

# 环境因子对菲在黄河口沉积物上吸附的影响

王建燕<sup>1,2</sup>, 王 萍<sup>3</sup>, 李秋梅<sup>3</sup>, 李淑芳<sup>3</sup>, 张高生<sup>1</sup>, 陈 静<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 烟台大学, 山东 烟台 264005)

**摘要:** 为研究多环芳烃从河口到近海的环境归趋行为与生态风险, 考察了沉积物质量浓度、溶解性有机质、温度、盐度 4 种典型环境因子对菲在黄河口沉积物上吸附的影响, 比较了黄河口与近海两种沉积物对菲的吸附性能。研究表明, 沉积物质量浓度越低, 单位质量颗粒物的菲吸附量越高; 共存的溶解性有机质对菲的吸附具有增促进作用, 且腐殖酸比黄腐酸的作用更显著; 温度的升高不利于菲的吸附, 而盐度的增加有利于菲的吸附。菲在沉积物上的吸附是分配作用与表面吸附两种行为的耦合, 其中黄河口沉积物以表面吸附为主, 而近海沉积物以分配作用为主。近海沉积物菲吸附量显著高于黄河口沉积物菲吸附量。基于此, 菲从河口到近海的迁移过程中, 更易于在沉积物表面发生吸附沉降, 从而可能降低水相中的生态危害, 但对近海底栖生物具有潜在的健康生态风险。

**关键词:** 黄河口; 菲; 沉积物; 吸附; 环境因子

中图分类号: X145 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)05-0103-07

DOI: 10.11759/hyxx20160121001

多环芳烃是指两个或两个以上苯环的疏水性芳香族化合物, 具有致畸性、致癌性、致突变性与难降解性。多环芳烃作为石油烃的主要组分, 对海洋生态系统的破坏和对海洋生物资源的持久性危害越来越受到人们的关注<sup>[1-4]</sup>。菲是属于三环的多环芳烃, 代谢物的毒性、致癌性和致突变性相对较低, 是最简单的含有与其反应性和致癌性相关区域的芳烃, 常被作为模式底物用于研究自然环境中多环芳烃的迁移过程与降解机制<sup>[5-7]</sup>。

河口是海陆交替的过渡带之一, 是淡水和海洋之间的生态交错区, 其物质和能量的转换远比其他地域迅速, 对流域自然环境变化和人类活动的响应敏感, 具有复杂的环境条件, 并随水文和季节不同而剧烈变化<sup>[8-11]</sup>。河口沉积物作为环境演变的重要产物, 为污染物从流域到近海的迁移、转化与归趋提供主要的环境信息<sup>[11-14]</sup>。

黄河是中国第二大河, 多环芳烃也是黄河水体的主要有毒有机污染物之一<sup>[15-17]</sup>, 引起了广泛重视。其中, 孟丽红等<sup>[15]</sup>研究了多环芳烃在黄河水体悬浮颗粒上的吸附特征, 重点探讨了表面吸附和分配作用对多环芳烃吸附的贡献; 范顺利等<sup>[16]</sup>比较了菲和芘在淮河、黄河和卫河沉积物上的吸附及解吸行为, 表明菲和芘在三种河流沉积物上的吸附均呈

非线性; 焦立新等<sup>[18]</sup>考察了菲在渤海湾入海河流与河口沉积物上的吸附行为, 指出有机质的含量与性质是影响菲在沉积物上吸附的重要因素; 张雷等<sup>[19]</sup>进一步研究了菲在渤海湾潮滩不同粒径沉积物上吸附的行为, 表明沉积物上总有机碳和炭黑含量则显著影响对菲的吸附能力, 推测人类源有机质的输入可能是导致菲在沉积物上吸附能力提高的主要原因。

在前期研究的重要基础上, 本研究以菲为代表, 结合河口区域的复杂环境条件, 重点考察水体中沉积物质量浓度、溶解性有机质、温度与盐度 4 种典型环境因子对菲在黄河口沉积物上吸附的影响, 而且进一步对比黄河口沉积物与近海沉积物的菲吸附性能, 探讨多环芳烃从河口到近海的环境归趋行为, 为近岸海域的区域生态环境保护与污染治理提供科学依据。

收稿日期: 2016-07-21; 修回日期: 2016-09-11

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14)

[Foundation: Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. KZZD-EW-14]

