

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2011.05.003

活性污泥降解水中邻苯二甲酸酯类的研究

黄珂, 赵东豪, 黎智广, 古小莉

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300)

摘要: 用液质联用测定了活性污泥对7种邻苯二甲酸酯(PAEs)的降解能力。结果显示, PAEs的降解过程可用一级动力学方程描述, 随着分子量和初始质量浓度的增加, 其降解速率常数减小, 活性污泥对混合体系PAEs的降解能力优于降解单一类型PAEs, 温度和pH能直接影响降解性能, 其最优水平组合为温度36.7℃, pH 7.6。

关键词: 邻苯二甲酸酯类; 活性污泥; 生物降解

中图分类号: X 172

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2011)05-0018-06

Biodegradation of phthalate esters in water by activated sludge

HUANG Ke, ZHAO Donghao, LI Zhiguang, GU Xiaoli

(South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: We used LC-MS-MS to investigate the biodegradation capacity of 7 PAEs by activated sludge. The results reveal that first-order kinetics equation can describe the degradation process of PAEs, and the degradation rate constants decrease with the increase of the molecular weight and initial concentration of PAEs. The degradation capacity of activated sludge is enhanced when several kinds of PAEs existed simultaneously. Temperature and pH affect the degradation directly, and the optimal conditions for the biodegradation are 36.7 °C and pH 7.6.

Key words: phthalate esters; activated sludge; biodegradation

有机化合物在环境中的残留和累积所造成的危害不仅能致畸和致突变, 而且还能够干扰包括人类在内的生物内分泌系统^[1]。邻苯二甲酸酯类(phthalate esters, PAEs, 别名酞酸酯)就属于这一类有机化合物, 其作为重要的化工原料被大量用于生产橡胶、塑料、润滑剂、粘合剂、涂料、高分子助剂、印刷油墨用软化剂及电容器油等^[2]。正是这些广泛的应用导致了PAEs在环境中无处不在^[3], 全球主要工业国的生态环境中均已达到了普遍检出的程度^[4], 严重威胁着人类健康、食品安全以及动物繁殖^[5-9]。因此, 研究如何将邻苯二甲酸酯类从环境中去除成为广大研究人员关注的热点, 也是环境保护的迫切需要。

邻苯二甲酸酯类物质在环境中的降解途径包括

生物降解、光解和水解, 但光解和水解速度特别缓慢^[10], 故利用微生物降解是去除环境中邻苯二甲酸酯类的主要方法之一。文章以驯化的活性污泥作为接种物, 对7种邻苯二甲酸酯[邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二戊酯(DPP)、邻苯二甲酸二己酯(DHXP)、邻苯二甲酸二正辛酯(DNOP)和邻苯二甲酸二壬酯(DNP)]进行摇瓶生物降解试验, 通过测定其降解参数, 建立了PAEs生物降解反应的一级动力学模型, 并对其分子结构与生物降解性能的定量关系、底物及环境因素对降解性能的影响进行了探讨, 以为该类化合物的环境行为评价提供方法, 也为治理环境中PAEs污染提供应用基础。

收稿日期: 2010-12-31; 修回日期: 2011-03-30

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国水产科学研究院南海水产研究所)资助项目(2009TS03)

作者简介: 黄珂(1979-), 女, 助理研究员, 从事渔业环境及水产品质量安全研究。E-mail: xiamike@163.com

1 材料与方法

1.1 培养液和接种物

1.1.1 无机盐培养液 磷酸二氢钾(KH_2PO_4) 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 硝酸钾(KNO_3) 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 硫酸镁($\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 氯化钙(CaCl_2) 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 氯化铁(FeCl_3) 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 氯化钠(NaCl) 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.1.2 接种物 接种用活性污泥取自广东省河源市污水处理厂, 取一定量的活性污泥置于大口玻璃瓶中, 加入各种受试邻苯二甲酸酯和上述无机盐培养液, 使溶液中各 PAEs 的质量浓度达到 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在 30 $^{\circ}\text{C}$ 下连续通气培养 24 h 后, 逐渐增加各 PAEs 的质量浓度, 使其最终质量浓度达到 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 待加入的化合物完全降解后, 用灭菌的双层纱布夹 0.5 cm 厚的脱脂棉过滤的滤液作为降解接种物。滴加少量盐酸(HCl)或氢氧化钠(NaOH)调节滤液 pH 为中性。

