

准好氧填埋渗滤液水质变化特性研究*

杨玉飞^{1,2} 黄启飞¹ 王 琪^{1* *} 刘玉强¹ 董 路¹

(¹ 中国环境科学研究院, 北京 100012; ² 西南农业大学资源环境学院, 重庆 400716)

【摘要】 在大型模拟填埋试验装置(21 m×3.8 m×6.0 m)上,研究了准好氧填埋渗滤液水质的主要指标 COD_{Cr}、BOD₅、NH₃⁺-N 和 pH 的变化特性。结果表明,准好氧填埋结构下渗滤液 COD_{Cr}、BOD₅ 浓度下降很快,没有出现在传统填埋场累积的现象,并且封场后 39 周分别降为 173 和 30 mg·L⁻¹; NH₃⁺-N 浓度下降更为显著,第 39 周降为 15 mg·L⁻¹,下降率达到 99.6%,为渗滤液后续处理解决了 NH₃⁺-N 浓度过高的难题;pH 值在前 2 周略低于 7,第 3 周后一直呈弱碱性。根据实验数据,拟合了准好氧填埋结构渗滤液污染物的衰减方程。

关键词 准好氧 城市固体废物 填埋 渗滤液
文章编号 1001- 9332(2005) 11- 2168- 05 中图分类号 X53 文献标识码 A

Variation characteristics of leachate quality in a semi aerobic municipal solid waste landfill. YANG Yufei^{1,2}, HUANG Qifei¹, WANG Qi¹, LIU Yuqiang¹, DONG Lu¹ (¹Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; ²Southwest Agricultural University, Chongqing 400716, China). - Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(11): 2168~ 2172.

A large scale semi aerobic landfill set (21 m×3.8 m×6.0 m) was constructed to study the variation characteristics of pollutants in the landfill leachate. The results showed that after 39 weeks, the concentrations of COD_{Cr}, BOD₅ and NH₃⁺-N in the leachate declined rapidly, which reached 173, 30 and 15 mg·L⁻¹ respectively, and the reducing rate of NH₃⁺-N was 99.6%. The pH value was below 7 during the first 2 weeks, but became weak alkali line after three weeks. Based on the experimental data, the attenuation equations of pollutants in the leachate were built.

Key words Semi aerobic, Municipal solid waste, Landfill, Leachate.

1 引言

随着我国城市化进程的加快,城市规模的不断扩大和人们生活水平的日益提高,城市垃圾产量也在逐年增加。在我国一般采用焚烧、堆肥、填埋等方法,对垃圾进行处理^[7, 8, 30]。垃圾填埋具有技术成熟、处理费用低等优点,是我国城市垃圾集中处置的主要方式^[14]。而卫生填埋场产生的渗滤液为高浓度有机废水,具有 NH₄⁺-N 含量高、污染负荷大、水质水量变化大的特点,传统水处理方法难以处理^[15, 28]。因此,从降低渗滤液污染物浓度入手,可以减轻后续水处理的压力,也符合清洁生产、源头控制的理念。王琪等研究结果表明,准好氧填埋结构能有效降低渗滤液中污染物的浓度^[12, 26, 27, 29]。准好氧填埋的设计思想是不用动力供氧,而是利用渗滤液收集管道的不满设计,使空气自然通入,在垃圾堆体发酵产生温差的推动下,使填埋场内部存在一定的好氧区域,以使渗滤液得以处理和加快填埋垃圾的分

解速度^[12]。但准好氧填埋结构在试验场的应用效果尚未见报道,准好氧填埋渗滤液性质变化的系统研究也未充分开展。因此,本研究试图揭示大型准好氧填埋处理渗滤液性质的时空变化特点,为推广准好氧填埋工艺、解决渗滤液污染问题提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 试验填埋场的建立

