

广西茅尾海潮间带表层沉积物有机物特征及来源分析

阎琨^{1,2}, 庞国涛¹, 李伟¹

(1.中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264000; 2.中国地质大学 环境学院, 湖北 武汉 430000)

摘要:为研究广西钦州湾茅尾海潮间带表层沉积物有机质中烃类化合物的分布特征及来源, 本文于 2019 年 10 月采集茅尾海潮间带表层沉积物样品 6 件, 对沉积物中的正构烷烃和多环芳烃 (PAHs) 进行分析。结果表明, 茅尾海潮间带表层沉积物样品中正构烷烃的含量 (干重) 为 $1835.6 \times 10^{-9} \sim 5661.6 \times 10^{-9}$, PAHs 含量 (干重) 为 $39.45 \times 10^{-9} \sim 138.12 \times 10^{-9}$, 总体处于含量较低的水平; 参数比值法分析结果显示, 正构烷烃主要来源于陆源草本植物、木本植物及浮水植物; PAHs 具有大分子化合物占优势的特征, 组分分析法结果指示 PAHs 主要来源于煤、草木等的燃烧; 应用效应区间低/中值法对 PAHs 进行生态风险评价, 结果表明, PAHs 生态风险处于较低水平。

关键词:茅尾海; 沉积物; 正构烷烃; 多环芳烃; 风险评价

中图分类号: P736; X820.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2022)02-0303-06

Characteristics and sources of organic matter in surface sediments of the intertidal zone in Maowei sea, Guangxi

YAN Kun^{1,2}, PANG Guo-tao¹, LI Wei¹

(1.Yantai Geological Survey center of Coastal Zone, China Geological Survey, Yantai 264000, China; 2.School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to study the characteristics of the distribution and sources of hydrocarbons in organic matter in the surface sediments of the intertidal zone in Maowei sea, Guangxi. Six samples of surface sediments which were collected from the intertidal zone of the Maowei sea in October 2019 were analyzed in terms of the contents of the *n*-alkanes and PAHs. The results show that the content of *n*-alkanes (dw) in the surface sediments of intertidal zone of Maowei sea is $1835.6 \times 10^{-9} \sim 5661.6 \times 10^{-9}$, and the content of PAHs (dw) is $39.45 \times 10^{-9} \sim 138.12 \times 10^{-9}$. Generally, the contents of *n*-alkanes and PAHs in the surface sediments of intertidal zone of Maowei sea is low. The parameter ratio analysis shows that the *n*-alkanes mainly come from terrestrial herbaceous plants, woody plants and floating plants, whereas PAHs are characterized by high level of macromolecular compounds. The results of component analysis suggest they mainly come from the combustion of coal, grass, tree, and so on. The assessment report of the ecological risk about PAHs using the *ERL/ERM* shows that the overall risk of PAHs is in a low level.

Key words: Maowei sea; sediment; *n*-alkanes; polycyclic aromatic hydrocarbons; risk assessment

收稿日期: 2020-11-13, 修订日期: 2021-03-25

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20191024)

作者简介: 阎琨 (1988-), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事环境地质调查与评价工作, E-mail: 544507188@qq.com

北部湾城市群是面向东盟国际大通道的重要枢纽,是“一带一路”建设有机衔接的重要门户和陆海统筹规范发展的示范区。根据职能定位,钦州市主要以建设航运中心、物流中心为目标,钦州南部的钦州港以国际枢纽海港为目标,立足建设成为西部陆海新通道国际门户的重要枢纽,为“一带一路”起到重要作用。钦州港以集装箱和石油化工运输为主。随着钦州地区经济不断发展,特别是临港工业区石油运输业和化工产业的发展,有机物污染风险逐渐升高,开展有机物含量、分布及风险评价研究十分必要。

