

杨志辉,张利兰,杨锐.全球海洋表层水体中多环芳烃的分布特征[J].中国环境科学,2025,45(1):379-389.

Yang Z H, Zhang L L, Yang R. Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in global marine surface waters [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):379-389.

全球海洋表层水体中多环芳烃的分布特征

杨志辉¹,张利兰^{1,2*},杨锐¹ (1.重庆大学,三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400044; 2.重庆大学,煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044)

摘要: 本文采用文献调研(Meta-analysis)方法,探讨全球海洋表层水中 3 种多环芳烃(Phe,Pyr 和 BbF)的分布特征及其影响因素.研究结果显示, Phe,Pyr 和 BbF 在太平洋浓度(16.885,15.787 和 0.642ng/L)显著高于其他大洋,且与离岸距离、纬度、叶绿素、温度和盐度等因素显著相关.数据表明,海洋 PAHs 与能源消耗量显著正相关($P<0.05$).本研究揭示了 PAHs 在全球海洋中的分布规律,为制定有效的海洋污染防控策略提供了科学依据.

关键词: 多环芳烃; 分布; 海洋; 能源

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)01-0379-11

Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in global marine surface waters. YANG Zhi-hui¹, ZHANG Li-lan^{1,2*}, YANG Rui¹ (1.Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2.State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China). *China Environmental Science*, 2025,45(1): 379~389

Abstract: This study used a meta-analysis approach to examine the distribution of three polycyclic aromatic hydrocarbons (Phe, Pyr and BbF) in the surface water of the world's seas as well as the factors that influence them. According to the findings, the Pacific Ocean had significantly greater concentrations of Phe, Pyr and BbF (16.885, 15.787, and 0.642ng/L) than the other oceans. These concentrations were also significantly linked with salinity, temperature, latitude, distance from coast, and chlorophyll. According to the findings, energy consumption and oceanic PAHs had a substantial and positive correlation ($P<0.05$). The distribution pattern of PAHs in the world's oceans is shown by this study, which offers a scientific foundation for the development of practical methods for the prevention and management of marine pollution.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons; distribution; oceans; energy

多环芳烃(PAHs)广泛存在于大气^[1]、水^[2]、土壤^[3]和沉积物^[4]等各类环境介质中.许多 PAHs 以其高毒性、致癌性和致突变性而闻名,对人类^[5]和其他动物的健康构成严重威胁,并影响生态环境.美国环保署根据 PAHs 的毒性和流行性,将 16 种 PAHs 列入优先控制的污染物名单,以加强其管理和控制^[6].

PAHs 通过人为来源和自然来源进入水生生态系统.人为来源主要是化石燃料的不完全燃烧、城市径流、石油加工和渗漏或意外漏油等^[7-9],构成了 PAHs 进入水生生态系统的主要来源.随着社会经济趋势的发展,人为来源在时间和空间大尺度上显得尤为突出^[10].例如,煤炭、石油和生物质的不完全燃烧过程,促进 PAHs 的产生^[11-12].在全球范围内,据估计,直接使用生物质燃料进行烹饪的人数约有 30 亿^[13],这一庞大的基数导致了大量 PAHs 被释放到大气中.早在 2007 年全球大气中排放的 16 种优控 PAHs 总量就

已达到 504Gg^[14],并且全球每月大气中的 PAHs 对海洋的输入量为 0.09Tg^[15].人为活动产生的 PAHs 通过大气或洋流的远距离运输^[16-18],得以在全球范围内广泛传播,同时海洋与大气之间的相互作用对 PAHs 在海洋中的分布和浓度起到了重要的调节作用^[19-20].使得海洋成为了 PAHs 的一个关键汇集地^[21].相比之下,自然来源的 PAHs 则相对有限.虽然自然过程如火山爆发、森林火灾等也会释放一定量的 PAHs,但其贡献远不及人为活动显著.因此,在探讨海洋中的 PAHs 时,人为来源的 PAHs 更应引起重视.

在不同的海域中,PAHs 的浓度和分布呈现出各自的特点.太平洋、印度洋和南大洋中 Σ_{23} PAHs 浓度分别为 4,2.7 和 2.3ng/L,其中三至四环 PAHs 占据了

收稿日期: 2024-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42177363)

* 责任作者, 副教授, lilanzhang@cqu.edu.cn

总浓度的绝大部分,达到了 94%^[22].而在开阔的大西洋中 Σ_{10} PAHs 浓度为 0.058~1.07ng/L,并且以 Phe 和 Pyr 为主^[23-24].此外,从北太平洋至北冰洋海水中 Σ_9 PAHs 浓度范围为 1.8~16ng/L^[19].在北极海域中, Σ_{16} PAHs 平均浓度为 48.5ng/L^[25],而在南极海水中 Σ_{16} PAHs 浓度为 0.6~6.3ng/L^[26].

海洋中 PAHs 浓度虽然较低,但由于它们具有生物蓄积性^[27]和高毒性,能够沿着食物链进行生物放大,对海洋生物和生态系统都造成严重威胁^[28].海洋生态系统是全球最重要的生态系统之一,影响着全球生态系统的稳定和安全,关乎人类的生存和发展.在过去几十年中,城市化导致大量污染物通过河流径流和长距离大气输送排放到海洋生态系统中^[29-30],并且随着能源消费结构的优化,更多的可再生能源被利用^[31],而不是传统能源(煤炭和石油),这可能会影响 PAHs 的环境水平.尽管关于海洋水体中 PAHs 的调查已有许多,大气运输机制被广泛研究^[32-33],但鲜有研究在全球规模上讨论海水 PAHs 分布特征,并将其与能源消耗量相结合.本文基于文献调研,归纳总结海洋表层 PAHs 的分布特征,揭示其全球规模的分布以及与能源消耗量之间的关系,为海洋中 PAHs 的风险评价提供更全面的数据支撑,为制定有效的污染防控策略提供科学支持.

1 文献收集和数据处理

1.1 数据收集

本文在 Web of science、Elsevier ScienceDirect、SpringerLink 和 Wiley Online Library 数据库中以海洋(ocean)、多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons)和表层水(surface water)为关键词搜索近 10a(2013~至今)的文献,对收集的文献进行筛选,剔除支撑材料中没有提供站位确切经纬度或者海水溶解相单体 PAHs 浓度的文献,并统一 PAHs 单位(ng/L),共收集 23 篇文献^[26,34-55],总计 637 个站位,这些数据包括站位的经纬度、叶绿素、温度、盐度和单体 PAHs 的浓度.选取三环菲(Phenanthrene, Phe, 637 个站)、四环芘(Pyrene, Pyr, 637 个站)和五环苯并(b)荧蒽(Benzo(b)fluorene, BbF, 250 个站)进行分布特征分析, Phe 和 Pyr 因其高毒性以及在环境中的高丰度而被选为目标物质^[56], BbF 则是因为在收集的五环 PAHs 中检出率最高.

