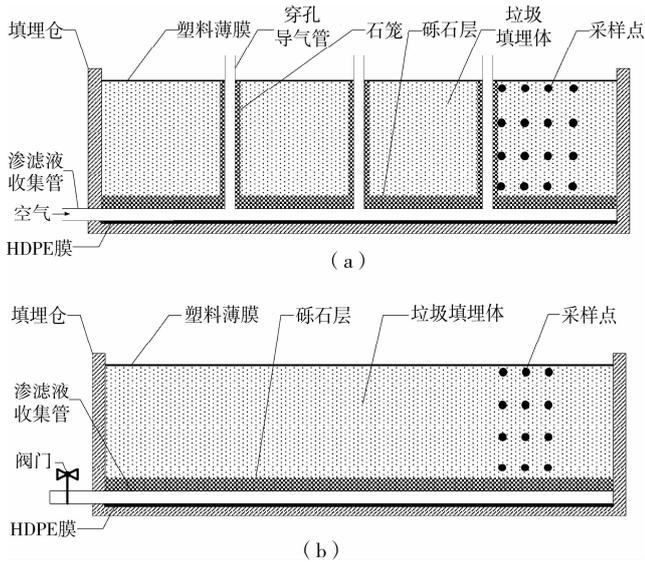


图 1 陈腐垃圾采样点的剖面分布示意图

1.2.2 有机质含量测定 陈腐垃圾有机质含量测定采用《城市生活垃圾有机质的测定—灼烧法(CJ/T96—1999)》，测定 3 次重复。有机碳含量则根据有机质含量的 47% 进行估算^[15]。

1.2.3 BDM 测定 由于垃圾中 BDM 比不可生物降解有机质易于被化学氧化，故可以在“湿烧法”测定总有机质的基础上，采用常温反应降低溶液的氧化能力，选择性氧化 BDM。即在常温和强酸性条件下采用 $K_2Cr_2O_7$ 氧化样品中有机质，采用 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ 回滴。具体步骤见何晶晶等^[16]，其测定样品中的 BDM 含量表示为：

$$BDM(\%) = \frac{(V_0 - V_1) \times C \times 6.383 \times 10^{-3} \times 10}{W} \times 100\% \quad (1)$$

表 3 陈腐垃圾的基本理化性质

样品	pH 值	含水率/%	电导率/($\mu s \cdot cm^{-1}$)	TN/($g \cdot kg^{-1}$)	TP/($g \cdot kg^{-1}$)
新鲜垃圾	7.21	64.3	2 271	—	—
A [#] (准好氧/清水)	7.55	33.0	1 346	9.3	10.3
B [#] (准好氧/渗滤液)	7.53	32.2	1 710	8.9	7.2
C [#] (厌氧/清水)	7.50	34.5	1 693	9.2	10.8
D [#] (厌氧/渗滤液)	7.59	34.2	1 807	10.0	9.9
上海老港填埋场 8 a 填埋龄陈腐垃圾 ^[18]	7.80	—	763.3	4.7	7.3
南方典型红壤 ^[19]	5.2	—	189.1	1.3	1.0
中国城镇垃圾农用控制标准(GB8172—87)	6.5~8.5	25~35	—	5.0	3.0

2.2 陈腐垃圾的稳定化指标比较

2.2.1 挥发性固体 (Volatile Solids, VS) 和总有机碳含量 (Total Organic Carbon, TOC) 经过 5 a 的填埋处置，准好氧和厌氧填埋体陈腐垃圾的 VS 和

式(1)中， V_0 为空白处理消耗的 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ 溶液体积，mL； V_1 为样品所消耗的 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ 溶液的体积，mL；6.383 为换算系数； C 为 $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ 溶液浓度，mol/L； W 为样品的重量，g。

1.2.4 腐殖质 (Humic Matter, HM)、胡敏酸 (Humic Acids, HA) 和富里酸 (Fulvic Acids, FA) 含量测定：采用 $Na_4P_2O_7-NaOH$ 浸提法，具体见文献^[17]。