准好氧填埋场规模 21 m×3.8 m×6 m(图 1)。填埋场底先铺 HDPE(高密度聚乙烯)膜,然后在膜上设置直径为 20 cm 的渗滤液收集管,收集管周围用碎石覆盖,在收集管的 3 个等分处安装直径为 15 cm 的竖导气管,竖导气管周围用石笼保护,以利于导气,然后往填埋场里边填埋生活垃圾边压实,在填到 5.5 m 高度铺设模拟降雨装置,最后用塑料薄膜代替粘土覆盖层实现密封。

2.2 试验样品

试验垃圾为江西省九江市生活垃圾,所填垃圾量约 250

* 国家“863”计划资助项目(2001AA644010)。

* * 通讯联系人。

2004- 10- 02 收稿, 2005- 04- 11 接受。

t, 试验垃圾成分见表 1.

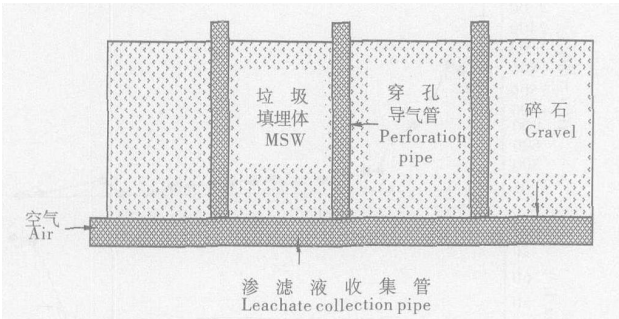


图 1 准好氧填埋实验装置示意图
Fig. 1 Sketch of semi aerobic landfill.

表 1 试验垃圾样品基本组成

Table 1 Components of experimental municipal solid waste								
	厨余 Remnant	草木 Vert	纸类 Paper	布类 Mercury	塑料 Plastic	金属 Metal	砖瓦玻璃 Tile and putty	灰土 Dust
比例 (%) Proportion	50.8	2.30	4.56	1.20	8.74	0.18	5.38	26.8

2.3 试验方法

模拟降雨量根据九江市年降雨量分次控制, 1 周为 1 m³. 在填埋场封顶后 1 个月开始进行水质分析, 主要分析测定渗滤液中 COD_{Cr}、BOD₅、NH₃⁺-N、NO₃⁻-N 浓度和 pH, 其中 pH 值用 pH S-25 数自显示 pH 计测定, COD_{Cr}、BOD₅、NH₃⁺-N、NO₃⁻-N 浓度测定分别为标准重铬酸钾法、5 日生化需氧量稀释法、纳氏试剂比色法、酚二磺酸分光光度法^[24]. 采样分析频率为 1 次·周⁻¹.

3 结果与讨论

3.1 COD_{Cr}、BOD₅ 及可生化性的动态变化

准好氧填埋方式下, 渗滤液 COD_{Cr}、BOD₅ 下降在前 3 周较为迅速(图 2), 分别从 26 486 和 17 600 mg·L⁻¹ 下降至 8 560 和 4 300 mg·L⁻¹, 下降率分别为 67.7% 和 75.6%. BOD₅ 下降率在前 3 周大于 COD_{Cr}, 这是由于在初期渗滤液中易降解有机物含量较高, 在准好氧条件下基本进行好氧反应, 在有氧条件下大分子有机物在微生物产生的各种胞外酶的作用下首先分解为小分子有机物, 这些小分子有机物被好氧微生物继续氧化分解, 通过不同的途径进入三羧酸循环, 最终被分解为 CO₂、H₂O、硝酸盐和硫酸盐. 有机物在有氧条件下分解较为迅速和彻底^[21], 因此 BOD₅ 下降较快.

