

# 厦门海域正构烷烃组成特征及石油烃污染情况研究

邝伟明, 陈文锋, 陈金民

(国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 本文对厦门海域水体及表层沉积物的正构烷烃含量及水体中的石油烃含量进行检测, 通过正构烷烃的组成特征和特征比值分析其来源, 并对石油烃污染情况进行评价。结果表明, 厦门海域水体中石油烃含量符合国家一类海水水质标准, 正构烷烃含量与 1995 年厦门海域的水体正构烷烃含量相比有较明显的升高, 石油烃污染有加重的可能性。沉积物正构烷烃含量为 1.80 ~ 4.27  $\mu\text{g/g}$ , 对姥鲛烷和植烷比值 (Pr/Ph)、长短链比值 (L/H)、碳优势指数 (CPI) 和主峰碳数等特征比值的分析, 表明厦门海域沉积物环境为还原性, 厦门西海域、同安湾和九龙江口海域正构烷烃组成为双峰型, 陆源贡献大于海洋贡献且有受到石油烃污染的可能性; 东海域和大嶝海域正构烷烃组成表现为单峰型, 主要体现为海洋生物贡献, 但是无法排除石油烃污染的可能性。

**关键词:** 正构烷烃; 来源分析; 特征比值; 厦门海域

中图分类号: P734 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2017)01-0076-05

## The characteristic parameters of *N*-alkanes and petroleum pollution of Xiamen bay

KUANG Wei-ming, CHEN Wen-feng, CHEN Jin-min

(Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration People's Republic of China, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The concentration and composition characteristics of *n*-alkanes in seawater and sediment of Xiamen bay were detected to elucidate their sources and the condition of petroleum pollution. The concentration of oil in seawater conformed to the first class of seawater quality standards. The concentrations of *n*-alkanes were higher than those in 1995 indicating the increased risk of petroleum pollution in seawater. The concentrations of *n*-alkanes in sediments were ranged from 1.80  $\mu\text{g/g}$  to 4.27  $\mu\text{g/g}$ . The characteristic parameters of Pr/Ph, L/H, CPI dominant peaks and so on suggested the sediments in Xiamen bay were reducible. Furthermore, the *n*-alkanes in Tong'an bay, western Xiamen and Jiulong estuary were double peak-clustered, mainly from terrestrial sources and the sediments in these areas might be contaminated by petroleum while that in eastern Xiamen and Dadeng were one peak-clustered, mainly from marine organisms but could not exclude the possibility of petroleum pollution.

**Key words:** *n*-alkanes; sources analysis; characteristic parameters; Xiamen bay

烷烃是海洋沉积物中有机化合物的重要组成部分之一,也是重要的生物标志物,目前研究最广泛的是正构烷烃和异戊二烯烷烃<sup>[1]</sup>。正构烷烃主要来自于海洋浮游生物、陆生高等植物和石油及其产品的生产运输<sup>[2]</sup>。正构烷烃可根据主峰碳数、

碳优势指数、奇偶碳优势、姥鲛烷和植烷比值等特征参数,分析正构烷烃的来源和石油烃污染程度。前人根据正构烷烃的特征参数对莱州湾、锦州湾、大亚湾和圣弗朗西斯科湾等港口的沉积物来源和石油烃污染情况进行分析评价<sup>[1,3-6]</sup>,也有学者对

河口及近岸海域,如长江口、黄河口、浙江列岛、黄海和渤海等海域的沉积物正构烷烃的组成和分布进行了相应研究,分析了陆源输入和石油烃污染情况<sup>[7-13]</sup>。因此,对正构烷烃的组成情况及特征参数的分析,能够反应海洋环境及石油烃污染情况。

厦门港是福建重要的海运港口,2014 年货物吞吐量超过 2 亿 t,位居全国第 8 位,繁忙的海运导致海港的石油烃污染状况加重。此外,厦门海域还是九龙江的入海口,九龙江沿岸的工业污水排放及船运也给厦门海域带来石油烃污染。本文通过分析 2014 年厦门海域水体及沉积物的正构烷烃含量及组成,评价厦门海域石油烃污染情况,并对其来源进行探究,为厦门海域环境整治提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