1.3 数据处理

分别采用 Excel 2003 和 SPSS 11.0 软件对实验数据进行分析 and 作图处理。

2 结果与分析

2.1 陈腐垃圾的基本理化性质

陈腐垃圾的基本理化性质见表 3 所示。由表可知，经过 5 a 的填埋处置，陈腐垃圾的理化性质存在较大程度的变化，其中 pH 值和电导率分别呈现增加和下降的趋势；含水率从 64.3% 显著降低到 32.2%~34.5%，准好氧填埋体陈腐垃圾的含水率与厌氧填埋体差异不显著 ($P < 0.05$)。此外，A[#] 处理中陈腐垃圾的电导率显著低于其他 3 种处理 ($P < 0.05$)，这可能是准好氧填埋结构引起的有机物快速降解和清水稀释作用叠加的结果。此外，A[#]、B[#]、C[#] 和 D[#] 陈腐垃圾的 TN 和 TP 含量比上海老港填埋场 8 a 填埋龄的陈腐垃圾^[18] 和南方典型红壤^[19] 高。

TOC 含量如图 2 所示。与新鲜垃圾相比，陈腐垃圾中 VS 和 TOC 含量显著降低，分别从 57.2% 和 26.9% 降低到 15.8%~17.4% 和 7.4%~8.2%，即陈腐垃圾中的有机质绝大部分被微生物降解消耗。准

好氧填埋体陈腐垃圾 A# 的 VS 和 TOC 含量分别为 15.9% 和 7.5%, B# 分别为 15.8% 和 7.3%; 厌氧填埋体陈腐垃圾 C# 的有机质和有机碳含量分别为 17.4% 和 9.6%, D# 分别为 17.1% 和 9.2%。从 VS 和 TOC 含量的变化来看, 准好氧和厌氧填埋体的差别不大, 仅 1%~2%, 与分析误差接近。因此, 准好氧填埋可在一定程度上加速生活垃圾的降解。

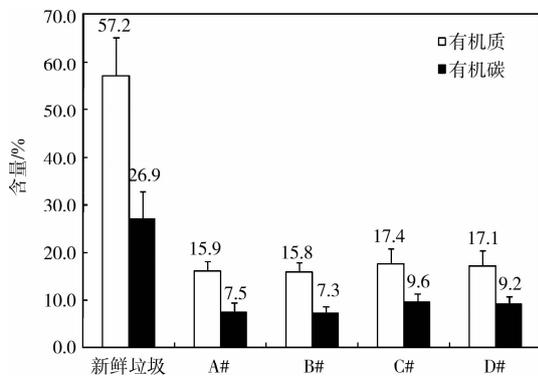


图2 准好氧和厌氧填埋体陈腐垃圾的 VS 和 TOC 含量

准好氧和厌氧填埋体采用渗滤液回灌处理的陈腐垃圾中 VS 含量略低于清水回灌工艺, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。谌戡等^[20] 研究指出, 渗滤液回灌引入的微生物、水分和营养元素等条件可以显著加速陈腐垃圾中的有机物降解, 但本研究中渗滤液和清水回灌引起陈腐垃圾中 VS 含量的差异极小, 可能是由于填埋方式对有机物加速降解起主导作用, 进而使渗滤液回流造成的影响不明显。

Suna 等^[21] 研究指出, 经过 630 d 的厌氧和好氧填埋处理, 垃圾的有机质含量从 82% 和 84% 分别降低到 47% 和 38%, 即好氧填埋可以显著提高垃圾中有机质的降解速度。赵由才等^[10] 报道的上海老港填埋场(厌氧型) 5 a 填埋龄陈腐垃圾的 VS 含量分别为 17.9% 和 19.0%, 与研究中厌氧填埋体陈腐垃圾的有机质含量相近(17.1% 和 17.4%), 均显著高于准好氧填埋体。

2.2.2 有机质降解与填埋体沉降的关系 填埋体的表面沉降量与陈腐垃圾 VS 含量的相关性如表 4 所示。由表可知, 准好氧填埋体 A# 和 B# 的沉降量均显著高于厌氧填埋体 C# 和 D# ($P < 0.05$), 而准好氧填埋体陈腐垃圾的 VS 含量则低于厌氧填埋体, 两者具有较高的负相关关系, 这与准好氧填埋加速了垃圾中有机物的降解, 进而增加了填埋体表面的沉降量有关。渗滤液和清水回灌引起陈腐垃圾 VS 含量的差异不明显, 但造成了填埋体表面的不均匀沉降, 其中渗滤液回灌引起填埋体表面的不均匀沉降较大。

