

# 城市生活垃圾填埋场渗滤液 生化处理过程中重金属离子问题

彭永臻\* 张树军 郑淑文 王淑莹

(北京工业大学环境与能源工程学院北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022)

**摘要** 我国对城市生活填埋场渗滤液处理技术的研究主要集中在 COD 与  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除上, 对渗滤液中重金属离子的专项研究几乎未见报道。本文首先总结了国内外城市生活垃圾渗滤液中重金属的种类及浓度, 在渗滤液中的存在状态, 渗滤液中重金属与其他成分(有机物、氨氮)的相互作用关系, 辩证分析了重金属在渗滤液生化处理过程中的有益作用和毒性, 归纳了重金属在渗滤液生化处理过程中的变化规律, 同时总结分析了重金属的去除技术。

**关键词** 垃圾渗滤液 重金属 有益作用 毒性

**中图分类号** X703.1 **文献标识码** A **文章编号** 1008-9241(2006)01-0001-05

## Heavy metal ions in the biological treatment of municipal landfill leachate

Peng Yongzhen Zhang Shujun Zheng Shuwen Wang Shuying

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering,  
College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

**Abstract** In China treatment technology of landfill leachate has been attached importance to the removal of COD and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ . No materials may be gained about special research of heavy metal ions in landfill leachate. The article firstly summarizes varieties, concentration, existing states of heavy metals and the mutual relation with other component (COD and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ) in the typical municipal landfill leachate at home and abroad. Secondly, it analyzes the benefits and toxicity of heavy metals in the biological treatment of the leachate, generalizes their laws of flux in the process of biological treatment, finally presents several kinds of removal technology of the heavy metals in the leachate.

**Key words** landfill leachate; heavy metals; active function; toxicity

城市生活垃圾的处理方法包括卫生填埋、焚烧和堆肥等。卫生填埋法由于处理费用低、技术成熟, 成为垃圾处理的主要方式<sup>[1-3]</sup>。城市生活垃圾填埋场渗滤液(以下简称渗滤液)是一种高浓度有机废水,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量高, 而且含有多种重金属离子。国内对渗滤液中重金属离子的种类及含量很少检测, 少量的数据也差别很大。对诸如渗滤液生化处理前是否需要重金属进行预处理, 及生化过程中重金属的作用及变化规律等问题上, 一直存在分歧和认识上的偏颇。

在渗滤液处理的试验研究和工程实践中, 人们有时不加区别地认为, 重金属离子会对生物处理过程产生严重的抑制和毒害作用, 因此在生物处理前需经预处理去除重金属离子。事实上, 许多渗滤液中的重金属离子浓度很低, 不会对生化处理造成危害。但有时会因为接纳某些工业垃圾造成重金属离

子浓度超标, 则应对工业垃圾进行预处理。因而对渗滤液中重金属有一个全面深入的认识是非常必要的。

### 1 渗滤液中重金属离子种类及含量

#### 1.1 国内渗滤液中重金属种类及含量

重金属在环境污染研究中多指 Hg、Cd、Pb、Cr 以及类金属 As 等生物毒性显著的元素; 其次是指 Zn、Cu、Ni、Co 和 Sn 等金属离子。在水中绝大部分以化合物或配合物的形式存在, 而具体的存在形式与污水的 pH 值、水中有机物的浓度密切相关, 通常

基金项目: 国家自然科学基金国际重大合作项目(50521140075)

收稿日期: 2005-04-26; 修订日期: 2005-10-08

作者简介: 彭永臻(1949~), 男, 黑龙江省哈尔滨人, 工学博士, 教授, 主要从事水污染控制研究。E-mail: pyz@bjut.edu.cn

\* 通讯联系人

对生物毒性最大的是自由态离子(有机汞等是例外)。

我国垃圾渗滤液处理的研究起步较晚,对渗滤液中重金属离子的专项研究则更少,少量的文献数据差别也较大,这与我国地域辽阔,同时垃圾的收集填埋不规范,垃圾中含有工业废物等因素有关。总结国内资料<sup>[5-7]</sup>得出我国垃圾渗滤液中的重金属含量,结果如表1所示。

表1 我国城市垃圾渗滤液中的重金属  
Table 1 Concentration of heavy metals  
in landfill leachate in China

