

# Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Seawaters from Jiaozhou Bay and Qingdao Coastal Water: Seasonal Distribution, Sources Apportionment and Risk Assessment

Ni Niu<sup>1</sup>, Xiaofeng Shi<sup>2</sup>, Tong Zhong<sup>1</sup>, Xianguo Li<sup>1</sup>, Dahai Zhang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology (Ocean University of China) and Ministry of Education, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optics and Optoelectronics (Ocean University of China), Qingdao Shandong

Email: \*dahaizhang@ouc.edu.cn

Received: May 3<sup>rd</sup>, 2019; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2019; published: May 27<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Surface seawater samples were collected from Jiaozhou Bay and Qingdao coastal water in February (winter), May (spring) and August (summer) 2018. Seasonal distribution, sources and ecological risk assessment of PAHs in surface seawater of this area were examined. The result shows that the concentration of PAHs in seawater in spring, summer and winter was 99.8 - 366.7 ng/L, 64.6 - 253.3 ng/L and 68.9 - 234.0 ng/L, respectively. Compared with the concentration of PAHs in surface seawater of other regions, it is at a moderate level of pollution. And compared with the previous research results in this studied area, we found that there was an increasing tendency year by year for  $\Sigma$ PAHs. The compositional characteristics of PAHs show that the 2-3 ring congeners are higher than that of the 4-6 ring congeners. Source apportionment results suggested that main source of PAHs in surface waters of Jiaozhou Bay and Qingdao coastal area was petroleum source in spring, whilst a mixed source from petroleum and biomass burning was identified in summer and winter. The results from risk quotient assessment showed that phenanthrene (Phe) may pose a relatively high ecological risk in surface seawater, while the other 15 PAHs are at medium risk, and there is no distinct difference among spring, summer and winter. This provides data support for PAHs pollution control and ecological environment protection in Jiaozhou bay and Qingdao coastal water.

## Keywords

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), Source Apportionment, Risk Assessment, Seawater, Jiaozhou Bay and Qingdao Coastal Water

---

\*通讯作者。

# 胶州湾及青岛近海表层海水中多环芳烃的季节分布、来源解析及风险评价

牛妮<sup>1</sup>, 史晓凤<sup>2</sup>, 钟彤<sup>1</sup>, 李先国<sup>1</sup>, 张大海<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛

<sup>2</sup>中国海洋大学光学光电子重点实验室, 山东 青岛

Email: \*dahaizhang@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019年5月3日; 录用日期: 2019年5月20日; 发布日期: 2019年5月27日

## 摘要

分别于2018年2月(冬季)、2018年5月(春季)和2018年8月(夏季)采集胶州湾及青岛近海表层海水, 对该区域表层水体中多环芳烃的季节分布、来源及生态风险进行了分析和讨论。结果表明, 春季、夏季和冬季海水中多环芳烃的浓度分别为99.8 ng/L~366.7 ng/L、64.6 ng/L~253.3 ng/L和68.9 ng/L~234.0 ng/L。与其他地区表层海水中PAHs的浓度相比处于中等污染水平, 与该海域之前的研究结果对比, 发现表层海水中PAHs的浓度有逐年增加的趋势。多环芳烃的组成特征呈现出2-3环含量高于4-6环的含量。来源分析表明, 胶州湾及青岛近海海域表层海水中的PAHs春季的主要输入源是石油源, 夏季和冬季为石油源和燃烧源的混合来源。风险熵值法评估结果表明, 胶州湾及青岛近海表层海水中菲(Phe)存在较高的生态风险, 其它15种PAHs的风险处于中等水平; 春、夏、冬季节差异不大。为胶州湾及青岛近海PAHs的污染控制和生态环境保护工作提供数据支持。

## 关键词

多环芳烃(PAHs), 来源解析, 风险评价, 海水, 胶州湾及青岛近海

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)是一类典型持久性有机污染物, 是目前自然界中发现最早、数量最大的一类强致癌物质[1]。PAHs在大气[2]、水体[3][4]、沉积物[5]和生物体[6]等各类环境介质中普遍存在, 其主要来源于人类的生产、生活, 少量来自于自然过程。煤炭燃烧、机动车尾气排放、石油泄漏、有机物质燃烧等都会向环境中释放PAHs, 通过大气干-湿沉降、地表径流以及点源排放等方式进入海洋[7], 在海洋环境中累积, 对生态系统和环境带来潜在的威胁。