表4 填埋体表面沉降量与陈腐垃圾 VS 含量的相关性

填埋体	VS 含量/%	平均沉降量/cm
A#	15.9 ± 2.1	120.2 ± 8.9
B#	15.8 ± 1.9	118.2 ± 25.4
C#	17.4 ± 3.4	89.5 ± 11.7
D#	17.1 ± 3.2	99.0 ± 22.3

2.2.3 BDM 生物可降解物质(BDM) 作为一类具有生物活性的有机质, 是垃圾填埋过程中微生物的主要降解对象。BDM 含量能准确地反映陈腐垃圾的生物降解程度, 是判定陈腐垃圾稳定性的重要指标之一。准好氧和厌氧填埋体陈腐垃圾中 BDM 含量如图 3 所示。由图可知, 准好氧填埋体陈腐垃圾 A# 和 B# 的 BDM 含量为 9.9%, 厌氧填埋体陈腐垃圾 C# 和 D# 的 BDM 含量分别为 12.0% 和 11.3%, 前者的 BDM 含量显著低于后者 ($P < 0.05$), 说明相对于 VS 和 TOC, BDM 用来反映垃圾的生物降解程度更为准确, 准好氧填埋场由于扩大了好氧降解区域, 垃圾中 BDM 低于厌氧填埋场。此外, 与 VS 和 TOC 含量相似, 研究中渗滤液和清水回灌对陈腐垃圾 BDM 含量的影响不明显。

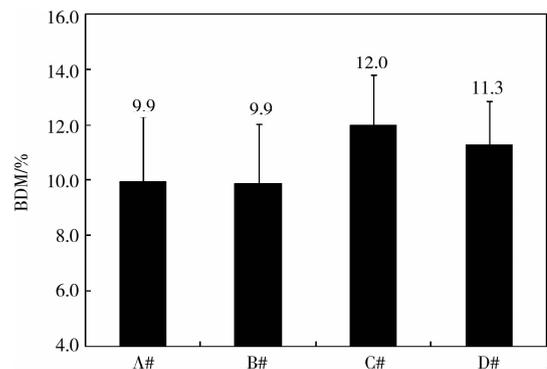


图3 准好氧和厌氧填埋体陈腐垃圾中 BDM 含量

贾传兴等^[9] 研究表明, 经过 20 d 堆肥化处理, 垃圾中 BDM 含量从 66.9% 降低到 27.8%; 有机质含量则从 64.2% 降低到 43.6%, 分别降低了 59.5% 和 32.2%, 即 BDM 含量表征陈腐垃圾的稳定化程度比有机质含量具有更好的区分度。杨军等^[22] 研究指出, 新鲜垃圾、5 a 和 9 a 填埋龄陈腐垃圾的 BDM 含量分别为 18.0%、9.8% 和 9.4%, 即 BDM 含量变化可以有效反映陈腐垃圾的降解规律, 进而可以采用 BDM 含量变化模型来预测陈腐垃圾稳定化特性的变化。石洪影等^[23] 的研究表明, 1 a、5 a 和 10 a 填埋龄陈腐垃圾的 BDM 值分别为 13.6%、6.8% 和 3.5%, 且 BDM 含量随时间变化呈指数函数衰减。赵由才等(2000)的研究结果显示, 5 a 陈腐

垃圾的 BDM 含量约为 8.91%，与 BDM 含量变化模型的预测值(9.28%)差异较小。该研究准好氧填埋体陈腐垃圾的 BDM 含量在 9.9% 左右，接近赵由才等^[10]的研究结果；但厌氧填埋体陈腐垃圾 BDM 含量则显著高于其研究结果。

