

黄海近岸日照段表层沉积物中多环芳烃的来源解析研究

薛荔栋¹, 郎印海^{1*}, 刘爱霞¹, 刘洁¹

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

关键词: 表层沉积物; 多环芳烃; 来源解析; 因子分析; 多元统计

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 0253 4193(2008) 06-0164-07

1 引言

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是指广泛存在于环境中由两个以上的苯环以稠环形式相连的有机污染物。目前发现的大部分 PAHs 具有致癌、致畸和致突变性, 可通过食物链进入生态系统, 其毒性和持久性严重影响了生态环境和人类的健康。PAHs 的疏水亲脂性使它们在水体中的含量较低, 大部分被水体中的悬浮颗粒物吸附, 并迅速进入沉积物中。沉积物中的 PAHs 还能通过食物链的逐级传递向水体释放, 造成二次污染^[1-2]。

为了有效控制沉积物中 PAHs 的污染, 识别其来源是必要的。PAHs 的来源广泛, 它经历了复杂的迁移和转化过程, 识别起来较困难。目前应用较多的比值法只能定性描述 PAHs 的污染来源, 而因子分析模型作为多元统计方法的一种, 可在不了解研究区域特征源成分谱的情况下, 对足够数量的样品进行分析并定量解析可能的污染源。这一方法在国内外沉积物中 PAHs 的来源解析研究中均已得到了成功的应用^[3-5]。Christensen et al.^[6-7] 应用因子分析模型研究了 Michigan 湖沉积物中 PAHs 的来源及其贡献率, 刘宗峰^[8]、郭炜峰^[9] 也利用此方法分别对黄河口及莱州湾表层、黄河兰州段

沉积物中 PAHs 进行了来源解析研究, 并取得了比较满意的结果。

关于黄海沉积物中 PAHs 的污染情况, Wu et al.^[10]、凌晰等^[11] 等先后对表层和柱状沉积物样品中 PAHs 的来源进行了研究, 但仅局限于比值法定性源解析方法。本研究首次应用因子分析和多元线性回归方法 (FA/MLR) 对黄海近岸日照段表层沉积物中 PAHs 的来源进行识别, 并定量描述各污染源的相对贡献, 为该区域的环境治理和规划提供科学依据。

2 材料和方法

2.1 样品采集

研究海域位于山东省日照市东部, 黄海近岸, 濒临山东省东南部港口——岚山港。在距岸边约 500 m 处设置采样断面, 自西向东采用纬向相距 3 km, 经向相距 2 km 的网格, 共布设 4 个采样断面, 总计 12 个采样站位。采样工作于 2007 年 2 月进行, 用抓斗采样器采集 12 个站位的表层沉积物样品。样品采集后冷冻 (-20℃) 保存直至分析。监测站位如图 1 所示。

2.2 样品分析

2.2.1 仪器和试剂

使用的仪器有 Agilent GC/MS 色谱质谱联用仪 6890N GC/5975B MSD, 超声波清洗器、旋转蒸

收稿日期: 2008-03-19; 修订日期: 2008-10-07。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40706039)。