胶州湾是一半封闭式的海湾, 位于山东半岛的南岸、南黄海西部, 是一个深入内陆的生态系统[8]。胶州湾是青岛的母亲湾, 是青岛市形成和发展的摇篮, 拉动着青岛市的经济、文化、社会等方面的发展[9]。但随着青岛近几十年经济的快速发展, 各类陆源污染物的排放也在增加[10]。而目前对胶州湾及青岛近海海水中PAHs的生态风险研究未见报道。本文研究了胶州湾及青岛近海表层海水中PAHs的季节分布和来源, 并对其生态风险进行评价, 以期为胶州湾及青岛近海PAHs的污染控制和生态环境保护工

作提供数据支持。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 样品采集

本论文以胶州湾及青岛近海的海水为研究对象, 采样站位如图 1 所示。2018 年 2 月(冬季), 2018 年 5 月(春季), 和 2018 年 8 月(夏季)用采水器采集表层(0.5 m)水样 2.5 L, 装于洁净并且烧过的棕色的玻璃瓶内, 快速运回实验室。5℃冰箱冷藏至分析。



Figure 1. Sampling stations in Jiaozhou Bay and Qingdao coastal water  
图 1. 胶州湾及青岛近海采样站位

### 2.2. 样品处理

水体中 PAHs 前处理具体过程参考李等[11]的方法, 采用固相萃取法(SPE), AgelaCleanert C18 的 SPE 小柱依次用二氯甲烷(5.0 mL)、甲醇(5.0 mL)、超纯水(5.0 mL)进行活化。准确量取 1 L 的水样, 加入 5% 的甲醇作为改性剂, 以提高多环芳烃的回收率, 搅拌均匀后使海水以 4 mL/min~5 mL/min 的速度通过 SPE 小柱, 最后用 5.0 mL 的 Q 水淋洗 SPE 小柱后抽干。用 7.0 mL 的二氯甲烷分两次洗脱 SPE 小柱, 氮吹至 0.5 mL 左右, 转移至样品瓶中, 然后在柔和的氮吹条件下吹干, 加异辛烷定容在 100  $\mu$ L, 等待仪器的检测。

### 2.3. 仪器分析

采用岛津气相色谱仪(2010Plus), 对处理后样品中 16 种美国环保局优先控制的 PAHs 单体进行分析。仪器分析条件: 色谱柱为 DB-5MS 毛细柱(30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu$ m 安捷伦, 美国), 采用不分流进样, 进样量为 1  $\mu$ L; 进样口的温度 280℃, 检测器的温度为 300℃, 载气为高纯氮气/空气, 流量为 3.0 mL/min; 其中柱温箱的升温程序是: 柱子的初始温度 50℃, 以 10℃/min 速度升温至 150℃, 保持 1 min, 然后以 4℃/min 速度升温至 290℃, 保持 15 min, 总的分析时间为 60 min。

### 2.4. 质量控制与质量保证

所有的玻璃仪器在使用之前用二氯甲烷润洗 3 次, 目的是去除仪器中的 PAHs 及其他物质, 避免造

成干扰。每 5 个样品增加 1 个方法空白、1 个基质加标(一个水样品, 进行前处理前加入一定的 PAHs 标准, 与未加标准的样品比较, 用来计算基质加标回收率)、1 个样品平行样。方法空白的目的是为了消除整个实验过程中人为因素所造成的污染, 本研究结果的方法空白 PAHs 的含量远小于方法检出限值, 表明实验方法不会干扰 PAHs 的测定。基质加标回收率的范围 70%~103%, 符合美国 EPA 规定法范围 (70%~130%), 保证了实验结果的可信度。平行样的相对标准偏差小于 26% ( $n = 3$ ), 达到美国 EPA 的标准(RSD < 30%), 说明实验具有较好的重现性。其中所有样品未进行回收率的校正。

### 3. 结果和讨论

#### 3.1. 表层海水中 PAHs 含量及组成特征

3 个季节获得的胶州湾及青岛近海表层水中 16 种 PAHs 的含量列于表 1。冬季 PAHs 的总浓度介于 68.9 ng/L~234.0 ng/L 之间, 平均浓度为 151.1 ng/L; 春季 PAHs 总浓度介于 99.8 ng/L~366.7 ng/L 之间, 平均浓度为 209.9 ng/L; 夏季 PAHs 浓度范围 64.6 ng/L~253.3 ng/L 之间, 平均浓度为 131.0 ng/L。比较 3 个季节的结果可以看出, 在该研究海域表层水体中 PAHs 总量在春季和冬季较高, 夏季相对较低。8 月具有较高的温度和强烈的阳光照射造成多环芳烃光降解和生物降解的速率加快[12]。另外, 夏季雨水充沛, 水量增加对 PAHs 的浓度起到了稀释作用, 使得检测到的 PAHs 含量较低[13]。