准好氧填埋体中陈腐垃圾的 BDM 含量随导气管距离和埋深度的变化如图 4 所示。由图可知，

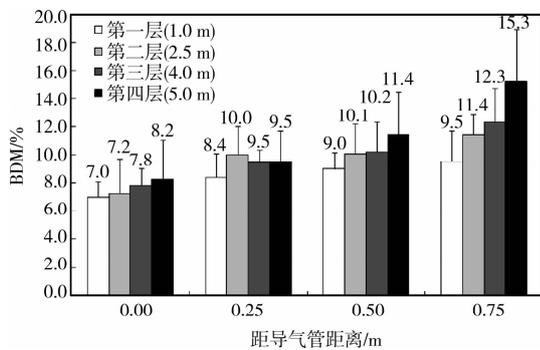


图 4 陈腐垃圾中 BDM 含量随距离导气管距离和埋深度的变化

随着距离导气管距离的增加，不同埋深度陈腐垃圾的 BDM 含量呈现逐渐升高的趋势；除导气管距离为 0.25 m 处外，距离导气管为 0、0.5 和 0.75 m 处陈腐垃圾的 BDM 值均随着埋深度的增加而逐渐升高，且导气管距离越大，不同深度陈腐垃圾的 BDM 值差异越大。其中，导气管附近(0 m)陈腐垃圾的 BDM 值从上而下分别为 7.0%、7.2%、7.8% 和 8.2%，不同埋深度之间差异较小；距离导气管 0.5 m 处陈腐垃圾的 BDM 值分别为 9.0%、10.1%、10.2% 和 11.4%，层间差异逐渐增大；距离导气管 0.75 m 处陈腐垃圾的 BDM 值分别为 9.5%、11.4%、12.3% 和 15.3%，层间差异最大。BDM 值表征陈腐垃圾中有机质的稳定化程度，其大小受到埋体中 O_2 浓度分布的影响。由于导气管附近不同埋深度的 O_2 含量相对充足，且差异较小，导致陈腐垃圾中有机质的降解速率相对较快；随着导气管距离的增加， O_2 浓度受到导气管的影响逐渐减小，同时埋体表层受到外界空气渗入的影响，埋体从上至下存在明显的 O_2 浓度梯度，进而导致陈腐垃圾的降解程度从上至下逐步降低。Shimaoka 等^[5]和董路等^[24]的研究均证明了准好氧埋体内 $[O_2]_{上层} > [O_2]_{中层} > [O_2]_{下层}$ 的分布特征。因此，陈腐垃圾中 BDM 在高 O_2 含量条件下快速降解，低 O_2 含量条件下降解速率相对较慢，最终导致准好氧埋体陈腐垃圾的 BDM 含量呈现上述区域性分布。

2.2.4 腐殖质总可提取率和 HA/FA 垃圾的腐殖化是有机质转化为胡敏酸、富里酸和胡敏素等组分

的过程，其中胡敏酸、富里酸和胡敏素等含量的差异可反映其腐殖化和稳定化程度^[25]。通常将陈腐垃圾的腐殖质提取率和 HA/FA 比作为表征埋垃圾或埋场稳定性的重要指标之一。其中，腐殖质提取率定义为陈腐垃圾腐殖质提取液的总有机质含量与陈腐垃圾总有机质含量的比值。

准好氧和厌氧埋体陈腐垃圾的腐殖质提取率与 HA/FA 比如图 5 所示。由图 5(a)可知，准好氧埋体陈腐垃圾 A# 和 B# 的腐殖质提取率分别为 12.7% 和 12.5%；厌氧埋体陈腐垃圾 C# 和 D# 的腐殖质提取率分别为 13.1% 和 12.8%。2 种埋结构的腐殖质提取率差异不明显，但前者的腐殖质提取率略低于后者，其原因可能是埋单元封场后，小分子 FA 缩合成大分子 HA，HA 则矿化形成胡敏素组分，而腐殖质体系的 C 源得不到有效补充，进而腐殖质体系中难提取的胡敏素的比列增高，FA 和 HA 含量则下降。同时，上述过程在准好氧埋体中发生相对较快，结果导致陈腐垃圾中腐殖质提取率不断下降。