1.2 研究对象

DMP、DEP、DBP、DNOP、DPP、DHXP 和 DNP 购自 Sigma 公司, 纯度均 >98 %。

1.3 分析测试方法

滤液经甲醇饱和的正己烷超声提取, 离心后取上清液氮吹至近干, 用甲醇定容至 1 mL, 混匀后过滤进样测定。利用液相色谱-质谱联用对 PAEs 进行检测, 用保留时间和质谱特征离子双重定性, 选择定量离子对色谱峰面积外标法定量。

1.4 试验方法

1.4.1 相同底物质量浓度下各 PAEs 的降解试验

取一定量的 DMP、DEP、DBP、DNOP、DPP、DHXP 和 DNP 分别加入 50 mL 驯化后的污泥接种物(1.1.2 中制备, 下同), 玻璃棒搅拌均匀, 使溶液中各 PAEs 的质量浓度约为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 置于 30 $^{\circ}\text{C}$ 、120 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的恒温摇床上避光培养, 每隔 12 h 取出定量溶液按 1.3 的方法分析测定各 PAEs 质量浓度, 同时用灭菌后添加各 PAEs 的驯化后污泥作为对照试验。根据不同时间分析所得的含量绘制降解动力学曲线。

1.4.2 不同底物质量浓度下各 PAEs 的降解试验

取一定量的 DMP、DEP 和 DBP, 分别加入 50 mL 的驯化后污泥, 用玻璃棒搅拌均匀, 使溶液中各 PAEs 的初始质量浓度分别为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、200

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 每个化合物各质量浓度做 3 次平行, 培养与测定方法同上。根据不同时间分析所得的数据, 比较降解性能与底物质量浓度之间的关系。

1.4.3 活性污泥对单一种类和混合体系 PAEs 的降解试验 取一定量的 DMP、DEP、DBP 以及这 3 种 PAEs 的混合溶液, 分别加入 50 mL 的驯化后污泥, 用玻璃棒搅拌均匀, 使单一种类 PAEs 和混合体系 PAEs(每种邻苯二甲酸酯的质量浓度为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的质量浓度均为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 培养与测定方法同上。根据不同时间分析所得的数据, 比较活性污泥对单一种类和混合体系 PAEs 的降解性能。

1.4.4 不同因素对活性污泥降解邻苯二甲酸酯类的影响 取一定量的 DMP 和 50 mL 驯化后的污泥, 用玻璃棒搅拌均匀, 使溶液中 DMP 的初始质量浓度均为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 以温度和 pH 为主要因素, 每个因素均取 4 个水平, 按均匀设计表 1 $U_4(4^2)$ 进行 PAEs 降解试验。培养与测定方法同上。用 DPS 软件进行二次多项式逐步回归分析, 获得最优水平组合。

表 1 活性污泥降解 DMP 的均匀试验因子水平表

Tab. 1 Factors and levels of uniform design for degradation experiment of DMP by activated sludge

序号 No.	1	2	3	4	5	6
温度/ $^{\circ}\text{C}$ temperature	15	20	25	30	35	40
酸度 pH	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	9.0

1.5 结果计算

根据降解动力学曲线, 用一级反应动力学方程进行拟合。

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

$$t_{1/2} = \ln 2/k \quad (2)$$

式中 C_t 为 t 时刻 PAEs 的残留质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); C_0 为 PAEs 的初始质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); k 为降解速率常数; $t_{1/2}$ 为降解半衰期。

2 结果与分析

2.1 相同底物质量浓度各 PAEs 的降解规律

在相同条件下对 7 种 PAEs 进行摇瓶试验, 降

解过程中质量浓度与时间的关系见图1。结果表明,对照试验即图中CK曲线基本无变化,说明接种物的吸附和接种、取样过程中光照对PAEs产生的影响很小,试验中PAEs的减少主要是由接种物的降解作用引起的。DMP和DEP能被迅速降解,初始质量浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,36 h内降解超过90%,DBP也能被微生物降解,72 h内降解接近90%,其他4种PAEs的降解过程相对较慢,尤其是DHXP、DNOP和DNP,96 h内其降解率均小于50%。与文献[11]相比,相同初始质量浓度下,该研究的活性污泥对PAEs的降解要快的多,充分表明了其良好的降解能力。