**Table 1.** Concentrations of PAHs monomers in surface waters of Jiaozhou Bay and Qingdao Qingdao coastal water (ng/L)  
**表 1.** 胶州湾及青岛近海表层水体中 PAHs 单体的浓度(ng/L)

PAHs 单体	冬季			春季			夏季		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
萘	0.1	13.2	3.8	n.d.	12.3	1.4	0.1	2.9	1.1
蒽	0.1	33.5	3.3	0.3	5.2	1.4	0.0	3.0	0.8
芘	0.6	9.4	3.5	0.6	14.6	4.3	0.6	10.8	4.6
芴	4.7	40.9	15.7	4.5	58.2	21.3	10.3	70.0	32.5
菲	27.6	92.1	57.8	32.5	125.1	81.9	26.9	150.8	60.6
葱	1.8	18.8	6.0	2.2	10.8	6.2	2.0	6.4	3.8
荧葱	1.4	50.6	19.7	0.2	16.9	2.7	0.5	3.5	1.9
芘	0.8	24.7	2.9	0.5	17.8	5.4	0.1	5.4	1.6
苯并 a 葱	0.5	10.4	3.2	0.3	7.9	4.3	0.2	3.0	1.0
屈	0.7	54.5	14.9	1.6	26.8	9.8	0.5	19.4	4.6
苯并 b 荧葱	n.d.	9.1	2.4	0.1	22.2	4.5	0.1	1.6	0.6
苯并 k 荧葱	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	70.5	14.2	1.2	22.0	6.1
苯并 a 芘	0.4	50.7	8.3	0.5	103.6	22.1	0.3	30.0	6.2
茚并 123 芘	0.4	16.9	4.0	0.1	29.2	5.4	n.d.	n.d.	n.d.
二苯并 ah 葱	0.1	8.3	1.7	n.d.	6.8	0.9	n.d.	n.d.	n.d.
苯并 ghi 花	n.d.	66.6	4.0	n.d.	62.7	24.1	0.7	36.1	5.8
∑PAHs	68.9	234.0	151.1	99.8	366.7	209.9	64.6	253.3	131.0