图 2 表明, 随着时间的延续, 渗滤液可生化性逐渐下降, 前 3 周 BOD₅/COD_{Cr} 值都在 0.5 左右, 7~10 周 BOD₅/COD_{Cr} 值为 0.2~0.3, 10~11 周 BOD₅/COD_{Cr} 值为 0.1~0.15, 在第 13 周 BOD₅/COD_{Cr} 值降到 0.1 以下, 可见准好氧填埋渗滤液可生化性下

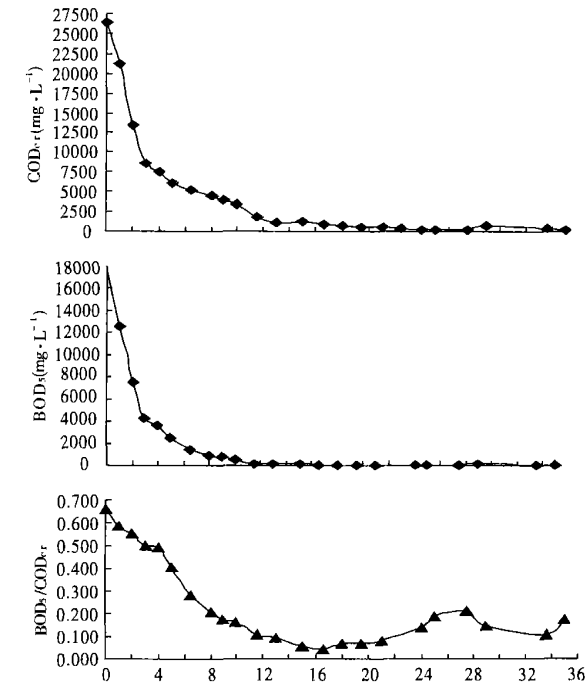


图 2 渗滤液 COD_{Cr}、BOD₅ 浓度及 BOD₅/COD_{Cr} 值变化曲线
Fig. 2 Variation of COD_{Cr}, BOD₅ concentration and BOD₅/COD_{Cr} in leachate.

降较快. 这一现象反映, 准好氧填埋情况下微生物活动较为旺盛, 加速了有机污染物的生物降解, 从而导致渗滤液有机污染物浓度的快速下降^[1,20,21]. 在第 39 周, COD_{Cr}、BOD₅ 值分别降为 17 和 30 mg·L⁻¹.

本实验条件下渗滤液 COD_{Cr} 最高浓度为 26 000 mg·L⁻¹, 比国内外文献报道的厌氧填埋场渗滤液 COD_{Cr} 值要低很多^[10,11], 原因可能是准好氧填埋中有机污染物在氧气较为充分的条件下大部分转为气相, 成为 CO₂ 和 N₂ 等气体. 本实验对填埋气的检测也表明, 准好氧填埋气中 CO₂ 的百分含量高于传统厌氧填埋^[14,18], 也可能是因为本试验水质监测滞后 1 个月所致.

准好氧填埋渗滤液 COD_{Cr} 的变化特征呈现出与传统厌氧填埋不同的特点(图 2): 渗滤液 COD_{Cr} 随着时间的延续呈稳步下降趋势, 没有出现传统厌氧填埋渗滤液 COD_{Cr} 在前期会累积上升的情况^[5]. 出现这种现象的原因是: 一般传统填埋场垃圾层在初期都处于有氧环境, 好氧细菌占主导地位, 随着垃圾层内氧气被耗尽, 从而出现厌氧环境, 此时厌氧微生物开始逐渐适应环境, 并开始占主导地位, 垃圾层中的有机物以厌氧降解为主, 这时填埋场内的固相有机垃圾在微生物分泌的各种胞外酶分作用下分解为可溶性小分子有机物, 这些可溶性小分子有机物进入渗滤液, 从而导致渗滤液中 COD_{Cr} 值的上升^[13,25].