重金属	浓度( $\mu\text{g/L}$ )
As	0~92
Fe	1330~3.02 $\times 10^5$
Zn	75~1060
Cd	1~100
Ni	260~1000
Pb	100~200
Cr	60~990
Cu	10~1100

## 1.2 国外渗滤液中重金属种类及含量

Dorthe等<sup>[4]</sup>对丹麦4个填埋场渗滤液中重金属的含量及存在形态进行了调查分析,结果如下:0.2~3.6 $\mu\text{g Cd/L}$ , 28~84 $\mu\text{g Ni/L}$ , 85~5310 $\mu\text{g Zn/L}$ , 2~34 $\mu\text{g Cu/L}$ , 0~188 $\mu\text{g Cr/L}$ , 0~16 $\mu\text{g Pb/L}$ 。调查表明,大部分重金属与渗滤液中的胶体结合,不同的重金属结合的比例不同。Andreotola<sup>[8]</sup>对欧美70多个垃圾填埋场渗滤液成分进行了统计。Urase等<sup>[9]</sup>对日本5个填埋场渗滤液中的重金属进行了调查。根据上述文献归纳的结果如表2所示。

表2 国外垃圾渗滤液中的重金属离子含量  
Table 2 Concentration of heavy metals  
in foreign leachate

重金属	浓度( $\mu\text{g/L}$ )	重金属	浓度( $\mu\text{g/L}$ )
As	5~1600	Co	4~950
Fe	400~2.2 $\times 10^6$	Ni	20~2050
Zn	27~1.7 $\times 10^5$	Pb	5~1020
Mn	400~5.0 $\times 10^4$	Cr	13~1600
Cd	0.5~140	Cu	2~1400
Hg	0.2~50		

Joar等<sup>[10]</sup>对挪威4个填埋场重金属离子的渗滤情况进行了调研,表明渗滤液中待测重金属的含量很低。垃圾中几种重金属的年渗滤最大量如下: Cd、Pb、Hg和Cr分别为0.06%、0.01%、0.02%和1.0%,Fe在条件适宜时最为活跃,其年渗滤量在1.9%~18%之间变化。尽管Cr的渗滤量高于Cd、Pb与Hg,但其含量仍然低于欧盟规定的饮用水标准的限制<sup>[11]</sup>。该调研的结果在其他的研究中也得到了证明<sup>[12-15]</sup>。

重金属不易渗滤的原因主要有:没有氧的进入,保持一个厌氧的还原环境;同时微生物有充足营养;保持适当湿度。这样的环境可以保证硫酸盐还原菌的生长,生成硫化物沉淀。厌氧环境也容易形成金属氢氧化物沉淀,而且这种现象会随着回灌、垃圾稳定化进程的加快而提高。

## 2 重金属在生化处理中的作用

几乎所有微生物的生长都离不开Fe、Mn、Co、Cu、Ni、Zn、Al和V等重金属元素。当这些重金属元素适量存在时,对微生物的生长具有作为酶催化剂、在氧化还原反应中传递电子(将ADP转化为ATP)以及调节生物渗透压等作用。当特定金属离子的含量达到一定浓度时,这种离子才能完成相应的生物作用。但是浓度高于一定界限时,金属离子将会产生毒性效应。某些金属离子没有已知或假定的生物功能,当存在于细胞中时,它们可能产生较大的毒性<sup>[16]</sup>,例如Cd、Cr、Hg、Pb和As等(图1)。

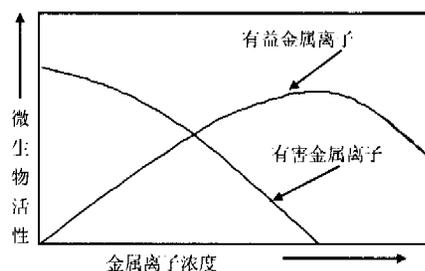


图1 金属离子毒性和有益作用与其浓度的关系

Fig. 1 Relation between toxicity or benefit of heavy metals and their concentration

### 2.1 重金属的有益作用

#### 2.1.1 微生物重要的化学组成成分

通过细胞化学组成分析可以看出重金属是微生物重要的微量营养元素。例如甲烷菌的化学组成中重金属含量如表3所示<sup>[17]</sup>。甲烷菌化学组成中有相对较高的铁、镍和钴元素。