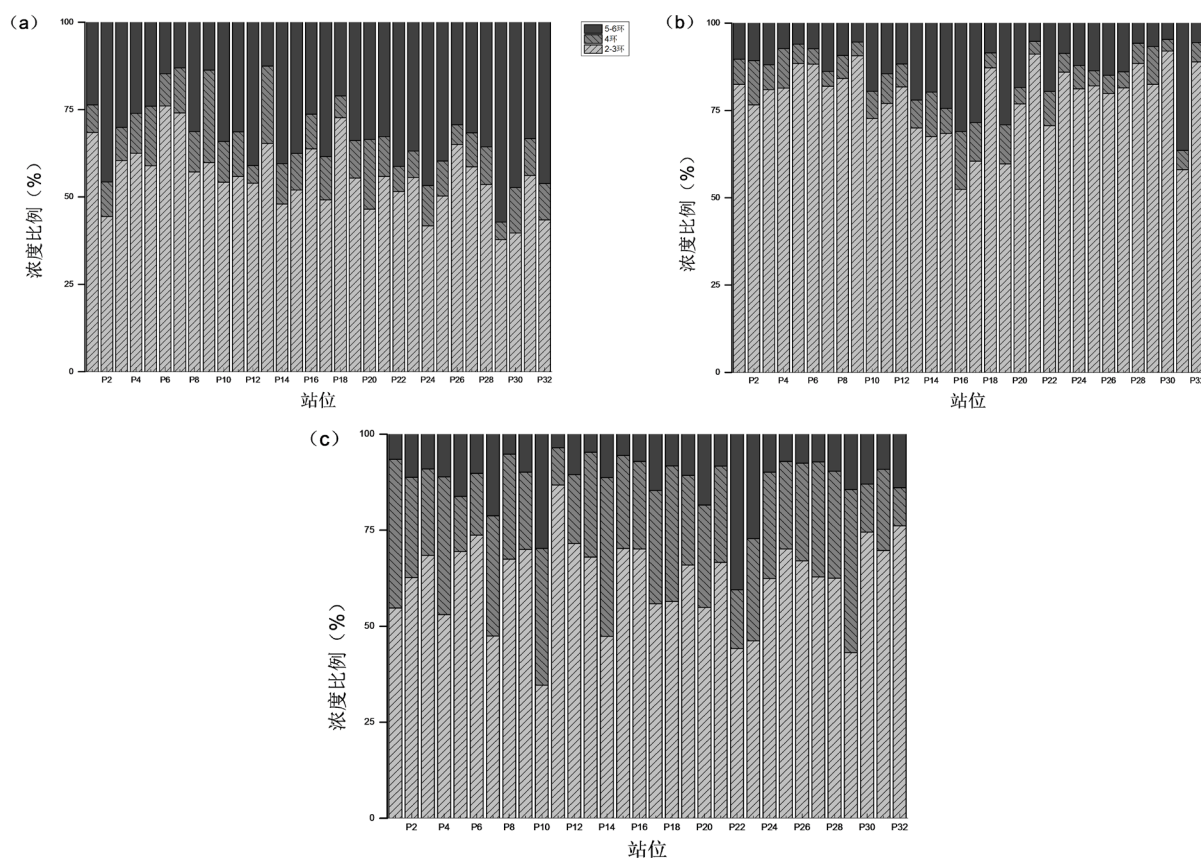
n.d.: 未检出。

与其他地区表层水体中的 PAHs 浓度相比, 如表 2 所示, 发现本研究海域与南黄海中部[1] (15.8 ng/L~233.4 ng/L)、厦门西港(2004) [14] (103.4 ng/L~676.9 ng/L)、珠江河口(12.9 ng/L~182.4 ng/L) [15]、东海[16] (70.2 ng/L~120.3 ng/L)以及辽东湾[17]等区域的表层水体中 PAHs 的浓度水平相当; 但低于厦门的西港(1999) [4] (106.1 ng/L~4365.6 ng/L)、辽东湾大辽河河口[18] (139.2 ng/L~1717.9 ng/L)、杨浦湾[19] (582.8 ng/L~2208.3 ng/L (冬季), 952.4 ng/L~1201.7 ng/L (夏季))和黄河口[20] (473.7 ng/L~1190.1 ng/L (雨季), 1681.8 ng/L~6014.4 ng/L (旱季)); 而高于台湾海峡西部海域(23.3 ng/L~70.9 ng/L) [21]。总体上来说, 胶州湾及青岛近海表层水体中的 PAHs 处于中等污染水平。而且研究发现即使同一水域在不同时期污染物浓度也是不同的, 与该海域之前的研究结果比较, 韩彬在 2004 年[22]研究胶州湾西部海域表层水体中 PAHs 的浓度范围是 22.8 ng/L~85.0 ng/L, 李等在 2009 年[23]研究青岛近岸海域表层水体中 PAHs 的浓度范围是 8.2 ng/L~272.0 ng/L, 发现在该区域表层海水中 PAHs 的浓度有逐年增加的趋势, 是由于青岛近十几年城市化、工业化以及农业的过快发展造成的[24]。

**Table 2.** Content levels of PAHs in surface water of different regions  
**表 2.** 各地区表层水中 PAHs 的含量水平

研究区域	样品数	表层水体中 PAHs 浓度范围	参考文献
南黄海中部	-	15.8 ng/L~233.4 ng/L	[1]
厦门西港(1999)	9	106.1 ng/L~4365.6 ng/L	[4]
厦门西港(2004)	6	103.4 ng/L~676.9 ng/L	[14]
台湾海峡西部海域	25	23.3 ng/L~70.9 ng/L	[21]
辽东湾	21	284.6 ng/L~468.1 ng/L (5 月)	[17]
		106.8 ng/L~203.6 ng/L (8 月)	
辽东湾大辽河河口	16	139.2 ng/L~1717.9 ng/L	[18]
珠江河口	15	12.9 ng/L~182.4 ng/L	[15]
黄河口	25	473.7 ng/L~1190.1 ng/L (雨季)	[20]
		1681.8 ng/L~6014.4 ng/L (旱季)	
杨浦湾	12	582.8 ng/L~2208.3 ng/L (冬季)	[19]
		952.4 ng/L~1201.7 ng/L (夏季)	
东海	8	70.2 ng/L~120.3 ng/L	[16]
胶州湾东北部	21	22.8 ng/L~85.0 ng/L (2004 年)	[22]
青岛近岸海域	25	8.2 ng/L~272.0 ng/L (2009 年)	[23]
		68.9 ng/L~234.0 ng/L (冬季)	
胶州湾及邻近海域	34	99.8 ng/L~366.7 ng/L (春季)	本研究
		64.6 ng/L~253.3 ng/L (夏季)	

研究发现在三个季节的 PAHs 均以混合的形式存在于环境中, 从图 2 中可以看出本研究区域 PAHs 在春、夏和冬三个季节 PAHs 的环数组成差别较小, 总体呈现出小环即 2-3 环占据主导地位, 在春季占总含量的 55.9%, 夏季占总含量的 78.5%, 冬季占总含量的 62.3%; 4-6 环的含量较少。在三个季节 PAHs 组成特征相似, 预示着胶州湾及青岛近海表层海水中 PAHs 在不同季节有着相似的污染来源。