作者简介: 王建燕(1993-), 女, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要从事海岸带水环境风险评估与修复技术研究, E-mail: huankejianyan@163.com; 陈静, 通信作者, 博士, 助理研究员, 电话: 0535-2109135, E-mail: jchen@yic.ac.cn

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 主要试剂与amp;仪器

试剂: 菲, TOKYO CHEMICAL IDUSTRY CO., LTD (TCI) P0079, 纯度>97%, 购自国药集团化学试剂有限公司; 腐殖酸(HA)与amp;黄腐酸(FA)购自上海将来生化试剂有限公司, 均为 BR 级试剂; 甲醇为色谱纯; NaN<sub>3</sub>、CaCl<sub>2</sub>、NaOH 与 HNO<sub>3</sub> 均为分析纯。

仪器: 高效液相色谱仪(Agilent 1200), 恒温振荡器(DLHR-Q200), 台式自动平衡离心机(Cence L500), pH 计(Orion 3 STAR), 激光粒度仪(Marlvern Mastersizer 2000F)。

### 1.2 沉积物的采集与amp;处理

黄河口沉积物采样时间为 2015 年 10 月, 采自东营市垦利胜利黄河浮桥断面, 坐标位置为 37°45.075'N, 118°49.384'E, 近海沉积物采样时间为 2015 年 7 月, 采自黄河入海口近岸海域, 坐标位置为 38°4.975'N, 119°16.651'E, 均为表层沉积物, 去除杂物后封装、冷藏, 并及时带回实验室冷冻备用。实验前, 将冷冻的沉积物样品置于实验室阴凉处自然风干, 过 100 目细筛待用。

### 1.3 吸附实验

准确称取 0.0500g 菲, 溶于甲醇中, 超声震荡将菲溶解后, 转移至 50mL 棕色容量瓶中, 用甲醇定容到刻度线, 菲的质量浓度为 1.000 g/L, 密封后置于冰箱保存。临用时用去离子水逐级稀释至设定质量浓度, 控制甲醇浓度<0.1%<sup>[15]</sup>。将 HA 溶于 1%的 NaOH 溶液中, 将 FA 直接溶于去离子水中, 充分溶解后, 分别配制成 250 mg/L 的溶液, 临用时稀释至设定质量浓度。

吸附实验在 150 mL 规格的具塞锥形瓶中进行。背景电解质 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 用于调节介质的离子强度, 100 mg/L NaN<sub>3</sub> 作为抑菌剂, 避免微生物对菲的降解<sup>[20-21]</sup>。溶液 pH 7.5 ± 0.1, 避光条件下于 200 r/min 的恒温振荡器中平衡 24 h, 自然沉降后, 取上清液于具有聚四氟乙烯胶垫的玻璃离心管, 避光条件下于 3000 r/min 离心 20 min 后, 测定菲的质量浓度, 计算沉积物的菲吸附量, 每组实验设计 2 个平行样。

#### (1) 沉积物质量浓度的影响

以沉积物质量浓度 5、10、20 mg/L 分别模拟黄河口水体中不同的泥沙含量, 配制系列 50 mL 菲初始质量浓度为 0~1 000 μg/L 的溶液, 温度 25℃, 考

察水体中泥沙含量对菲吸附的影响。

#### (2) 溶解性有机质的影响

配制一系列 20 mL 菲初始质量浓度 500 μg/L 的溶液, 沉积物含量 5 mg/L, 温度 25℃, 分别考察溶解性有机质腐殖酸(HA)与amp;黄腐酸(FA)在 0、2.0、5.0、10、15、20 mg/L 时对沉积物吸附菲的影响。

#### (3) 温度的影响

配制系列 50 mL 菲初始质量浓度为 0~1 000 μg/L 的溶液, 沉积物含量 20 mg/L, 温度分别为 15、25、35℃, 考察温度对沉积物吸附菲的影响。

#### (4) 盐度的影响

配制盐度为 35 的人工海水(NaCl 23.939 g/L, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 5.079 g/L, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3.994 g/L, CaCl<sub>2</sub> 1.123 g/L, KCl 0.667 g/L, NaHCO<sub>3</sub> 0.196 g/L, KBr 0.098 g/L, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 0.027 g/L, NaF 0.003 g/L 与 SrCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.024 g/L), 分别稀释至盐度为 7、14、21、28、31.5 的溶液, 模拟从黄河注入近海过程中水环境盐度的变化, 考察菲初始质量浓度 500 μg/L, 沉积物含量 5 mg/L, 温度 25℃时水环境盐度的变化对沉积物吸附菲的影响。