本研究于 2014 年在厦门海域设置 16 个调查站位,站位位置如图 1 所示。正构烷烃水体样品用 1 L 棕色玻璃瓶采集,装满保存,采样后 24 h 内分析;油类水体样品用 500 mL 小口玻璃瓶装好并加入 5 mL 硫酸(体积比 1:3)酸化。沉积物采用抓斗采泥器采取表层样品(0~5 cm),放入棕色玻璃瓶,冷藏,运回实验室,于-20℃冷冻保存。

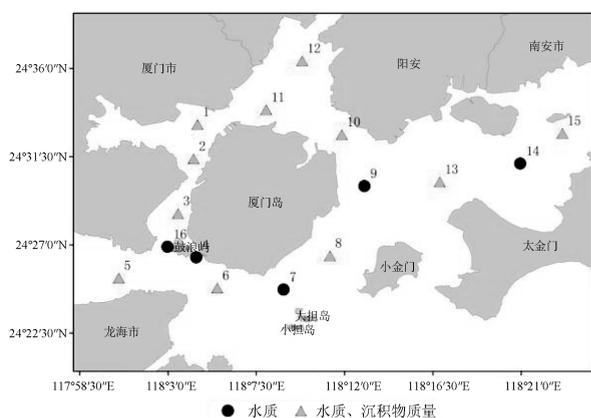


图 1 采样站位

Fig. 1 Location of sampling stations

### 1.2 实验材料及样品前处理

正己烷、二氯甲烷、石油醚(Tedia company, 色谱纯);无水硫酸钠(分析纯,广东汕头西陇化工有限公司,经 450℃灼烧 4 h,密封备用);高纯氮气(99.999%,福州新航气体公司);纯氮气

(99.99%,福州新航气体公司);键合硅胶固相萃取小柱(500 mg/6 mL、1000 mg/6 mL, Agela company);烃类混合标准(500.00 μg/mL, n-C8 ~ n-C40、植烷、姥鲛烷,百灵威公司);内标:氘代正二十四烷(100.00 μg/mL,百灵威公司);海洋环境监测石油成分分析标准物质(1000 mg/L,国家海洋环境监测中心)。

水样正构烷烃分析:取 1.0 L 水样,用 25 mL 二氯甲烷萃取 2 次,合并萃取液,浓缩至约 1 mL 后用 500 mg/6 mL SPE 硅胶小柱净化,用 6 mL 正己烷洗脱,并浓缩至体积小于 0.5 mL,加入 100 μL 内标氘代正二十四烷后定容至 1.0 mL 待进样。

水样油类分析:按照 GB17378.4-2007 荧光分光光度法分析水体中的油类含量。用 10.0 mL 石油醚萃取经过硫酸酸化的海水样品(约 500 mL)2 次,合并萃取液并定容至 20 mL,萃取液于 360nm 处荧光进行分析。

沉积物正构烷烃分析:将沉积物冷冻干燥后,研磨过 80 目筛,称取 5 g 样品,以 25 mL 二氯甲烷作为萃取液,超声萃取 15 min,萃取 3 次合并萃取液,浓缩至约 1 mL 后用 1000 mg/6 mL SPE 硅胶小柱净化,10 mL 正己烷洗脱,浓缩至体积小于 0.5 mL,加入 100 μL 内标氘代正二十四烷,定容至 1.0 mL,待进样。

### 1.3 实验仪器条件及质量控制

岛津 QP2010 型气质联用仪;荧光分光光度计(瓦里安 Cary Eclipse);EYELA MG2200 型氮吹仪;KQ-300DA 超声波清洗器;Restek Rtx-5MS 色谱柱,涂层厚度 0.25 μm,内径 0.25 mm,长度 30 m。实验用玻璃器皿均经过丙酮清洗晾干并 450℃灼烧 4 h。

程序升温:50℃保持 2 min,以 6℃/min 的速度升到 300℃,保持 16 min;载气:高纯氮气;进样方式:不分流;进样口温度:280℃;流速:恒流模式 1 mL/min;接口温度:270℃;离子源温度:200℃;sim 模式选取 m/z 为 85 对样品进行定量分析。