**Figure 2.** Relative abundance of PAHs in surface waters of Jiaozhou Bay and Qingdao coastal water (a spring, b summer, c winter)

**图 2.** 胶州湾及青岛近海表层海水 PAHs 的相对丰度(a 春季, b 夏季, c 冬季)

### 3.2. 表层海水中 PAHs 的来源解析

不同的有机燃料以及不同的燃烧条件, 生成的 PAHs 具有特定的成分和比值即所谓的成分谱, 然后通过特定的成分和比值, 可以定性的判断 PAHs 的来源[25] [26]。而且 PAHs 的同分异构体具有相似的热力学和动力学特征, 在环境介质中具有相同的迁移过程, 而且它们的浓度比值不会发生明显变化, 因此可以根据特定来源的特征值, 用以区分环境介质中 PAHs 污染源。本研究选用  $\text{Ant}/(\text{Phe}+\text{Ant})$  和  $\text{Fla}/(\text{Fla}+\text{Pyr})$  比值相结合来定性的判断胶州湾表层水体中 PAHs 的来源。

其中  $\text{Ant}/(\text{Phe}+\text{Ant})$  的比值小于 0.1 则主要是石油源, 大于 0.1 则主要是燃烧源。 $\text{Fla}/(\text{Fla}+\text{Pyr})$  的比值小于 0.4 主要是石油源, 大于 0.5 则主要是煤炭和生物质燃烧源, 介于 0.4~0.5 之间主要是石油燃烧源[27] [28]。

从图 3  $\text{Ant}/(\text{Phe}+\text{Ant})$  和  $\text{Fla}/(\text{Fla}+\text{Pyr})$  构成的比值图可以看出, 在春季除了 1 个站位  $\text{Ant}/(\text{Phe}+\text{Ant})$  比值大于 0.1; 其他的站位该比值均小于 0.1, 处于诊断图的石油源区域, 表明春季胶州湾及青岛近海的表层海水中石油源是 PAHs 的主要来源。在夏季有 10% 的站位  $\text{Ant}/(\text{Phe}+\text{Ant})$  的比值大于 0.1, 有 16% 的站位  $\text{Fla}/(\text{Fla}+\text{Pyr})$  的比值小于 0.4, 66% 站位  $\text{Fla}/(\text{Fla}+\text{Pyr})$  的比值大于 0.5, 表明胶州湾表层水体中 PAHs 在夏季是一个混合来源。在冬季有 9 个站位  $\text{Ant}/(\text{Phe}+\text{Ant})$  的比值大于 0.1, 而且  $\text{Fla}/(\text{Fla}+\text{Pyr})$  的比值仅仅有 1 个站位小于 0.4, 和 1 个站位在 0.4~0.5 之间, 表明冬季在该区域的多环芳烃的来源是一个混合源, 但是煤炭和生物质燃烧对 PAHs 贡献较大, 说明胶州湾沿岸的青岛市及其附近的居民在冬季取暖燃烧的煤炭、木材等增加了多环芳烃的输入。

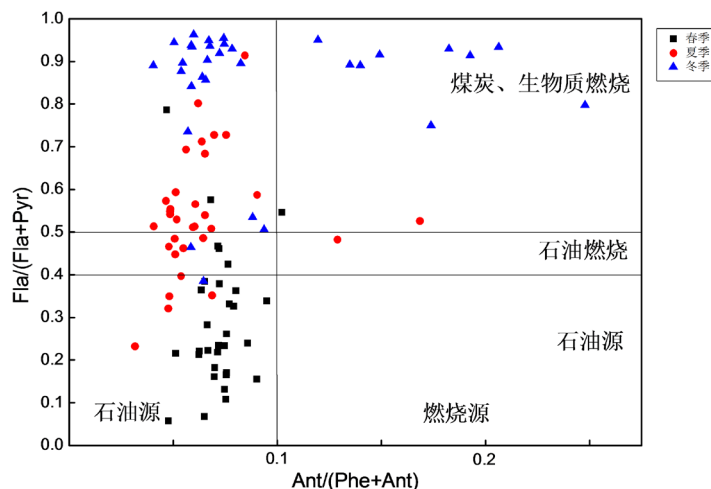


Figure 3. Ant/(Phe+Ant) and Fla/(Fla+Pyr) in Jiaozhou Bay and Qingdao coastal water  
图 3. 胶州湾及青岛近海表层水体中 Ant/(Phe+Ant)和 Fla/(Fla+Pyr)

