

不同填埋时间、不同季节的垃圾渗滤液生物毒性

刘婷¹, 陈朱蕾^{1*}, 唐素琴², 谢文刚¹, 杨列¹

(1. 华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 杭州市固体废弃物处理有限公司, 杭州 310022)

摘要: 以武汉市 7 个城市生活垃圾填埋场渗滤液作为研究对象, 探讨不同填埋时间、不同季节渗滤液的生物毒性变化以及理化指标与生物毒性效应的相关性。毒性实验采用嗜热四膜虫 (*Tetrahymena thermophila*) 作为试验生物, 进行了渗滤液对受试生物 24 h 半数致死浓度 LC_{50} 和生长抑制测定。结果表明, 不同填埋时间的渗滤液 LC_{50} 在 0.84% ~ 12.15% 之间; 随着填埋时间延长, 渗滤液 LC_{50} 有增大的趋势, 急性毒性逐渐减小, 但渗滤液对嗜热四膜虫种群的生长抑制没有减少的趋势。不同季节渗滤液的 LC_{50} 没有明显的规律性, 夏季的渗滤液 LC_{50} 较小, 急性毒性较强; 不同季节的渗滤液对嗜热四膜虫的生长抑制情况不同, 春季渗滤液的生长抑制作用最小。渗滤液理化指标与 LC_{50} 无显著相关性, 而渗滤液对嗜热四膜虫种群的生长抑制作用随着 COD、 BOD_5 、 NH_4^+-N 和邻苯二甲酸二异辛酯 (DEHP) 的增加而增强。

关键词: 填埋时间; 季节; 垃圾渗滤液; 嗜热四膜虫; 毒性

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)02-0541-06

Toxicity of Leachate of Different Landfill Ages and Different Seasons

LU Ting¹, CHEN Zhu-lei¹, TANG Su-qin², XIE Wen-gang¹, YANG Lie¹

(1. School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hangzhou Solid Wastes Handling Inc., Hangzhou 310022, China)

Abstract Leachates from 7 landfill of Wuhan, China were selected to determine the toxicity of leachates of different landfill age and different seasons, and relationships between physical-chemical parameters and toxicity of leachates were also study. Bioassays were conducted recording toxicity against *Tetrahymena thermophila* as median lethal concentrations (LC_{50} values) after 24h exposure and growth inhibition. The results show that LC_{50} values of leachates of different landfill age oscillate between 0.84% and 12.15%, and LC_{50} values increase and growth inhibitions do not decrease with increase of landfill age. No clear regularity is observed from LC_{50} values of leachates of different seasons, and LC_{50} values of leachates of summer are comparatively lower. Growth inhibitions of leachates of spring are the lowest. Physical-chemical parameters of leachates do not correlated with LC_{50} values, whereas growth inhibitions are dependent on COD, BOD_5 , NH_4^+-N and concentrations of diethylhexyl phthalate (DEHP).

Key words landfill age; seasons; leachate; *Tetrahymena thermophila*; toxicity

在垃圾填埋过程中会有大量的高浓度渗滤液产生, 渗滤液是填埋场周边环境污染的主要来源之一。渗滤液水质随着填埋时间、季节不断变化: 其中 COD、 BOD_5 、重金属含量随填埋时间的延长而降低^[1-5]; NH_4^+-N 浓度不随填埋时间的延长而下降, 甚至有增加的趋势^[2, 4, 5]; 磷酸盐、氯化物、钙、镁、硫酸盐、溶解性有机物、苯、甲苯、乙苯、二甲苯等随季节变化甚于填埋时间的变化^[5]。渗滤液中含有多种有毒有害的污染物, 对动植物和人类有着长期潜在的毒性影响。渗滤液中最常见的 2 种内分泌干扰素是双酚 A (bisphenol A, BPA) 和邻苯二甲酸二异辛酯 (diethylhexyl phthalate, DEHP), 随着填埋时间的延长, BPA 浓度逐渐下降, 而 DEHP 浓度保持在一定的范围, 变化不大^[6]。目前国内外在垃圾渗滤液生物毒性方面开展了一些研究, 如评价各种来源垃圾渗滤液的生物毒性^[7-11], 采用生物毒性来评价不同处理工艺对渗滤液的处理效果等^[12-14]。关于渗滤液