根据 2022 年发布的《bp 世界能源统计年鉴》中的数据,收集各国一次能源消耗量.

1.2 数据处理

由于数据离散程度大,且部分 PAHs 浓度小于 1ng/L 或零值,将 PAHs 浓度加一处理保证对数处理后数值非负数,并根据对数处理数据绘制图片.为了计算 PAHs 年排放量,将收集的煤炭和石油消耗量,根据换算系数,统一化为千克标准煤当量(kg ce)^[57],由于燃料来源、燃烧设施等条件差异较大,各地区和国家之间的排放因子差异很大,文献中报告的数据不足以编制各个区域内每个国家的排放因子数据库,采用统一的煤的排放因子^[58]计算 3 种 PAHs 的年排放量(t/a).

$$L(t/a) = C(\text{kg ce/a}) \times F(\text{mg/t}) \times 10^{-12} \quad (1)$$

式中: L 、 C 和 F 分别代表 PAHs 年排放量、能源消耗量换得到的标准煤当量和煤的排放因子.

使用 R 4.3.3 绘制纬度与 PAHs 的关系图, ArcGIS 10.8.1 绘制 PAHs 分布图以及能源消耗量图,其余图片由 Origin 2023 绘制.统计分析使用 SPSS 26 和 Origin 2023,任何 $P < 0.05$ 都被认为具有统计学意义.

2 结果与分析

2.1 全球尺度下 PAHs 分布特征

将收集的 PAHs 浓度从低到高排列四等分, 3 种 PAHs 在全球海洋表层海水的分布如图 1 所示, Phe 和 Pyr 分布于全球五大洋中,其中 Phe 的浓度范围为 0.002~299ng/L,平均值为 9.767ng/L; Pyr 的浓度范围为 0.001~336ng/L,平均值为 7.854ng/L; 而 BbF 分布于除印度洋之外的其他大洋中,浓度范围为 0.003~10ng/L,平均值为 0.781ng/L. 3 种 PAHs 在表层海水溶解相中平均浓度排列为 Phe>Pyr>BbF,这可能与它们的物理性质有关, PAHs 水溶性和蒸气压会随着 PAH 单体的环数与分子量的增加而降低^[59],较高环的 PAHs 具有较高的辛醇-水分配系数和有机质分配系数,更容易吸附在颗粒物上,因此海水溶解相高环的 PAHs 浓度较低.

从全球尺度来看, 3 种 PAHs 在太平洋区域平均浓度最高 (Phe: 16.885ng/L, Pyr: 15.787ng/L, BbF: 0.642ng/L), 主要集中于中国边缘海域(红色站位所示).这可能是因为距离陆地较近,有报道称,陆地向

沿海水域排放 PAHs 的速率可达 1 亿 t/a^[60], 河流输入将 PAHs 排放到近海水域, 因此, 与远洋水域相比, 近海受到来自陆地源的 PAHs 污染严重^[61]. 由于 PAHs 的高水溶性, 低分子量的 PAHs 溶解在水中, 并可以通过水团的运动被输送到更远的地区, 如温带和极地地区. 高分子量的 PAHs 很少溶于水, 并倾向于与颗粒物结合. 因此, 远离陆地的站位中 PAHs 浓度普遍较低(绿色、蓝色站位). 全球海洋中 PAHs 的空

间变化清楚地表明了发展中国家对海洋 PAHs 污染的贡献, 与欧洲、北美和澳大利亚相比, 亚洲附近的海域 PAHs 含量更高. 而人口的增加、对生物燃料和石油能源的依赖以及缺乏大气中减少 PAHs 的措施使发展中国家的 PAHs 排放量激增. 在未来几年, 城市化和人口增长的加剧将促使 PAHs 源源不断地进入亚洲、非洲和拉丁美洲的沿海海洋环境中^[62], 这可能会增加 PAHs 对海洋生态系统的潜在风险.