表 3 甲烷菌的重金属离子含量

Table 3 Content of heavy metals of methanogenic

重金属	Ni	Co	Mo	Zn	Mn	Cu	Fe
含量	0.01	0.075	0.06	0.06	0.02	0.01	1.8

### 2.1.2 微量金属对甲烷菌的激活作用

微量金属可能对多种微生物有激活作用,但研究较多的是对甲烷菌的激活作用。研究表明,对甲烷菌有激活作用的微量金属包括<sup>[18]</sup>;Fe、Co、Ni、Zn、Cu、Mn、Mo、Se、W 和 B 等,其中 Fe、Co、Ni 的需要量分别是 0.02、0.004 和 0.003 mg/g AC( acetic acid, 乙酸)。缺少或限制其中任何一种微量金属,产甲烷过程都会受到抑制或完全停止。同时缺少微量金属也是厌氧处理出水挥发酸长期居高不下的原因之一。

Speece 研究表明<sup>[18]</sup>,向厌氧反应器中投加 Fe、Co、Ni 有助于生物体对高浓度 Na<sup>+</sup> (12000mg/L) 的驯化。向反应器中直接投加 Fe、Co、Ni 时,对 Na<sup>+</sup> (12 000 mg/L) 的冲击剂量的驯化约 15 d,不投加这些微量金属,直到 39 d 后仍没用甲烷产生。

### 2.1.3 微生物的金属辅助因子

一些酶只依赖自身的蛋白质结构就能发挥活性,而另外一些酶还需要非蛋白质成分才能发挥作用。当这种非蛋白质部分是金属离子时,称为辅助因子。表 4 列出了各种金属离子(辅助因子)以及与它们有关的酶<sup>[19]</sup>。

表 4 金属辅助因子、它们激活的酶以及酶的功能

Table 4 Metal cofactors, the enzymes they activate, and the enzymes function

辅助因子	酶及其功能
Co	转羧(基)酶,维生素 B <sub>12</sub>
Cu	细胞色素氧化酶,参与呼吸作用的蛋白质,一些过氧化物歧化酶
Fe	激活许多酶,过氧化氢酶、加氧酶、细胞色素、固氮酶、过氧化物酶
Mn	激活许多酶,产氧光合作用,一些氧化物歧化酶
Mo	硝酸盐还原酶、甲酸脱氢酶、氧转移酶、钼固氮酶
Ni	一氧化碳脱氢酶、大多数氢化酶、产甲烷菌的辅酶 F <sub>430</sub> 、尿素酶
Se	某些氢化酶、甲酸脱氢酶
V	钒固氮酶、一些过氧化物酶
W	极度嗜热菌的氧转移酶、一些甲酸脱氢酶
Zn	RNA 与 DNA 聚合酶、碳酸酐酶、乙醇脱氢酶

## 2.2 重金属离子的毒性及抑制浓度

重金属离子达到一定浓度时会对微生物产生毒害作用,它们能够和细胞的蛋白质相结合,而使其变性或沉淀。有毒物质对微生物的毒害作用,有一个量的概念,有毒物质达到极限允许浓度才产生毒害。但是这些浓度也不是绝对的,通过逐渐的驯化,微生物可以承受更大的浓度。渗滤液中的金属离子如果含量很高也会形成沉淀物使生化反应器堵塞,或在生物膜表面结垢,影响去除效率。

### 2.2.1 重金属离子对好氧菌毒性及抑制浓度

Paolo 等<sup>[20]</sup>以氨吸收速率(AUR)和氧吸收速率(SOUR)作为衡量重金属对微生物毒性大小的标准,研究了重金属离子对活性污泥中异养菌和硝化菌的抑制作用。他们在试验中采用不同浓度的 Cd<sup>2+</sup>、Cr<sup>6+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 与 Zn<sup>2+</sup> 溶液与活性污泥接触混合,在混合接触 1 h 后,检查 AUR 和 SOUR 的变化。研究结果如下:Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 和 Cr<sup>6+</sup> 对异养菌产生 50% 抑制作用的浓度分别 250、500、650、13 500 和 150 000 μg/L;而对硝化菌产生 50% 抑制作用的浓度分别 3800、750、225、16 000 和 300 000 μg/L。可以看出与重金属接触时硝化菌不如好氧异养菌敏感。