#### (5) 沉积物类型的影响

配制系列 50 mL 菲初始质量浓度为 0~1000 μg/L 的溶液, 温度 25℃, 沉积物含量 20 mg/L, 考察黄河口沉积物与amp;近海沉积物两种不同类型沉积物对吸附菲的影响。

### 1.4 菲测定方法与amp;质量控制

采用高效液相色谱仪测定菲的质量浓度, 以外标法定量。采用 Agilent XDB-C18 液相色谱柱, 流动相甲醇/水的体积比 95/5, 流速 1.0 mL/min, 检测器激发波长 250 nm, 发射波长 364 nm, 菲出峰的保留时间约为 2.965 min。加标量为 200 μg/L 菲标准溶液, 回收率为 96.6%~102.7%, 相对标准偏差为 5.9%~10.5%, 稳定性与amp;准确性均在精度范围之内。预实验表明当没有加入沉积物时, 菲的挥发损失低于 5%, 吸附实验中菲降低的主要原因是沉积物的吸附作用。

### 1.5 菲吸附等温线的拟合

菲在沉积物上的吸附等温线用线性分配模型和 Freundlich 模型来描述<sup>[10, 16, 18, 20]</sup>。线性分配方程(1)和 Freundlich 方程(2)分别表述如下:

$$q_e = K_D C_e \quad (1)$$

$$q_e = K_F C_e^N \quad (2)$$

式(1)和(2)中,  $q_e$  是吸附达到平衡时菲吸附在单位沉

积物上的吸附量( $\mu\text{g/g}$ ),  $C_e$  是非在平衡溶液中的质量浓度( $\mu\text{g/L}$ ),  $K_D$  为线性分配系数(L/g),  $K_F$  是吸附剂的 Freundlich 能力因子 $[(\mu\text{g/g})/(\mu\text{g/L})^N]$ ,  $N$  是 Freundlich 指数因子, 指相对于线性等温线的偏离程度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物质量浓度对菲吸附的影响

为了模拟黄河水体中年平均泥沙含量、丰水期泥沙含量与高泥沙含量, 设置沉积物的质量浓度分别为 5、10、20 mg/L, 考察沉积物质量浓度对菲吸附的影响。如图 1 所示, 随着菲平衡质量浓度的增加, 菲的吸附量迅速增加; 但随着沉积物质量浓度的增加, 单位质量沉积物的菲吸附量降低。孟丽红等<sup>[15]</sup>研究了苯并(a)芘在黄河水体悬浮泥沙上的吸附, 亦发现随着泥沙含量的增加, 苯并(a)芘的总吸附量在增加, 而单位质量泥沙的吸附量却在减少, 这与菲在黄河口沉积物上的吸附具有相似的趋势。

采用线性分配方程与 Freundlich 方程对菲在不同质量浓度沉积物上的吸附等温线分别进行拟合, 拟合参数见表 1, 两个方程的拟合参数  $R^2 > 0.90$ , 即线性分配模型与 Freundlich 吸附模型的都能较好的拟合菲在沉积物上的吸附等温线, 其中 Freundlich 方程

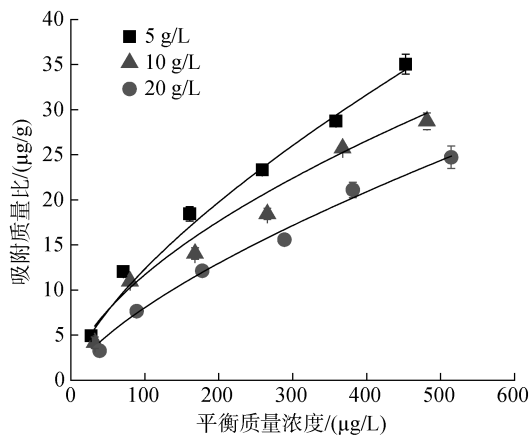


图 1 菲在不同质量浓度沉积物上的吸附等温线  
Fig. 1 Sorption isotherm of phenanthrene on sediments with different concentration

的拟合参数  $R^2$  值分别为 0.993 (5 mg/L)、0.974 (10 mg/L) 与 0.983 (20 mg/L), 均大于线性分配方程的拟合参数  $R^2$  值 0.908 (5 mg/L)、0.957 (10 mg/L) 与 0.966 (20 mg/L), 说明菲在沉积物上的吸附是分配作用与表面吸附作用的共同作用, 其中表面吸附为主导作用。这与报道的黄河水体悬浮颗粒物对苯并(a)芘的吸附是以表面吸附作用为主, 且颗粒物含量越低, 表面吸附作用对总吸附的贡献率越高的研究结论相一致<sup>[15]</sup>。