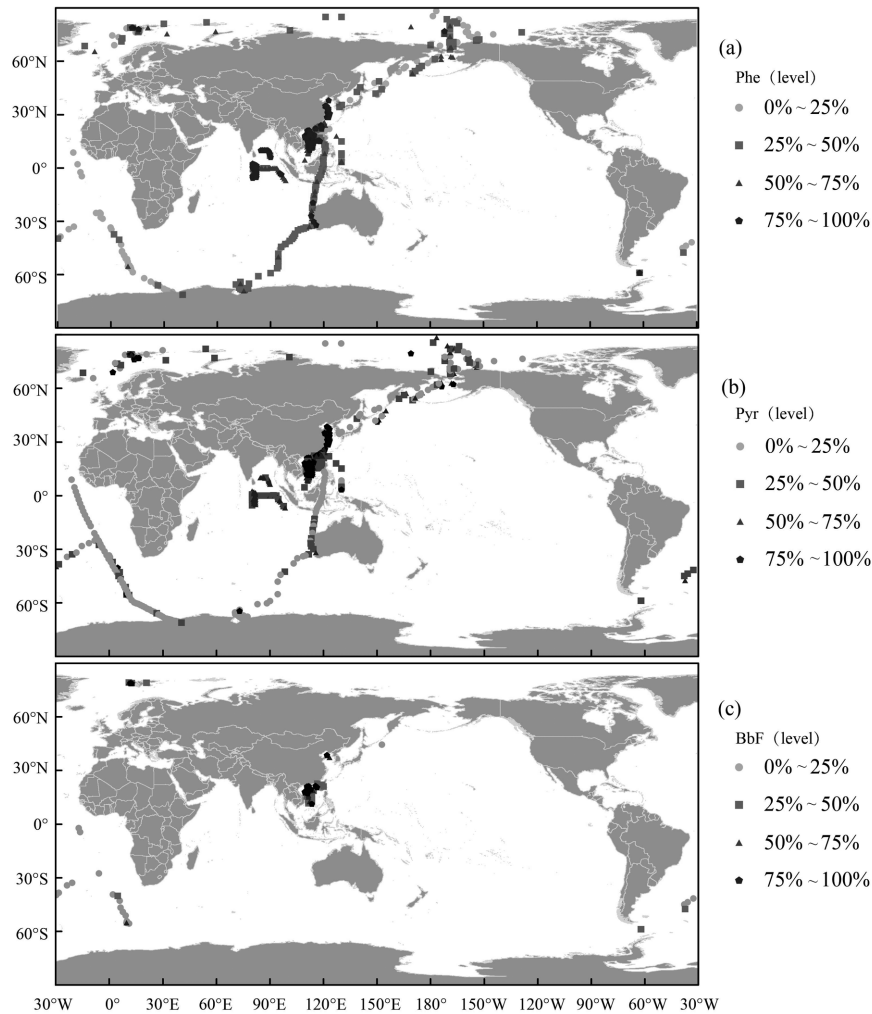


图 1 PAHs 在全球海水的分布

Fig.1 Distribution of PAHs in seawater worldwide

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2016)1665 号的标准地图制图, 底图边界无修改; (a):Phe; (b):Pyr; (c):BbF; 绿色点位表示该站位 PAHs 浓度排列顺序位于 0~25%, 蓝色为 25%~50%, 黄色为 50~75%, 红色为 75~100%; 所有站位 PAHs 浓度均高于检出限

2.2 五大洋中 PAHs 分布特征

海洋约占全球地表面积的 71%, 主要由太平洋、大西洋、印度洋、北冰洋和南冰洋组成. 太平洋是世界上最大的洋, 约占海洋总面积的 46%; 大西洋是世界第二大洋, 约占海洋总面积的 24%, 北面连接北冰

洋, 南面则以 66°S 与南冰洋接连; 印度洋是世界的第三大洋, 位于亚洲、大洋洲、非洲和南极洲之间, 约占海洋总面积的 20%; 北冰洋是世界最小最浅和最冷的大洋; 南冰洋是世界第五个被确定的大洋, 是世界上唯一完全环绕地球却没有被大陆分割的大洋.

了解 PAHs 在五大洋中分布情况,有助于进一步认识海洋中 PAHs 分布特征。

图 2 显示了 3 种 PAHs 在五大洋中的分布差异,Phe、Pyr 和 BbF 最高平均浓度均在太平洋,分别为 16.885,15.787 和 0.642ng/L.最低平均浓度出现海域不一致,Phe 在大西洋平均浓度最低(0.212ng/L),Pyr 在南冰洋平均浓度最低(0.108ng/L),BbF 在南冰洋平均浓度最低(0.013ng/L).PAHs 浓度在五大洋排列顺序为 Phe>Pyr>BbF.单因素方差分析显示,Phe 和 Pyr 在太平洋中浓度显著高于其他四大洋,印度洋、大西洋、北冰洋和南冰洋中浓度分布没有显著差异.不同国家和地区工业化程度、能源利用方式的差异,可能会影响 PAHs 的

排放量.在太平洋发现 3 种 PAHs 的浓度最高,可能受到大陆源的影响,例如来自澳大利亚、东南亚国家和中国的废气和污水排放,携带着 PAHs 进入海洋^[22].研究表明,在中国流出的 PAHs 总量(8092t)中,有 69.9%到达海上环境(4664t)和南海(991t)^[63].此外,中国大陆的一次能源消耗量高达 157.65EJ,比其他国家高出 1~2 个数量级,这表明太平洋中 PAHs 浓度显著高于其他大洋,可能与能源消耗量密切相关.相比之下,在远离人类活动的南冰洋,检测到的 PAHs 浓度则相对较低.并且发现 Phe 的平均浓度比大西洋高,这一现象表明,低纬度地区的人类活动排放的 PAHs 可能通过大气或洋流等途径进行了长距离的传输,最终抵达了南冰洋.

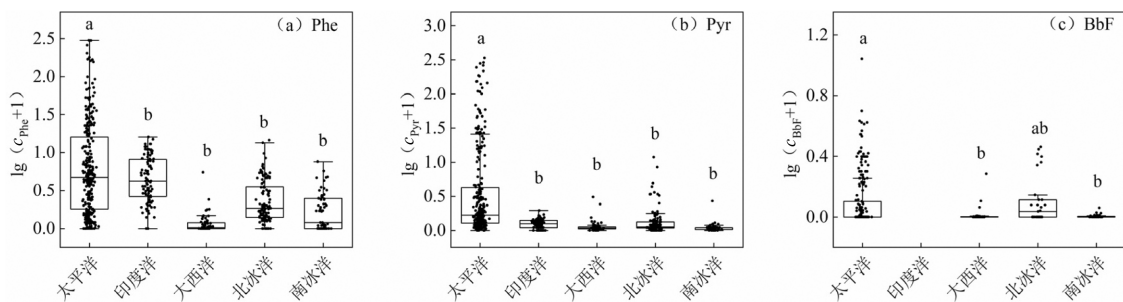


图 2 3 种 PAHs 大洋分布差异图

Fig.2 Differences in the oceanic distribution of the three PAHs

图中不同小写字母代表差异显著($P < 0.05$);(a):Phe;(b):Pyr;(c):BbF

2.3 中国边缘海中 PAHs 分布特征

太平洋中 PAHs 浓度最高,收集的文献中太平洋站点集中于西部(图 1),该区域主要为中国边缘海(黄

海、东海和南海),它们毗邻中国大陆,是陆地和远洋的重要缓冲带,本文进一步分析 3 种 PAHs 在中国边缘海的浓度分布差异。

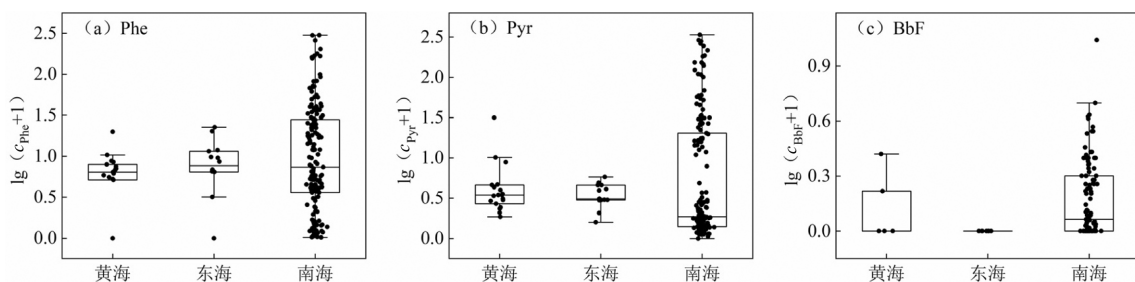


图 3 3 种 PAHs 在中国边缘海分布差异图

Fig.3 Differences in the distribution of three PAHs in the Chinese Marginal Sea

(a):Phe;(b):Pyr;(c):BbF

Phe 在黄海浓度范围为 0~18.85ng/L,平均值为 5.419ng/L,东海浓度范围 0~21.61ng/L,平均值为 7.978ng/L,南海浓度范围为 0.02~299ng/L,平均值为 25.715ng/L.Pyr 在黄海浓度范围为 0.86~30.51ng/L,

平均值为 4.383ng/L,东海浓度范围 0.59~4.786ng/L,平均值为 2.55ng/L,南海浓度范围为 0~336ng/L,平均值为 24.979ng/L.BbF 在黄海浓度范围为 0~1.63ng/L,平均值为 0.456ng/L,在东海的浓度低于检出限,南海

浓度范围为 0~10ng/L,平均值为 0.723ng/L.