烃类混合标准稀释至 10.00 μg/mL,作为标准使用液。以此标准使用液配置浓度梯度为 0.10 μg/mL、0.20 μg/mL、0.50 μg/mL、1.00 μg/mL、2.00 μg/mL 的工作曲线。内标氘代正二十四烷稀释至 10.00 μg/mL 作为使用液,每个样品加入 100 μL,内标法定量。

实验质量控制:试剂空白所有目标物均未检

出,目标物  $n$ -C8 ~  $n$ -C40 加标回收率 74.2% ~ 107.6%,平行样分析精密性 1.8% ~ 4.9%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 厦门海域表层水体中正构烷烃含量

厦门海域水体中石油烃含量为 0.011 ~ 0.026 mg/L,符合国家一类海水水质标准( $\leq 0.05$  mg/L),碳数为  $n$ -C9 ~  $n$ -C36 的正构烷烃均有检出,正构烷烃含量在 3.40 ~ 11.25  $\mu\text{g/L}$  之间(表 1)。2014 年,厦门海域 8 月份水体中正构烷烃的含量高于 5 月和 10 月,与 1995 年(未检出 ~ 2.7  $\mu\text{g/L}$  [14])相比,有较明显的升高。正构烷烃是原油的重要组成部分,其含量一般占原油总量的 15% ~ 20%,而我国华北地区正构烷烃含量甚至达到 38% ~ 40% [15]。因此海水中正构烷烃含量升高表明厦门海域石油烃污染风险增加。

碳数 25 ~ 31 的正构烷烃含量和 ( $\Sigma n$ -AlkC<sub>25-31</sub>) 能够指示陆源物质输入的情况 [3]。厦门海域  $\Sigma n$ -AlkC<sub>25-31</sub> 含量占正构烷烃总量的 5.03% ~ 11.61%,5 月份和 8 月份 5 号站位  $\Sigma n$ -AlkC<sub>25-31</sub> 含量最高,10 月份 5 号站  $\Sigma n$ -AlkC<sub>25-31</sub> 含量没有明显高于其它站位(表 1),而 5、8 月份为九龙江入海流量较大的季节,以上结果表明九龙江对厦门海域水体中高碳数正构烷烃含量有重要贡献。

### 2.2 沉积物正构烷烃含量组成及特征分析

表 2 为厦门海域沉积物中正构烷烃浓度和相应参数计算值。由表显示,调查站位沉积物的正

构烷烃含量在 1.80 ~ 4.27  $\mu\text{g/g}$  之间,最高值出现在九龙江口的 5 号站,其余站位正构烷烃含量相差不大。厦门海域沉积物正构烷烃含量与锦州湾(1.9 ~ 4.2  $\mu\text{g/g}$ ) [3] 相当,略高于莱州湾(0.23 ~ 2.15  $\mu\text{g/g}$ ) [11]。九龙江口 5、6 和 8 号站沉积物正构烷烃含量分别为 4.27  $\mu\text{g/g}$ 、2.63  $\mu\text{g/g}$  和 2.44  $\mu\text{g/g}$ ,与黄河口正构烷烃含量(0.38 ~ 2.55  $\mu\text{g/g}$ ) [9] 和长江口正构烷烃含量(0.35 ~ 6.44  $\mu\text{g/g}$ ) [10] 相比,含量处于中等水平。调查站位  $\Sigma n$ -AlkC<sub>25-31</sub> 含量在 0.18 ~ 1.33  $\mu\text{g/g}$  之间,占正构烷烃总量的 9.89% ~ 31.08%, $\Sigma n$ -AlkC<sub>25-31</sub> 含量最高值仍然出现在 5 号站。调查站位沉积物碳数范围为  $n$ -C<sub>9</sub> ~  $n$ -C<sub>38</sub>。图 2 为 5 号站和 10 号站为两类典型正构烷烃相对含量分布图,分别表现为双峰型和单峰型。双峰型主峰碳为  $n$ -C<sub>18</sub> 和  $n$ -C<sub>31</sub>,高碳数正构烷烃占优,前峰群偶碳优势明显,后峰群低碳数则是奇碳占优,说明沉积物中正构烷烃是海洋生物和陆源高等植物共同作用的结果,这类站位出现在厦门西海域、同安湾和九龙江口海域,靠近陆地的海区。单峰型主峰碳为  $n$ -C<sub>16</sub> 或  $n$ -C<sub>18</sub>,正构烷烃分布偏向于低碳数一边,且偶碳占优。一般认为此类峰型是海洋菌藻来源的可靠标志 [16],有研究认为微生物降解对偶碳正构烷烃的形成有重要作用 [17],该类型站位出现在厦门东海域和大嶝海域等开阔海区。由于  $n$ -C<sub>16</sub> 为大多数原油样品的特征峰 [18],厦门海域所有站位均有可能受到原油污染。

