

澳门南湾湖钻孔沉积物中烷基酚的初步研究

郝永梅¹, 麦碧娴^{1,2}, 李春雷¹, 盛国英¹, 傅家谟^{1,2}, 王志石³, 邓宇华³

(1. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院广州地球化学研究所广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广州 510640; 3. 澳门大学科技学院, 澳门 3001)

摘要: 烷基酚具有环境生物体雌激素效应. 澳门南湾人工湖钻孔沉积物中壬基酚的浓度垂直分布在河口沉积环境时期(1970s ~ 1980s)为 2.17 ~ 5.91 $\mu\text{g/g}$ (平均 3.66 $\mu\text{g/g}$), 在湖泊沉积环境时期(1990s)为 0.69 ~ 3.04 $\mu\text{g/g}$ (平均 2.08 $\mu\text{g/g}$); 辛基酚浓度分布范围在湖泊沉积环境初期(1990s 早期)与河口环境类似, 浓度范围为 14.33 ~ 39.11 ng/g (平均 20.59 ng/g), 随后浓度大幅度降低, 浓度范围为 2.58 ~ 6.52 ng/g (平均 4.25 ng/g). 河口环境中的烷基酚来源包括珠江三角洲上游水系来源和澳门本地来源, 而湖泊环境中则只有澳门本地来源, 导致河口沉积环境中烷基酚的污染程度明显重于湖泊沉积环境. 烷基酚在钻孔沉积物剖面中的分布规律与区域经济发展及城市废水处理的进程都有一定的关系, 同时, 沉积过程中上覆泥层中烷基酚具有向填海砂层迁移的特征.

关键词: 壬基酚; 辛基酚; 钻孔沉积物; 珠江三角洲; 澳门

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)04-0129-05

Primarily Study of Alkylphenols in Sediment Core from Nam Van Artificial Lake of Macao

HAO Yong-mei¹, MAI Bi-xian^{1,2}, LI Chun-lei¹, SHENG Guo-ying¹, FU Jia-mo^{1,2}, WANG Zhi-shi³, TANG U Wa³

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Environment Protection and Resources Utilization, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Faculty of Science and Technology, University of Macao, Macao.)

Abstract: Alkylphenols, nonylphenols (NPs), octylphenol (OP), are known to have estrogenic effects. In a sediment core from Nam Van artificial lake of Macao, the concentrations of NPs ranged from 2.17 to 5.91 $\mu\text{g/g}$, with mean value of 3.66 $\mu\text{g/g}$ during the estuarine sedimentary environment from 1970s ~ 1980s and from 0.69 to 3.04 $\mu\text{g/g}$, with mean value of 2.08 $\mu\text{g/g}$ during lagoon sedimentary environment in 1990s. The concentrations of OP during the initial stages of lagoon environment in the early 1990s were similar to that in the estuarine environment, and ranged from 14.33 to 39.11 ng/g . Subsequently, the concentration of OP was rapidly decreasing from 6.52 to 2.58 ng/g . Sources of APs in the estuarine condition included the urban runoffs from the upstream waters of Pearl River Delta and Macao city, but just from Macao in the lagoon condition. Consequently, concentration of APs in estuary condition was higher than that in lagoon condition. The vertical profile of concentration of APs in the sediment core, to some degree, was correlated with the development degree of regional economy and the proceeding of wastewater treatment. The results also showed that the alkylphenols in overlapping silty layer preferred to transfer downward to filling sandy layer.