的生物毒性随着填埋时间、季节的变化少见报道。

目前渗滤液生物毒性研究用到的生物有浮萍、大鼠、金鱼、大型水蚤和发光细菌等^[7-9, 15-17]。垃圾渗滤液对水体环境的影响较大, 本研究选用水生生物中的原生动物作为毒性试验生物。原生动物四膜虫 (*Tetrahymena*) 是单细胞真核生物, 对污染物胁迫的响应直接而敏感; 因其处于水生生态系统食物链的底层, 故更有利于对污染物毒性的早期预报; 同时由于其生命周期短且无菌纯培养方法成熟、易操作, 因此一直被作为毒理学研究的良好模式生物^[18, 19]。

收稿日期: 2009-03-22; 修订日期: 2009-06-04

基金项目: “十一五” 国家科技攻关计划项目 (2006BAC06B04); 中国博士后科学基金面上项目 (20080430967); 华中科技大学博士后基金项目 (0128110004)

作者简介: 刘婷 (1976-), 女, 博士后, 主要研究方向为固体废弃物处理及资源化, E-mail: xiangl@263.net

* 通讯联系人, E-mail: chenzhule@263.net

本研究选取武汉市 7 个填埋时间不同的城市生活垃圾填埋场,测定各个填埋场渗滤液对嗜热四膜虫 (*Tetrahymena thermophila*) 的急性毒性及种群生长抑制,探讨不同填埋时间、不同季节渗滤液的生物毒性变化以及生物毒性效应与理化指标的相关性.研究结果可为渗滤液的生态风险评价与管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验样品

为了比较不同填埋时间垃圾渗滤液的生物毒性,于 2006 年 5 月采集了二妃山、金口、岱山、流芳和紫霞观 5 个填埋场的渗滤液样品,于 2009 年 5 月采集了北洋桥和陈家冲 2 个填埋场的渗滤液样品;为了比较不同季节垃圾渗滤液的生物毒性,于 2006 年 5 月、9 月和 12 月和 2007 年的 3 月采集了二妃山和流芳 2 个填埋场的渗滤液样品,于 2008 年 3 月、5 月、9 月采集了北洋桥填埋场的渗滤液样品.渗滤液样品取自各个填埋场的渗滤液调节池,收集样品于采样瓶中,尽快避光冷冻送到实验室进行分析.

嗜热四膜虫 BF_5 (*T. thermophila* BF_5) 由中国科学院武汉水生生物研究所原生动物组馈赠.嗜热四膜虫的培养采用 PPYE 培养基^[20],以总体积 2% 的比例接入对数期的四膜虫悬液,28℃光照培养箱内静止培养约 3 d 后进入稳定期.

1.2 理化指标检测

对不同时间取回的渗滤液,测定了 pH、COD、BOD₅、NH₄⁺-N 等指标.对 2009 年 5 月陈家冲和北洋桥填埋场渗滤液测定了 DEHP 的含量.测定方法如下: pH 值采用上海雷磁仪器厂生产的 PHS23C 精密 pH 计直接测定; COD 用重铬酸钾标准法测定; BOD₅ 用 HACH 公司的 BOD₅TRAK 仪测定; NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法测定. DEHP 测定方法见文献 [21].

1.3 毒性实验

渗滤液样品先进行毒性预备实验,得到对嗜热四膜虫的最小全致死和最大无死亡浓度范围,然后在此范围内进行不同稀释倍数的急性毒性实验,用半数致死浓度 LC₅₀ 表示急性毒性效应.将稳定期的嗜热四膜虫培养液离心 (4 000 r/min) 后,弃去上清液,用等渗溶液将虫体清洗 3 遍,再用等渗溶液重悬.急性毒性实验在 28℃ 下进行,采用 10 mL 的反应体系,分别在不同稀释倍数的渗滤液中加入嗜热

四膜虫悬液,使四膜虫的浓度为 750~1 000 个/mL,放置 24 h 后取 0.1 mL 液体用微型生物计数框计数.每个稀释倍数的渗滤液做 3 个平行样,同时做 3 个空白对照样,取平均值进行计算.