而准好氧填埋场由于存在较大范围的好氧区域, 环境条件改变较小, 从而对微生物的种类和活性的影响较小, 有机物降解较为彻底, 进入渗滤液中的小分子有机物相对较少, 所以准好氧填埋场渗滤液 COD_{Cr} 稳步下降. COD_{Cr} 变化可以大致分为 3 个阶段: 前 3 周为快速下降阶段, 在该阶段由于垃圾中有机物含量很高, F/M 值(垃圾基质和微生物的相对数量)很高, 微生物处于对数增长期, 开始大量繁殖, 分解活动也很旺盛^[24]; 第 4 到 21 周为平缓的下降阶段, 该阶段由于微生物的大量繁殖和垃圾层中有机物浓度的下降, F/M 值下降, 微生物进入衰减期, 降解活动减缓^[24]; 第 21 周后 COD_{Cr} 基本稳定在 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 这时由于有机物浓度的进一步降低, 微生物进入内源呼吸期, 开始大量代谢自身储存的细胞物质, 总量不断减少, 对有机物的降解活动几乎停止, 而此时渗滤液中溶解性有机碳(DOC)的 30% ~ 60% 是分子量在 1 000 以上的难降解物质, 含有大量的腐殖酸和富里酸, 很难被微生物所降解^[3].

3.2 NH_3^+-N 和 NO_3^--N 的变化

渗滤液中 NH_3^+-N 主要来源于填埋垃圾中蛋白质等含 N 类物质的生物降解, 其浓度高且变化范围大, 过高的 NH_3^+-N 浓度可抑制垃圾层中微生物活性, 从而减缓垃圾的降解, 而且高浓度的 NH_3^+-N 也不利于渗滤液的后续处理. 因此降低渗滤液中高浓度 NH_3^+-N 也一直是渗滤液处理中急需解决的难题^[2, 16, 17].

结果表明, 渗滤液中的 NH_3^+-N 浓度在前 4 周有波动, 其后呈逐渐下降趋势, 并没有出现传统厌氧填埋场渗滤液 NH_3^+-N 浓度长时间累积的现象(图 3). 生物脱 N 的原理主要是利用硝化菌和反硝化菌的硝化、反硝化作用, 最终将 NH_3^+-N 转化为 N_2 达到脱 N^[23]. 传统的厌氧填埋由于垃圾层中绝大部分的厌氧环境不利于硝化细菌的硝化作用, 进而分解 NH_3^+-N , 所以渗滤液中 NH_3^+-N 浓度很高^[26]. 而准好氧填埋场由于能使垃圾层保持较好的有氧环境, 所以利于硝化细菌的硝化作用, 而且准好氧填埋场垃圾层中存在一部分的厌氧环境, 所以又能实现反硝化作用, 使得垃圾层中的 N 通过硝化和反硝化作用以 N_2 的形式进入空气, 实现生物脱 N, 从而使得渗滤液中 NH_3^+-N 浓度下降.

本实验中出现 NH_3^+-N 的最大值为 $3\,860 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 第 4~9 周下降的幅度较大, 第 9 周后下降幅度减小, 在第 39 周下降到 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 下降率为

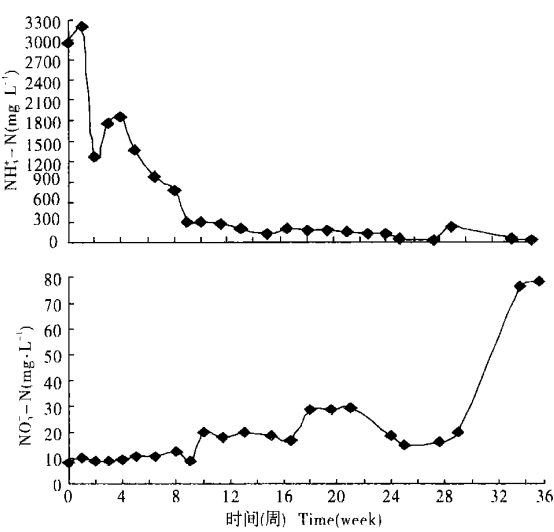


图 3 渗滤液 NH_3^+-N 、 NO_3^--N 浓度的变化曲线
Fig. 3 Variation of NH_3^+-N and NO_3^--N concentration in leachate.