对图1中各化合物质量浓度和时间进行线性回归,发现一级反应动力学模型能更好地描述PAEs的生物降解过程。根据公式(1)和公式(2),经过对数转换得各PAEs的降解动力学方程、降解速率常数和半衰期(表2)。研究表明,在相同底物质量浓度下活性污泥对各受试PAEs的降解速率均有所不同,降解半衰期的大小顺序为 $\text{DNP} > \text{DNOP} > \text{DHXP} > \text{DPP} > \text{DBP} > \text{DEP} > \text{DMP}$ 。参考文献[12~18]中列出的中国水环境中PAEs含量显示,DMP和DEP在地表水、地下水或是生活饮用水中的含量较低,而DBP、DNOP和DHXP等含量较高,与之相比,该研究中各PAEs的降解半衰期的大小与

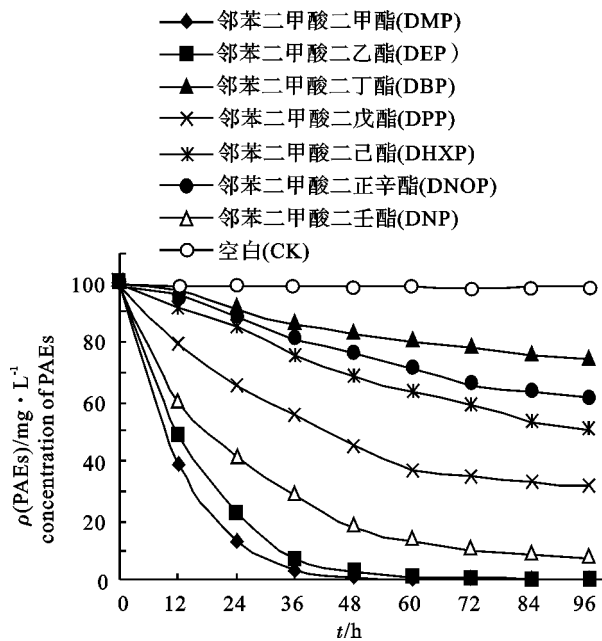


图1 邻苯二甲酸酯类的生物降解过程

Fig. 1 Biodegradation of phthalic acid esters (PAEs)

其在自然环境中生物降解的快慢相符合。

有研究证明活性污泥降解PAEs的难易程度取决于化合物分子的大小^[19-20]。该研究所选取的各PAEs均由相同的苯环结合不同长度的烷基链而组成,烷基链的长短决定分子的大小,分别将降解速率和半衰期与各PAEs的烷基链长度(用亚甲基数目表示)进行考察发现,这些化合物之间具有图2和图3表示的关系,即在相同底物质量浓度下活性污泥降解各PAEs的速率常数随着分子量的增加而减小,降解半衰期随着分子量的增加而增加,这是由于分子量的增加、烷基链的加长和分支侧链的增加加大了生物反应的位阻效应^[21]。降解速率常数和半衰期与烷基链长度的线性关系可以分别用以下2个公式进行表述: 1) $\ln k = 0.0217x^2 - 0.621x - 1.722$

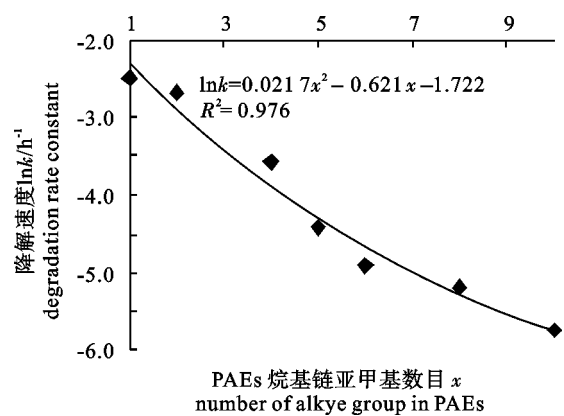


图2 降解速率常数与PAEs烷基链亚甲基数目的关系

Fig. 2 Relation between degradation rate constant and number of alkyl group in PAEs