作者简介: 薛荔栋 (1984—), 男, 安徽省黄山市人, 硕士研究生, 从事海洋环境化学研究。E-mail: sediment305@ouc.edu.cn

* 通讯作者: 郎印海, 博士, 副教授。E-mail: yhlang@ouc.edu.cn

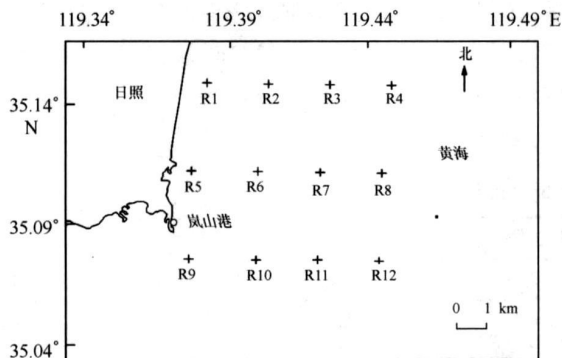


图1 沉积物采样站位示意图

发仪。试剂有二氯甲烷、正己烷、层析硅胶(100—140目)、无水 Na_2SO_4 、高纯氮气、中性氧化铝、铜片、玻璃纤维。本实验所用有机试剂均经过重蒸馏,在试剂空白中未检出目标化合物。16种PAHs混标包括萘(NAP)、芘(ACP)、二氢芘(ACPY)、苊(FLU)、菲(PHE)、蒽(ANT)、荧蒽(FLUA)、芘(PYR)、苯并[a]蒽(BaA)、屈(CHR)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DBahA)、茚并[1,2,3-cd]芘(IND)、苯并[g,h,i]芘(BghiP)以及由萘 d_8 、二氢芘 d_{10} 、菲 d_{10} 、屈 d_{12} 和芘 d_{12} 组成的氘代PAHs混合标准物质(购自美国Supelco公司),用于样品中PAHs的定性与定量分析。

2.2.2 样品的前处理

沉积物样品经风干、过100目筛处理,置于密封塑料袋中,在 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 保存备用。称取经筛分、混匀的样品2.0g与无水 Na_2SO_4 混匀,加入5种氘代多环芳烃作回收率指示物,置于100mL具塞比色管内,加正己烷与二氯甲烷(1:1)20mL和0.5g铜片,密封,超声萃取20min后静置0.5h,将上清液转移至平底烧瓶内。重复超声萃取2次,合并上清液,用旋转蒸发器浓缩至约1mL。将浓缩液过硅胶与氧化铝质量比为2:1制成的层析柱,用少量正己烷冲洗平底烧瓶2次,转移至层析柱,用适量正己烷淋洗烷烃,弃去。用二氯甲烷与正己烷的体积比为3:7溶液50mL洗脱层析柱,洗脱液经旋转蒸发浓缩至1mL左右,氮吹定容至1mL,加标测定。具体分析方法参见文献[8]。

2.2.3 仪器分析

对PAHs组分采用配有6890N型气相色谱仪和5975B型质谱检测器的Agilent GC-MS进行分

析。GC-MS条件:进样口温度是 $250\text{ }^\circ\text{C}$;柱的初始温度为 $45\text{ }^\circ\text{C}$,保持1min,以 $6\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 速率升温至 $200\text{ }^\circ\text{C}$,然后以 $8\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 速率升温到 $300\text{ }^\circ\text{C}$,并保持5min。载气为氦气,流量为 $1.0\text{ mL}/\text{min}$ 。不分流进样,进样量为 $1\text{ }\mu\text{L}$ 。毛细管柱:HP-5MS(Agilent 19091S-433) $30.0\text{ m} \times 250.0\text{ }\mu\text{m} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$ 。质谱条件:电子轰击离子源模式,离子源温度为 $200\text{ }^\circ\text{C}$;接口温度为 $280\text{ }^\circ\text{C}$;电子轰击能量为 70 eV ;选择离子扫描(SIM)方式。

2.3 质量控制和保证

质量控制过程参考相关文献^[12]。以氘代多环芳烃作回收率指示物来控制操作流程的回收率。每10个样品增加一个方法空白、基质加标、样品平行样。四次平行样品中PAHs的相对标准偏差(RSD)为 $0.007\% \sim 0.039\%$,基质加标回收率为 $70.0\% \sim 106.0\%$,方法空白无检出。指示物回收率对萘 d_8 为 $(68.9 \pm 11.4)\%$,对二氢芘 d_{10} 为 $(76.5 \pm 10.1)\%$,对菲 d_{10} 为 $(81.4 \pm 9.2)\%$,对屈 d_{12} 为 $(91.2 \pm 12.4)\%$,对芘 d_{12} 为 $(81.5 \pm 13.6)\%$,最后的结果经回收率校正。分析萘、菲等指示物的回收率较低的原因可能是在萃取和净化过程中指示物的部分挥发以及溶解有目标物质的正己烷溶剂损失造成的。

方法检出限实验是在样品中加入 $0.05\text{ }\mu\text{g}/\text{g}$ 的PAHs混标,处理过程同回收率实验。测得的16种PAHs的方法检出限(MDL)为 $4.98 \sim 21.70\text{ ng}/\text{g}$ 。