3 种 PAHs 在边缘海的浓度分布无显著差异(图 3),并且均在南海平均浓度最高,不同的是,Phe 在黄海平均浓度最低,Pyr 和 BbF 在东海平均浓度最低.在 3 个海域内,3 种 PAHs 平均浓度从高到低排列顺序同样为 Phe>Pyr>BbF.3 种 PAHs 在南海的分布最多,这可能是由于南海北部毗邻中国工业化程度最高、经济最具活力的地区之一珠江三角洲^[64],它包括香港、深圳和广州等大城市.这些地区的污染物可能通过珠江口进入南海.此外,南海还具有季风气候的特点,冬季东北风较强,夏季西南风相对较弱,带来了来自中国和东南亚的空气污染物^[65].

3 讨论

3.1 自然因素对海洋 PAHs 分布的影响

3.1.1 离岸距离对 PAHs 分布的影响 对 3 种 PAHs 与离岸距离进行线性拟合,结果如图 4 所示.3 种 PAHs 的浓度与离岸距离均为显著负相关性($P<0.001$),这很可能是多重因素综合作用的结果.首先,PAHs 的主要来源为陆地的人类活动^[66],如化石燃料燃烧及工业排放,使得近岸海域的 PAHs 浓度相对较高.其次,自然因素如风速和洋流^[45]等,是 PAHs 在海洋环境中扩散和稀释过程的重要因素,可以将陆源 PAHs 输送至偏远地方.Zhang 等^[22]发现 PAHs 浓度随海岸线距离的增加呈现明显的线性下降($P<0.05$),表明海水中的 PAHs 污染受到大陆排放和河流输入的高度影响.当大陆外流的影响增强时,近岸海域中气态 PAHs 浓度增加,促进 PAHs 输送至海水中,相反,当远离大陆时,大陆外流的影响减弱,气相 PAHs 浓度降低,海水中的 PAHs 过度挥发于大气中,导致在开阔海域发现的较高挥发量^[67],降低海水中 PAHs 浓度.这些原因可能导致 PAHs 浓度随离岸距离增加而降低.从整体来看,3 种 PAHs 的浓度排序为 Phe>Pyr>BbF,这与前文中在全球尺度,五大洋或中国边缘海中 PAHs 浓度排序一致.与高分子量 PAHs 相比,低分子量 PAHs 的辛醇-水分配系数更低,水溶性更高,在海水中被检测到相对较高的丰度^[68].相反,高分子量的 PAHs 由于具有较高的辛醇-水分配系数和较低的亨利定律常数^[69],水溶性低,在海洋运输或在大气运输过程中更倾向于与颗粒物结合,并最终沉积到沉积物中^[70].这解释了在海水中,随着

PAHs 环数的增加,浓度递减的现象.

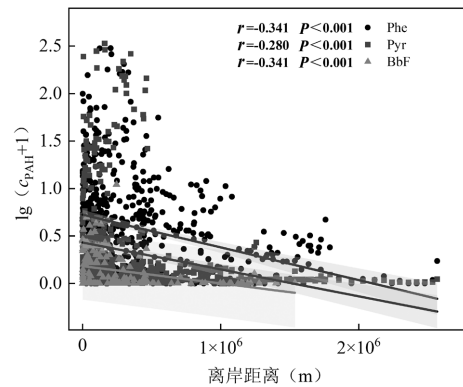


图 4 PAHs 与离岸距离的关系

Fig.4 The connection between PAHs and shoreline distance

3.1.2 纬度对 PAHs 分布的影响 对 3 种 PAHs 与纬度进行相关性分析,结果如图 5 所示.Phe 和 Pyr 的浓度从赤道向两极显著降低($P<0.001$),但 BbF 的浓度从赤道向北极($P=0.15$)或者南极($P=0.48$)均未发现显著的增减规律.3 种 PAHs 浓度在北半球热带区域 ($16^{\circ}\text{N}\sim 23.5^{\circ}\text{N}$) 达到最高值 (Phe:299ng/L;Pyr:336ng/L;BbF:10ng/L).这或许可以归因于北半球热带区域的人类活动更为频繁和密集,这些地区往往是工业和交通运输活动的主要集中地,会释放出废水、废气和烟尘等,很可能导致 PAHs 浓度远高于其他地区.

人类活动排放的 PAHs,通过大气和洋流进行区域和全球运输.先前研究表明,在描述和解释受季风影响的中低纬度海洋中 PAHs 的分布模式时,不能忽视季节性大气输送的影响^[2].大气会携带来自陆地的 PAHs,在海洋表面与海水进行海-气交换,此过程中,大气干沉积通量取决于悬浮气溶胶中 PAHs 的浓度,还取决于物理化学性质和环境变量(蒸气压、风速和气溶胶沉积到海面的亲和力)^[71].随着纬度的增加,所有 PAHs 的海-气交换均呈现显著的下降趋势,表明 PAHs 在低纬度地区的海空交换比高纬度地区更容易^[48].洋流是影响陆源 PAHs 和其他有机污染物在近海迁移和分布的关键驱动因素^[72].春季在南向的黄海沿岸洋流和东向长江稀释水的相互作用下,陆源 PAHs 可到达 30°N 和 125°E 左右,甚至延伸至 29°N 和 126°E ^[17].位于澳大利亚西侧的 Leeuwin 洋流是全球唯一向极地流动且无上升流的东部边界洋流^[73],受其影响,在公海 ($40\sim 60^{\circ}\text{S}$) 范围内,三环

PAHs 呈向南减少的趋势^[41].在渺无人烟的南冰洋,其北部边界有南极环极洋流(ACC),连接大西洋、印度洋和太平洋^[74].它包含了来自世界不同海洋的混

合物,因此南冰洋中的 PAHs 主要受远距离运输的影响^[41].以上研究表明,PAHs 浓度随纬度的增加而减少可能受到季风和洋流的影响.