Key words: nonylphenols; octylphenol; Pearl River Delta; Macao; sediment core

烷基酚聚氧乙烯醚(AP_nEO , n 代表氧乙烯链的数目,下同)是一种重要的非离子表面活性剂,在工农业生产以及家庭生活中都有广泛的使用,其使用历史可追溯到 20 世纪 50 年代中期^[1].其中主要为壬基酚聚氧乙烯醚(NP_nEO),其次为辛基酚聚氧乙烯醚(OP_nEO).在自然环境及废水处理过程中,高聚的 AP_nEO ($n \geq 4$) 被需氧降解成低聚的 AP_nEO ($n = 1, 2, 3$),然后再经过微生物的作用,经厌氧消化转化成壬基酚(nonylphenols, NPs)和辛基酚(octylphenol, OP)^[2,3],最后随污水排放及地表径流进入水体环境.因此,烷基酚已经被用作陆源废

水污染的一种标志性化合物.研究表明,烷基酚具有环境生物体雌激素效应^[4,5],在沉积物中具有持久性(如在沿海沉积物中半衰期为 60 年)^[1].

目前,欧美和日本的研究者对各种环境介质(大气、水体、土壤和沉积物以及生物)中低聚的烷基酚聚氧乙烯醚、壬基酚和辛基酚进行了较多的研究,而且针对沉积物中壬基酚和辛基酚的研究主要集中在

收稿日期: 2003-09-15; 修订日期: 2003-12-22

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-SW-414); 国家自然科学基金项目(40272129)

作者简介: 郝永梅(1972~),汉族,女,硕士生,主要从事沉积物中有机污染物和分子标志物方面的研究.

表层沉积物上,对于钻孔沉积物的研究相对还较少^[1,6,7].在我国,邵兵等^[8]、段菁春等^[9]对国内几条主要河流中溶解态的烷基酚进行了研究,目前为止,尚没有关于沉积物中烷基酚的相关报道.本文对澳门南湾湖钻孔样品中壬基酚和辛基酚的垂直分布特征进行了初步研究,并分析了烷基酚的来源及其迁移,同时,初步探讨了烷基酚在沉积剖面中的分布与区域经济发展之间的关系,为进一步研究壬基酚和辛基酚等环境雌激素在沉积物中的环境/生物地球化学行为奠定基础.

1 实验部分

1.1 采样点区域背景及样品采集

珠江三角洲包括广州、珠海、深圳、香港和澳门几个重要城市.它是一个多河流汇集、多口门出海的河网型三角洲,包括西江、北江、东江和流溪河-珠江正干等 10 多条大、中、小河流,构成世界上最为复杂的水网系统^[10].珠江三角洲地区属亚热带季风气候,夏季炎热多雨,以东南季风为主;冬季气候干燥,以东北季风为主.

澳门位于珠江口西边.澳门沿海接受来自三角洲北部、东部和西部水系水体的注入,同时也接受来自本地的城市废水和地表径流.因此,澳门沿海沉积物在一定程度上成为来自上游和本地的各种疏水性污染物的聚集地.南环湾位于澳门半岛的南部.20 世纪 80 年代末 90 年代初澳门市政府在南环湾实施“南湾填海工程”,使得南环湾圈闭成湖(又称南湾湖),并且分成了南湾和西湾两个部分.

本次样品于 2000 年 12 月采自于南环湾的西湾,采样点经全球定位系统(GPS)定位为 N22°10′

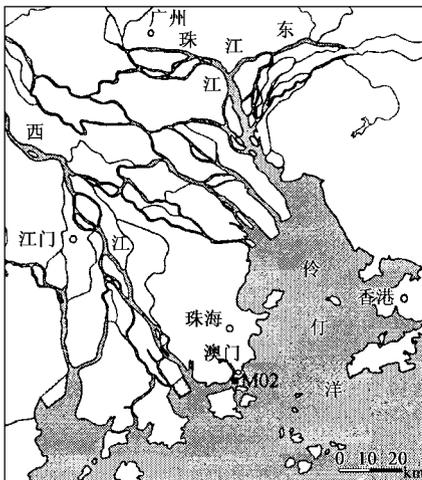


图 1 采样点区域位置及采样点(M02)位置

Fig.1 Regional site and sampling site (M02)

56″, E113°32′03″(图 1).采用无扰动沉积物的压力采样器钻取水下沉积物的柱芯样品,每 4cm 迅速切割后冷冻(-20℃)保存至分析.