### 3.3. 表层海水中 PAHs 的生态风险评价

风险熵值法(RQ)是一种较为常用的评估水体、生物体内化学物质潜在生态风险的一种方法, 可以对生态风险进行定量评价[19] [29] [30]。其风险水平计算公式如下:

$$RQ = C_{PAHs} / C_{QV} \quad (1)$$

$$RQ_{NCs} = C_{PAHs} / C_{QV(NCs)} \quad (2)$$

$$RQ_{MPCs} = C_{PAHs} / C_{QV(MPCs)} \quad (3)$$

公式中  $C_{PAHs}$  为环境介质中 PAHs 的质量浓度, ng/L;  $C_{QV}$  表示该相应环境介质中的 PAHs 风险标准值,  $C_{QV(NCs)}$  表示该相应环境介质中的 PAHs 最低风险标准值。 $C_{QV(MPCs)}$  表示该相应环境介质中的 PAHs 最高风险标准值。16 种 PAHs 的  $C_{QV(NCs)}$  和  $C_{QV(MPCs)}$  的值如表 4 所示[17] [19]。其中  $RQ_{PAHs(NCs)}$  是最低风险熵值, 当  $0 < RQ_{\Sigma PAHs(NCs)} < 1$ , 生态环境表现为极低风险, 当  $1 \leq RQ_{\Sigma PAHs(NCs)} < 800$ , 生态环境为中等风险;  $RQ_{PAHs(MPCs)}$  是高风险熵值,  $0 < RQ_{\Sigma PAHs(MPCs)} < 1$ , 环境表现为生态中等风险,  $RQ_{\Sigma PAHs(MPCs)} \geq 1$ , 环境表现为存在高风险。PAHs 的风险分级见表 3。

Table 3. Risk classification of PAHs

表 3. PAHs 的风险分级

Individual PAHs			$\Sigma$ PAHs		
风险分级	$RQ_{PAHs(NCs)}$	$RQ_{PAHs(MPCs)}$	风险分级	$RQ_{\Sigma PAHs(NCs)}$	$RQ_{\Sigma PAHs(MPCs)}$
低风险	0~1		极低风险	0~1	
			低风险	$\geq 1; < 800$	0
中等风险	$\geq 1$	$< 1$	中等风险 1	$\geq 800$	0
			中等风险 2	$< 800$	$\geq 1$
高风险		$\geq 1$	高风险	$\geq 800$	$\geq 1$

根据风险熵值的计算公式得出胶州湾及青岛近海水体中春、夏和冬三个季节 PAHs 的  $RQ_{NCs}$  和  $RQ_{MPCs}$  的平均值, 如表 4 所示。在春季表层水体中 Phe 的最高风险熵值  $RQ_{MPCs}(2.7 \text{ ng/L}) \geq 1$ , 表明海水中的 Phe 存在较高的风险; 而其他的 15 种 PAHs 的  $RQ_{MPCs}$  值均  $< 1$ , 而  $RQ_{NCs} \geq 1$  表明春季海水中 Nap、Acy、Ace、Flo、Ant、Fla、Pyr、BaA、Chr、BbP、BkF、BaP、InP、DBahA、BghiP 均处于中等风险; 在春季的  $RQ_{\Sigma PAHs(NCs)}(347.7 \text{ ng/L}) < 800$ , 而  $RQ_{\Sigma PAHs(MPCs)}(5.9) > 1$ , 表明春季水体中 PAHs 整体处于中等风险。发现在夏季和冬季的  $RQ_{NCs}$ 、 $RQ_{MPCs}$  值与春季具有类似的规律, 表明在该区域 PAHs 生态风险未体现出明显的季节性变化规律。总体上来看胶州湾及青岛近海表层水体中已经普遍受到 PAHs 的污染, 并且对生态对环境产生中等强度的生态风险, 而其中 Phe 处于较高的生态风险, 应该引起重视。