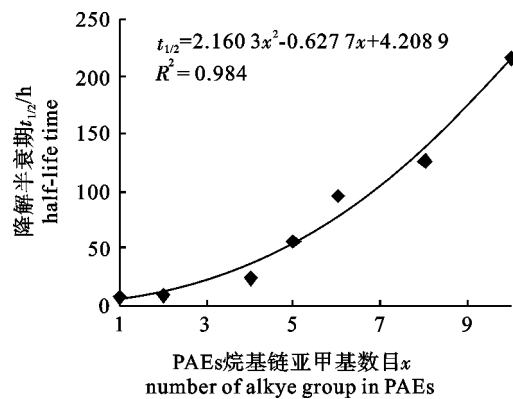


图3 降解半衰期与PAEs烷基链亚甲基数目的关系

Fig. 3 Relation between half-life time in biodegradation and number of alkyl group in PAEs

1.722 ($R^2 = 0.976$); 2) $t_{1/2} = 2.1603x^2 - 0.6277x + 4.2089$ ($R^2 = 0.984$), 其中 x 表示 PAEs 化合物中从 DMP 开始烷基链亚甲基数目。

2.2 不同底物质量浓度各 PAEs 的降解规律

在 PAEs 不同初始质量浓度下, 活性污泥接种物降解 DMP、DEP 和 DBP 的速率常数和半衰期见表 3。结果表明, 各 PAEs 在初始质量浓度 100 ~ 800

mg·L⁻¹ 内其降解速率常数随质量浓度的增加而减小, 半衰期则随着初始质量浓度的增加而增加, 说明高质量浓度的 PAEs 对活性污泥接种物的降解能力有抑制。从各化合物分子大小分析发现, PAEs 初始质量浓度对活性污泥降解分子量较小、烷基链较短的 DEP 和 DMP 有明显的影响, 而对接种植物降解分子量较大、烷基链较长的 DBP 的影响相对不明显。

表 2 水环境中 PAEs 的生物降解动力学方程

Tab. 2 Kinetics equation for biodegradation of PAEs in water

化合物 compounds	降解动力学方程 kinetics equation for biodegradation	降解速率常数 k/h^{-1} degradation rate constant	半衰期 $t_{1/2}/h$ half-life time	相关系数 R^2 RSD
邻苯二甲酸二甲酯 DMP	$\ln C_t = 4.3175 - 0.0822t$	0.0822	8.43	0.957
邻苯二甲酸二乙酯 DEP	$\ln C_t = 4.4985 - 0.0675t$	0.0675	10.26	0.964
邻苯二甲酸二丁酯 DBP	$\ln C_t = 4.3964 - 0.0275t$	0.0275	25.21	0.970
邻苯二甲酸二戊酯 DPP	$\ln C_t = 4.4879 - 0.0122t$	0.0122	56.82	0.950
邻苯二甲酸二己酯 DHXP	$\ln C_t = 4.5992 - 0.0073t$	0.0073	94.95	0.996
邻苯二甲酸二正辛酯 DNOP	$\ln C_t = 4.6054 - 0.0055t$	0.0055	126.03	0.988
邻苯二甲酸二壬酯 DNP	$\ln C_t = 4.5921 - 0.0032t$	0.0032	216.61	0.967

表 3 不同初始质量浓度下活性污泥降解各 PAEs 的比较

Tab. 3 Comparison of degradation of PAEs at different initial concentrations by activated sludge

化合物 compounds	初始质量浓度/mg·L ⁻¹ initial concentration							
	100		200		400		800	
	k/h^{-1}	$t_{1/2}/h$	k/h^{-1}	$t_{1/2}/h$	k/h^{-1}	$t_{1/2}/h$	k/h^{-1}	$t_{1/2}/h$
邻苯二甲酸二甲酯 DMP	0.082	8.432	0.078	8.875	0.064	10.81	0.048	14.44
邻苯二甲酸二乙酯 DEP	0.068	10.27	0.056	12.29	0.045	15.51	0.034	20.63
邻苯二甲酸二丁酯 DBP	0.028	25.21	0.022	30.94	0.017	39.84	0.013	53.73