表 1 菲在不同质量浓度沉积物上吸附等温线的拟合参数

Tab. 1 Isotherm parameters for phenanthrene adsorption on sediments with different concentration

质量浓度 (mg/L)	线性分配模型		Freundlich 模型		
	$K_D$	$R^2$	$K_F$	$N$	$R^2$
5	0.092	0.908	0.523	0.684	0.993
10	0.072	0.957	0.770	0.591	0.974
20	0.062	0.966	0.339	0.688	0.983

### 2.2 溶解性有机质对菲吸附的影响

溶解性有机质(DOM)的化学组成与含量对多环芳烃的环境行为有着重要影响<sup>[18, 21-22]</sup>。Gao 等<sup>[22]</sup>研究当加入低质量浓度外源 DOM (<28 mg/L DOC)时, 土壤对菲的吸附量增加。结合天然水体中 DOM 的平均含量约为 10 mg/L, 考察了腐殖酸(HA)与黄腐酸(FA)两种水体中常见 DOM 在浓度为 0 ~ 20 mg/L 时对菲在沉积物上吸附的影响。如图 2 所示, 随着 HA 和 FA 质量浓度的增加, 菲在沉积物上的吸附量逐渐增加, 但 FA 作用下菲吸附量的增加幅度较为平缓, 而 HA 作用下菲吸附量的增加幅度较为显著。当 HA 与 FA 的质量浓度为 20 mg/L 时, 菲在沉积物上的吸附

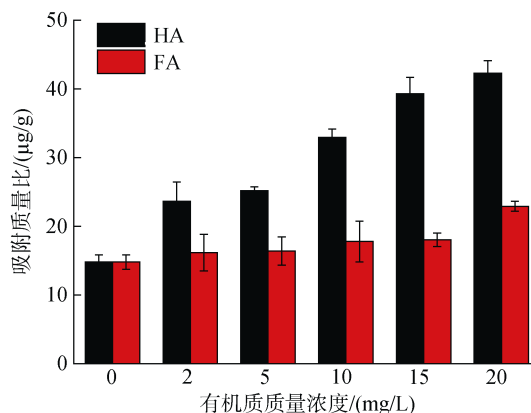


图 2 腐殖酸(HA)与黄腐酸(FA)对菲在沉积物上吸附的影响  
Fig. 2 Effect of humic acid (HA) and fulvic acid (FA) on phenanthrene sorption by sediments

量比空白对照组分别增加了 30.5  $\mu\text{g/g}$  与 8.1  $\mu\text{g/g}$ 。因此, 在实验质量浓度范围内, HA 与 FA 对菲在沉积物上的吸附均有促进作用, 但 HA 的作用比 FA 更为显著, 这可能是由于 HA 比 FA 分子量大, 活性弱, 更易于附着在沉积物表面, 增加了沉积物的有机质含量, 进而促进了菲的吸附。

### 2.3 温度对菲吸附的影响

温度是影响多环芳烃在环境中迁移转化的主要因素之一, 在 15、25 与 35 $^{\circ}\text{C}$  时, 考察了温度的变化对菲吸附的影响。如图 3 所示, 沉积物对菲的吸附量随温度的升高而降低, 当溶液温度由 15 $^{\circ}\text{C}$  升至 35 $^{\circ}\text{C}$ , 菲初始质量浓度为 600  $\mu\text{g/L}$  时, 菲在沉积物上的吸附量则由 20.6  $\mu\text{g/g}$  降至 12.5  $\mu\text{g/g}$ 。

菲在沉积物上的吸附是表面吸附与分配作用的共同作用, 对图 3 中的菲吸附等温线, 分别采用线性分配方程与 Freundlich 方程进行拟合, 拟合参数如表 2 所示, 线性分配模型的分配系数  $K_D$  与 Freundlich

模型的吸附能力因子  $K_F$  均随着温度的升高而降低, 说明温度升高不利于菲在沉积物上的吸附, 可能是由于温度升高会导致菲在水相中的溶解度增大, 减小沉积物表面与菲之间的吸附作用力, 从而使菲不易吸附在沉积物表面<sup>[16, 20, 23]</sup>。