1.2 试剂、标样及实验材料

壬基酚(NPs,技术纯,各种不同支链的同分异构体混合物)、辛基酚(OP)、4- α -异丙基酚、4-叔丁基辛基酚购自东京化成;正己烷、二氯甲烷、甲醇等有机溶剂均为色谱纯(购自 Tedia 公司);硅胶(80~100 目),先经二氯甲烷/甲醇(V/V,1:1)索氏抽提 24h,后用二氯甲烷索氏抽提 48h.

1.3 样品前处理

称取经冷冻干燥后的样品 15g,用滤纸(经二氯甲烷索氏抽提 48h)包好,加 4-叔丁基辛基酚作为回收率指示物,加入铜片(脱硫).用二氯甲烷/甲醇(V/V,1:1)混合溶剂 150 mL,经索氏抽提 72h.抽提液经旋转蒸发至 10 mL 左右,滤去铜片,置换溶剂并旋转蒸发至 1 mL.将浓缩液加入 5%的去活化硅胶柱,用 40 mL 的二氯甲烷/正己烷(V/V,3:7)混合溶剂淋洗第 1 组分,30 mL 的二氯甲烷/正己烷(V/V,8:2)混合溶剂淋洗第 2 组分.淋洗液经旋转蒸发并转换溶剂为正己烷,再用柔和的高纯氮气浓缩并定容为 200 μ L.第 2 组分加 4- α -异丙基酚作为内标作 NPs 和 OP 分析.

1.4 实验仪器及样品测试

样品在 HP5890 GC/5972 MSD 上进行分析.毛细管色谱柱为 DB-5 (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m).GC-MSD 条件:进样口温度 280℃,电子能量 70eV,离子源为电子轰击源,电子倍增电压 2200eV,载气为高纯氦气,柱头压 15psi,1 μ L 无分流方式进样.程序升温:70℃起温(保留 2min),以 30℃/min 的速率升至 180℃,然后以 2℃/min 的速率升至 200℃(保留 10min),最后以 40℃/min 的速率升至 295℃(保留 10min).以 SIM 模式(特征离子为 107、121、135、149、177、220)扫描并进行样品定性.

1.5 样品的定量

由于壬基酚的壬基取代基有多种分支结构,所以壬基酚的色谱图出现 11 个峰.以质核比 107 为特征离子,其积分面积用所有同分异构体的积分面积之和来计算.辛基酚的色谱峰只有一个,以质核比 135 为特征离子.采用内标法和五点校正曲线法对 NPs、OP 进行定量.

2 结果与讨论

本次所采的沉积柱样品显示出明显的 2 类沉积

环境:中间(32~44cm)为全砂质层(图2的阴影部分),其上、下均为泥质或泥质夹薄层砂.全砂层为“南湾填海工程”中的填砂层,以其为界,向下(44~88cm)的沉积柱代表填海前的河口沉积环境,运用 ^{210}Pb 法的稳恒初始放射性模式(CA模式)测定所得柱样的沉积年龄,平均沉积速率为 $1.87\text{cm}/\text{年}$,因此指示了20世纪60年代末到80年代末的沉积输入过程.向上(0~32cm)的沉积柱代表填海后相对稳定的人工湖泊沉积环境,指示了90年代的沉积过程.

2.1 质量保证与质量控制(QA/QC)

在分析过程中,增加QA/QC控制样品分析:方法空白、加标空白、基质加标、基质加标平行样和样品平行样. QA/QC样品的整个分析流程与实际样品的分析流程相同.回收率指示物4-叔丁基辛基酚的回收率为 $85.3\% \sim 103.4\%$,相对标准偏差为 8.9 . OP和NPs的回收率为 $77.6\% \sim 105.0\%$ 和 $81.4\% \sim 108.5\%$,相对标准偏差为 9.5 和 7.3 ,方法检测限分别为 3.84 ng/g 和 44.60 ng/g .