表 1 厦门海域海水中正构烷烃浓度和油类浓度

Tab. 1 Concentrations of  $n$ -alkanes and calculate distributions in seawater

站位	$\Sigma n$ -Alk/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$			$\Sigma n$ -AlkC <sub>25-31</sub> / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$			石油烃总量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		
	5 月	8 月	10 月	5 月	8 月	10 月	5 月	8 月	10 月
1	4.42	10.47	8.48	0.27	0.83	0.75	0.016	0.018	0.021
2	3.40	9.75	9.20	0.25	0.81	0.86	0.019	0.020	0.026
3	7.24	9.73	8.28	0.45	0.73	0.87	0.015	0.024	0.019
4	5.49	9.39	8.11	0.37	0.97	0.73	0.016	0.017	0.019
5	5.64	10.16	7.97	0.64	1.18	0.72	0.020	0.018	0.020
6	6.96	8.83	7.17	0.35	0.86	0.68	0.019	0.014	0.020
7	5.42	7.11	7.73	0.33	0.49	0.68	0.015	0.013	0.015
8	6.68	9.77	7.11	0.52	0.58	0.46	0.015	0.016	0.017
9	5.44	7.65	7.91	0.43	0.39	0.54	0.016	0.017	0.021
10	3.97	9.92	6.50	0.29	0.61	0.41	0.015	0.015	0.020
11	3.92	10.04	6.91	0.26	0.85	0.49	0.019	0.019	0.018
12	3.69	9.34	8.20	0.29	0.58	0.88	0.020	0.017	0.025
13	6.59	7.87	7.95	0.52	0.41	0.57	0.011	0.014	0.016
14	5.26	9.82	5.83	0.31	0.55	0.45	0.014	0.015	0.018
15	5.55	11.25	6.73	0.40	0.70	0.48	0.012	0.013	0.015
16	6.50	7.95	8.20	0.34	0.58	0.79	0.017	0.015	0.023

注:  $\Sigma n$ -Alk 正构烷烃总含量;  $\Sigma n$ -AlkC<sub>25-31</sub>: 碳数 25 ~ 31 的正构烷烃含量和

姥鲛烷与植烷比值(Pr/Ph)常用于判断沉积物的氧化还原环境,高值指示有机质形成于氧化环境,低值则为还原环境<sup>[3]</sup>。在未受污染的沉积物中,Ph含量一般较低,而来自于海洋生物的Pr

含量较高,Pr/Ph高于1;接近于1或小于1表明有可能受到石油烃污染<sup>[5]</sup>。调查结果显示厦门海域Pr/Ph在0.34~0.68之间,表明厦门海域沉积物环境为还原性,且有可能受到石油烃污染。