茅尾海属钦州湾外湾与钦江等入海河口的接触部位,周边人类社会活动和工业活动频繁,生态风险系数较高^[1]。潮间带沉积物受人类活动影响明显,有机地球化学的研究可以为生态演化提供基础数据支撑。部分学者针对茅尾海海水水质及沉积物重金属生态风险开展了系统研究,取得了丰硕成果,但对茅尾海表层沉积物中有机物的相关研究还相对较少^[2-3]。本研究采集茅尾海潮间带沉积物样品,分析沉积物中有机物的含量及分布特征,利用参数比值法和组分分析法分析有机物来源,利用效应区间法对多环芳烃(PAHs)进行风险评价。研究结果可为茅尾海生态环境现状研究提供依据,为政府生态环境修复决策提供一定的科学支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2019年10月,采集茅尾海潮间带沉积物样品5件、钦州湾湾口潮间带沉积物样品1件,采样站位分布见图1。样品采集依据《海洋调查规范》(GB/T 12763.8—2007)的相关规定,用抓斗取样器取样,用铝勺取表层样品(0~5 cm),迅速置于封口聚乙烯袋中,低温保存。

1.2 样品处理及分析

样品测试于国土资源部武汉矿产资源监督检测中心进行。正构烷烃、PAHs检测仪器为气相色谱-质谱仪,仪器型号为Thermo Fisher Trace 1300, ISQ7000,分析方法为加速溶剂萃取 GC-MSD法,具体测试方法见参考文献[4-5]。

前期处理过程:样品风干后研磨过筛(100目),

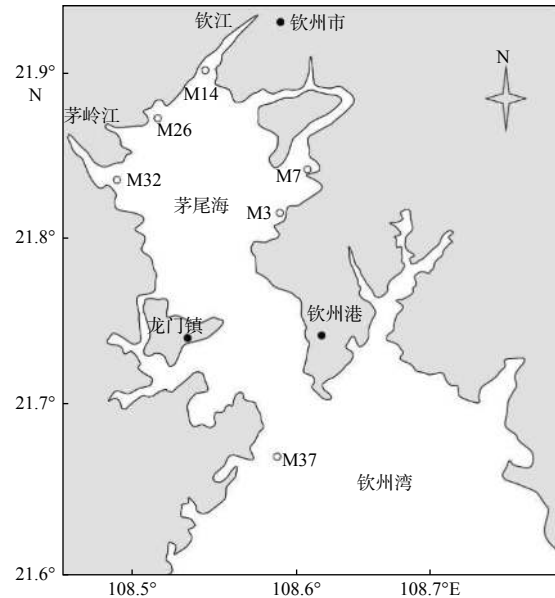


图1 茅尾海采样站位

Fig. 1 Distribution of sampling stations in Maowei sea

称取 20.0 g 样品,加入回收率指示物和正己烷-二氯甲烷(体积比为 1 : 1),利用索式提取法提取 48 h,加入铜粉静置过夜,脱硫,提取物经无水 Na_2SO_4 过滤后,旋转蒸发浓缩。浓缩液通过硅胶-氧化铝层析柱后,用正己烷淋洗出正构烷烃;使用正己烷/二氯甲烷(3 : 7)淋洗出 PAHs,浓缩至 0.5 mL 后待测。正构烷烃系列替代物对三联苯的回收率为 43%~139%,PAHs 化合物替代物 2-氟联苯的回收率为 41.4%~80.1%,对三联苯-d14 的回收率为 41.7%~124%。替代物回收率较低的为 M14 站位,可能与其采样站位距离河口较近有关。正构烷烃的检出限为 0.92×10^{-9} ~ 4.2×10^{-9} ,PAHs 的检出限为 0.12×10^{-9} ~ 0.37×10^{-9} 。

2 结果与讨论

2.1 沉积物正构烷烃特征

2.1.1 正构烷烃的分布特征

表层沉积物中正构烷烃检测结果见表1,正构烷烃总含量($T-ALK$)为 1835.6×10^{-9} ~ 5661.6×10^{-9} ,除 M14、M37 站位较低外,其余站位样品含量为 4380.6×10^{-9} ~ 5661.6×10^{-9} ,其中,含量最高的为茅尾海西北侧 M26 站位(5661.6×10^{-9})。正构烷烃的分布总体表现为钦州湾外湾附近含量低、茅尾海含量高的特征。