在急性毒性实验基础上,将垃圾填埋场渗滤液按 10%、2%、1%、0.1% 浓度组稀释,试验其对嗜热四膜虫种群生长的影响,采用世代时间作为评价指标.不同浓度的渗滤液加入 PPYS 培养基中,接种稳定期的四膜虫,于 28℃ 下光照培养箱内静置培养,定时取样测其吸光度 D_{600} 值.每个稀释倍数的渗滤液做 3 个平行样,同时做 3 个空白对照样,取平均值进行计算.

1.4 实验结果统计方法

采用概率单位法计算得到暴露 24 h 的 LC₅₀ 及其 95% 置信区间;世代时间计算参考文献 [22];以 SPSS11.5 统计软件进行毒性指标与理化参数相关性分析.

2 结果与讨论

2.1 不同填埋时间渗滤液对嗜热四膜虫的毒性效应

7 个填埋场的填埋垃圾都是武汉市的生活垃圾,垃圾的组成较为类似.填埋场的基本情况见表 1.渗滤液的理化指标和 24h-LC₅₀ 分别见表 2 和表 3.填埋场的填埋时间各不相同,填埋时间较短的有二妃山、陈家冲填埋场 (5 a 以内),填埋时间中等的是流芳填埋场 (5~10 a 之间),填埋时间较长的有紫霞观、金口、岱山和北洋桥填埋场 (10 a 以上).随着填埋时间短、中、长的变化,渗滤液 COD、BOD₅ 有下降的趋势, NH₄⁺-N 有先下降、后逐渐增加的趋势.杨庆^[21]测定了 2006 年 5 月二妃山、金口、岱山、流芳和紫霞观填埋场同一批渗滤液样品的 DEHP 含量.从 DEHP 的监测结果看,DEHP 的含量并不随着填埋时间的增加而减少.7 个填埋场渗滤液对嗜热四膜虫的 24h-LC₅₀ 都较低,说明其对嗜热四膜虫都存在着较高的急性毒性.随着填埋时间短、中、长的变化,24h-LC₅₀ 有增大的趋势,说明渗滤液对嗜热四膜虫的急性毒性呈减少的趋势.

7 个填埋场渗滤液对嗜热四膜虫种群生长的影响见表 4 在 10%~0.1% 浓度的实验中,较高浓度的渗滤液对嗜热四膜虫种群生长有抑制作用,使速率常数有不同程度的降低,世代时间增加;而较低浓度的渗滤液对嗜热四膜虫种群生长有促进作用,世

表 1 武汉市 7 个垃圾填埋场的基本情况
Table 1 Status of 7 MSW landfill sites of Wuhan

填埋场名称	填埋方式	处理量 / t · d ⁻¹	启用时间 (年)	目前状况	防渗方式
陈家冲填埋场	卫生填埋	2 000	2008	运行中	膜防渗
二妃山填埋场	卫生填埋	1 200	2003	运行中	膜防渗
流芳填埋场	一般填埋	1 200	1997	已封场	粘土防渗
紫霞观填埋场	一般填埋	800	1992	运行中	自然土防渗
金口填埋场	卫生填埋	2 000	1991	已封场	自然土防渗
岱山填埋场	一般填埋	600	1989	运行中	自然土防渗
北洋桥填埋场	一般填埋	900	1989	运行中	自然土防渗

表 2 不同填埋时间的渗滤液理化指标¹⁾
Table 2 Physical-chemical parameters of leachates of different landfill age

渗滤液来源	pH	COD / mg · L ⁻¹	BOD ₅ / mg · L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N / mg · L ⁻¹	DEHP / μg · L ⁻¹
陈家冲填埋场	7.28	27 225	14 800	2 580	318.41
二妃山填埋场	7.54	23 488	4 167	3 370	289.30
流芳填埋场	8.22	2 436	420	610	170.84
紫霞观填埋场	7.74	4 439	136	410	160.44
金口填埋场	8.37	3 850	295	1 910	215.67
岱山填埋场	8.00	2 689	369	760	207.51
北洋桥填埋场	8.07	448	125	434	191.23

1) 二妃山、金口、岱山、流芳和紫霞观填埋场渗滤液采集时间是 2006 年 5 月, 北洋桥和陈家冲填埋场渗滤液采集时间是 2009 年 5 月

表 3 不同填埋时间渗滤液的 24h-LC₅₀
Table 3 24h-LC₅₀ values of leachates of different landfill age