3 结果和讨论

3.1 黄海近岸日照段表层沉积物中PAHs的理化性质及含量特征

黄海近岸日照段12个站位表层沉积物的有机质的质量分数为 $0.16\% \sim 1.37\%$,其中R1站位有机质含量最低,而R5、R6及R12站位的有机质含量较高。各站位颗粒物的组成差异较大,样品含沙量为 $1.3\% \sim 100.0\%$,最高值出现在R10站位;粉粒含量为 $0\% \sim 54.8\%$,在R2的值最高;黏粒含量为 $0\% \sim 79.3\%$,最高值出现在R6站位。依据相关标准判断,沉积物样品以黏土和沙为主,兼有少量粉土^[13]。

优先控制的PAHs的16种组分除苯并(a)芘(BaP)外,在沉积物样品中均有较好检出。未检出BaP可能是由于预处理及测量过程中造成的一系列损失引起的。12个站位表层沉积物样品中PAHs

含量如表 1 所示。该海域表层沉积物中 PAHs 总量为 76.38~27512.02 ng/g。最高值出现在距离岚山港附近的 R5 站位,最低值出现在 R10 站位。

海区的 PAHs 总量平均值为 2622.58 ng/g。除 R5 站位外 11 个站位的 PAHs 总量为 76.38~853.48 ng/g,含量差异较小。

表 1 表层沉积物中 PAHs 的含量 (ng/g)

多环芳烃	站位号										
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
NAP	28.47	28.26	103.94	30.33	231.50	104.38	38.33	24.71	58.25	22.53	48.96
ACP	0.11	0.04	1.41	0.59	497.58	3.13	0.01	1.36	5.56	1.03	5.65
ACPY	0.06	3.55	6.65	8.95	34.51	13.69	3.62	6.62	8.34	2.72	7.04
FLU	13.11	34.92	40.60	161.37	821.36	166.62	27.36	183.19	20.85	18.09	72.33
PHE	29.46	51.00	61.02	529.65	514.35	342.97	10.47	208.30	67.47	14.44	242.02
ANT	0.66	0.77	1.75	12.93	954.74	19.51	0.69	3.28	5.73	0.53	7.30
FLU A	1.29	2.72	5.54	15.82	963.09	19.31	2.00	14.27	13.45	5.14	14.03
PYR	0.20	3.93	5.72	23.65	5784.81	45.63	0.05	17.11	23.75	0.21	26.15
BaA	1.90	1.92	2.03	6.10	3315.80	10.26	3.80	7.75	7.43	2.11	16.81
CHR	0.04	6.11	6.21	13.55	3077.93	26.49	1.58	8.43	13.94	1.39	22.48
BbF	3.10	7.71	13.62	17.75	2130.39	17.06	8.62	7.76	18.06	3.21	20.77
BkF	0.57	1.31	7.02	7.37	2640.07	9.15	0.18	1.76	5.30	2.54	15.77
BaP	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	2640.07	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
IND	0.27	4.88	4.59	12.04	1900.95	6.88	1.28	4.09	10.34	1.27	23.44
DBahA	0.04	1.07	0.29	1.81	473.27	1.78	0.30	2.18	0.75	0.02	17.97
BghiP	0.06	5.05	4.65	11.59	1531.61	10.70	1.33	3.08	10.35	1.15	16.88
总 PAHs	79.31	153.23	265.05	853.48	27512.02	797.55	99.61	493.88	269.57	76.38	557.61

注: N. D. 表示未检出。

该海域表层沉积物中 PAHs 含量与福建省厦门西港沉积物中 PAHs 的总量(105.3~5118.3 ng/g)、渤海表层沉积物中 PAHs 总含量(32.70~3558.88 ng/g)、美国 Casco 湾 PAHs 总含量(16~20748 ng/g)、澳大利亚悉尼港(100~380000 ng/g)^[14-18]相比,在 R5 站位污染较严重,在其他站位污染水平较低。与黄海其他区域相比,R5 站位表层沉积物中 PAHs 含量明显高于邻近海域的,其余 11 个站位 PAHs 含量则与北黄海(222.1~776.3 ng/g)及山东半岛南部近岸、江苏近岸 PAHs 含量(<400 ng/g)相近^[3,19]。考虑到沉积物有机质含量与粒度特征可能对 PAHs 分布的影响,认为 R5 站位含量较高的原因可能与其沉积物有机质高含量和粒度较细有关^[20]。该站位距岸较近,水动力条件的局部差异以及岸边潜在污染源的输入也可能是造成该站位 PAHs 含量高的原因之一。