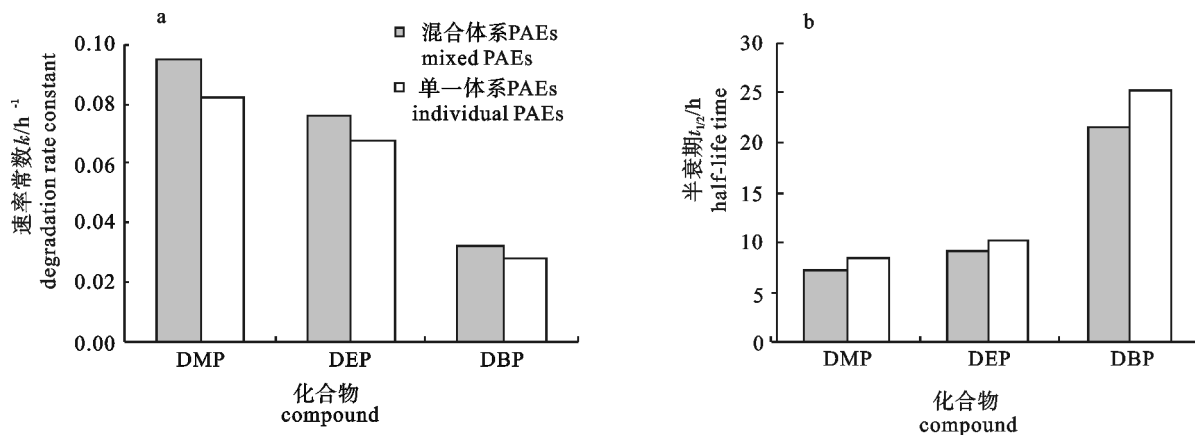


图 4 活性污泥降解单一和混合体系 PAEs 的速率常数 (a) 和半衰期 (b) 比较

Fig. 4 Comparison of degradation rate constant (a) and half-life time (b) for mixed PAEs and individual PAE by activated sludge

2.3 活性污泥对单一种类和混合体系 PAEs 的降解规律

活性污泥对单一种类和混合体系 PAEs 降解参数见图 4-a。接种物降解 DMP、DEP 和 DBP 的混合体系 PAEs 时,这 3 种化合物的降解速率常数 k 均比降解单一种类的大,相应的半衰期 $t_{1/2}$ 也有不同程度的缩短,说明多种 PAEs 化合物同时存在有利于活性污泥接种物降解性能的提高(图 4-b)。这可能是因为共代谢原理,多种 PAEs 能够提供足够营养物质供活性污泥中的微生物生长和繁殖,使微生物的生长和繁殖加快,或是由于 3 种 PAEs 混合后对微生物的降解具有协同作用,增加了微生物对 PAEs 降解位点的识别^[22]。

2.4 多因素条件下活性污泥对各 PAEs 的降解规律

以温度和 pH 为主要因素,每个因素取 6 个水平进行均匀试验,经过摇床培养并测定后得到不同因素同时存在条件下 DMP 的降解速率常数 k (表 4)。对表 4 中不同培养条件对活性污泥降解 DMP 的影响用 DPS 数据统计软件进行二次多项式逐步回归得到多元方程: $y = -0.51569 + 0.0048861x_1 + 0.13577x_2 - 0.000068471x_1^2 - 0.0089458x_2^2$, 相关系数 $R = 0.9998$, $F = 611.74$, 显著水平 $P = 0.0303$, 剩余标准差 $s = 0.0006$ 。对该多元回归方程应用二元平面模型,计算出该方程的最大值和在取最大值时各变量的最优值。设计表中 2 个变量的最优值为 $x_1 = 36.7014$, $x_2 = 7.5593$, $y = 0.0865$ 。即表示促使活性污泥降解水中 DMP 的最佳环境条件是温度为 36.7 °C, pH 7.6, 此条件下 DMP 降解速率常数 k 将达到 0.0865。同时对多元方程进行通径系数分析发现温度和 pH 对活性污泥降解 DMP 都有直接影响,且 pH 的影响较温度的影响明显。

3 结论

1) 通过驯化培养,活性污泥接种物能够以 PAEs 为主要碳源生长,各 PAEs 的生物降解速率可以用一级反应动力学方程描述,且 7 种 PAEs 的降解速率常数有如下关系 $k_{DMP} > k_{DEP} > k_{DBP} > k_{DPP} > k_{DHXP} > k_{DNOP} > k_{DNP}$ 。

2) 相同底物质量浓度下活性污泥降解各 PAEs 的速率常数随着分子量的增加而减小,降解半衰期随着分子量的增加而增加,可用线性方程预测该类

表 4 不同条件下活性污泥对 DMP 的降解影响

Tab. 4 Effects of activated sludge on degradation of DMP under different conditions