2.2 钻孔剖面中壬基酚和辛基酚浓度的垂直分布

以填海砂层中NPs的浓度为界,NPs在钻孔沉积物中的浓度分布从下到上呈现出高-低-高的3阶段变化模式(图2).其中,反映河口沉积环境的沉积物中的浓度分布范围为 $2.17 \sim 5.91\text{ }\mu\text{g/g}$ (干重,下

同),平均 $3.66\text{ }\mu\text{g/g}$,在 $44 \sim 48\text{ cm}$ 、 $64 \sim 68\text{ cm}$ 和 $80 \sim 84\text{ cm}$ 处出现峰值;填海砂层中的浓度范围为 $0.53 \sim 1.37\text{ }\mu\text{g/g}$ (平均 $1.05\text{ }\mu\text{g/g}$);湖泊沉积环境中浓度范围为 $0.69 \sim 3.04\text{ }\mu\text{g/g}$ (平均为 $2.08\text{ }\mu\text{g/g}$).

OP在沉积剖面中的垂直分布从下到上的总体表现为高-低的两阶段变化模式(图2):从表层到第6层(0~24cm),浓度范围为 $2.58 \sim 6.52\text{ ng/g}$ (平均为 4.25 ng/g);从24cm向下,浓度范围为 $14.33 \sim 39.11\text{ ng/g}$ (平均浓度 20.59 ng/g),在 $64 \sim 68\text{ cm}$ 和 $76 \sim 80\text{ cm}$ 处出现峰值.与NPs相比,OP在填海砂层中的浓度非但没有降低,反而在整个剖面中呈现出较高的浓度(表1).

表1 澳门南环湾钻孔沉积物样品描述及烷基酚分析结果

Table 1 Analytical result of APs and sample description of sediment core from Nam Van artificial lake of Macao

样品名	深度/cm	样品描述	OP 浓度 / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	NPs 浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
M02-1F	0~4	泥	3.651	0.689
M02-2F	4~8	泥	6.525	2.163
M02-3F	8~12	泥	3.045	2.946
M02-4F	12~16	泥	5.114	2.989
M02-5F	16~20	泥	4.587	3.036
M02-6F	20~24	泥	2.582	1.721
M02-7F	24~28	泥	19.463	1.673
M02-8F	28~32	泥	18.442	1.430
M02-9F	32~36	砂	23.565	1.259
M02-10F	36~40	砂	21.045	1.369
M02-11F	40~44	砂	27.919	0.528
M02-12F	44~48	泥含砂	15.946	4.085
M02-13F	48~52	泥	19.422	3.263
M02-14F	52~56	泥	16.396	3.661
M02-15F	56~60	泥	14.656	3.057
M02-16F	60~64	泥	16.064	2.592
M02-17F	64~68	泥	22.357	5.090
M02-18F	68~72	泥	15.764	4.782
M02-19F	72~76	泥	14.332	3.269
M02-20F	76~80	泥夹薄层砂	39.105	2.174
M02-21F	80~84	泥夹薄层砂	27.691	5.905
M02-22F	84~88	泥夹薄层砂	17.201	2.416

与国外其它研究结果相对比,南湾河口沉积物中APs浓度要低于美国、英国和瑞典的某些河口区沉积物中的浓度,但是比日本东京湾的浓度要高(表2).同时,段菁春等^[9]的研究结果也表明,珠江口水体中近岸NPs浓度明显低于美国Hudson River Estuary、纽约Jamaica Bay和英国主要河口湾中NPs的浓度,而且OP浓度也低于美国纽约Jamaica Bay河口湾.其原因可能是由于美国和英国的壬基酚聚氨酯的使用量高于我国,而日本如此低的浓度,