渗滤液来源	回归方程	R ²	标准误	LC ₅₀ / %	95% 可信限 / %
陈家冲填埋场	$y = 0.9202x + 5.0310$	$R^2 = 0.9695$	0.01679	0.93	1.00~0.86
二妃山填埋场	$y = 4.8016x + 5.3705$	$R^2 = 0.9593$	0.09565	0.84	0.54~1.29
流芳填埋场	$y = 6.5145x + 3.5636$	$R^2 = 0.9658$	0.07935	1.66	1.16~2.38
紫霞观填埋场	$y = 4.5101x + 4.6743$	$R^2 = 0.9345$	0.13178	1.18	0.65~2.14
金口填埋场	$y = 10.421x - 2.4630$	$R^2 = 0.9042$	0.04292	5.20	4.28~6.31
岱山填埋场	$y = 19.7x - 16.3670$	$R^2 = 0.9664$	0.02824	12.15	10.70~13.80
北洋桥填埋场	$y = 1.8725x + 3.7372$	$R^2 = 0.9690$	0.05122	4.72	5.95~3.75

表 4 不同填埋年限渗滤液作用下嗜热四膜虫 BF₅ 的世代时间¹⁾ / h

Table 4 Generation time of *T. thermophila* BF₅ under the effect of leachates of different landfill age / h

渗滤液来源	0	0.5%	1%	2%	10%
陈家冲填埋场	7.87	8.54	9.89	16.34	24.77
二妃山填埋场	7.98	8.49	9.23	14.67	20.84
流芳填埋场	7.98	7.89	8.77	8.51	11.33
紫霞观填埋场	7.98	7.40	7.43	8.16	8.23
金口填埋场	7.98	6.74	7.91	9.2	9.72
岱山填埋场	7.98	8.13	9.32	9.37	10.40
北洋桥填埋场	7.87	7.13	7.56	7.71	8.05

1) 以上世代时间计算中, 标准误均小于 0.10. 二妃山、金口、岱山、流芳和紫霞观填埋场渗滤液采集时间是 2006 年 5 月, 北洋桥和陈家冲填埋场渗滤液采集时间是 2009 年 5 月

代时间缩短. 随着填埋时间短、中、长的变化, 渗滤液对嗜热四膜虫种群生长的抑制没有减少的趋势.

2.2 不同季节渗滤液对嗜热四膜虫的毒性效应

对二妃山、流芳和北洋桥垃圾填埋场渗滤液进行了四季的理化指标和生物毒性监测, 理化指标和 24h-LC₅₀ 分别见表 5 和表 6 不同季节渗滤液水质变

表 5 不同季度渗滤液的理化指标

Table 5 Physical-chemical parameters of leachates of different seasons

填埋场	采样时间 (年-月)	pH	COD / mg · L ⁻¹	BOD ₅ / mg · L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N / mg · L ⁻¹
二妃山填埋场	2006-05	7.54	23 488	4 167	3 370
	2006-09	8.51	9 493	1 130	2 840
	2006-12	7.85	4 114	516	1 521
流芳填埋场	2007-03	8.30	6 800	653	1 709
	2006-05	8.22	2 436	420	610
	2006-09	8.33	3 473	2 420	1 000
北洋桥填埋场	2006-12	7.82	1 723	475	855
	2007-03	7.31	480	116	584
	2008-03	7.80	3 089	1 435	608
北洋桥填埋场	2008-05	7.83	2 171	618	859
	2008-09	7.78	833	480	327

化较大,夏季渗滤液的 COD、BOD₅ 均较高. 不同季节的渗滤液对嗜热四膜虫的急性毒性都较高; 对于二妃山填埋场渗滤液, 急性毒性由高到低顺序是: 5月 > 9月 > 次年 3月 > 12月; 对于流芳填埋场渗滤液, 急性毒性由高到低顺序是: 9月 > 5月 > 12月 >

次年 3月; 对于北洋桥填埋场渗滤液, 急性毒性由高到低的顺序是: 3月 > 5月 > 9月. 从实验结果看, 不同季节的渗滤液的 24h-LC₅₀ 值没有明显的规律性, 夏季的渗滤液 24h-LC₅₀ 值较低, 夏季渗滤液的急性毒性较高.