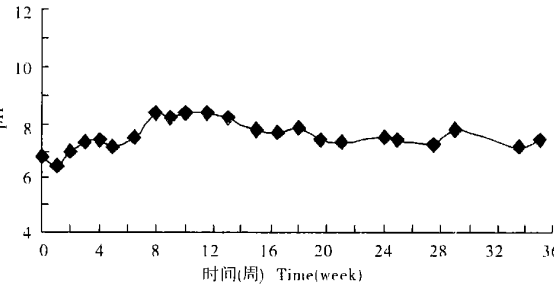


图 4 渗滤液 pH 值变化曲线
Fig. 4 Variation of pH in leachate.

99.6%. 前 4 周 NH_3^+-N 浓度高且变化大, 这是由于前期微生物降解活动旺盛, 大量的 NH_3^+-N 从垃圾含 N 物质中释放出来, 这时硝化细菌还处于繁殖阶段, 且由于开始阶段有机物浓度过高, 而硝化细菌是严格的自养细菌, 过高的有机物会抑制它们的生长, 所以硝化作用很弱. 过高的 NH_3^+-N 浓度又会对微生物的活性有影响, 使微生物降解活动不稳定^[4, 23]. 随着对环境的适应和有机物浓度的下降, 硝化细菌的硝化作用开始增强, NH_3^+-N 浓度开始逐渐下降, NO_3^--N 浓度变化曲线也反映了第 4 周后 NO_3^--N 浓度开始有所上升(图 3), 表明硝化作用开始增强. NO_3^--N 在前期浓度维持在较低的水平, 一方面是硝化作用受到高浓度有机物的抑制, 另一方面也有反硝化作用的缘故. 第 10~第 29 周 NO_3^--N 有所波动, 但都保持在较高水平, 这是由于硝化细菌对环境逐渐适应和有机物浓度的下降导致硝化作用的增强, 但直到 33 周才出现高浓度的 NO_3^--N , 达到 $78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这是由于渗滤液中有有机物浓度的大幅度下降, 反硝化作用所需的碳源不足, 反硝化作用减

弱, 使 NO_3^- -N 累积^[23].

图 4 反映了准好氧填埋渗滤液 pH 值的变化情况. 在前 2 周渗滤液 pH 值略低于 7, 其他阶段都呈弱碱性(7.0~8.5), 而厌氧填埋场渗滤液 pH 值在很长时间段内都呈弱酸性, 这是由于准好氧填埋结构微生物对有机物的降解较为彻底, 反应的时间也较短, 所以水解酸化产物存在的量较少, 时间较短.

3.3 COD_{Cr} 、 BOD_5 和 NH_3^+ -N 浓度衰减数学模拟

填埋场垃圾的降解是以生化反应为主体, 所以可以从垃圾层中微生物作用规律推导理论模型. 根据微生物作用规律, 填埋场污染物质的溶出为一级反应过程^[12, 24]:

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

式中, C 为 t 时刻渗滤液污染物(COD_{Cr} 、 NH_3^+ -N、 BOD_5)的质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), C_0 为封场后初始渗滤液污染物(COD_{Cr} 、 NH_3^+ -N、 BOD_5)质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), t 为封场后填埋时间(d), k 为溶出系数(d^{-1}). 根据现场实验数据, 利用方程(1)通过指数回归拟合, 得到 COD_{Cr} 的拟合方程为:

$$C_t = 13\,690 e^{-0.1484t} \quad (R^2 = 0.9108, t > 3) \quad (2)$$

BOD_5 的拟合方程为:

$$C_t = 4\,408 e^{-0.1855t} \quad (R^2 = 0.7869, t > 5) \quad (3)$$

NH_3^+ -N 的拟合方程为:

$$C_t = 2\,056 e^{-0.1374t} \quad (R^2 = 0.9120, t > 7) \quad (4)$$

式中, C_t 为 t 时刻污染物浓度值($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), t 为填埋时间(周).