从单组分看,除 R5 站位以外的 11 个站位中,低环 PAHs 组分占优,NAP,FLU,PHE 等组分所占比重较大,中高环 PAHs 组分则相对较低,表明 11 个站位的 PAHs 可能主要来自石油类污染^[1]。R5 站位的 PAHs 组分分布恰与其余站位相反,中高环 PAHs 组分明显占优,四环、五环 PAHs 含量占总量的 78.11%,表明各类热解过程可能是 PAHs 的主要来源。上述站位 PAHs 的分布特征指示该海域表层沉积物中 PAHs 的主要污染源很可能是石油产品与燃烧过程的混合源^[11,21]。

3.2 比值法污染源分析

PHE 与 ANT 含量和 FLUA 与 PYR 含量之比是两个最常用来指示 PAHs 污染来源的判断值。当 PHE 与 ANT 含量的比值大于 10 时,指示 PAHs 主要来源于石油;当 PHE 与 ANT 含量的比值小于 10 时,指示 PAHs 主要来源于燃料在高温

燃烧。同理,当 FLUA 与 PYR 的含量比值小于 1 时,指示 PAHs 主要来源于石油源;当 FLUA 与 PYR 含量比值大于 1 时,指示 PAHs 来源于燃料在高温燃烧。

除了利用 PHE 与 ANT 和 FLUA 与 PYR 的含量比值结果进行判断,国内外研究人员还对在燃油、燃煤、木材燃烧等污染源产生的 PAHs 特征进

行了相关研究,并指出了不同源的 BaA 与 CHR, IND 与(IND + BghiP)、FLUA 与(FLUA + PYR) 含量比值等特征指数的变化范围^[22-27]。表 2 总结了 几种常见源中 PAHs 各种特征指数的变化范围。对比表中沉积物样品中 PAHs 的特征比值结果,可以粗略判断研究区域内表层沉积物中 PAHs 的污染源种类。

表 2 特征比值^[22-27]

	特征比值						
	FLUA 与 PYR	PHE 与 ANT	BaA 与 CHR	BaA 与 (CHR+ BaA)	FLUA 与 (FLUA+ PYR)	IND 与 (IND + BghiP)	ANT 与 (ANT+ PHE)
石油污染	< 1	> 10		< 0.2	< 0.4	< 0.2	< 0.1
柴油泄漏				0.35±0.24	0.26±0.16	0.40±0.18	0.09±0.05
原油泄漏				0.12±0.06	0.22±0.07	0.09	0.07
燃料燃烧	> 1	< 10		> 0.35	> 0.4	> 0.2	> 0.1
车辆		2.7	0.63				> 0.1
汽油燃烧		3.4~ 8	0.28~ 1.20	0.33~ 0.38	0.4~ 0.5	0.09~ 0.22	0.11
柴油燃烧		7.6~ 8.8	0.17~ 0.36	0.18~ 0.69	0.20~ 0.58	0.25~ 0.45	0.11±0.05
煤	1.4	3	1.0~ 1.2	0.36~ 0.50	0.48~ 0.85	0.48~ 0.57	0.31~ 0.36
焦炉		0.79	0.7	0.54	0.58	0.53	0.18
木材	1	3	0.93	0.40~ 0.52	0.41~ 0.67	0.57~ 0.71	0.14~ 0.29
PAHs 特征	多数分布范围	多数分布范围	多数分布范围				多数分布范围
比值	0.17~ 0.97	11.77~ 81.98	0.31~ 2.41	0.24~ 0.98	0.14~ 0.97	0.39~ 0.82	0.012~ 0.078