表 6 嗜热四膜虫 BF₅ 在不同季节渗滤液下的 24h-LC₅₀

Table 6 24h-LC₅₀ values of leachates of different seasons

填埋场	采样时间 (年-月)	回归方程	R ²	标准误	LC ₅₀ /%	95% 可信限 /%
二妃山填埋场	2006-05	$y = 4.8016x + 5.3705$	$R^2 = 0.9593$	0.09565	0.84	0.54~1.29
	2006-09	$y = 9.5109x + 4.3491$	$R^2 = 0.9926$	0.05477	1.17	0.91~1.50
	2006-12	$y = 29.395x - 23.152$	$R^2 = 0.9728$	0.01536	9.07	8.46~9.72
	2007-03	$y = 4.5576x + 4.6162$	$R^2 = 0.9828$	0.09855	1.21	0.78~1.89
流芳填埋场	2006-05	$y = 6.5145x + 3.5636$	$R^2 = 0.9658$	0.07935	1.66	1.16~2.38
	2006-09	$y = 5.6888x + 4.2454$	$R^2 = 0.9739$	0.08321	1.36	0.93~1.98
	2006-12	$y = 9.6426x - 1.5815$	$R^2 = 0.9817$	0.04735	4.82	3.89~5.96
	2007-03	$y = 13.541x - 17.039$	$R^2 = 0.9873$	0.03333	42.42	36.50~49.30
北洋桥填埋场	2008-03	$y = 1.5411x + 4.5235$	$R^2 = 0.9435$	0.06457	2.04	2.73~1.52
	2008-05	$y = 1.5282x + 4.1611$	$R^2 = 0.9949$	0.08923	3.54	5.30~2.37
	2008-09	$y = 1.4977x + 4.0709$	$R^2 = 0.9953$	0.03901	4.17	4.97~3.67

不同季节二妃山和流芳垃圾填埋场渗滤液对嗜热四膜虫的种群生长影响见表 7. 不同季节的渗滤液对嗜热四膜虫的生长抑制的情况不同, 春季渗滤液的抑制作用最小. 表 7 的结果也说明, 在 10% ~ 0.1% 浓度的渗滤液中, 较高浓度的渗滤液对嗜热四膜虫种群生长有抑制作用, 世代时间增加; 而较低浓度的渗滤液对嗜热四膜虫种群生长有促进作用, 世代时间缩短. 垃圾渗滤液成分复杂, 含有多种有毒有害的物质, 对四膜虫的生长有不利影响, 因此在浓度较高(如 ≥10%) 时, 使生长速率常数有不同程度的

降低, 世代时间增加. 同时垃圾渗滤液有机物含量高, 四膜虫可能会利用其中的营养物质来生长繁殖, 当渗滤液稀释到一定浓度时, 其中的营养物质浓度也正好适合四膜虫生长所需, 因而会促进四膜虫的生长, 缩短世代时间. 丁元峰等^[23] 曾研究过垃圾填埋场渗滤液对部分淡水藻类的作用, 结果表明, 垃圾渗滤液对藻类的生长有明显的促进作用, 其对斜生栅藻和蛋白核小球藻表现出促进作用, 当渗滤液浓度处于 1% ~ 0.1% 时, 对铜绿微囊藻表现出促进作用.

表 7 不同季节渗滤液作用下嗜热四膜虫 BF₅ 的世代时间¹⁾ /h

Table 7 Generation time of *T. thermophila* BF₅ under the effect of leachates of different seasons/h

采样时间	二妃山填埋场渗滤液浓度 /%					流芳填埋场渗滤液浓度 /%				
	空白	0.1	1	2	10	空白	0.1	1	2	10
5月	7.98	8.49	9.23	14.67	20.84	7.98	7.89	8.77	8.51	11.33
9月	7.96	9.01	9.07	10.62	15.35	7.96	7.63	7.53	9.55	9.32
12月	8.17	11.34	11.28	15.72	17.27	8.17	8.75	9.83	11.18	10.07
次年 3月	8.07	7.82	7.67	7.41	8.56	8.07	7.64	7.35	6.21	8.54