根据所拟合得到的方程计算, 预测值和实测值比较接近, 方程能比较真实地反映本实验条件下准好氧填埋场渗滤液各污染物的变化情况. 上述拟合到的方程 KCOD_{Cr} 、 KBOD_5 、 KNH_3^+ -N 分别为 0.1484、0.1588 和 0.1374, 远大于蒋建国等^[9]对下坪填埋场渗滤液水质变化预测所得到的污染物溶出系数. 根据拟合方程预测: 准好氧填埋场渗滤液 COD_{Cr} 、 NH_3^+ -N、 BOD_5 下降到国家二级排放标准的时间分别为 26、32 和 18 周.

4 结 论

4.1 本试验验证了关于本研究前期实验室内准好氧填埋对渗滤液中污染物去除有较好效果的结论.

4.2 准好氧填埋结构渗滤液有机污染物浓度变化稳定, 呈稳步下降趋势, 没出现累积现象; 下降速度快, 在第 39 周 COD_{Cr} 、 BOD_5 浓度分别下降为 173 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 下降率为 99.4% 和 99.8%, 减轻了渗

滤液后续处理的压力.

4.3 准好氧填埋结构渗滤液中 NH_3^+ -N 衰减显著, 在填埋 39 周后降为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 下降率可达 99.6%, 解决了传统填埋场渗滤液中 NH_3^+ -N 浓度过高的难题.

致谢 感谢刘玉强在本试验中给予的帮助, 我的导师王琪研究员、黄启飞副研究员在试验和文章完成上的指导.

参考文献

- 1 Ander B, Lotte AR, Tomas H. 2003. Natural attenuation of xenobiotic organic compounds in a landfill leachate plume. *J Contam Hydro*, **65**(4): 269~291
- 2 Chao G-M (曹国民), Zhao Q-X (赵庆祥), Sun X-B (孙贤波). 2001. Study on single stage biological nitrogen removal technique with recycling of carbon source. *Acta Sci Circ* (环境科学学报), **21**(6): 705~709 (in Chinese)
- 3 Debra RR. 1996. Full scale experiences with leachate recirculation landfill: Case studies. *Waste Man Res*, **14**(1): 347~356
- 4 El Fadel M, Findikakis AN, Leckie JO. 1996. Numerical modeling of generation and transport of gas and heat in landfills: Model formulation. *Waste Man Res*, **14**(1): 483~504
- 5 Elevi H, Baccini P. 1989. Long term behavior of municipal solid waste landfills. *Waste Man Res*, **7**(1): 43~56
- 6 Hamsen J. 1983. Identification of organic compounds in leachate from a waste tip. *Water Res*, **17**(4): 699~712
- 7 Huang G-F (黄国锋), Zhong L-J (钟流举), Zhang Z-T (张震钊). 2003. Physicochemical changes and maturity evaluation of solid organic waste compost. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(5): 813~858 (in Chinese)
- 8 Huang Q-F (黄启飞), Gao D (高定), Ding D-R (丁德蓉). 2002. Remediation of chromium polluted soil using municipal solid waste compost. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **13**(2): 167~170 (in Chinese)
- 9 Jiang J-G (蒋建国), Bi Z-Q (毕志清), Wang W (王伟). 2002. Experimental study on prediction model for leachate quality variation in MSW landfills. *Environ Sci* (环境科学), **23**(5): 92~95 (in Chinese)
- 10 Kjeldsen PK, Barlaize MA, Rooker AP. 2002. Present and long term composition of MSW landfill leachate: A review. *Crit Rev Environ Sci Technol*, **32**(4): 297~336
- 11 Liu J-Y (刘疆英), Zhao Y-C (赵由才), Zhao A-H (赵爱华). 2000. Natural reduction of COD in large scale landfill leachate. *J Tongji Univ* (同济大学学报), **28**(3): 328~332 (in Chinese)
- 12 Masataka H. 1994. Commonly Waste Finally Disposal. Chuanqi: Japan Environment Sanitation. 586~599 (in Japanese)
- 13 Morris JWF, Vasuki NC, Baker JA. 2003. Findings from long term monitoring studies at MSW landfill facilities with leachate recirculation. *Waste Man*, **23**(6): 653~666
- 14 Nei T XH. 1976. Disposal Technique Journal. Tokyo: North Publish Organize. 593~621 (in Japanese)
- 15 Nie Y-F (聂永丰). 2000. Waste Management Engineering Technique Handbook. Beijing: Chemical Industry Press. 253~268 (in Chinese)
- 16 Onay TT. 1998. In situ nitrogen management in controlled bioreactor landfill. *Water Res*, **32**(6): 1383~1392
- 17 Pohland FG. 1995. Landfill bioreactors: Historical perspective, fundamental principle, and new horizons in design and operations. In: US Environmental Protection Agency, ed. Landfill Bioreactor Design and Operation Wilmington DE. Washington: Seminar Publication. 9~24
- 18 Pohland FG, Yousfi BA. 1994. Design and operation of landfills for optimum stabilization and biogas production. *Water Sci Technol*, **30**(12): 117~124
- 19 Raffaello C, Roberto R. 2003. The PAF model: An integrated ap