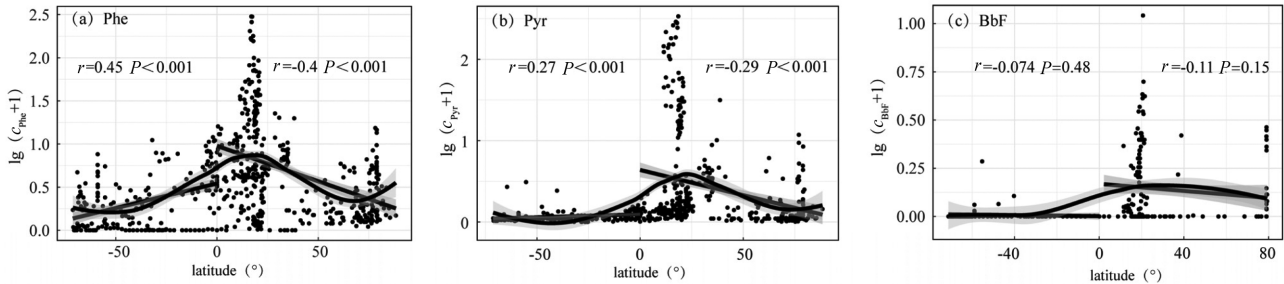


图5 3种PAHs与纬度的关系

Fig.5 Relationship between the three PAHs and latitude

(a):Phe;(b):Pyr;(c):BbF

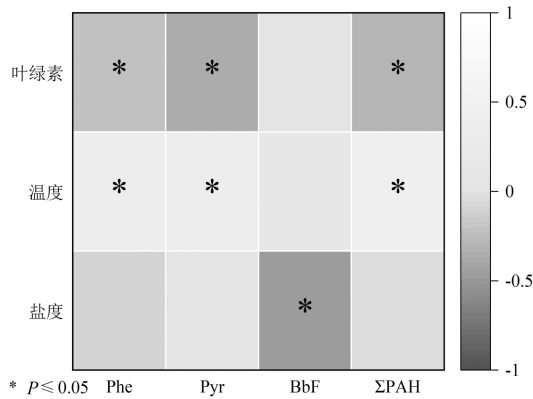


图6 叶绿素、温度和盐度与PAHs相关性热图

Fig.6 Heat map of chlorophyll, temperature and salinity correlations with PAHs

3.1.3 盐度、叶绿素和温度对 PAHs 分布的影响
盐度、叶绿素和温度同样会影响海洋 PAHs 的分布.图6为盐度、叶绿素和温度与 PAHs 的相关性热图,盐度与 BbF 具有显著负相关性($P < 0.05$),叶绿素与 Phe、Pyr 和 Σ_3 PAHs 具有显著负相关性($P < 0.05$),温度与 PAHs 具有显著正相关性($P < 0.05$).由于盐析效应,盐与水分子强烈结合,盐度升高会降低 PAHs 水溶性^[75],可能导致 PAHs 更多地被悬浮颗粒或沉积物吸收,从而降低海水溶解相中的 PAHs 浓度.叶绿素浓度是浮游植物生物量的代表,生物因素对于 PAHs 分布是个不可忽略的因素.在生物降解过程中,三环 PAHs 可作为唯一碳,稳定降解,而四环 PAHs 通过共代谢降解^[76-77].浮游生物通过摄食颗粒物和排便影响 PAHs 的传播^[78],并能通过垂直运输将颗粒物输送到深海^[79],降低表层海水 PAHs 浓度^[80].理论计算表

明,温度升高会增加 PAHs 的水溶性^[75],并且在热带季风地区,海水温度的增加,降雨也会增加^[81],降雨会将大气环境和降尘中的大部分 PAHs 冲入水环境^[82].此外,大气颗粒物的吸附可以增加 PAHs 从大气到海洋的输送通量,研究表明大气颗粒物会显著加速 PAHs 的垂直迁移^[54],导致海洋中 PAHs 浓度升高.

3.2 人为因素对海洋 PAHs 分布的影响

在 2021 年全球国家的一次能源使用量中,中国,美国和印度的能源使用量排列前三(图 7(a)),分别为 157.65,92.97 和 35.43EJ,占全球一次能源使用量比例分别为 26.5%,15.6%和 6%.对中国而言,石油和煤炭的消耗量在一次能源使用量中的占比是最高的,分别为 19.4%和 54.7%;印度同样如此,占比分别为 26.6%和 56.7%;不同的是,石油和天然气的消耗量在美国的一次能源使用量中的占比是最高的,分别为 38.0%和 32.0%.一次能源中生物质、煤炭和石油燃烧是三个最重要的人为 PAHs 排放源^[83],因此中国和印度一次能源使用量中煤炭和石油的高占比,可能会产生大量的 PAHs,导致它们附近海域中 PAHs 浓度较高.

由能源消耗量计算得到的 PAH 年排放量与 Phe、Pyr 和 Σ_3 PAHs 具有显著正相关性(图 7(b)),表明能源消耗量会显著影响海水 PAHs 的分布,能源消耗量高的国家会释放更多的 PAHs,导致周边海域中 PAHs 更高.为了量化能源消耗量与海水 PAHs 浓度的定量关系,基于对数处理的 PAHs 年排放量与海水中 PAHs 浓度的一元线性回归模型($r=0.950, P=$

0.004),将 PAHs 年排放量换算成能源消耗量,得到对数处理的海水 PAHs 浓度与能源消耗量的定量关系式如下所示:

$$\lg(C_{\Sigma_3\text{PAH}} + 1) = 1.41 \cdot \lg\left(\sum_i^n \frac{E_i \cdot k_i}{r_i} \cdot F + 1\right) - 1.48 \quad (2)$$

式中: $C_{\Sigma_3\text{PAH}}$ 表示海水中 3 种 PAHs 浓度之和; E_i 表示第 i 种能源消耗量,EJ; k_i 表示第 i 种能源的折标煤系数,kg ce/kg; r_i 表示第 i 种能源的平均低位发热量,kJ/kg; F 表示煤的排放因子,mg/t; n 表示能源种类数量。

在大洋尺度范围内,周边国家石油和煤炭能源消耗量高的大洋,其海域中 PAHs 浓度会相对较高,这进一步证实了能源消耗量是影响海水中 PAHs 浓

度的一个重要因素.然而,在小尺度范围,如海湾、近岸区域等,季风、洋流等因素对海水 PAHs 分布的影响不可忽视,模型可能无法解释能源消耗量与海水 PAHs 浓度的关系,需要综合考虑多种因素,并收集更多精细尺度的数据来完善和优化相关模型。