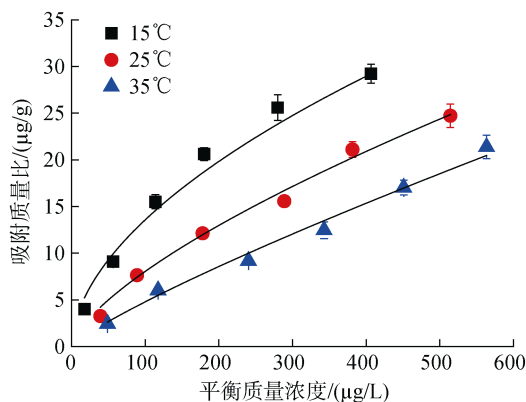


图 3 温度对菲在沉积物上吸附的影响

Fig. 3 Effect of temperature on phenanthrene sorption by sediments

表 2 不同温度下菲在沉积物上吸附等温线的拟合参数

Tab. 2 Isotherm parameters for phenanthrene adsorption on sediments with different temperature

温度( $^{\circ}\text{C}$ )	线性分配模型		Freundlich 模型		
	$K_D$	$R^2$	$K_F$	$N$	$R^2$
15	0.098	0.853	0.683	0.639	0.985
25	0.062	0.966	0.339	0.688	0.983
35	0.043	0.974	0.131	0.789	0.965

### 2.4 盐度对菲吸附的影响

海水中的平均盐度为 35, 从黄河注入近海过程中水环境盐度逐渐增加, 为了研究盐度的变化对菲吸附的影响, 分别考察了溶液盐度 0、7、14、21、28、31.5 时, 沉积物的菲吸附量。如图 4 所示, 当溶液盐度在 0~7 范围时, 随着溶液盐度的增加, 沉积物对菲的吸附量增加幅度较平缓; 当溶液盐度由 7 增加至 21 时, 菲在沉积物上的吸附量由 16.4  $\mu\text{g/g}$  迅速增加至 28.5  $\mu\text{g/g}$ ; 而溶液盐度进一步增加至 31.5 时, 菲吸附量趋于稳定。溶液中盐度的增加, 有助于菲在沉积物上的吸附, 一方面原因是盐度的增加能够降低弱极性和非极性化合物的溶解度, 溶解度降低促进非极性化合物的吸附; 另一方面原因是沉积物上的有机质发生盐析作用, 使得疏水有机物更易于向沉积物中分配, 有利于疏水有机物的吸附<sup>[10, 24]</sup>。

### 2.5 沉积物类型对菲吸附的影响

以黄河口沉积物与近海沉积物为代表, 进一步

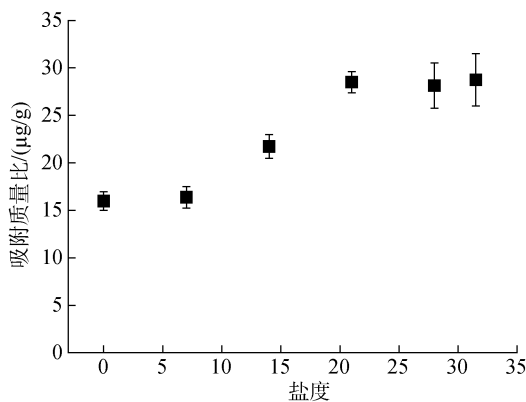


图 4 盐度对菲在沉积物上吸附的影响

Fig. 4 Effect of salinity on phenanthrene adsorption by sediments

考察了沉积物类型对菲吸附的影响。黄河口沉积物与近海沉积物的粒径分布与有机质含量见表 3。菲在这两种沉积物上的吸附如图 5 所示, 随着溶液中菲平衡质量浓度的增加, 菲在沉积物上的吸附量增加, 但菲在近海沉积物上的吸附量显著高于在黄河口沉

表 3 黄河口沉积物与近海沉积物的粒径分布与组分含量

Tab. 3 Size fractionation and components of estuarine sediment and marine sediments

沉积物	< 4.0 μm (%)	4.0~24 μm (%)	24~63 μm (%)	> 63 μm (%)	有机质含量 (%)	Fe 质量比 (mg/g)	Al 质量比 (mg/g)	Mn 质量比 (mg/g)
黄河口沉积物	0	0	25.6	74.4	0.0746	14.0	35.8	0.33
近海沉积物	11.9	33.1	39.7	15.3	0.653	20.6	41.1	0.60