表1 表层沉积物正构烷烃特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of *n*-alkanes in surface sediments

| 分析项目 | $T-ALK/\times 10^{-9}$ | $CPI-L$ | $CPI-H$ | L/H | AI | TAR | C_{16} 指数 | $Pmar-aq$ |
|------|------------------------|---------|---------|-------|------|-------|-------------|-----------|
| M3 | 4380.6 | 0.89 | 1.78 | 0.20 | 0.52 | 3.86 | 75.61 | 0.31 |
| M7 | 5404.7 | 2.02 | 2.52 | 0.31 | 0.56 | 1.84 | 75.32 | 0.21 |
| M14 | 1835.6 | 0.78 | 0.74 | 0.50 | 0.45 | 0.82 | 31.64 | 0.52 |
| M26 | 5661.6 | 1.58 | 2.70 | 0.13 | 0.55 | 6.71 | 111.23 | 0.21 |
| M32 | 4417.2 | 1.03 | 1.61 | 0.21 | 0.53 | 3.25 | 54.87 | 0.31 |
| M37 | 2391.1 | 0.70 | 1.06 | 0.23 | 0.50 | 2.76 | 66.74 | 0.40 |

注: 低碳优势指数 $CPI-L=1/2*[(C_{13}+C_{15}+C_{17}+C_{19})/(C_{14}+C_{16}+C_{18}+C_{20})+(C_{13}+C_{15}+C_{17}+C_{19})/(C_{16}+C_{18}+C_{20}+C_{22})]$; 高碳优势指数 $CPI-H=1/2*[(C_{25}+C_{27}+C_{29}+C_{31}+C_{33})/(C_{24}+C_{26}+C_{28}+C_{30}+C_{32}+C_{34})+(C_{25}+C_{27}+C_{29}+C_{31}+C_{33})/(C_{26}+C_{28}+C_{30}+C_{32}+C_{34})]$; 低分子量烷烃与高分子量烷烃比值 $L/H=(\sum C_{15-21})/(\sum C_{22-35})$; 烷烃指数 $AI=C_{31}/(C_{29}+C_{31})$; 陆源优势正构烷烃与海源优势正构烷烃比值 $TAR=(C_{27}+C_{29}+C_{31})/(C_{15}+C_{17}+C_{19})$; C_{16} 指数= $T-ALK/C_{16}$; 正构烷烃指标 $Pmar-aq=(C_{23}+C_{25})/(C_{23}+C_{25}+C_{27}+C_{29}+C_{31})$

2.1.2 正构烷烃的来源

根据前人的研究, 正构烷烃的特征参数比值可以用来判断其来源(表1), 当 $CPI-H$ 小于1时, 主要受石油产品的影响; 当 $CPI-H$ 为1~4时, 受陆源物质和石油产品的双重影响^[6-7], 数值越大表明受陆源植物影响越大。茅尾海潮间带样品的 $CPI-L$ 多小于1, $CPI-H$ 多大于1, 表明正构烷烃主要为陆源植物和石油的混合来源; C_{16} 较少出现在非石油污染的生物源, 因此, 利用 C_{16} 指数可以很好地判断是否存在石油污染源^[8]。本研究中, C_{16} 指数为31~111, 多数样品为54~75, 表明站位样品基本不受石油污染; L/H 值为0.1~0.5, TAR 值为0.82~6.71, 表明样品正构烷烃主要为陆源输入^[9-11]。综合分析得出, 茅尾海潮间带沉积物中正构烷烃来源受陆源输入和石油污染共同影响, 其中, 陆源输入影响显著。

$Pmar-aq$ 用于区分不同植物的有机物输入, 陆源植物输入的 $Pmar-aq$ 值较小(0.01~0.25), 浮水植物输入为0.4~0.5, 大于0.6则主要为海洋大型植物的输入^[12-13]。茅尾海潮间带样品的 $Pmar-aq$ 值为0.2~0.5, 表明其主要为陆源植物与浮水植物的混合来源。前人认为, 陆源输入的木本植物正构烷烃以 C_{29} 为主峰碳, 草本植物为来源的则以 C_{31} 为主峰碳^[14-15], 因此, 利用 AI 值 $[C_{31}/(C_{29}+C_{31})]$ 可以区分草本植物与木本植物的来源, 当 $AI\approx 0.5$ 时, 表明陆源沉积有机质中草本植物与木本植物在母质中比例相近, 大于该值表明草本植物比例较大。由表1可知, 样品 AI 值为0.45~0.56, 由 $Pmar-aq$ 和 AI 可以确定