Metcalf 等<sup>[21]</sup>研究总结了重金属离子对异养微生物抑制作用的起始浓度:As 50 μg/L, Cd 1000 μg/L, 总 Cr 10 000 μg/L, Cr<sup>6+</sup> 1000 μg/L, Cu 1000 μg/L, Pb 100 μg/L, Hg 100 μg/L, Ni 1000 μg/L, Zn 1000 μg/L。菌种驯化程度以及基质种类等试验条件的不同可能造成了研究结果较大的差异。

### 2.2.2 重金属离子对厌氧菌的毒性及抑制浓度

废水厌氧处理中产生的 S<sup>2-</sup> 与 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 等阴离子,会与废水中的金属离子迅速地发生沉淀反应,使金属离子的浓度迅速下降,而 pH 值的适当提高,也有助于重金属离子的沉淀。重金属迁移到沉淀物中一方面可以降低重金属离子的毒性,另一方面可能导致某些重要的微量金属元素的浓度过低,影响微生物的活性。

总结有关重金属对甲烷菌毒性的研究结果得出结论<sup>[22]</sup>:对甲烷菌而言,重金属离子的 IC<sub>50</sub> 值一般在 30 ~ 300 mg/L,该浓度指的是加到溶液试样中的金属离子浓度。

王菊思等<sup>[23]</sup>的研究表明,对厌氧体系直接起抑制作用的是溶解态的金属离子,当几种重金属共存时所产生的毒性要比单独存在时大,亦即污泥对混

合离子协同作用的承受能力要比任何单个离子的承受能力低。而维持厌氧体系正常运行的溶解态金属离子的浓度分别为:  $Zn^{2+} < 700 \mu\text{g/L}$ ,  $Cr^{3+} < 500 \mu\text{g/L}$ ,  $Cu^{2+} < 500 \mu\text{g/L}$ ,  $Ni^{2+} < 400 \mu\text{g/L}$ ,  $Cr^{6+} < 400 \mu\text{g/L}$ , 混合金属离子  $< 500 \mu\text{g/L}$ 。

### 3 渗滤液中重金属离子处理技术

渗滤液中的重金属含量通常很低,不会对生化处理产生大而持续的毒害作用。对富含重金属的垃圾,应考虑在入场前进行预处理。如果已经造成渗滤液重金属浓度过高的事实,或处理后排放水有很高的环境要求,应进行相应的处理使出水满足规定的标准。主要技术包括:微生物去除法、吸附法、混凝沉淀法和膜分离法等。

#### 3.1 微生物法去除技术

微生物法去除废水中重金属的主要机理之一:利用以硫酸盐还原菌(sulfate reducing bacteria, SRB)为主的厌氧微生物将高价的重金属离子还原,再利用SRB代谢产生的 $S^{2-}$ 与重金属离子生成硫化物沉淀。微生物去除重金属的作用机理还在于微生物表面通常带有负电荷,故对重金属有较强的吸附性。其次,微生物菌群本身还有较强的生物絮凝作用,使废水中的金属硫化物得以沉淀。

厌氧微生物对重金属的去除作用是从污泥床中顶替微生物作为代价的,导致生物活性降低,同时发生污泥钙化现象,严重时可能造成颗粒污泥上浮,或污泥床压缩与沟流导致运行失败。同时,也有许多厌氧反应器处理渗滤液时能够长期高效运行,这与反应器的结构及运行方式有关。

Rumpf和Ferguson研究了UASB反应器中去除重金属离子的情况:溶解性的Cd、Cr、Co、Cu和Pb全部去除,Ca、Fe、Mn和Zn的去除率 $> 94\%$ 以上,Mg、P和Ni的去除率分别为36%、79%和68%。由于缺少硫化物与磷化物,沉淀主要以碳酸盐为主,但金属离子优先以硫化物的形式沉淀。

好氧活性污泥通过沉淀、细胞外多聚物的吸附、胞内吸收等途径对废水中金属离子加以去除。通过对活性污泥系统的金属离子分配研究可知,Cd、Ni的去除主要是吸附而不是沉淀。活性污泥对Cd、Cr和Co的去除率较高,而对Ni、Zn的去除率一般都比较低并且变化大,沉淀是一个主要的去除机制。