全球范围内,PAHs 的来源取决于该国的发展状况和能源结构^[84],发达国家能源利用效率的提高有助于减少 PAHs 的排放,而发展中国家普遍存在的能源危机则会显著增加 PAHs 的排放^[83,85].鉴于能源消耗量与人口和 GDP 相关,对人口、GDP 及人均 GDP 与海水 PAHs 浓度进行相关性分析,结果表明人口、GDP 及人均 GDP 不会显著影响海水中 PAHs 的分布(图 8)。

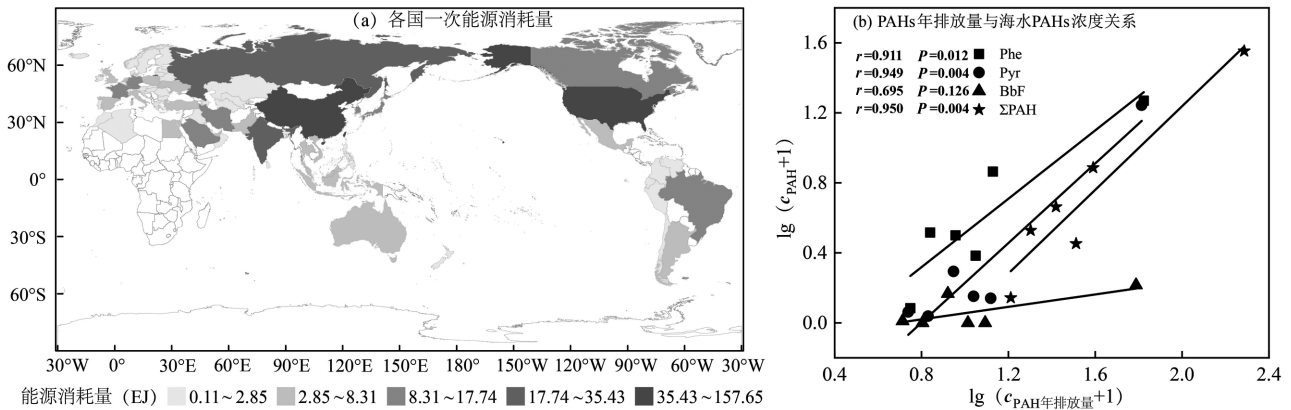


图 7 全球能源消耗量与 PAHs 的关系

Fig.7 Relationship between global energy consumption and PAHs

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2016)1665 号的标准地图制图,底图边界无修改;(a):各国一次能源消耗量;(b):由能源消耗量计算得到的 PAHs 与海水 PAHs 浓度关系

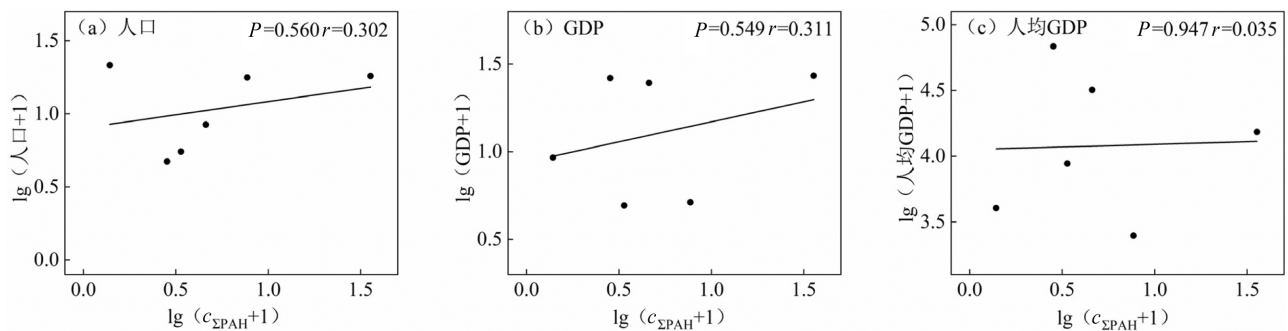


图 8 人口、GDP 和人均 GDP 与 PAHs 关系

Fig.8 Population, GDP and GDP per capita in relation to PAHs

(a):人口;(b):GDP;(c):人均 GDP

已有的研究表明,能源对不同环境中 PAHs 的分布有显著影响.在巴基斯坦城市大气环境中发现,使

用柴油驱动发电机作为替代电源,导致了室内环境中 PAHs 的高含量,并且天然气车辆转向汽油/柴油

驱动车辆也增加了室外 PAHs 的浓度^[86].中国大气 PAHs 的主要来源为煤炭燃烧和汽车尾气^[87].亚洲边缘海域的大气 PAHs 与陆地排放活动密切相关,受到大陆外流的显著影响^[88].它们经过远距离传输,通过海-气交换,进入海洋之中.大陆河流中 PAHs 主要来源为燃煤和汽车尾气排放^[89],经过洋流输送进入海洋.而且,大陆边缘沉积物中的 PAHs 来源受附近区域不同能量结构下,不同陆源 PAHs 排放特征的影响^[90].沉积物经过再重悬,释放颗粒物,而吸附 PAHs 颗粒物,经过生物泵、微生物泵和物理泵后分解,PAHs 被释放回海水中^[91].因此在海洋环境中发现石油或者煤燃烧不仅是边缘海域海水中 PAHs 的主要来源^[92-93],同样也是远洋海水中 PAHs 主要来源^[22].以上研究表明,能源使用量在一定程度上可以影响 PAHs 在大洋海水内的分布情况.鉴于煤炭燃烧和石油使用是 PAHs 排放的主要来源之一,并且排放的 PAHs 可以通过大气传输和河流输送远距离传播进入海洋,因此政策制定者可以积极推动能源结构的优化和转型,鼓励并支持清洁能源(如太阳能、风能、水能等)的开发和利用.特别是在交通和工业部门,通过引入更严格的排放标准、提供清洁能源补贴、建设充电站等措施,以减少 PAHs 的排放,进而减轻对海洋环境的压力.

4 结语

探究了全球海洋表层 PAHs 的分布特征.首先,五大洋中的 PAHs 分布有所不同,太平洋中的浓度显著高于其他四大洋.其次,Phe、Pyr 和 BbF 随着离岸距离的增加,PAHs 的浓度呈现出明显的下降趋势.此外,PAHs 的分布与纬度具有显著负相关性,纬度越高,PAHs 浓度越低.探究影响海洋中 PAHs 分布的因素时,盐度、叶绿素和温度显著影响海洋 PAHs 的分布,而能源消耗量可能是关键因素.这些过程的综合作用共同塑造了海洋中 PAHs 的分布格局.