沉积物中正构烷烃主要是陆源草本植物、木本植物及浮水植物的混合来源。

2.2 沉积物 PAHs 特征

2.2.1 PAHs 的组成

茅尾海表层沉积物中 PAHs 总含量为 $39.45\times 10^{-9}\sim 138.12\times 10^{-9}$, 平均值为 75.68×10^{-9} 。其中, 最高值位于 M3 站位, 最低值位于 M14 站位。与其他地区对比(表2), 茅尾海沉积物中 PAHs 总含量高于钦州湾外湾、辽东半岛表层沉积物, 低于胶州湾、东海及广东沿海表层沉积物, 含量总体处于较低水平。

表2 不同区域 PAHs 含量对比

Tab.2 Comparison of polycyclic aromatic hydrocarbons in different regions

| 采样位置 | 平均值/ $\times 10^{-9}$ | 范围/ $\times 10^{-9}$ | 文献来源 |
|--------|-----------------------|----------------------|------|
| 胶州湾 | 1000.0 | 82~4567 | [16] |
| 钦州湾近岸 | 23.4 | 1.9~60.1 | [17] |
| 辽东半岛海域 | 34.5 | 3.54~93.07 | [18] |
| 广东滨海湿地 | 423.2~634.5 | 139.4~1134.3 | [19] |
| 东海 | 90.1 | 8.2~180.2 | [20] |
| 茅尾海 | 75.68 | 39.45~138.12 | 本次研究 |

单项分子中, 除 M7 和 M37 站位未检出萘外, 其余成分均有检出。其中, 含量较高的为菲、蒽、苯并(b)荧蒹、茚并(123-cd)芘, 各分子含量占比较接近, 表明各站位 PAHs 具有相似来源。

2.2.2 PAHs 的来源

环境中的 PAHs 来源复杂, 不同成因的 PAHs 结构和组分的差异可以作为污染来源的判断依

据。通常来说, 2~3 环的 PAHs 多来自石油污染源, 4 环以上的以燃烧来源为主^[21]。不同环数 PAHs 含量分布显示, 不同站位的分布比例较一致, 表明具有同源性(图 2)。其中, 2~3 环的占比为 17%~29%, 4 环的占比为 27%~37%, 5 环以上的占比为 39%~52%, 4 环以上的占比超过 70%, 表明其主要为燃烧来源。

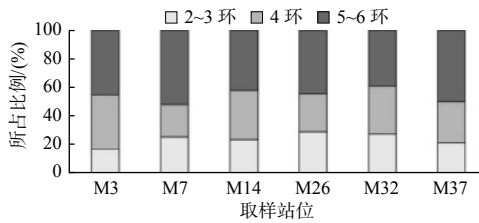


图 2 茅尾海潮间带样品中不同环数 PAHs 含量分布
Fig. 2 The composition patterns of PAHs by ring size in intertidal samples of Maowei sea

特征分子比值法可以判断 PAHs 的来源^[22-24]。其中, 利用 Ant/(Ant+Phe) 和 Flu/(Flu+Pyr) 值是一种常用的方法, 其判断标准为: Ant/(Ant+Phe) 大于 0.1 为燃烧来源, 小于 0.1 为石油来源; Flu/(Flu+Pyr) 大于 0.5 一般为煤炭、草木等燃烧源, 小于 0.4 则为石油污染源。茅尾海潮间带样品的 Flu/(Flu+Pyr) 值为 0.52~0.58, 平均值为 0.56; Ant/(Ant+Phe) 值为 0.59~0.82, 平均值为