#### 3.2 吸附法去除重金属离子

常用的吸附剂包括:活性炭、焦炭<sup>[24]</sup>、泥煤以及

树脂等。泥煤具有吸附特定的金属离子的能力。Catherine<sup>[25]</sup>研究了泥煤对渗滤液中Al、B、Ba、Ca、Co、Fe、Mn和Zn等的吸附容量,结果如表5所示。泥煤对Al、B、Zn有很高的去除效率,对Mn的去除效率不高,对Ca、Co、Fe的去除率波动较大。采用吸附法去除重金属时吸附剂的用量很大,渗滤液中的污染物会很快使其饱和失效,运行操作强度也较大。

表5 泥煤对重金属离子的吸附容量

Table 5 Adsorptive capacity of peat to heavy metals

(mg/kg 干泥炭)

重金属	Al	B	Ba	Ca	Co	Mn	Zn
吸附容量	7.35	142	4.6	13.1	5.6	292	227

#### 3.3 混凝沉淀去除技术

Dorthe等<sup>[4]</sup>对丹麦4个有混凝工艺的渗滤液处理厂进行研究表明,重金属去除效果均不理想:重金属B在混凝前后几乎没有变化;在低pH条件下,有利于Cr、Cu、Ni、Mo和Sn的混凝去除;在高pH条件下,有利于Zn的混凝去除。而在纯重金属溶液中,As、Cd、Ni、Cu、Pb、Sn和Zn在高pH条件下得到较好去除;As、Cr、Sb和Sn在较低pH条件下得到较好去除。可见存在于渗滤液中的重金属与纯溶液中的重金属性质产生了差异。

#### 3.4 膜分离技术

纳滤与反渗透技术可以有效地去除渗滤液中的重金属离子,以反渗透的效果最佳,但其操作压力在2 MPa以上,建设费用与运行维护费用都很高。Peters<sup>[26]</sup>研究表明,德国Ihlenberg垃圾填埋场采用2级反渗透装置处理渗滤液,处理量为 $36 \text{ m}^3/\text{h}$ ,重金属的总去除率达到了98%。

Angelo等<sup>[27]</sup>的研究表明,在应用反渗透处理渗滤液时,渗滤液中的有机物浓度对重金属去除的影响与重金属的性质有关。在所调查的重金属中,随着有机物浓度的提高Cu与Zn去除率受到较大的影响,但Cd的去除受到的影响很小,其去除率一直高于99.5%。尽管如此,当操作压力由2 MPa提高到5 MPa时,Cu、Zn的去除率由96%提高到了98%。

## 4 结论

Ni、Co、Mo、Zn、Mn、Cu和Fe等重金属离子是微生物生长代谢必需的微量营养元素,是许多酶的辅助因子,只有达到一定浓度才会产生抑制作用。

Cd、Cr、Hg、Pb 和 As 等重金属离子没有已知的或假定的生物功能,在细胞中可能产生较大的毒性。不加区别的去重金属离子不仅造成浪费,而且可能导致生化处理失败。

应充分掌握特定渗滤液中重金属离子的种类和含量,如果对重金属离子加以控制或去除,就应注意重金属离子的双重作用,根据要去重金属离子种类和去除程度来选择处理工艺,防止造成微量有益重金属离子缺乏。