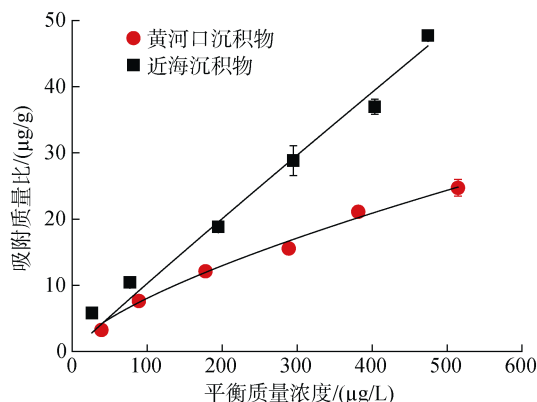


图 5 菲在河口沉积物与海洋沉积物上的吸附

Fig. 5 Phenanthrene adsorption on estuarine sediments and marine sediments

沉积物上的吸附量。这是由于沉积物上的有机质起着重要作用，有机质能够使沉积物形成复杂的孔隙结构，多环芳烃在沉积物上的吸附主要是发生在有机质孔隙结构中的分配作用<sup>[18-20, 25]</sup>。近海沉积物比黄

河口沉积物中有机质含量高，对菲吸附能力强，菲吸附量高，这与附着在沉积物上的溶解性有机质有助于菲的吸附也相互印证。而且，近海沉积物中 Fe、Al、Mn 的含量分别高于黄河口沉积物中该组分的含量，有助于菲在近海沉积物上的吸附。

分别采用线性分配方程与 Freundlich 方程对菲在两种沉积物上的吸附等温线进行拟合，拟合参数见表 4。由方程的拟合参数  $R^2$  值可得，菲在黄河口沉积物上的吸附较为符合 Freundlich 吸附模型，而菲在近海沉积物上的吸附较为符合线性分配模型。近海沉积物的有机质含量高，颗粒物粒径小，分配作用在吸附过程中占主导地位，而黄河口沉积物中有机质含量低，粒径  $d \geq 24 \mu\text{m}$ ，菲在黄河口沉积物上的吸附以表面吸附作用为主。夏星辉等<sup>[26]</sup>也曾报道的苯并(a)芘在粒径  $d \geq 25 \mu\text{m}$  黄河水体颗粒物上的吸附以表面吸附为主，而且随着颗粒物粒径的降低，表面吸附作用对总吸附的贡献降低，这与本研究的结果相吻合。

表 4 菲在河口沉积物与海洋沉积物上吸附等温线的拟合参数

Tab. 4 Isotherm parameters for phenanthrene adsorption on estuarine sediments and marine sediments

类别	线性分配模型		Freundlich 模型		
	$K_D$	$R^2$	$K_F$	$N$	$R^2$
河口沉积物	0.062	0.966	0.339	0.688	0.983
海洋沉积物	0.099	0.990	0.121	0.964	0.965

### 3 结论

(1) 沉积物质量浓度、溶解性有机质、温度与盐度 4 种环境因子均影响菲在黄河口沉积物上的吸附，其中共存的溶解性有机质、盐度的增加有利于菲的吸附。

(2) 菲的吸附是分配作用与表面吸附的耦合，在黄河口沉积物上以表面吸附为主，在近海沉积物上以分配作用为主。近海沉积物菲吸附量显著高于黄河口沉积物菲吸附量。

(3) 以菲为代表的多环芳烃，从河口到近海的迁移过程中，更易于在沉积物表面发生吸附沉降，从而可能降低水相中的生态危害，但对近海底栖生

物具有潜在的健康生态风险。

参考文献:

[1] 江玉, 吴志宏, 韩秀荣, 等. 多环芳烃对海洋浮游植物的生物毒性研究[J]. 海洋科学, 2002, 26(1): 46-50. Jiang Yu, Wu Zhihong, Han Xiurong, et al. Toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) to marine algae[J]. Marine Sciences, 2002, 26(1): 46-50.

[2] 马继臻, 袁骥, 蒋玫, 等. 东海沿岸不同区域贝类体内石油烃含量的分布特征及其评价[J]. 海洋通报, 2008, 27(2): 73-78. Ma Jizhen, Yuan Qi, Jiang Mei, et al. Distributional feature and assessment of petroleum hydrocarbon in the shellfish from the east China sea coast[J]. Marine Science Bulletin, 2008, 27(2): 73-78.