0.69(表 3), 表明 PAHs 主要来自煤炭等燃烧。

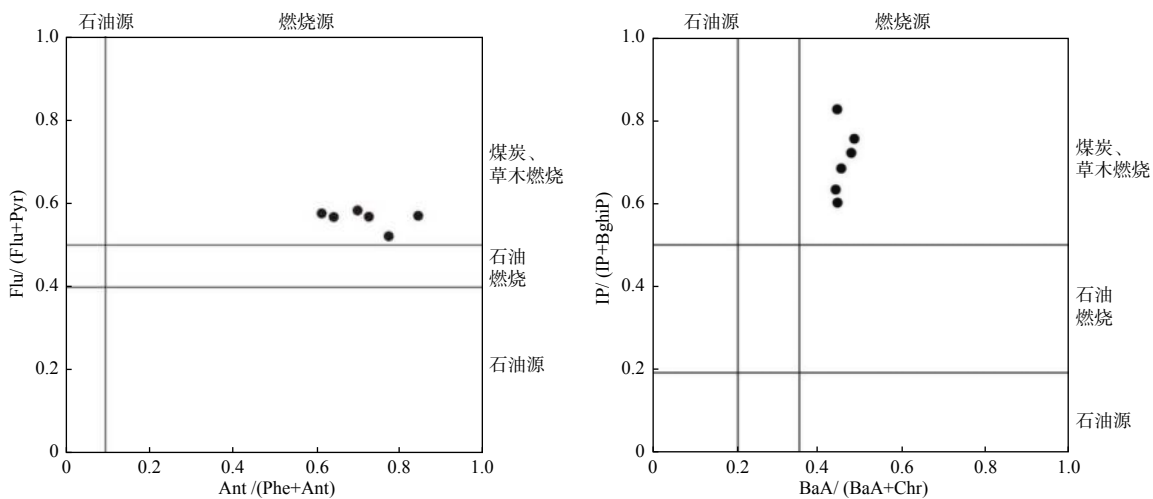
前人也多利用 BaA/(BaA+Chr) 和 IP/(IP+BghiP) 的值来判断 PAHs 来源^[24-25]。判别标准为: BaA/(BaA+Chr) 值小于 0.2 为石油来源, 大于 0.2 为燃烧来源; IP/(IP+BghiP) 值小于 0.2 为石油来源, 0.2~0.5 为石油燃烧来源, 大于 0.5 为煤炭、草木燃烧来源。茅尾海潮间带样品的 BaA/(BaA+Chr) 值为 0.42~0.45, 平均值为 0.43; IP/(IP+BghiP) 值为 0.59~0.82, 平均值为 0.69(表 3), 均指示 PAHs 主要为煤炭、草木等燃烧来源。

表 3 不同站位特征分子比值

Tab.3 Characteristic molecular ratios of different sites

| 站位 | Flu/(Flu+Pyr) | Ant/(Ant+Phe) | BaA/(BaA+Chr) | IP/(IP+BghiP) |
|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| M3 | 0.52 | 0.75 | 0.45 | 0.75 |
| M7 | 0.56 | 0.61 | 0.42 | 0.61 |
| M14 | 0.57 | 0.82 | 0.42 | 0.82 |
| M26 | 0.57 | 0.59 | 0.42 | 0.59 |
| M32 | 0.57 | 0.70 | 0.45 | 0.70 |
| M37 | 0.58 | 0.68 | 0.44 | 0.68 |

特征分子比值法综合分析显示, 茅尾海潮间带沉积物中 PAHs 主要来自草木、煤炭燃烧(图 3)。



注: ①蒽/(菲+蒽): Ant/(Phe+Ant); ②荧蒽/(荧蒽+芘): Flu/(Flu+Pyr); ③苯并(a)蒽[苯并(a)蒽+屈]: BaA/(BaA+Chr); ④茚并(1, 2, 3-cd)芘/(茚并(1, 2, 3-cd)芘+苯并(g, h, i)芘): IP/(IP+BghiP)

图 3 茅尾海表层沉积物中 PAHs 特征分子比值来源判定

Fig. 3 Source determination of characteristic molecular ratio of PAHs in surface sediments of Maowei sea

2.2.3 PAHs 的生态风险评价

Long 等人提出采用效应区间法来确定海洋与河口沉积物中有机污染物的潜在生态风险, 利用效应区间低值(*ERL*)和效应区间中值(*ERM*)^[26]评估沉积物的生态风险水平。污染物浓度 < *ERL*, 负面生态效应风险较低; 污染物浓度在两者之间, 负面生态效应风险中等; 污染物浓度 > *ERM*, 负面生态效应风险较高。茅尾海潮间带样品的 PAHs 浓度均低于 *ERL*(表 4), 表明其潜在的有机污染物生态风险较低。