1) 以上世代时间计算中, 标准误均小于 0.10

2.3 渗滤液理化参数与生物毒性的关系

垃圾渗滤液理化参数不同, 对嗜热四膜虫的生物毒性效应就不同, 为了进一步分析理化参数对生物毒性的影响, 对理化参数指标、24h-LC₅₀ 和种群世代时间(渗滤液 10% 浓度下生长的代时) 进行了 Pearson 相关性分析, 结果见表 8. 可以看出, 渗滤液

理化指标与 24h-LC₅₀ 无显著相关性, 而 COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 DEHP 与嗜热四膜虫的世代时间显著正相关, 这说明渗滤液对生物的生长抑制作用随着 COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 DEHP 的增加而增强. 与本研究发现相类似, O livero-Verbe 等^[24] 也发现垃圾渗滤液毒性随着 COD 增加而增强. 一些研究者通

表 8 渗滤液理化参数与毒性效应的相关性¹⁾

Table 8 Pearson correlation between physical-chemical parameters and toxicity of leachates

项目	参数	pH	COD	BOD ₅	NH ₄ ⁺ -N	DEHP
24h-LC ₅₀ /%	相关系数 (<i>r</i>)	-0.415	-0.303	-0.217	-0.273	-0.247
	显著性水平 (<i>p</i>)	0.110	0.255	0.420	0.306	0.593
	样本数 (<i>n</i>)	16	16	16	16	7
世代时间	相关系数 (<i>r</i>)	-0.440	0.890	0.794	0.773	0.942
	显著性水平 (<i>p</i>)	0.132	0.000	0.001	0.002	0.002
	样本数 (<i>n</i>)	13	13	13	13	7

1) 当 $p < 0.05$ 时, 认为显著相关

通过对水蚤、浮萍和发光细菌的毒性实验^[9, 25, 26], 发现渗滤液的生物毒性主要与NH₄⁺-N呈正相关。

3 结论

(1) 随着填埋时间短 (5 a 以内)、中 (5~10 a 之间)、长 (10 a 以上) 的变化, 渗滤液 COD、BOD₅ 有下降的趋势, NH₄⁺-N 是先下降, 之后逐渐增加的趋势。

(2) 不同填埋时间渗滤液对嗜热四膜虫都存在较高的急性毒性, 7 个填埋场渗滤液的 24h-LC₅₀ 在 0.84% ~ 12.15% 之间; 随着填埋年限延长, 渗滤液的 24h-LC₅₀ 有增大的趋势, 急性毒性逐渐减小, 而对嗜热四膜虫种群生长抑制没有减少的趋势。

(3) 不同季节的渗滤液的 24h-LC₅₀ 没有明显的规律性, 夏季的渗滤液 24h-LC₅₀ 较低, 急性毒性较大; 不同季节的渗滤液对嗜热四膜虫种群的生长抑制情况不同, 春季渗滤液的生长抑制作用最小。

(4) 在 10% ~ 0.1% 浓度的渗滤液中, 较高浓度的渗滤液对嗜热四膜虫种群生长有抑制作用, 使速率常数有不同程度地降低, 世代时间增加; 而较低浓度的渗滤液对嗜热四膜虫种群生长有促进作用, 世代时间缩短。

(5) 渗滤液理化指标与 24h-LC₅₀ 无显著相关性, 渗滤液对嗜热四膜虫种群生长的抑制作用随着 COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 DEHP 的增加而增强。

致谢: 本研究在采样过程中, 得到了武汉市环境卫生科学研究设计院罗毅高工和陈家冲生活垃圾卫生填埋场胡波副场长的帮助, 在此表示衷心感谢。

参考文献:

[1] Chian E SK, Dawalle F B. Sanitary landfill leachates and their treatment [J]. J Environ Eng Div. 1976, **102** (2): 411-431.
 [2] Kjellsen P, Barlaz M A, Rooker A P, et al. Christensen Thomas H. Present and long term composition of MSW landfill leachate: a review [J]. Crit Rev Environ Sci Technol. 2002, **32** (4): 297-