对 PHE 与 ANT 和 FLUA 与 PYR 含量的比值分析结果表明该海域表层沉积物中 PAHs 可能来源于石油污染。将 PAHs 特征比值结果与所列常见污染源各特征指数的变化范围进行对比,可以粗略判断黄海岸边日照段表层沉积物中 PAHs 的主要污染来源有柴油泄漏、燃油、燃煤、木材燃烧源及焦化源等,这一结果与 PAHs 分布特征的指示结果相一致。

3.3 因子分析和多元线性回归法(FA/MLR)污染源分析

3.3.1 因子分析

本次调查中 R5 站位 PAHs 的总含量测定结果较大,可能对其余站位的分析有干扰,影响最终的结果,而且各站位(除 R5 站位外) BaP 含量均未检测出,故在应用 FA/MLR 方法时,剔除 R5 站位的数据以及 BaP 含量值,仅对其余 11 个站位的 15 种 PAHs 数据进行分析。基于 SPSS13.0 统计软件,对上述数据提取因子并结合方差极大旋转进行因子

分析,提取特征根大于 1 的因子共 3 个,方差贡献率依次为 59.95%, 18.85%, 8.92%, 累计方差贡献率包括了原始信息的 85% 以上,因此可以用这 3 个因子来分析表层沉积物中 PAHs 的来源。

分析表 3 中 15 种 PAHs 组分的主因子载荷,根据 PAHs 各组分载荷高低来推断它们的来源:因子 1 中 IND, DBahA, BaA, BkF 等高环 PAHs 组分的载荷较高,这些化合物被认为主要来自于燃料高温燃烧^[5]。依据特征化合物所对应的不同 PAHs 来源,判断因子 1 主要代表柴油、汽油以及天然气燃烧源^[22],可归结为燃油源;因子 2 中 FLU, PHE, ANT 等中低环 PAHs 组分具有较高的负荷值。研究表明上述中低环组分可能是木柴、煤等在低至中等温度范围内燃烧生成的^[5],因此因子 2 主要代表了燃煤源、木柴燃烧源以及可能存在的焦化源^[22,28]。因子 3 中 NAP 的组分载荷最高,分析认为是可能主要来自柴油泄露^[21]。

表 3 方差极大旋转后的主因子载荷

PAHs	主因子 1	主因子 2	主因子 3
萘 (NAP)	0.173	-0.057	0.942
蒽 (ACP)	0.737	0.026	0.248
二氢蒽 (ACPY)	0.138	0.841	0.177
芴 (FLU)	0.020	0.927	-0.153
菲 (PHE)	0.190	0.913	-0.192
蒽 (ANT)	0.182	0.917	0.156
荧蒽 (FLUA)	0.478	0.770	0.276
芘 (PYR)	0.484	0.728	0.423
苯并(a)蒽 (BaA)	0.899	0.271	0.095
屈 (CHR)	0.686	0.477	0.508
苯并(b)荧蒽 (BbF)	0.699	0.377	0.477
苯并(k)荧蒽 (BkF)	0.857	0.278	0.266
茚并(1,2,3)芘 (IND)	0.935	0.197	0.104
二苯并(a)蒽 (DBaA)	0.928	-0.018	-0.234
苯并(g,h,i)花 (BghiP)	0.822	0.370	0.322

表 4 因子得分变量的多元线性回归结果

污染源	标准化回归系数	参数贡献率 (%)	条件概率	相关系数二次方
燃油源	0.307	24.52	0.000	0.938
燃煤源、木柴燃烧及焦化源	0.928	74.12	0.000	
柴油泄露	0.017	1.36	0.000	

黄海近岸日照段表层沉积物中 PAHs 三个主因子所代表的主要来源贡献率: 柴油、汽油等燃油源为 24.52%; 燃煤、木柴燃烧源、焦化源三者合计为 74.12%; 柴油等石油产品泄露为 1.36%。从不同污染源的相对贡献率可以推断燃煤、木柴燃烧源及焦化源的贡献率较大, 其次为柴油、汽油等燃油源, 柴油等石油产品泄露的贡献率较小。这一分析结果分别与特征比值法的分析结果以及前人的研究结果相似^[10-11], 海区表层沉积物中 PAHs 的主要来源于各类燃烧物如煤、生物物质、天然气燃烧和交通尾气等, 石油产品输入的影响居次要地位。