同一种重金属离子对不同微生物的抑制作用不同,而同一种微生物对不同的重金属离子的敏感度也不同。通过驯化可以提高微生物对某些重金属离子的抗毒性。

### 参 考 文 献

- [1] Davoli E., Gangai M. L., Morselli L., et al. Characterization of odorants emissions from landfills by SP ME and GC/MS. *Chemosphere*, **2003**, 51:357 ~ 368
- [2] Butt T. E., Oduyemik O. K. A holistic approach to concentration assessment of hazards in the risk assessment of landfill leachate. *Environ. International*, **2003**, 28: 597 ~ 608
- [3] 李海生,刘光辉,刘亮,等.城市垃圾填埋场渗滤液处理研究进展. *环境科学研究*, **2004**, 17(1):76 ~ 80
- [4] Dorthe L. J., Thomash C. Colloidal and dissolved metals in leachates from four Danish landfills. *Wat. Res.*, **1999**, 33(9):2139 ~ 2147
- [5] 汪群慧. 固体废弃物处理及资源化. 北京:化学工业出版社, **2004**
- [6] 赵宗升. 城市生活垃圾渗滤液水质和处理研究. 清华大学博士学位论文, **2001**
- [7] 杭世珩,张荣辉,王玫,等.城市垃圾卫生填埋场渗滤液处理工艺研究. 北京市市政设计研究院研究所, **2003**
- [8] Andreottola G. Chemical and biological characteristics of landfill leachate. In: *Landfilling of Waste: Leachate*. London: Elsevier Applied Science, **1992**
- [9] T. Urase, M. Salequzzaman, S. Kobayashi, et al. Effect of high concentration of organic and inorganic matters in landfill leachate on the treatment of heavy metals in very low concentration level. *Wat. Sci. Tech.*, **1997**, 36(12):349 ~ 356
- [10] Joar K. Ø., Amund M., Elin G. Estimation of the mass-balance of selected metals in four sanitary landfills in Western Norway, with emphasis on the heavy metal content of the deposited waste and the leachate. *Water Research*, **2004**, 38: 2851 ~ 2858
- [11] Council Directive 98/83/EU. Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the Quality of Water Intended for Human Consumption. The Council of the European Union, **1998**
- [12] Reinhart D. R., Grosh C. J. Analysis of Florida MSW landfill leachate quality. Florida Centre for Solid and Hazardous Management, Gainesville, FL, **1998**. 3 ~ 97
- [13] Rooker A. P. A critical evaluation of factors required to terminate the post-closure monitoring period at solid waste landfill. Master of science thesis, Department of Civil Engineering, Environmental Engineering and Water Resources, NC State University, Raleigh, NC, **2000**
- [14] Flyhammar P. Analysis of the cadmium flux in Sweden with special emphasis on landfill leachate. *Environ. Qual.*, **1995**, 24:21 ~ 612
- [15] Belevi H., Baccini P. Water and element fluxes from sanitary landfills. In: Christensen T. H., Cossu R., Stegmann R., editors. *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*. London: Academic Press Ltd., **1989**. 7 ~ 391
- [16] S. J. Lippard and J. M. Berg, 席振峰等译. 生物无机化学原理. 北京:北京大学出版社, **2000**
- [17] 贺延龄. 厌氧生物处理. 北京:中国轻工业出版社, **1998**. 53 ~ 54
- [18] R. E. Speece 著,李亚新译. 工业废水的厌氧生物技术. 中国建筑工业出版社, **2001**. 153 ~ 156
- [19] Bruce E. Rittmann and Perry L. MacCarty. 文湘华, 王建龙译. 环境生物技术原理与应用. 北京:清华大学出版社, **2004**. 37 ~ 40
- [20] Paolo M., Donatella D., Lorena G., et al. Response of SOUR and AUR to heavy metal concentration in activated sludge. *Wat. Res.*, **1999**, 33(10):2459 ~ 2464
- [21] Metcalf & Eddy, Inc. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (Fourth Edition)*. 北京:清华大学出版社, **2003**
- [22] 胡纪萃,周孟津,左剑恶,等. 废水厌氧生物处理理论与技术. 北京:中国建筑工业出版社, **2003**
- [23] 王菊思. 高浓度有机废水厌氧生物处理过程中重金属离子抑制作用的研究. 国家环境保护局编, 水污染防治及城市污水资源化技术. 北京:科学出版社, **1993**. 133 ~ 143
- [24] 沈耀良. 垃圾填埋场渗滤液中重金属的去除. *环境保护*, **1994**, (3):15 ~ 16
- [25] Catherine Savard. Anaerobic treatment of landfill leachate using a peat moss filter for pre-treatment. Doctor dissertation of the University of Ottawa, **1997**
- [26] Peters T. A. Purification of landfill leachate with reverse osmosis and nanofiltration. *Desalination*, **1998**, 119:289 ~ 293
- [27] Angelo C., Rolando R., Nicola V. Treatment of landfill leachate by reverse osmosis. *Wat. Res.*, **1999**, 33(3):647 ~ 652