本研究虽然对全球海洋表层 PAHs 的分布特征进行了探究,但仍存在一些不足之处.首先,受限于数据获取和监测站点分布不均等因素,未能全面覆盖全球所有海域,特别是某些偏远海域和深海区域的 PAHs 分布状况仍缺乏充分了解.这可能导致对全球海洋 PAHs 污染的整体认识仍存在一定程度的偏差.本研究虽然分析了能源对 PAHs 分布的影响,但未能

充分考虑气候变化、季风和海洋环流等自然因素对 PAHs 分布的影响.气候变化可能导致海洋环境发生一系列变化,进而影响 PAHs 的迁移和转化过程.因此,未来研究需要综合考虑自然因素和人类活动对海洋 PAHs 分布的共同影响.建议加强全球海洋 PAHs 监测网络建设,提高数据覆盖范围和准确性,综合考虑自然因素和人类活动对海洋 PAHs 分布的共同影响.加强跨学科合作研究,将气候变化、海洋环流等自然因素纳入研究范围,全面评估其对海洋 PAHs 分布的影响机制,为制定应对全球气候变化和海洋污染的综合策略提供有力支撑.

参考文献:

- [1] Matos J, Silveira C, Cerqueira M. Particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in a rural background atmosphere of southwestern Europe [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,787:147666.
- [2] Zhang L, Zhang L, Shi Y, et al. PAHs in the monsoonal open ocean: Homogeneous spatial pattern and wind-driven significant seasonal variations [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023,454:131462.
- [3] Ren K, Wei Y, Li J, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their derivatives (oxygenated PAHs, azaarenes, and sulfur/oxygen-containing heterocyclic PAHs) in surface soils from a typical city, south China [J]. *Chemosphere*, 2021,283:131190.
- [4] Ma Y, Halsall C J, Xie Z, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in ocean sediments from the North Pacific to the Arctic Ocean [J]. *Environmental Pollution*, 2017,227:498-504.
- [5] Kim K H, Jahan S A, Kabir E, et al. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects [J]. *Environment International*, 2013,60:71-80.
- [6] Keith Lawrence H. The Source of U.S. EPA's Sixteen PAH Priority Pollutants [J]. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2015,35(2-4):147-160.
- [7] Boehm P D, Page D S. Exposure elements in oil spill risk and natural resource damage assessments: a review [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2007,13(2):418-448.
- [8] Trilla-Prieto N, Vila-Costa M, Casas G, et al. Dissolved black carbon and semivolatile aromatic hydrocarbons in the ocean: Two entangled biogeochemical cycles? [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2021,8(10):918-923.
- [9] 史敬文,张瑞杰,韩民伟,等.北部湾涠洲岛珊瑚礁区多环芳烃污染特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(4):1802-1811.
Shi J W, Zhang R J, Han M W, et al. Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coral reef regions of Weizhou Island, Beibu Gulf [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(4): 1802-1811.
- [10] Othman H B, Pick F R, Hlaili A S, et al. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on marine and freshwater microalgae—A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023,441:129869.
- [11] Sarigiannis D A, Karakitsios S P, Zikopoulos D, et al. Lung cancer risk from PAHs emitted from biomass combustion [J]. *Environmental*

- Research, 2015,137:147–156.
- [12] Zhang L, Yang L, Bi J, et al. Characteristics and unique sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitro-polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} at a highland background site in Northwestern China [J]. *Environmental Pollution*, 2021,274:116527.
- [13] Suresh R, Singh V K, Malik J K, et al. Evaluation of the performance of improved biomass cooking stoves with different solid biomass fuel types [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2016,95:27–34.
- [14] Shen H, Huang Y, Wang R, et al. Global Atmospheric Emissions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from 1960 to 2008 and Future Predictions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,47(12):6415–6424.
- [15] González-Gaya B, Fernández-Pinos M C, Morales L, et al. High atmosphere–ocean exchange of semivolatile aromatic hydrocarbons [J]. *Nature Geoscience*, 2016,9(6):438–442.
- [16] Lin T, Hu L, Guo Z, et al. Deposition fluxes and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Yangtze River estuarine-inner shelf in the East China Sea [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013,27(1):77–87.
- [17] Ya M, Wang X, Wu Y, et al. Seasonal variation of terrigenous polycyclic aromatic hydrocarbons along the marginal seas of China: input, phase partitioning, and ocean–current transport [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017,51(16):9072–9079.
- [18] Inomata Y, Kajino M, Sato K, et al. Emission and atmospheric transport of particulate PAHs in Northeast Asia [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012,46(9):4941–4949.
- [19] Zheng H, Cai M, Zhao W, et al. Net volatilization of PAHs from the North Pacific to the Arctic Ocean observed by passive sampling [J]. *Environmental Pollution*, 2021,276:116728.
- [20] Jiang L, Ma X, Wang Y, et al. Land–Ocean exchange mechanism of chlorinated paraffins and polycyclic aromatic hydrocarbons with diverse sources in a coastal zone boundary area, North China: the role of regional atmospheric transmission [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022,56(18):12852–12862.
- [21] Dachs J, Lohmann R, Ockenden W A, et al. Oceanic biogeochemical controls on global dynamics of persistent organic pollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002,36(20):4229–4237.
- [22] Zhang X, Zhang Z F, Zhang X, et al. Dissolved polycyclic aromatic hydrocarbons from the Northwestern Pacific to the Southern Ocean: Surface seawater distribution, source apportionment, and air–seawater exchange [J]. *Water Research*, 2021,207:117780.
- [23] Nizzetto L, Lohmann R, Gioia R, et al. PAHs in air and seawater along a North–South Atlantic transect: trends, processes and possible sources [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008,42(5):1580–1585.
- [24] Sobotka J, Lammel G, Slobodník J, et al. Dynamic passive sampling of hydrophobic organic compounds in surface seawater along the South Atlantic Ocean east–to–west transect and across the Black Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021,168:112375.
- [25] Li R, Gao H, Ji Z, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water column of Kongsfjorden, Arctic [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020,97:186–193.
- [26] Vecchiato M, Barbaro E, Spolaor A, et al. Fragrances and PAHs in snow and seawater of Ny–Ålesund (Svalbard): Local and long–range contamination [J]. *Environmental Pollution*, 2018,242:1740–1747.
- [27] 邝伟明,林彩,林辉,等.南海海洋生物体内多环芳烃污染特征及风险评估 [J]. *环境保护科学*, 2021,47(4):127–132.
- Kuang W M, Lin C, Lin H, et al. Characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine organisms from South China Sea [J]. *Environmental Protection Science*, 2021,47(4):127–132.
- [28] Ali M, Xu D, Yang X, et al. Microplastics and PAHs mixed contamination: an in–depth review on the sources, co–occurrence, and fate in marine ecosystems [J]. *Water Research*, 2024:121622.
- [29] Li Y, Duan X. Analysis of origin, change, and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the continental shelf of China Sea [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020,27(5):4683–4694.
- [30] Ma Y, Xie Z, Yang H, et al. Deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons in the North Pacific and the Arctic [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013,118(11):5822–5829.
- [31] Subramani A, Badruzzaman M, Oppenheimer J, et al. Energy minimization strategies and renewable energy utilization for desalination: a review [J]. *Water research*, 2011,45(5):1907–1920.
- [32] Yu H, Guo T, Wu Z, et al. Distribution and gas–particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons over the East China Sea and Yellow Sea in spring: Role of atmospheric transport transition [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,762:143071.
- [33] Cheng J O, Ko F C, Lee C L, et al. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of southern Taiwan in relation to monsoons [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016,23:15675–15688.
- [34] Liu M, Cai M, Duan M, et al. PAHs in the North Atlantic Ocean and the Arctic Ocean: Spatial Distribution and Water Mass Transport [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022,127(6):e2021JC018389.
- [35] Wang S, Ding G, Liu Y, et al. Legacy and emerging persistent organic pollutants in the marginal seas of China: Occurrence and phase partitioning [J]. *Science of The Total Environment*, 2022,827:154274.
- [36] Liu M, Zheng H, Chen M, et al. Dissolved PAHs impacted by air–sea interactions: Net volatilization and strong surface current transport in the Eastern Indian Ocean [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 431:128603.
- [37] Liu M, Chen M, Duan M, et al. Particulate export of PAHs firstly traced by 210Po/210Pb disequilibrium: Implication on the “shelf sink effect” in the Arctic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021,126(8):e2021JC017384.
- [38] Lohmann R, Markham E, Klanova J, et al. Trends of diverse POPs in air and water across the western Atlantic Ocean: Strong gradients in the ocean but not in the air [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020,55(14):9498–9507.
- [39] Liu M, Zheng H, Wang W, et al. Enhanced sinks of polycyclic aromatic hydrocarbons due to Kuroshio intrusion: implications on biogeochemical processes in the ocean–dominated marginal seas [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021,55(10):6838–6847.
- [40] Ademollo N, Spataro F, Rauseo J, et al. Occurrence, distribution and pollution pattern of legacy and emerging organic pollutants in surface water of the Kongsfjorden (Svalbard, Norway): Environmental