比较其他区域 PAHs 的来源解析结果, 例如胶州湾海域表层沉积物中 PAHs 来源为煤炭燃烧、木材燃烧、石油类高温裂解及油类污染^[29]; 珠江三角洲水体沉积物中 PAHs 的相对贡献较大的污染来源为石油排放源占 36%, 煤、木柴等低温燃烧排放占 27%, 机动车尾气排放占 25%^[5]; 浙江台州湾表层沉积物中的 PAHs 主要来源于燃煤污染, 部分来源于石油烃类物质的直接污染^[30], 可见黄海近岸日照段表层沉积物中 PAHs 源解析结果与以上区域的相近, 这可能是

研究海域位于黄海近岸, 毗邻日照市与岚山货运港口。区域内船舶来往频繁, 柴油等石油产品泄露严重; 港口船舶以及附近地区机动车辆等燃油尾气排放量较大; 港口及附近城市居民、企业在采暖期内燃烧煤、木材等燃料, 造成近岸表层沉积物中 PAHs 可能有燃煤源及木材燃烧源的贡献, 另外该研究区域内及附近工业区的化工企业有可能是焦化源存在的原因。

3.3.2 多元线性回归

以标准化因子得分变量为自变量, 标准化的 15 种 PAHs 总量为因变量, 进行多元线性回归分析。设定进入方程的变量的显著水平为 0.05, 从方程中剔除变量的显著水平为 0.10, 由此获得方程的标准化回归系数可以反映各主因子, 即各主要源的相对贡献, 回归结果见表 4。

因为各区域的能源结构与组成相似。

4 结论

(1) 通过分析黄海近岸日照段 12 个站位表层沉积物中 PAHs 的含量, 得出以下结论: 表层沉积物中 PAHs 总量为 76.38~27512.02 ng/g。最高值出现在 R5 站位, 最低值出现在 R10 站位; 海区平均值为 2622.58 ng/g。R5 站位中高环 PAHs 组分明显占优, 其余 11 个站位 PAHs 含量差异较小, 低环组分占优。

(2) 利用特征比值法粗略地判断出表层沉积物中 PAHs 可能来源于柴油泄露、燃油源、燃煤源、焦化源以及木材燃烧源。

(3) 运用因子分析和多元线性回归方法, 定量描述了可能污染源的贡献率。剔除 R5 站位以及 BaP 的含量数据, 仅对其余 11 个站位点的 15 种 PAHs 组分数据进行分析, 结果显示燃煤、木柴燃烧源及焦化源三者合计的贡献率较大, 均为 74.12%; 其次为柴油、汽油等燃油源, 贡献率都为 24.52%; 柴油等石油产品泄露的贡献率较小, 贡献率为 1.36%。

参考文献:

- [1] 罗雪梅, 刘昌明, 何孟常. 黄河沉积物中多环芳烃的分布特征及来源分析[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2): 48—51.
- [2] 舒卫先, 李世杰. 太湖流域典型湖泊表层沉积物中多环芳烃污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1409—1414.
- [3] 李斌, 吴莹, 张经. 北黄海表层沉积物中多环芳烃的分布及其来源[J]. 中国环境科学, 2002, 22(5): 429—432.
- [4] 林秀梅, 陈江麟, 刘文新, 等. 多元统计在渤海表层沉积物中 PAHs 源解析上的应用[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(2): 107—111.
- [5] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江三角洲地区水体表层沉积物中多环芳烃的来源、迁移及生态风险评价[J]. 生态毒理学报, 2006, 1(1): 17—24.
- [6] CHRISTENSEN E R, BZDUSEK P A. PAHs in sediments of the Black River and the Ashtabula River, Ohio: source apportionment by factor analysis[J]. Water Research, 2005, 39(4): 511—524.
- [7] CHRISTENSEN E R, ARORA S. Source apportionment of PAHs in sediments using factor analysis by time records: application to Lake Michigan, USA [J]. Water Research, 2007, 41(1): 168—176.
- [8] 刘宗峰. 黄河口及莱州湾表层沉积物中多环芳烃来源解析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [9] 郭炜峰. 黄河兰州段沉积物多环芳烃源解析研究[D]. 天津: 南开大学, 2005.
- [10] WU Y, ZHANG J, MIT Z, et al. Occurrence of n alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in the core sediments of the Yellow Sea [J]. Marine Chemistry, 2001, 76(1-2): 1—15.
- [11] 凌晰, 刘文新, 陈江麟, 等. 黄海岸边日照段表层沉积物中 PAHs 的分布特征与潜在风险[J]. 环境科学学报, 2008, 28(7): 1394—1399.
- [12] 林峥, 麦碧娴, 张干, 等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药定量分析的质量保证和质量控制[J]. 环境化学, 1999, 18(2): 115—121.
- [13] 国家海洋局. GB/T 13909—1992 海洋调查规范: 海洋地质地球物理调查[S]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [14] 田蕴, 郑天凌, 王新红. 厦门西港表层沉积物中多环芳烃(PAHs)的含量、分布及来源[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 15—20.
- [15] 林秀梅, 刘文新, 陈江麟, 等. 渤海表层沉积物中多环芳烃的分布与生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2005, 25(1): 70—75.
- [16] 刘现明, 徐学仁, 张笑天, 等. 大连湾沉积物中 PAHs 的初步研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4): 507—509.
- [17] KENNICUTT M C, WADE T L, PRESLEY B J, et al. Sediments contaminants in Casco Bay, Maine: inventories, sources, and potential for biological impact[J]. Environmental Science and Technology, 1994, 28(1): 1—15.
- [18] MCCREADY S, SLEE D J, BIRCH G F, et al. The distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surficial sediments of Sydney Harbour, Australia[J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, 40(11): 999—1006.
- [19] LIU W X, CHEN J L, HU J, et al. Multi-residues of organic pollutants in surface sediments from littoral areas of the Yellow Sea, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(6): 1091—1103.
- [20] NEMR A E, SAID T O, KHALED A, et al. The distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments along the Egyptian Mediterranean coast[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 124(1-3): 343—359.
- [21] SOLO H H, GARRIGUES P H, EWALD M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas [J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, 40(5): 387—396.
- [22] 沈琼, 王开颜, 张巍, 等. 北京市通州区河流 PAHs 的源解析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 904—909.
- [23] 王洁, 林壬子, 王占生. 北京燕山河沉积物中多环芳烃分布规律及来源分析[J]. 长江大学学报(自然科学版理工卷), 2007, 4(2): 40—44.
- [24] 冯承, 夏星辉, 周追, 等. 长江武汉段水体中多环芳烃的分布及来源分析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1900—1908.
- [25] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江及南海北部海域表层沉积物中多环芳烃分布及来源[J]. 环境科学, 2005, 26(4): 129—134.
- [26] YUNKER M B, MACDONALD R W, VINGARZAN R, et al. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition[J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(4): 489—515.
- [27] BRANDLI R C, BUCHELI T D, KUPPER T, et al. Fate of PCBs, PAHs and their source characteristic ratios during composting and digestion of source separated organic waste in full scale plants[J]. Environmental Pollution, 2007, 148(2): 520—528.
- [28] HARRISON R M, SMITH D J T, LUHANA L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U. K. [J]. Environmental Science and Technology, 1996, 30(3): 825—832.
- [29] 杨永亮, 麦碧娴, 潘静, 等. 胶州湾表层沉积物中多环芳烃的分布及来源[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(4): 38—43.
- [30] 江锦花. 台州湾海域表层沉积物中多环芳烃的浓度水平、富集规律及来源[J]. 海洋通报, 2007, 26(4): 85—90.

Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from coastal Huanghai Sea in Rizhao, Shandong Province, China

XUE Li dong¹, LANG Yi r hai¹, LIU Ai xia¹, LIU Jie¹

(1. *Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology of Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Key words: surface sediment; PAHs; source apportionment; factor analysis; multiple linear regression