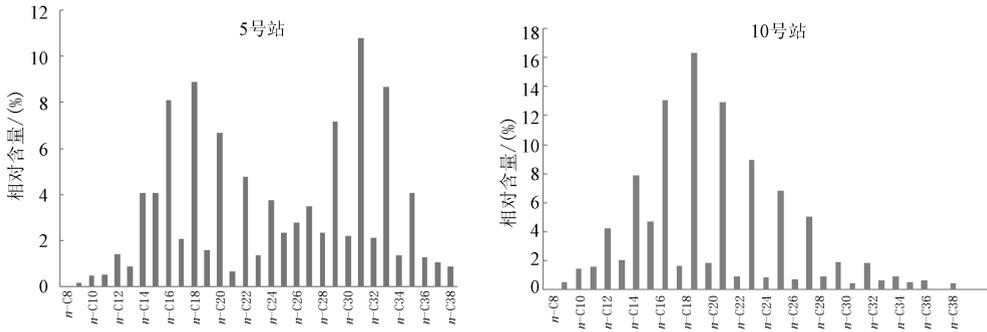


图 2 典型站位沉积物正构烷烃相对含量分布

Fig 2. Relative content of *n*-alkanes in typical stations

碳优势指数CPI常用来评价沉积物正构烷烃来源,一般来说陆源输入的CPI值在4~10之间,来源于原油及人类排放的正构烷烃CPI值接近于1<sup>[19]</sup>。厦门海域沉积物CPI介于0.26~2.72之间,所有值均小于4,最大值2.72出现在河口区的5号站。这个结果有可能是石油类污染和陆源输入混合作用的结果。与我国其它港湾河口<sup>[1,3,9-11]</sup>相比,厦门海域沉积物CPI没有明显差异。

可能是浮游动物和原油;L/H>2表明有新鲜石油烃污染存在<sup>[20]</sup>。TAR能够反应水陆贡献相对比例,比值越大表明陆生植物贡献越大,Σ*n*-Alk<sub>C<sub>25-31</sub></sub>能够指示陆源物质的输入情况<sup>[3]</sup>。由表2可以看出,10、13和15号站CPI、*n*-C<sub>31</sub>/*n*-C<sub>19</sub>、L/H、TAR和Σ*n*-Alk<sub>C<sub>25-31</sub></sub>明显与其它站位不同,这3个站正构烷烃以海洋生物贡献为主;6和8号站受到陆源植物和海洋生物输入混合作用的影响;其余站位沉积物正构烷烃则受到较明显的陆源输入影响。10、13和15号站L/H>2,但是这3个站均是以海洋生物输入为主,低碳数占优,用L/H判断这3个站有新鲜石油烃污染存在有较大的误差;5号站L/H为0.64,表明外来陆源贡献大于海洋源;其余站位L/H均大于1,有可能受到石油烃的污染。

正三十一烷与正十六烷比值(*n*-C<sub>31</sub>/*n*-C<sub>19</sub>)、短链/长链正构烷烃比值(L/H)和陆生与水生植物比值(TAR)也可以用于判断正构烷烃的来源。*n*-C<sub>31</sub>/*n*-C<sub>19</sub>>0.4被认为是非海洋源烃,L/H<1说明高等植物和海洋动物是正构烷烃的主要贡献;L/H接近1表明正构烷烃的主要贡献者

表 2 厦门海域沉积物中正构烷烃浓度和相应参数计算值

Tab. 2 Concentrations of *n*-alkanes and calculate distributions in sediments

站位	主峰	Pr/Ph	Σ <i>n</i> -Alk	Σ <i>n</i> -Alk <sub>C<sub>25-31</sub></sub>	Σ <i>n</i> -Alk/( <i>n</i> -C <sub>16</sub> )	L/H	TAR	CPI	<i>n</i> -C <sub>31</sub> / <i>n</i> -C <sub>19</sub>
1	C <sub>16</sub> /C <sub>31</sub>	0.66	2.50	0.40	7.42	1.68	0.63	0.96	1.60
2	C <sub>16</sub> /C <sub>31</sub>	0.65	3.22	0.63	8.31	1.37	0.95	1.58	3.02
3	C <sub>18</sub> /C <sub>31</sub>	0.36	3.54	0.70	8.73	1.35	0.92	1.48	2.35
5	C <sub>18</sub> /C <sub>31</sub>	0.42	4.27	1.33	12.34	0.64	2.77	2.72	6.75
6	C <sub>18</sub>	0.47	2.63	0.45	8.29	1.70	0.72	1.11	1.52
8	C <sub>18</sub>	0.67	2.44	0.44	8.08	1.65	0.68	0.82	1.51
10	C <sub>18</sub>	0.68	1.84	0.21	7.65	2.15	0.25	0.26	0.36
11	C <sub>18</sub> /C <sub>31</sub>	0.47	2.37	0.49	8.34	1.46	1.02	1.38	2.37
12	C <sub>18</sub> /C <sub>31</sub>	0.52	3.03	0.79	9.60	0.93	1.37	1.63	3.50
13	C <sub>18</sub>	0.50	1.80	0.18	7.33	2.27	0.27	0.30	0.48
15	C <sub>18</sub>	0.56	2.60	0.30	6.99	2.47	0.32	0.73	0.88