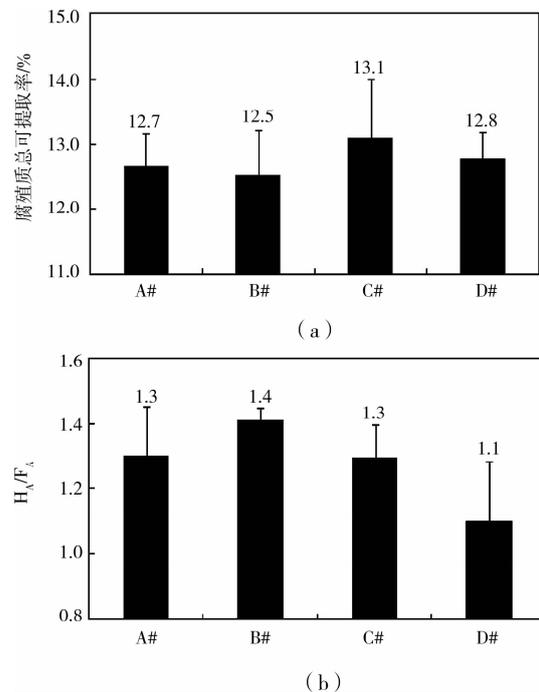


图 5 准好氧和厌氧埋体陈腐垃圾的腐殖质提取率与 HA/FA 比

由图 5(b)可知，陈腐垃圾 A#、B#、C# 和 D# 的 HA/FA 相对较高，分别为 1.3、1.4、1.3 和 1.1，比一般土壤(通常 < 1)和堆肥(约为 1)的 HA/FA 值高。此外，准好氧和厌氧埋体的 HA/FA 之间未表现出明显的规律，可能是因为垃圾腐殖化过程中胡敏酸、富里酸和胡敏素之间的转化是动态平衡过

程,一方面富里酸和胡敏酸等在填埋封场后 C 源得不到补充,另一方面是腐殖质组分存在流失和消耗。另外,半开放式准好氧填埋系统和封闭式厌氧填埋系统中腐殖质的形成、消耗和流失等途径存在明显不同。

3 结论

1)陈腐垃圾中 VS 和 TOC 含量较新鲜垃圾显著降低,准好氧和厌氧填埋体的 VS 和 TOC 含量相差不多,前者只比后者略低,说明准好氧填埋可在一定程度上加速生活垃圾的降解。

2)准好氧填埋体的表面沉降量高于厌氧填埋体,而前者陈腐垃圾的 VS 含量则低于后者,存在负相关关系。渗滤液和清水回灌引起陈腐垃圾 VS 含量的差异不明显,但造成了填埋体表面明显的不均匀沉降。

3)准好氧填埋体陈腐垃圾的 BDM 值低于厌氧填埋体,其中准好氧填埋体陈腐垃圾的 BDM 值随着导气管距离的增加逐渐升高;随着填埋深度的增加而逐渐升高,且导气管距离越大,层间 BDM 值差异越大。

4)准好氧填埋体和厌氧填埋体陈腐垃圾的腐殖质提取率与 HA/FA 差异不明显。

参考文献:

- [1] KRUEMPELBECK I, EHRIG H J. Long term behaviour of municipal solid waste landfills in Germany [C]//Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium.
- [2] WILLIAM E E, WILLIAM S O. Biodegradability of municipal solid waste components in laboratory-scale landfills[J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(3): 911-917.
- [3] CALACE N, LIBERATORI A, PETRONIO B M. Characteristics of different molecular weight fractions of organic matter in landfill leachate and their role in soil sorption of heavy metals [J]. Environmental Pollution, 2001, 113(5): 331-339.
- [4] MATSUFUJI Y, TANAKA A, HANASHIMA M. Biodegradation process of municipal solid waste by semiaerobic landfill type[C]//Proceedings of the First Korea-Japan Society of Solid Waste Management, Japan, 1997: 87-94.
- [5] SHIMAOKA T, MATSUFUJI Y, HANASHIMA M. Mechanism of self-stabilization of semi-aerobic landfill [C]//Proceedings of the 5th Annual Landfill Symposium, Solid Waste Association of North America, San Diego, California, 2000: 171-186.
- [6] HAARSTICK A, MORA-NARANJO N, MEIMA J, et al. Modeling anaerobic degradation in municipal landfill[J]. Environmental Engineering Science, 2004, 21(4): 471-484.
- [7] 唐平, 刘丹, 赵由才. 准好氧填埋场稳定化指标的室内模拟研究[J]. 有色冶金设计与研究, 2007, 28(2/3): 159-163.
- TANF PING, LIU DAN, ZHAO YOU-CAI. Laboratory simulation study on stabilization index of semi-aerobic landfill [J]. Nonferrous Metals Engineering and Research, 2007, 28(2/3): 159-163.
- [8] 王罗春, 赵由才, 陆雍生. 大型垃圾填埋场垃圾稳定化研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2001, 2(4): 15-17.
- WANG LUO-CHUN, ZHAO YOU-CAI, LU YONG-SHENG. The study on stabilization of refuse in large-scale landfills [J]. Techniques and Equipment For Enviro. Poll. Cont, 2001, 2(4): 15-17.
- [9] 贾传兴, 彭绪亚, 袁容焕, 等. 生物可降解度判定生活垃圾堆肥处理的稳定性[J]. 中国给水排水, 2006, 22(5): 68-70.
- JIA CHUAN-XING, PENG XU-YA, YUAN RONG-HUAN, et al. Biologically degradable material for stability determination of municipal solid waste composting[J]. China Water&Wastewater, 2006, 22(5): 68-70.
- [10] 赵由才, 黄仁华, 赵爱华, 等. 大型填埋场垃圾降解规律研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(6): 736-740.
- ZHAO YOU-CAI, HUANG REN-HUA, ZHAO AI-HUA, et al. Degradation of refuse in large-scale landfill[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(6): 736-740.
- [11] PURCELL B. Aerox landfilling: a change of approach [J]. Waste Management, 2000(2): 25-27.
- [12] PURCELL B. Aerox landfilling: the operational implications [J]. Waste Management, 2000(3): 27-28.
- [13] READ A D, HUDGINS M, HARPER S, et al. The successful demonstration of aerobic landfilling: the potential for a more sustainable solid waste management approach [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2001(32): 115-146.
- [14] COSSU R, RAGA R, ROSSETTI D. The PAF model: an integrated approach for landfill sustainability [J]. Waste Management, 2003(23): 37-44.
- [15] 王罗春. 垃圾填埋场稳定化进程研究[D]. 上海: 同济大学环境工程学院, 1999.
- [16] 何晶晶, 邵立明. 城市生活垃圾 BDM 测定方法的特性