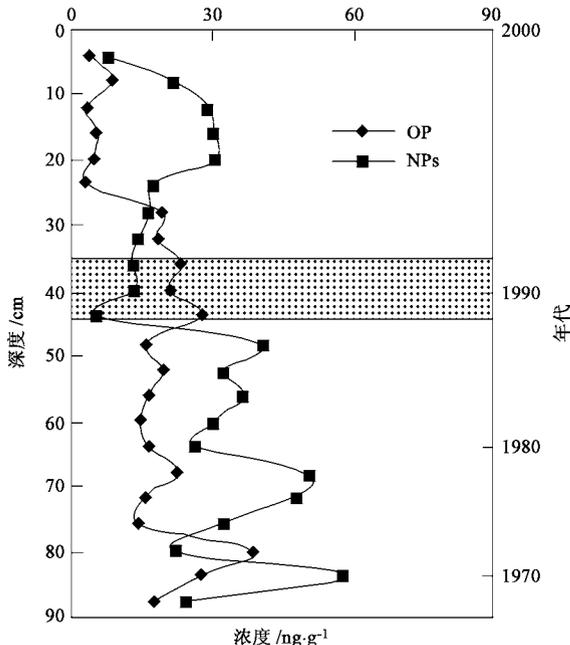


图2 澳门南环湾钻孔沉积物剖面中壬基酚($\times 10^2$)和辛基酚的垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution of NPs ($\times 10^2$) and OP concentration in sediment core from Nam Van artificial lake of Macao

是由于早在 1970 年日本政府就颁布了《水污染控制法》,对工业污水的排放实行强制性治理^[6]。

表 2 与其它研究中河口沉积物的烷基酚含量比较

Table 2 Comparison of APs concentration in the sediment from estuarine environment

地点	NP _s (干重)	OP (干重)	文献
	/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	
Jamaica bay, USA	>10		[11]
Delaware river estuary, USA	1.5 ~ 4.5		[12]
Tees estuary, UK	1.60 ~ 9.05		[13]
Tokyo bay, Japan	<0.6	<25	[6]
Glatt river, Switzerland	0.2 ~ 13.1		[14]
澳门南环湾	2.17 ~ 5.91	14.33 ~ 39.11	本研究

2.3 沉积物中烷基酚的来源及其迁移

(1)来源 珠江三角洲有着悠久的开发历史,人类活动对三角洲河网区、河口的沉积环境和沉积作用也产生了重要的影响,特别是近 20 年来随着城乡经济的崛起和城市化进程的加速发展,每年各有 10^8 m^3 的工业废水和生活污水以及大量的农业退水排入珠江三角洲的河网和水系^[10]。在填海前,澳门南环湾中的污染物既有珠江三角洲上游河网水系中悬浮颗粒物携带而来的,又有当地大气干湿沉降和地表径流的来源,因此,这期间南环湾沉积物中的烷基酚的分布特征主要反映了整个珠江三角洲地区(包括澳门)的陆源污染情况,如从 80 年代开始到末期的剖面中(64cm ~ 44cm)壬基酚和辛基酚的浓度不断增加,而这一时期正是珠江三角洲地区经济飞速发展时期,70 年代的沉积剖面中(80cm ~ 64cm)壬基酚和辛基酚的浓度也不断增加,与这一时期的澳门实现经济飞跃是一致的(从 1971 ~ 1981 年的 10 年间,澳门的经济平均每年增长 16.7%,是世界经济增长率最高的地区之一^[15])。南环湾在填海以后的湖泊沉积环境则主要接受了当地的地表径流和大气干湿沉降来源,主要反映了澳门地区的相对有限的陆源污染,如在表层和近表层沉积物中 NP_s 和 OP 的浓度均向上迅速降低,其原因可能是由于从 90 年代中期开始澳门污水处理厂的建成和运行提高了污水中烷基酚的去除效率,所以在整个沉积剖面中可以清楚地看出反映湖泊沉积环境(填海后)的沉积物中烷基酚的浓度要低于反映河口沉积环境(填海前)的沉积物中的浓度。

珠江每年携带大量的有机污染物入海,并主要沉积于各河口和海湾地区,以前的研究结果表明澳门港表层和沉积柱样品中 DDTs、PCBs 和 PAHs 的含量极高^[16,17]。段菁春等^[9]对洪季珠江三角洲水系