- [3] 耿沙沙, 刘晨, 张少宁, 等. 不同海洋微藻对石油污染的响应差异[J]. 海洋科学, 2016, 40(6): 62-71.  
Geng Shasha, Liu Chen, Zhang Shaoning, et al. Differences in the response of different marine microalgae to oil pollution[J]. Marine Sciences, 2016, 40(6): 62-71.
- [4] Gu Y G, Ke C L, Liu Q, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments of Zhelin Bay, the largest mariculture base on the eastern Guangdong coast, South China: Characterization and risk implications[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 110(1): 603-608.
- [5] 杨金水, 许良华, 余跃惠, 等. 菲降解菌的分离鉴定及其降解性研究[J]. 海洋科学, 2007, 31(12): 24-27.  
Yang Jinhua, Xu Lianghua, She Yuehui, et al. Isolation, identification and characteristics of phenanthrene-degrading bacteria[J]. Marine Sciences, 2007, 31(12): 24-27.
- [6] 雷欢, 黄栩, 田蕴, 等. 一株菲降解细菌的筛选及其降解条件的优化[J]. 海洋科学集刊, 2009, 49: 104-111.  
Lei Huan, Huang Xu, Tian Yun, et al. Isolation of phenanthrene-degrading bacteria and optimization for degrading activity of phenanthrene[J]. Studia Marina Sinica, 2009, 49: 104-111.
- [7] Yang Y, Liu M, Wang L L, et al. Sorption behavior of phenanthrene in Yangtze estuarine sediments: Sequential separation[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(5): 1025-31.
- [8] 邹景忠. 海洋环境科学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004: 54-58.  
Zou Jingzhong. Marine Environmental Science[M]. Jinan: Shandong Educational Press, 2004: 54-58.
- [9] 李磊, 蒋玫, 沈新强, 等. 长江口及邻近海域水体中石油烃分布特征及其污染评价[J]. 环境化学, 2014, 33(8): 1366-1372.  
Li Lei, Jiang Mei, Shen Xinqiang, et al. Spatial distribution and pollution analysis of the petroleum hydrocarbons in water from the Changjiang Estuary and its adjacent areas[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(8): 1366-1372.
- [10] Shang J, Chen J, Shen Z Y, et al. Effects of varying estuarine conditions on the sorption of phenanthrene to sediment particles of Yangtze Estuary[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 76(1-2): 139-145.
- [11] Vane C H, Harrison I, Kim A W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments from the Mersey Estuary, U.K.[J]. Science of the Total Environment, 2007, 374(1): 112-126.
- [12] 戴敏英, 周陈年. 渤海湾沉积物中的多环芳烃[J]. 海洋科学, 1984, 8(3): 34-36.  
Dai Mingying, Zhou Chennian. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Bohai Bay[J]. Marine Sciences, 1984, 8(3): 34-36.
- [13] Kingston P F, Runciman D, Mcdougall J. Oil contamination of sedimentary shores of the Galpagos Islands following the wreck of the Jessica[J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, 47(7): 303-312.
- [14] 李磊, 蒋玫, 王云龙, 等. 长江口及邻近海域沉积物中石油烃污染特征[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 752-757.  
Li Lei, Jiang Mei, Wang Yunlong, et al. Characteristics of petroleum hydrocarbon pollution in surface sediments from the Changjiang Estuary and its adjacent areas[J]. China Environmental Science, 2014, 34(3): 752-757.
- [15] 孟丽红, 夏星辉, 余晖, 等. 多环芳烃在黄河水体颗粒物上的表面吸附和分配作用特征[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 892-897.  
Meng Lihong, Xia Xinghui, Yu Hui, et al. Adsorption and partition of PAHs on particles of the Yellow River[J]. Environmental Science, 2006, 27(5): 892-897.
- [16] 范顺利, 田大勇, 韩晓霞. 多环芳烃在淮河、黄河和卫河沉积物上的吸附及解吸行为研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(5): 34-39.  
Fan Shunli, Tian Dayong, Han Xiaoxia. Adsorption and desorption behavior of phenanthrene and pyrene on sediments of Huai River, Yellow River and Wei River[J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(5): 34-39.
- [17] Yuan H M, Li T G, Ding X G, et al. Distribution, sources and potential toxicological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface soils of the Yellow River Delta, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 83(1): 258-264.
- [18] 焦立新, 孟伟, 郑丙辉, 等. 菲在渤海湾入海河流与河口沉积物上的吸附-解吸行为[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2321-2326.  
Jiao Lixin, Meng Wei, Zheng Binghui, et al. Sorption and desorption behaviors of phenanthrene on sediments from the rivers and estuaries flowing into sea around Bohai Bay[J]. Environmental Science, 2010, 31(10): 2321-2326.
- [19] 张雷, 焦立新, 秦延文, 等. 菲在渤海湾潮滩不同粒径沉积物上的吸附行为[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(5): 24-29.  
Zhang Lei, Jiao Lixin, Qin Yanwen, et al. Sorption of phenanthrene on different particle size fractions of inter-tidal zone sediments from Bohai Bay[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(5): 24-29.
- [20] 陈华林, 陈英旭, 王子健, 等. 中国南方河流和湖泊沉积物对菲的吸附特性[J]. 环境科学, 2003, 24(5): 120-124.  
Chen Hualin, Chen Yingxu, Wang Zijian, et al. Sorption characteristics of phenanthrene on sediments from Chinese southern rivers and lakes[J]. Environmental