试验号 No.	温度/°C temperature (x_1)	酸度 pH (x_2)	降解速率常数 k/h^{-1} degradation rate constant (y)
1	40	7.0	0.0821
2	20	6.5	0.0588
3	30	6.0	0.0621
4	25	9.0	0.0609
5	15	7.5	0.0575
6	35	8.0	0.0852

同系物中其他化合物的降解性能。

3) 不同底物质量浓度下活性污泥降解 DMP、DEP 和 DBP 的降解速率常数随质量浓度的增加而减小,半衰期则随着初始质量浓度的增加而增加,且初始质量浓度对分子量较小、烷基链较短的 PAEs 的降解有明显影响。

4) 活性污泥降解相同质量浓度的 3 种 PAEs 混合体系的降解速率常数 k 大于降解单一种类的,相应的半衰期 $t_{1/2}$ 也有不同程度的缩短,多种 PAEs 化合物同时存在有利于活性污泥接种物降解性能的提高。

5) 环境温度和 pH 都对活性污泥降解 PAEs 有直接影响, pH 对其影响比温度的影响大,两因素最优水平组合为温度 36.7 °C, pH 7.6, 此时降解速率常数将达到 0.0865。

参考文献:

- [1] 沈萍萍, 王莹莹, 顾继东. 活性污泥中细菌对邻苯二甲酸酯的降解及其途径[J]. 应用环境生物学报, 2004, 10(5): 643-646.
SHEN Pingping, WANG Yingying, GU Jidong. Degradation of phthalic acid and ortho-dimethyl phthalate ester by bacteria isolated from sewage sludge and its biochemical pathway[J]. Chin J Appl Environ Biol, 2004, 10(5): 643-646. (in Chinese)
- [2] 房丽萍, 牛增元, 蔡发, 等. 邻苯二甲酸酯类增塑剂分析方法进展[J]. 聚合物与助剂, 2006, 8(4): 30-35.
FANG Liping, NIU Zengyuan, CAI Fa, et al. Development of the analysis methods of phthalate plasticizers[J]. Polym & Addit, 2006, 8(4): 30-35. (in Chinese)
- [3] TAKESHITA R. Micro-determination of total phthalate esters in biological samples by gasliquid chromatography[J]. J Chromatogr,