proach for landfill sustainability. *Waste Man*, **23**(5): 37~ 44

20 Read AD, Hudgins M, Harper S. 2001. The successful demonstration of aerobic landfilling: The potential for a more sustainable solid waste management approach. *Cons Recyc*, **32**(2): 115~ 146

21 Robert JF, Morton AB. 1996. Hydrogen sulfide production during decomposition of landfill inputs. *J Environ Eng*, **124**(4): 353~ 361

22 Robinson HD. 1983. The treatment of leachate from domestic wastes in landfill I: Aerobic biological treatment of a medium strength leachate. *Water Res*, **17**(7): 1537~ 1548

23 Robinson HD. 1992. Leachate collection, treatment and disposal. *Water Environ Man*, **6**(3): 321~ 332

24 Shen D-S(沈东升). 2003. Municipal Solid Waste Landfill Biological Disposal Technique. Beijing: Chemical Industry Press. 345~ 365 (in Chinese)

25 Wang J-Q(王君琴), Shen D-S(沈东升). 2003. An experimental study with bioreactor landfill system. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **14**(11): 2077~ 2078(in Chinese)

26 Wang Q(王琪), Dong L(董路), Li H(李). 2000. Studies on the leachate recycling technique of waste landfills. *Res Environ Sci*(环境科学研究), **13**(3): 1~ 5(in Chinese)

27 Wang Q(王琪), Zhou B-H(周北海), Dong L(董路). 1998. Functions and compositions of leachate control system of landfill. *Res Environ Sci*(环境科学研究), **11**(3): 28~ 3(in Chinese)

28 Wang W(王伟), Yuan G-Y(袁光钰). 1997. The status and development of solid waste treatment and disposal in China. *Environ Sci*(环境科学), **18**(3): 87~ 90(in Chinese)

29 Yu X-H(于晓华), He P-J(何品晶), Ling G-J(李国建). 2004. Effect on nitrogen component in leachate under different air conditions landfill layers. *J Tongji Univ*(同济大学学报), **32**(6): 741~ 744 (in Chinese)

30 Zhou Z-F(周仲凡), Wang J(王吉). 2000. Municipal Solid Waste Management and Disposal Technique. Beijing: China Petrol Chemical Press. 145~ 198(in Chinese)

作者简介 杨玉飞,男,1978年生,硕士研究生.主要从事固体废物废弃物处理研究,发表论文2篇. E-mail: cqyyf@163.com

2003~ 2004 两刊主要计量指标

刊名	2003 年		2004 年	
	被引频次	影响因子	被引频次	影响因子
《应用生态学报》	2465	1.098	3935	1.525
《生态学杂志》	1098	0.865	1356	0.783