**Table 4.** Average RQNCs and RQMPCs of PAHs in Jiaozhou Bay and Qingdao coastal water

**表 4.** 胶州湾及青岛近海表层水体中 PAHs 的  $RQ_{NCs}$  和  $RQ_{MPCs}$  的平均值

PAH	$C_{QV(NCs)}(\text{ng/L})$	$C_{QV(MPCs)}(\text{ng/L})$	春季(ng/L)		夏季(ng/L)		冬季(ng/L)	
			$RQ_{NCs}$	$RQ_{MPCs}$	$RQ_{NCs}$	$RQ_{MPCs}$	$RQ_{NCs}$	$RQ_{MPCs}$
Nap	12	1200	1.1	0	0.1	1	1.3	0
Acy	0.7	70	2.1	0	1.1	0	4.7	0
Ace	0.7	70	6.1	0.1	6.6	0.1	5.1	0.1
Flo	0.7	70	30.5	0.3	46.4	0.5	22.4	0.2
Phe	3	30	27.3	2.7	20.2	2	19.3	1.9
Ant	0.7	70	8.8	0.1	5.4	0.1	8.6	0.1
Fla	3	300	0.9	0	0.6	0	6.6	0.1
Pyr	0.7	70	7.6	0.1	2.3	0	4.1	0
BaA	0.1	10	43.4	0.4	10.1	0.1	31.9	0.3
Chr	3.4	340	2.9	0	1.3	0	4.4	0
BbP	0.1	10	45	0.4	5.8	0.1	24.1	0.2
BkF	0.4	40	35.6	0.4	15.3	0.2	0	0
BaP	0.5	50	44.2	0.4	12.3	0.1	16.5	0.2
InP	0.5	50	10.7	0.1	0	0	8	0.1
DBahA	0.4	40	2.3	0	0	0	4.1	0
BghiP	0.3	30	80.3	0.8	19.2	0.2	13.4	0.1
$\Sigma PAHs$			347.7	5.9	146.8	3.3	173.4	3.5

#### 4. 结论

胶州湾及青岛近海表层水体中,  $\Sigma PAHs$  在春季和冬季的含量高, 在夏季含量少。与其他地区表层海水中 PAHs 的浓度相比处于中等污染水平; 与该海域之前的研究结果对比, 发现表层海水中 PAHs 的浓度有逐年增加的趋势。多环芳烃的组成特征呈现 2-3 环含量高, 4-6 环的含量较少。来源分析表明, 胶州湾及青岛近海海域表层海水中的 PAHs 春季的主要输入源是石油源, 夏季和冬季为石油源和燃烧源的混合来源。风险熵值法评估结果表明, 胶州湾及青岛近海表层海水中 Phe 存在较高的生态风险, 其它 15 种 PAHs 的风险处于中等水平; 春、夏、冬季节差异不大。



## 参考文献

- [1] 韩彬, 蒋凤华, 李培昌, 张新庆, 宋转玲, 王小如. 南黄海中部海水、间隙水和沉积物中多环芳烃的分布及源分析[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(2): 233-242.
- [2] Li, W., Shen, G., Yuan, C., Wang, C., Shen, H., Jiang, H., *et al.* (2016) The Gas/Particle Partitioning of Nitro- and Oxy-Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Northern China. *Atmospheric Research*, **172-173**, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.12.008>
- [3] Niu, L., Cai, H., Van Gelder, P.H.A.J.M., Luo, P., Liu, F. and Yang, Q. (2018) Dynamics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Water Column of Pearl River Estuary (China): Seasonal Pattern, Environmental Fate and Source Implication. *Applied Geochemistry*, **90**, 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.12.014>
- [4] 刘岩, 张祖麟, 洪华生. 厦门西港表层海水中多环芳烃(PAHs)含量分布特征及来源分析[J]. 海洋通报, 1999, 18(4): 38-43.
- [5] Zhang, D., Liu, J., Jiang, X., Cao, K., Yin, P. and Zhang, X. (2016) Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of PAHs in Surface Sediments from the Luan River Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, **102**, 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.10.043>
- [6] 聂利红, 刘宪斌, 降升平, 田胜艳, 张文亮, 张福, 等. 天津高沙岭潮间带泥螺体内多环芳烃的质量分数及富集特征[J]. 中山大学学报, 2008, 47(z1): 106-110.
- [7] Harris, K.A., Yunker, M.B., Dangerfield, N. and Ross, P.S. (2011) Sediment-Associated Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in Coastal British Columbia, Canada: Concentrations, Composition, and Associated Risks to Protected Sea Otters. *Environmental Pollution*, **159**, 2665-2674. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.033>
- [8] Pan, J., Yang, Y., Taniyasu, S., Yeung, L.-W., Falandysz, J. and Yamashita, N. (2012) Comparison of Historical Record of PCDD/Fs, Dioxin-Like PCBs, and PCNs in Sediment Cores from Jiaozhou Bay and Coastal Yellow Sea: Implication of Different Sources. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **89**, 1240-1246. <https://doi.org/10.1007/s00128-012-0836-z>
- [9] Zhang, P., Su, Y., Liang, S.-K., Li, K.-Q., Li, Y.-B. and Wang, X.-L. (2017) Assessment of Long-Term Water Quality Variation Affected by High-Intensity Land-Based Inputs and Land Reclamation in Jiaozhou Bay, China. *Ecological Indicators*, **75**, 210-219. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.035>
- [10] 陈金瑞, 陈学恩. 近70年胶州湾水动力变化的数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2012, 34(6): 30-41.
- [11] 李先国, 阎国芳, 周晓, 魏新运, 王岩, 刘金燕. 固相萃取-高效液相色谱-荧光检测法测定海水中的多环芳烃[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(5): 1087-1092.
- [12] Yamada, M., Takada, H., Toyoda, K., Yoshida, A., Shibata, A., Nomura, H., *et al.* (2003) Study on the Fate of Petroleum-Derived Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and the Effect of Chemical Dispersant Using an Enclosed Ecosystem, Mesocosm. *Marine Pollution Bulletin*, **47**, 105-113. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00102-4](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00102-4)
- [13] 李海燕, 段丹丹, 黄文, 冉勇. 珠江三角洲表层水中多环芳烃的季节分布、来源和原位分配[J]. 环境科学学报, 2014, 34(12): 2963-2972.
- [14] 田蕴, 郑天凌, 王新红. 厦门西港表层海水中多环芳烃(PAHs)的含量、组成及来源[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 50-55.
- [15] 罗孝俊, 陈社军, 余梅, 麦碧娟, 盛国英, 傅家谟. 多环芳烃在珠江口表层水体中的分布与分配[J]. 环境科学学报, 2008, 29(9): 2385-2391.
- [16] Ren, H., Kawagoe, T., Jia, H., Endo, H., Kitazawa, A., Goto, S., *et al.* (2010) Continuous Surface Seawater Surveillance on Poly Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Mutagenicity of East and South China Seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **86**, 395-400. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.09.025>
- [17] 张玉凤, 吴金浩, 宋永刚, 杨萌, 赵海勃, 李楠, 等. 辽东湾海水中PAHs分布与来源特征及风险评估[J]. 环境科学研究, 2017, 30(6): 892-901.
- [18] Men, B., He, M., Tan, L., Lin, C. and Quan, X. (2009) Distributions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Daliao River Estuary of Liaodong Bay, Bohai Sea (China). *Marine Pollution Bulletin*, **58**, 818-826. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.01.022>
- [19] Li, P., Cao, J., Diao, X., Wang, B., Zhou, H., Han, Q., *et al.* (2015) Spatial Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Seawater from Yangpu Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, **93**, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.02.015>
- [20] 郎印海, 贾永刚, 刘宗峰, 高振会, 王鑫平. 黄河口水中多环芳烃(PAHs)的季节分布特征及来源分析[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(4): 640-646.