烷基酚的污染状况研究表明,珠江三角洲各地区存在着不同程度的烷基酚污染,而且在珠江口和澳门内港的样品中均检测到较高浓度的烷基酚,反映了烷基酚污染在整个珠三角地区分布的广泛性和不均一性。Dachs^[7]在河口地区的城市和沿海大气中均检测到 NP_s。Düring R-A^[18]的研究结果表明陆地土壤中能够吸附较高浓度的 NP_s。因此,珠三角地区包括澳门本地夏季频繁强烈的降雨冲刷作用也为南环湾沉积物中高浓度的烷基酚污染做出了一定的贡献。

(2)迁移 从指示湖泊沉积环境的沉积柱中污染物浓度分布的特征来看, NP_s 浓度在填海后的沉积初期呈现低值,随后出现一个浓度明显升高的阶段,填海砂层中则有低浓度的 NP_s 存在。OP 在湖泊沉积初期和填海砂层中均呈现出较高浓度,随后浓度则明显下降。对这种分布特征的解释可能是由于浓度梯度和烷基酚本身性质共同作用的结果。填海砂层中烷基酚的初始浓度可以认为几乎为 0,且与上层泥质沉积物中的烷基酚存在巨大的浓度差,这导致上层的烷基酚迅速向下迁移进入砂层。在随后的沉积过程中, NP_s 在浓度梯度的作用下均存在向下迁移的可能,但由于浓度差逐渐减小,致使迁移量逐渐降低,迁移速率逐渐减慢。这使得随后沉积的 NP_s 在各沉积层中发生了累积,从而导致浓度有所增加。另外一个原因可能是由于澳门本地在各个时期 NP_nEO 的使用量不同造成的。相对于 NP_s 而言, OP 只有单一结构且分子量较小,同时, OP 的疏水性较弱(NP_s 和 OP 的辛醇-水分配系数 $\log K_{ow}$ 分别为 4.48 和 4.12),而亲水性则相对较强。在向下迁移的过程中, OP 更容易在不同层位中发生浓度的均一化。随后 OP 浓度的大幅度降低,可能是由于澳门 OP_nEO 的使用量减少。

3 结论

澳门南环湾钻孔沉积物样品反映了 2 种沉积环境(河口沉积环境和湖泊沉积环境)下陆源烷基酚的污染情况。结果表明,河口沉积环境受烷基酚的污染程度明显重于湖泊沉积环境。其原因是前者烷基酚的来源较为广泛,包括整个珠三角地区上游水系和澳门本地等多种来源,而后者则只有澳门本地的来源,同时烷基酚在沉积剖面中的分布也与珠江三角洲地区区域经济发展水平及澳门废水处理的进程有一定的对应关系。

填海砂层的存在导致其上层沉积物中的烷基酚向下运移,从而影响了湖泊环境中烷基酚的分布特

征. 由于化合物自身理化性质的差异, 使得 OP 比 NPs 的迁移能力更强.

由于我国经济的快速发展, 烷基酚聚氧乙烯醚等非离子表面活性剂的生产消费量在逐年上升, 而且到目前为止还没有相应的政策法规来限制它们的使用. 目前国内对环境中烷基酚的研究还相当少^[8,9], 而沉积物是它们的主要载体, 因此开展沉积物中烷基酚的生物地球化学研究必将有助于全面了解这类环境雌激素在环境中的迁移、转化、归宿等行为, 为它们的生产、使用和相应环境法规的建立提供必要的基础数据.

参考文献:

- [1] Shang D Y, Macdonald R W, Ikononou M G. Persistence of nonylphenol ethoxylate surfactants and their primary degradation products in sediments from near a municipal outfall in the Strait of Georgia, British Columbia, Canada [J]. Environ. Sci. Technol., 1999, **33**(9): 1366 ~ 1372.
- [2] Giger W, Brunner P H, Schaffner C. 4-Nonylphenol in sewage sludge: accumulation of toxic metabolites from non-ionic surfactants [J]. Science, 1984, **225**(4662): 623 ~ 625.
- [3] Brunner P H, Capri S, Marcomini A, Giger W. Occurrence and behaviour of linear alkylbenzenesulphonates, nonylphenol, nonylphenol mono- and nonylphenol diethoxylates in sewage and sewage sludge treatment [J]. Water Res., 1988, **22**(12): 1465 ~ 1472.
- [4] Comber M H I, Williams T D, Stewart K M. The effects of 4-nonylphenol on *Daphnia magna* [J]. Water Res., 1999, **27**(2): 273 ~ 276.
- [5] Jobling S, Sheahan D, Osborne J A, Matthiessen P, Sumpter J P. Inhibition of testicular growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to estrogenic alkylphenolic chemicals [J]. Environ. Toxicol. Chem., 1996, **15**: 194 ~ 202.
- [6] Isobe T, Nishiyama H, Nakashima A, Takada H. Distribution and behavior of nonylphenol, octylphenol, and nonylphenol monoethoxylate in Tokyo metropolitan area: Their association with aquatic particles and sedimentary distributions [J]. Environ. Sci. Technol., 2001, **35**: 1041 ~ 1049.
- [7] Marcomini A, Pojana G, Sfriso A, Alonso J M Q. Behavior of anionic and nonionic surfactants and their persistent metabolites in the Venice lagoon, Italy [J]. Environ. Toxicol. Chem., 2000, **19**(8): 2000 ~ 2007.
- [8] 邵兵, 胡建英, 杨敏. 重庆流域嘉陵江和长江水环境中壬基酚污染状况调查[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(1): 12 ~ 16.
- [9] 段菁春, 陈兵, 麦碧娴, 杨清书, 盛国英, 傅家谟. 洪季珠江三角洲水系烷基酚污染状况研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(3): 48 ~ 52.
- [10] 林瑞芬, 闵育顺, 卫本勤, 张干, 虞福基, 虞云龙. 珠江口沉积柱状样²¹⁰Pb 法年龄测定结果及其地球化学意义[J]. 地球化学, 1998, **27**: 401 ~ 411.
- [11] Ferguson P L, Iden C R, Brownwell B J. Distribution and fate of neutral alkylphenol ethoxylate metabolites in a sewage-impacted urban estuary [J]. Environ. Sci. Technol., 2001, **35**: 2428 ~ 2435.
- [12] Ashley J T F, Moore A, Stapleton H M, Velinsky M P, Wilhelm M P. Sedimentary nonylphenol contamination in an urbanized, industrialized segment of the Delaware river estuary, USA [J]. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 2003, **70**: 978 ~ 984.
- [13] Lye C M, Frid C L, Gill M E, Cooper D W, Jones D M. Estrogenic alkylphenols in fish tissues, sediments and waters from the U.K. Tyne and Tees estuary [J]. Environ. Sci. Technol., 1999, **33**: 1009 ~ 1014.
- [14] Ahel M, Giger W, Schaffner C. Behavior of alkylphenol polyethoxylate surfactants in the aquatic environment - II. Occurrence and transformation in rivers [J]. Wat Res, 1994, **28**: 1143 ~ 1152.
- [15] 黄汉强, 吴志良. 澳门地理[M]. 澳门: 澳门基金会和中国友谊出版公司联合出版, 1993. 1 ~ 9.
- [16] 麦碧娴, 林峥, 张干, 盛国英, 闵育顺, 傅家谟. 珠江三角洲地区河流和珠江口表层沉积物中有机污染物研究——多环芳烃和有机氯农药的分布特征[J]. 环境科学学报, 2000, **20**(2): 192 ~ 197.
- [17] 康跃惠, 盛国英, 傅家谟, 麦碧娴, 张干, 林峥, 闵育顺. 珠江三角洲一些表层沉积物中多氯联苯的初步研究[J]. 环境化学, 2000, **19**(3): 264 ~ 272.
- [18] Düring R A, Sebastian K, Stefan G. Sorption behavior of nonylphenol in terrestrial soils [J]. Environ. Sci. Technol., 2002, **36**: 4052 ~ 4057.