- 1987, 133(2): 303.
- [4] 郑文芝, 覃石坚, 陈殷. 环境激素邻苯二甲酸酯的研究进展[J]. 广州化工, 2006, 34(5): 14-16.
ZHENG Wenzhi, QIN Shijian, CHEN Yin. Research progress of environmental hormone phthalic acid esters[J]. Guangzhou Chem Ind Technol, 2006, 34(5): 14-16. (in Chinese)
- [5] LATINI G. Potential hazards of exposure to di-(2-ethylhexyl) phthalate in babies[J]. Biol Neonate, 2000, 7(8): 269-276.
- [6] HARRISSON P T C, HOLMES P, HUMFREY C D N. Reproductive health in humans and wildlife are adverse trend associated with environmental chemical exposure[J]. Sci Total Environ, 1997, 205(2/3): 25-27.
- [7] 高丽芳, 李勇, 苏忆兰. 邻苯二甲酸二-(2-乙基己基)酯对小鼠胚胎致畸作用和心肌细胞的毒性[J]. 毒理学杂志, 2005, 19(2): 123-124.
GAO Lifang, LI Yong, SU Yilan. The teratogenicity and the toxicity on mouse embryos and myocardial cells by phthalate(2-ethylhexyl)[J]. J Toxicol, 2005, 19(2): 123-124. (in Chinese)
- [8] 王明燕. 邻苯二甲酸(2-乙基己基)酯的致突变实验[J]. 职业与健康, 2002, 18(11): 35-36.
WANG Mingyan. The mutagenic test of phthalate(2-ethylhexyl)[J]. Occup Health, 2002, 18(11): 35-36. (in Chinese)
- [9] 邱东茹, 吴振斌, 贺锋. 内分泌扰乱化学品对动物的影响和作用机制[J]. 环境科学研究, 2000, 13(6): 52-55.
QIU Dongru, WU Zhenbin, HE Feng. Effects of endocrine disrupting chemicals on animals and mechanisms of action[J]. Res Environ Sci, 2000, 13(6): 52-55. (in Chinese)
- [10] 陈济安, 邱志群, 舒为群, 等. 我国水环境中邻苯二甲酸酯污染现状及其生物降解研究进展[J]. 癌变·畸变·突变, 2007, 19(3): 212-214.
CHEN Ji'an, QIU Zhiqun, SHU Weiqun, et al. Pollution of PAEs in water and the biodegradations studies in China[J]. Carcinog Teratog Mutagen, 2007, 19(3): 212-214. (in Chinese)
- [11] 王建龙, 吴立波, 施汉昌, 等. 驯化活性污泥降解邻苯二甲酸酯类化合物的研究[J]. 环境科学, 1998, 19(1): 18-20.
WANG Jianlong, WU Libo, SHI Hanchang, et al. Biodegradation of phthalic acid esters by acclimated activated sludge[J]. Environ Sci, 1998, 19(1): 18-20. (in Chinese)
- [12] 胡晓宇, 张克荣, 孙俊红, 等. 中国环境中邻苯二甲酸酯类化合物污染的研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2003, 13(1): 9-14.
HU Xiaoyu, ZHANG Kerong, SUN Junhong, et al. Environmental contamination by phthalates in China[J]. Chin J Health Lab Technol, 2003, 13(1): 9-14. (in Chinese)
- [13] 吴平谷, 韩关根, 王慧华, 等. 饮用水中邻苯二甲酸酯类的调查[J]. 环境与健康杂志, 1999, 16(6): 338-339.
WU Pinggu, HAN Guangen, WANG Huihua, et al. An investigation on phthalates in drinking water[J]. J Environ Health, 1999, 16(6): 338-339. (in Chinese)
- [14] LUKS-BETLEJ K, POPP P, JANOSZKA B, et al. Solid-phase microextraction of phthalates from water[J]. J Chromatogr A, 2001, 938(1/2): 93-101.
- [15] CASAJUANA N, LACORTE S. Presence and release of phthalic esters and other endocrine disrupting compounds in drinking water[J]. Chromatographia, 2003, 57(9/10): 649-655.
- [16] STAPLES C A, PARKERTON T F, PETERSON D R. A risk assessment of selected phthalate esters in North American and Western European surface waters[J]. Chemosphere, 2000, 40(8): 885-891.
- [17] 戴天有, 周文敏. 水和废水中酞酸酯的测定[J]. 中国环境科学, 1994, 14(2): 85-89.
DAI Tianyou, ZHOU Wenmin. The determination of phthalates in water and wastewater[J]. Chin Environ Sci, 1994, 14(2): 85-89. (in Chinese)
- [18] 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂, 等. 我国城市污泥中邻苯二甲酸酯的研究[J]. 中国环境科学, 2001, 21(4): 362-366.
MO Cehui, CAI Quanying, WU Qitang, et al. A study of phthalic acid esters (PAEs) in the municipal sludges of China[J]. Chin Environ Sci, 2001, 21(4): 362-366. (in Chinese)
- [19] 郑晓英, 周玉文, 王俊安. 城市污泥中邻苯二甲酸酯的好氧降解研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(12): 1077-1081.
ZHENG Xiaoying, ZHOU Yuwen, WANG Jun'an. Study on aerobic biodegradability of phthalic acid esters in sewage sludges[J]. J Beijing Univ Technol, 2006, 32(12): 1077-1081. (in Chinese)
- [20] 夏凤毅, 郑平, 周琦, 等. 邻苯二甲酸酯的摇瓶生物降解规律研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(3): 379-384.
XIA Fengyi, ZHENG Ping, ZHOU Qi, et al. Shake flask biodegradation of phthalic acid esters[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(3): 379-384. (in Chinese)
- [21] CHANG B V, YANG C M, CHENG C H, et al. Biodegradation of phthalate esters by two bacteria strains[J]. Chemosphere, 2004, 55(4): 533-538.
- [22] 张付海, 岳永德, 花日茂, 等. 一株邻苯二甲酸酯降解菌降解特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 79-83.
ZHANG Fuhai, YUE Yongde, HUA Rimao, et al. Degradation characteristics of phthalate esters by a bacterial strain[J]. J Agro-Environ Sci, 2007, 26(Suppl): 79-83. (in Chinese)