- Science, 2003, 24(5): 120-124.
- [21] 王志霞, 葛小鹏, 晏晓敏, 等. 溶解性有机质对菲在沉积物上吸附与解吸性能的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(1): 105-112.  
Wang Zhixia, Ge Xiaopeng, Yan Xiaomin, et al. Effects of dissolved organic matters (DOMs) on the sorption and desorption behaviors of phenanthrene by sediments[J]. China Environmental Science, 2012, 32(1): 105-112.
- [22] Gao Y Z, Xiong W, Ling W T, et al. Impact of exotic and inherent dissolved organic matter on sorption of phenanthrene by soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140(1-2): 138-144.
- [23] Wang L L, Yang Z F, Niu J F, et al. Temperature-dependent sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons on natural and treated sediments.[J]. Chemosphere, 2011, 82(6): 895-900.
- [24] Wu W L, Sun H W. Sorption-desorption hysteresis of phenanthrene - Effect of nanopores, solute concentration, and salinity[J]. Chemosphere, 2010, 81(7): 961-7.
- [25] 吴文伶, 孙红文. 菲在沉积物上的吸附-解吸研究[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 1133-1138.  
Wu Wenling, Sun Hongwen. Sorption and desorption of phenanthrene on sediments[J]. Environmental Science, 2010, 31(10): 2321-2326.
- [26] 夏星辉, 孟丽红, 呼丽娟. 苯并(a)芘在黄河水体不同粒径颗粒物上的表面吸附和分配作用特征[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 269-274.  
Xia Xinghui, Meng Lihong, Hu Lijuan. Adsorption and partition of benzo (a) pyrene on solids with different particle size from the Yellow River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(2): 269-274.

## Phenanthrene sorption by sediments from Yellow River Estuary: Effects of environmental factors

WANG Jian-yan<sup>1, 2</sup>, WANG Ping<sup>3</sup>, LI Qiu-mei<sup>3</sup>, LI Shu-fang<sup>3</sup>, ZHANG Gao-sheng<sup>1</sup>, CHEN Jing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Yantai University, Yantai 264005, China)

**Received:** Jul. 21, 2016

**Key words:** Yellow River Estuary; phenanthrene; sediment; sorption; environmental factor

**Abstract:** To understand the environmental behaviors and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the transport processes from the river to the estuary, and subsequently coastal waters, the sorption of phenanthrene on the Yellow River estuary sediments was investigated under varying conditions including sediment concentrations, dissolved organic matter (DOM), temperature, and salinity. Phenanthrene sorption by estuarine sediments and marine sediments were also compared. The results showed that sediments with low concentration exhibited high sorption capacity for phenanthrene. Phenanthrene sorption was enhanced in the presence of DOM, and the effect of humic acid (HA) was more significant than that of fulvic acid (FA). The sorption capacity declined with increasing temperature, whereas it increased with increasing salinity. Surface adsorption and partitioning of phenanthrene occur simultaneously on the sediments. For estuarine sediments, adsorption was predominant, while partitioning was the main mechanism for marine sediments. Moreover, the sorption capacity of marine sediments was higher than that of estuarine sediments. Based on these results, it can be concluded that phenanthrene is inclined to be adsorbed on sediments in the transport processes from the river to the estuary, and subsequently coastal waters, which may reduce the ecological damage in water, but raise the potential health risks to benthonic organisms in offshore marine areas.

(本文编辑: 梁德海)