- [21] Wu, Y.-L., Wang, X.-H., Li, Y.-Y. and Hong, H.-S. (2011) Occurrence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Seawater from the Western Taiwan Strait, China. *Marine Pollution Bulletin*, **63**, 459-463. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.03.008>
- [22] 韩彬, 辛明, 陈发荣, 李培昌, 宋转玲, 王小如. 胶州湾东北部海域生态环境污染状况研究[J]. 岩矿测试, 2009, 28(6): 524-528.
- [23] 李先国, 邓伟, 周晓, 唐旭利, 魏新运, 王岩. 青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析[J]. 环境科学学报, 2012, 33(3): 741-745.
- [24] 孙晓霞, 松孙, 赵增霞, 沈志良. 胶州湾营养盐浓度与结构的长期变化[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(5): 662-669.
- [25] Yan, B., Abrajano, T.A., Bopp, R.F., Chaky, D.A., Benedict, L.A. and Chillrud, S.N. (2005) Molecular Tracers of Saturated and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Inputs into Central Park Lake, New York City. *Environmental Science & Technology*, **39**, 7012-7019. <https://doi.org/10.1021/es0506105>
- [26] Bouloubass, I., Fillaux, J. and Saliot, A. (2001) Hydrocarbons in Surface Sediments from the Changjiang (Yangtze River) Estuary, East China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **42**, 1335-1346. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00149-7](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00149-7)
- [27] Readman, J.W., Fillmann, G., Tolosa, I., Bartocci, J., Villeneuve, J.P., Catinni, C. and Mee, L.D. (2002) Petroleum and PAH Contamination of the Black Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **44**, 48-62. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00189-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00189-8)
- [28] Yunker, M., Macdonald, R., Vingarzan, R., Mitchell, R., Goyette, D. and Sylvestre, S. (2002) PAHs in the Fraser River Basin: A Critical Appraisal of PAH Composition. *Organic Geochemistry*, **33**, 489-515. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5)
- [29] Kalf, D.F., Crommentuijn, T. and Plassche, E.J. (1997) Environmental Quality Objectives for 10 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **36**, 89-97. <https://doi.org/10.1006/eesa.1996.1495>
- [30] Wang, Y., Wang, J., Mu, J., Wang, Z., Yao, Z. and Lin, Z. (2014) Aquatic Predicted No-Effect Concentration for Three Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Probabilistic Ecological Risk Assessment in Liaodong Bay of the Bohai Sea, China. *Environmental Science and Pollution Research International*, **21**, 148-158. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1597-x>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-1557, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aac@hanspub.org](mailto:aac@hanspub.org)