注:Pr/Ph:姥鲛烷与植烷比值;Σ*n*-Alk:正构烷烃含量,μg/g;Σ*n*-Alk<sub>C<sub>25-31</sub></sub>:碳数25~31的正构烷烃含量和,μg/g;Σ*n*-Alk/(*n*-C<sub>16</sub>):正构烷烃总量与正十六烷比值;L/H:短链/长链正构烷烃比值,Σ*n*-C<sub>8-20</sub>/Σ*n*-C<sub>21-38</sub>;TAR:陆生、水生类脂物比值(C<sub>27</sub>+C<sub>29</sub>+C<sub>31</sub>)/(C<sub>15</sub>+C<sub>17</sub>+C<sub>19</sub>);CPI:碳优势指数,1/2×[Σ*n*-C<sub>25-33</sub>(奇数)/Σ*n*-C<sub>24-32</sub>(偶数)+Σ*n*-C<sub>25-33</sub>(奇数)/Σ*n*-C<sub>26-34</sub>(偶数)];*n*-C<sub>31</sub>/*n*-C<sub>19</sub>:正三十一烷与正十六烷比值

正构烷烃总量与正十六烷比值( $\sum n\text{-Alk}/(n\text{-C}_{16})$ )可用于推断海域是否受到石油烃污染,比值小于30说明受到原油污染,大于50则未被原油污染<sup>[5]</sup>。厦门海域 $\sum n\text{-Alk}/(n\text{-C}_{16})$ 比值在6.99~12.34之间,所有值均小于30,表明厦门海域沉积物可能受到原油污染。但是厦门海域均受到海洋生物输入的影响, $n\text{-C}_{16}$ 除了原油输入以外,也有海洋生物输入,结合调查站位低碳数正构烷烃分布偶碳占优的情况,影响海域是否受到石油烃污染的判断, $\sum n\text{-Alk}/(n\text{-C}_{16})$ 不适于作为研究厦门海域石油烃污染的指示参数。

### 3 结论

(1)2014年厦门海域海水中油类含量均符合国家一类海水水质标准,正构烷烃的含量为3.40~11.25  $\mu\text{g}/\text{L}$ ,与1995年相比有较明显的升高,水体中石油烃污染情况有加重的可能性。九龙江冲淡水对厦门海域海水中高碳数正构烷烃含量有重要贡献。

(2)厦门海域沉积物正构烷烃含量为1.80~4.27  $\mu\text{g}/\text{g}$ ,与国内其它港湾调查结果相比处于中间水平。厦门西海域、同安湾和九龙江口海域沉积物正构烷烃分布指示了海洋生物和陆源高等植物共同作用的结果,因此有受到陆源污染物输入的风险;东海域和大嶝海域正构烷烃分布指示了海洋藻类和细菌输入的来源。

(3)厦门海域沉积物Pr/Ph值均小于1,表明厦门海域沉积物环境为还原性。沉积物CPI在0.26~2.72之间,结合主峰碳数、 $\sum n\text{-AlkC}_{25-31}$ 、 $n\text{-C}_{31}/n\text{-C}_{19}$ 和L/H等参数分析,厦门海域存在石油烃污染的情况,且受到污染威胁的区域主要是西海域、同安湾和九龙江河口区。东海域和大嶝海域虽然是以海洋源输入为主,但是无法排除受到石油烃污染的可能性。