表 4 茅尾海表层沉积物 PAHs 含量特征及生态风险标志水平

Tab.4 Content characteristics and ecological risk indicators of PAHs in surface sediments of Maowei sea

| 分析项目 | 含量/ $\times 10^{-9}$ | <i>ERL</i> / $\times 10^{-9}$ | <i>ERM</i> / $\times 10^{-9}$ | <i>TEFs</i> |
|---------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|
| 萘 | 1.43 ~ 9.99 | 160 | 2100 | 0.001 |
| 萘烯 | 0.64 ~ 1.55 | 44 | 640 | 0.001 |
| 萘 | 0 ~ 0.53 | 16 | 500 | 0.001 |
| 芴 | 1.00 ~ 5.49 | 19 | 540 | 0.001 |
| 菲 | 5.24 ~ 7.0 | 240 | 1500 | 0.001 |
| 蒽 | 0.78 ~ 2.52 | 853 | 1100 | 0.01 |
| 荧蒽 | 3.63 ~ 15.19 | 600 | 5100 | 0.001 |
| 芘 | 2.63 ~ 14.02 | 665 | 2600 | 0.001 |
| 苯并(a)蒽 | 2.53 ~ 10.18 | 261 | 1600 | 0.1 |
| 蒽 | 3.25 ~ 12.21 | 384 | 2800 | 0.01 |
| 苯并(b)荧蒽 | 5.55 ~ 19.11 | 320 | 1880 | 0.1 |
| 苯并(k)荧蒽 | 2.06 ~ 6.65 | 280 | 1620 | 0.1 |
| 苯并(a)芘 | 2.97 ~ 10.29 | 430 | 1600 | 1 |
| 茚并(1,2,3-cd)芘 | 3.91 ~ 17.23 | | | 0.01 |
| 二苯并(ah)蒽 | 1.14 ~ 3.38 | 63.4 | 260 | 1 |
| 苯并(ghi)芘 | 0.85 ~ 5.73 | 430 | 1600 | 0.1 |
| 总PAHs | 39.45 ~ 138.12 | 4022 | 44792 | |

研究表明, 苯并(a)蒽、蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(ah)蒽、苯并(ghi)芘具有一定的致癌性, 本次样品中上述分子的含量为 $22.5 \times 10^{-9} \sim 84.8 \times 10^{-9}$, 占 PAHs 总含量的 53.1% ~ 63.4%。PAHs 的毒性当量(*TEFs*)转化后的总量 *TEQ_{bap}* 可以用来进行健康风险评价^[27]。近年来, 多名学者利用该方法对入海河口沉积物及海洋表层沉积物进行评价^[28-29], 均取得了较好的效果。茅尾海潮间带样

品的 *TEQ_{bap}* 为 $5.31 \times 10^{-9} \sim 18.05 \times 10^{-9}$, 平均值为 9.48×10^{-9} , 远低于沉积物中的安全水平 (700×10^{-9})^[29]。结果表明, 虽然茅尾海潮间带中致癌性分子百分比含量较高, 但由于整体含量较小, 因此, 基本不存在健康风险。

3 结论

(1) 钦州茅尾海潮间带沉积物正构烷烃含量为 $1835.6 \times 10^{-9} \sim 5661.6 \times 10^{-9}$, 表现出钦州湾外湾附近含量低、茅尾海含量高的特点。特征参数比值研究表明, 其主要来源为陆域草本植物、木本植物和浮水植物的混合输入。

(2) 表层沉积物中 16 种 PAHs 总含量为 $39.45 \times 10^{-9} \sim 138.12 \times 10^{-9}$, 平均含量为 75.68×10^{-9} , 整体含量较低。组分分析和特征分子比值分析结果表明, 其主要来自煤炭、草木等的燃烧。

(3) 生态风险评价和致癌性风险评价结果表明, 茅尾海表层沉积物中 PAHs 具有较低的致癌性。临港工业区的石油化工等产业目前对茅尾海影响较小, 但仍需持续关注。

参考文献:

- [1] 龙颖贤, 檀笑, 韩保新, 等. 茅尾海营养状况及其来源研究[J]. *生态科学*, 2012, 31(5): 572-576.
- [2] 张丹, 黎大荣, 陈建华, 等. 钦州湾及其入海河流表层沉积物中重金属分布及污染特征分析[J]. *安全与环境工程*, 2014, 21(5): 11-15.
- [3] 田海涛, 胡希声, 张少峰, 等. 茅尾海表层沉积物中重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(2): 187-191.
- [4] 李泽利. 锦州湾沉积物典型有机物组成及来源研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [5] HJ 805-2016, 土壤和沉积物 多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法[S].
- [6] RIELEY G, COLLIER R J, JONES D M, et al. Sources of sedimentary lipids deduced from stable carbon-isotope analyses of individual compounds[J]. *Nature*, 1991, 352(6334): 425-427.
- [7] SIMONEIT B R T, EGLINTON G. Organic matter of eolian dust and its input to marine sediments[M]//CAMPOS R, GONI J. *Advances in Organic Geochemistry 1975*. Madrid: Enadimsa, 1977: 415-430.
- [8] BLUMER M, GUILLARD R P L, CHASE T. Hydrocarbons of marine phytoplankton[J]. *Marine Biology*, 1971, 8(3): 183-

- 189.
- [9] DUAN Y. Organic geochemistry of recent marine sediments from the Nansha Sea, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(2/3): 159-167.
- [10] 赵美训, 张玉琢, 邢磊, 等. 南黄海表层沉积物中正构烷烃的组成特征、分布及其对沉积有机质来源的指示意义[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(4): 90-96.
- [11] SILLIMAN J E, SCHELSKE C L. Saturated hydrocarbons in the sediments of Lake Apopka, Florida[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(3): 253-260.
- [12] WANG Z, LIU W G. Carbon chain length distribution in *n*-alkyl lipids: a process for evaluating source inputs to Lake Qinghai[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 50: 36-43.
- [13] ZHANG Z H, ZHAO M X, EGLINTON G, et al. Leaf wax lipids as paleovegetational and paleoenvironmental proxies for the Chinese Loess Plateau over the last 170 kyr[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(5/6): 575-594.
- [14] MEAD R, XU Y P, CHONG J, et al. Sediment and soil organic matter source assessment as revealed by the molecular distribution and carbon isotopic composition of *n*-alkanes[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(3): 363-370.
- [15] FICKEN K J, LI B, SWAIN D L, et al. An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7/8): 745-749.
- [16] 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.
- [17] 崔振昂, 黄向青. 广西钦州湾近岸表层沉积物多环芳烃分布特征及生态风险评估[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(33): 11824-11826, 11933.
- [18] 刘强, 高建华, 石勇, 等. 北黄海北部表层沉积物中多环芳烃的分布特征及控制因素分析[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(1): 53-58.
- [19] 李海燕, 赖子尼, 曾艳艺, 等. 广东典型湿地环境沉积物及鱼体中多环芳烃的污染特征及风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2019, 14(5): 296-307.
- [20] 黄芳, 黄亮, 张国森. 东海表层沉积物中多环芳烃的分布特征及来源解析[J]. *地球与环境*, 2018, 46(1): 50-58.
- [21] DAHLE S, SAVINOV V M, MATISHOV G G, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in bottom sediments of the Kara Sea shelf, Gulf of Ob and Yenisei Bay[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 306(1/2/3): 57-71.
- [22] SICRE M A, MARTY J C, SALIOT A, et al. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in the Mediterranean aerosol[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1987, 29(1/2): 73-94.
- [23] 朱先磊, 刘维立, 卢妍妍, 等. 燃煤烟尘多环芳烃成分谱特征的研究[J]. *环境科学研究*, 2001, 14(5): 4-8.
- [24] 刘娜, 印萍, 朱志刚, 等. 胶州湾大沽河河口表层沉积物中多环芳烃分布特征、来源及生态风险评估[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(6): 831-837.
- [25] 杨敏, 倪余文, 苏凡, 等. 辽河沉积物中多环芳烃的污染水平与特征[J]. *环境化学*, 2007, 26(2): 217-220.
- [26] LONG E R, MACDONALD D D, SMITH S L, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. *Environmental Management*, 1955, 19(1): 81-97.
- [27] LIU S D, XIA X H, YANG L Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of different land uses in Beijing, China: distribution, sources and their correlation with the city's urbanization history[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177(1/2/3): 1085-1092.
- [28] 刘宗峰, 郎印海, 曹正梅, 等. 黄河口表层沉积物多环芳烃污染源解析研究[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(5): 79-84.
- [29] 邹艳梅, 李沅蔚, 纪灵, 等. 渤海龙口湾沉积物中烃类物质的分布特征、来源解析及风险评估[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(9): 2138-2147.