- 及应用[J]. 环境卫生工程, 1994, 2: 27-29.
- HE PIN-JING, SHAO LI-MING. Characteristic and application of test methods in municipal solid waste biologically degradable material [J]. Environmental Sanitation Engineering, 1994, 2: 27-29.
- [17] 严昶升. 土壤肥力研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
- [18] 郭亚丽, 赵由才, 徐迪民. 上海老港生活垃圾填埋场陈垃圾的基本特性研究[J]. 上海环境科学, 2002, 21(11): 669-671
- GUO YA-LI, ZHAO YOU-CAI, XU DI-MIN. Study on basic characteristics of aged refuse at Shanghai Laogang Landfill [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2002, 21(11): 669-671.
- [19] 钱小青, 牛东杰, 楼紫阳, 等. 填埋场矿化垃圾资源综合利用研究进展[J]. 环境卫生工程, 2006, 14(2): 62-64
- QIAN XIAO-QING, NIU DONG-JIE, LOU ZI-YANG, et al. Development of resource comprehensive application study on mineralized waste in landfill site [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2006, 14(2): 62-64.
- [20] 湛戡, 孙东, 任岷. 生活垃圾生物反应器填埋技术中渗滤液回灌的研究[J]. 环境卫生工程, 2005, 13(6): 1-4.
- CHEN KAN. SUN DONG, REN MIN. Research on leachate recirculation in the bioreactor landfill technology of municipal domestic wastes [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2005, 13(6): 1-4.
- [21] SUNA E A, TURGUT T, ONAY, ORHAN YENIGUN. Comparison of aerobic and anaerobic degradation of municipal solid waste in bioreactor landfills [J]. Bioresource Technology 99, 2008, 5418-5426.
- [22] 杨军, 黄涛, 曹江英. 垃圾填埋场降解规律研究[J]. 环境监测管理和技术, 2007, 19(2): 41-43.
- YANG JUN, HUANG TAO, CAO JIANG-YING. Study on degradation regulation in landfill [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2007, 19(2): 41-43.
- [23] 石洪影, 谢冰, 魏铮, 等. 哈尔滨市大型生活垃圾堆场稳定化研究[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2008, 24(3): 328-330
- SHI HONG-YING, XIE BING, WEI ZHENG, et al. Research on stabilization of large-scale municipal dumping sites of Harbin [J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition, 2008, 24(3): 328-330.
- [24] 董路, 刘玉强, 黄启飞, 等. 准好氧填埋结构 CH_4 含量分布变化研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(3): 20-23.
- DONG LU, LIU YU-QIANG, HUANG QI-FEI, et al. Study on distribution of methane content in semi-aerobic landfilling structure [J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(3): 20-23.
- [25] FILIP Z, PECHER W, BERTHELIN J. Microbial utilization and transformation of humic acid-like substances extracted from a mixture of municipal refuse and sewage sludge disposed of in a landfill [J]. Environmental Pollution, 2000, 109(1): 83-89.

(编辑 胡玲)