### 参考文献:

[1] 肖晓彤. 莱州湾沉积物主要有机物含量分布与来源解析[D]. 青岛:中国海洋大学,2010.  
 [2] 王璟,王春江,赵冬至,等. 渤海湾和黄河口外表层海水中正构烷烃的组成、分布及来源[J]. 海洋环境科学,2010,29(2):242-245.  
 [3] 李泽利,马启敏,程海鸥,等. 锦州湾表层沉积物正构烷烃特征参数研究[J]. 环境科学,2011,32(11):3300-3304.  
 [4] HOSTETTLER F D, PEREIRA W E, KVENVOLDEN K A, et al.

A record of hydrocarbon input to San Francisco Bay as traced by biomarker profiles in surface sediment and sediment cores[J]. Marine Chemistry,1999,64(1/2):115-127.  
 [5] GAO X L, CHEN S Y. Petroleum pollution in surface sediments of Daya Bay, South China, revealed by chemical fingerprinting of aliphatic and alicyclic hydrocarbons[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2008,80(1):95-102.  
 [6] MAIOLI O L G, RODRIGUES K C, KNOPPERS B A, et al. Pollution source evaluation using petroleum and aliphatic hydrocarbons in surface sediments from two Brazilian estuarine systems[J]. Organic Geochemistry,2010,41(9):966-970.  
 [7] BOULOU BASSI I, FILLAUX J, SALIOT A. Hydrocarbons in surface sediments from the Changjiang (Yangtze River) Estuary, East China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin,2001,42(12):1335-1346.  
 [8] 胡利民,刘季花,石学法,等. 渤海石油污染:来自表层沉积物中生物标志物的证据[J]. 海洋学报,2013,35(1):121-130.  
 [9] 张娇,张龙军,宫敏娜. 黄河口及近海表层沉积物中烃类化合物的组成和分布[J]. 海洋学报,2010,32(3):23-30.  
 [10] 朱纯,潘建明,卢冰,等. 长江口及邻近海域现代沉积物中正构烷烃分子组合特征及其对有机碳运移分布的指示[J]. 海洋学报,2005,27(4):59-67.  
 [11] 周华,马启敏,程海鸥,等. 浙江马鞍列岛海域表层沉积物中正构烷烃的分布与来源分析[J]. 海洋环境科学,2012,31(2):233-236.  
 [12] HU L M, GUO Z G, FENG J L, et al. Distributions and sources of bulk organic matter and aliphatic hydrocarbons in surface sediments of the Bohai sea, China[J]. Marine Chemistry,2009,113(3/4):197-211.  
 [13] WU Y, ZHANG J, MI T Z, et al. Occurrence of *n*-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in the core sediments of the Yellow Sea[J]. Marine Chemistry,2009,76(1/2):1-15.  
 [14] 陈伟琪,张路平,王隆发. 厦门港微表层中烷烃富集规律的研究[J]. 厦门大学学报:自然科学版,1995,34(1):127-130.  
 [15] 吕馨. 海洋中重度风化溢油指纹鉴别技术的研究[D]. 大连:大连海事大学,2004.  
 [16] 张经. 中国主要河口的生物地球化学研究[M]. 北京:海洋出版社,1996:107-132.  
 [17] JOHNSON R W, CALDER J A. Early diagenesis of fatty acids and hydrocarbons in a salt marsh environment[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,1973,37(8):1943-1955.  
 [18] WANG Z D, FINGAS M, PAGE D S. Oil spill identification[J]. Journal of Chromatography A,1999,843(1/2):369-411.  
 [19] TOLOSA I, BAYONA J M, ALBAIGÉS J. Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons and sulfur/oxygen derivatives in northwestern Mediterranean sediments: spatial and temporal variability, fluxes, and budgets[J]. Environmental Science & Technology,1996,30(8):2495-2503.  
 [20] COMMENDATORE M G, ESTEVES J L, COLOMBO J C. Hydrocarbons in coastal sediments of Patagonia, Argentina: levels and probable sources[J]. Marine Pollution Bulletin,2000,40(11):989-998.