[3] 楼紫阳, 柴晓利, 赵由才, 等. 生活垃圾填埋场渗滤液性质随时间变化关系研究 [J]. 环境科学学报, 2007, **27** (6): 987-992.
 [4] Renou S, Givaudan J G, Poulin S, et al. Landfill leachate treatment: review and opportunity [J]. J Hazard Mater. 2008, **150** (3): 468-493.
 [5] Kulikowska D, Klimk E. The effect of landfill age on municipal leachate composition [J]. Bioresour Technol. 2008, **99**: 5981-5985.
 [6] Asakura H, Matsuto T, Tanaka N. Behavior of endocrine-disrupting chemicals in leachate from MSW landfill sites in Japan [J]. Waste Manage. 2004, **24**: 613-622.
 [7] Seco J, Fernandez-Pereira C, Vale J. A study of the leachate toxicity of metal-containing solid wastes using *Daphnia magna* [J]. Ecotoxicol Environ Saf. 2003, **56**: 339-350.
 [8] Wik A, Dave G. Acute toxicity of leachates of tire wear material to *Daphnia magna*-Variability and toxic components [J]. Chemosphere. 2006, **64**: 1777-1784.
 [9] Pivato A, Gaspari L. Acute toxicity test of leachates from traditional and sustainable landfills using luminescent bacteria [J]. Waste Manage. 2006, **26**: 1148-1155.
 [10] Chen C M, Liu M C. Ecological risk assessment on a cadmium contaminated soil landfill-a preliminary evaluation based on toxicity tests on local species and site-specific information [J]. Sci Total Environ. 2006, **359**: 120-129.
 [11] Feng S, Wang X, Wei G, et al. Leachates of municipal solid waste incineration bottom ash from Macao: Heavy metal concentrations and genotoxicity [J]. Chemosphere. 2007, **67**: 1133-1137.
 [12] Dave G, Nilsson E. Increased reproductive toxicity of landfill leachate after degradation was caused by nitrite [J]. Aquat Toxicol. 2005, **73**: 11-30.
 [13] Billa DM, Montalbano A F, Silva A C, et al. Ozonation of a landfill leachate: evaluation of toxicity removal and biodegradability improvement [J]. J Hazard Mater. 2005, **117**: 235-242.
 [14] 何品晶, 王如意, 邵立明, 等. 渗滤液场内处理的有机物去除特征和植物毒性评价 [J]. 环境科学, 2007, **28** (1): 215-219.
 [15] Clement B, Merlin G. The contribution of ammonia and alkalinity to landfill leachate toxicity to duckweed [J]. Sci Total Environ. 1995, **170**: 71-79.

- [16] 于云江,王红梅,赵秀阁,等.垃圾渗滤液所致大鼠肝毒性研究[J].毒理学杂志,2008,22(1):38-39.
- [17] Deguchi Y, Toyozumi T, Masuda S *et al*. Evaluation of mutagenic activities of leachates in landfill sites by micronucleus test and comet assay using goldfish [J]. Mutation Research, 2007, 627: 178-185.
- [18] Sauvant N P, Pepin D, Piccini E. *Tetrahymena pyriformis* a tool for toxicological studies [J]. Chemosphere 1999, 38 (7): 1631-1669.
- [19] 傅诚杰,俞婷,缪炜,等.四膜虫:毒理学与生态学研究中的优良模式生物[J].动物学杂志,2005,40(1):108-113.
- [20] Gilron G, Gansden SG, Lynn DH, *et al*. A behavioral toxicity test using the ciliated protozoan *Tetrahymena thermophila*. I. Method description [J]. Environ Toxicol Chem, 1999, 18: 1813-1816.
- [21] 杨庆.垃圾渗滤液中 DEHP 的检测及其处理研究[D].武汉:华中科技大学,2006.
- [22] 黄秀梨.微生物学[M].北京:高等教育出版社,1998.144-145.
- [23] 丁峰元,袁峻峰,陈德辉,等.垃圾填埋场渗沥液对部分淡水藻类的作用[J].上海师范大学学报(自然科学版),2003,32(1):66-71.
- [24] Olivero-Verbel J, Padilla-Bottet C, Rosa O D. Relationships between physicochemical parameters and the toxicity of leachates from a municipal solid waste landfill [J]. Ecotoxicol Environ Saf 2008, 70: 294-299.
- [25] Goran D, Nilsson E. Increased reproductive toxicity of landfill leachate after degradation was caused by nitrite [J]. Aquat Toxicol 2005, 73: 11-30.
- [26] Clement B, Merlin G. The contribution of ammonia and alkalinity to landfill leachate toxicity to duckweed [J]. Sci Total Environ 1995, 170: 71-79.