- contamination, seasonal trend and climate change [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021,163:111900.
- [41] Cai M, Liu M, Hong Q, et al. Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in seawater from the Western Pacific to the Southern Ocean (17.5N to 69.2S) and their inventories on the Antarctic Shelf [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,50(17):9161–9168.
- [42] Zhang R, Han M, Yu K, et al. Distribution, fate and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmosphere and surface water of multiple coral reef regions from the South China Sea: A case study in spring–summer [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 412:125214.
- [43] Cai M, Duan M, Guo J, et al. PAHs in the Northern South China Sea: Horizontal transport and downward export on the continental shelf [J]. *Marine Chemistry*, 2018,202:121–129.
- [44] Ke H, Chen M, Liu M, et al. Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons from the North Pacific to the Arctic: field measurements and fugacity model simulation [J]. *Chemosphere*, 2017,184:916–923.
- [45] Ya M, Wu Y, Li Y, et al. Transport of terrigenous polycyclic aromatic hydrocarbons affected by the coastal upwelling in the northwestern coast of South China Sea [J]. *Environmental Pollution*, 2017,229:60–68.
- [46] Lohmann R, Klanova J, Pribylova P, et al. PAHs on a west-to-east transect across the tropical Atlantic Ocean [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,47(6):2570–2578.
- [47] Pouch A, Zaborska A, Mazurkiewicz M, et al. PCBs, HCB and PAHs in the seawater of Arctic fjords—Distribution, sources and risk assessment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021,164:111980.
- [48] Chen A, Wu X, Simonich S L M, et al. Volatilization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) over the North Pacific and adjacent Arctic Ocean: The impact of offshore oil drilling [J]. *Environmental Pollution*, 2021,268:115963.
- [49] Liu M, Hu J, Lin Y, et al. Full-depth profiles of PAHs in the western south China sea: influence of upwelling and mesoscale eddy [J]. *Chemosphere*, 2021,263:127933.
- [50] Ye J, Zheng H, Liu M, et al. Upwelling impact and lateral transport of dissolved PAHs in the Taiwan Strait and adjacent South China Sea [J]. *Science of the Total Environment*, 2023,895:165159.
- [51] Lin Y, Cai M, Chen M, et al. Evidence for the growing importance of Eurasian local source to PAHs in the Arctic central basin [J]. *Science of The Total Environment*, 2022,851:158373.
- [52] Liu M, Zheng H, Cai M, et al. Ocean stratification impacts on dissolved polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): From global observation to deep learning [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023,57(46):18339–18349.
- [53] Zhang L, Ma Y, Cai M, et al. Chemodynamics of polycyclic aromatic hydrocarbons and their alkylated and nitrated derivatives in the Yellow Sea and East China Sea [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023,57(48):20292–20303.
- [54] Han M, Yu K, Zhang R, et al. Sources of the elevating polycyclic aromatic hydrocarbon pollution in the Western South China Sea and its environmental implications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023,57(49):20750–20760.
- [55] Wu Z, Lin T, Sun H, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Fildes Peninsula, maritime Antarctica: effects of human disturbance [J]. *Environmental Pollution*, 2023,318:120768.
- [56] Wang Y, Wang J, Mu J, et al. Aquatic predicted no-effect concentration for three polycyclic aromatic hydrocarbons and probabilistic ecological risk assessment in Liaodong Bay of the Bohai Sea, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21:148–158.
- [57] GB/T 2589–2020 综合能耗计算通则 [S].
GB/T 2589–2020 General rules for calculation of the comprehensive energy consumption [S].
- [58] Xu S, Liu W, Tao S. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006,40(3):702–708.
- [59] Achten C, Andersson J T. Overview of polycyclic aromatic compounds (PAC) [J]. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2015,35(2–4): 177–186.
- [60] Latimer J S, Zheng J. The sources, transport, and fate of PAHs in the marine environment [J]. *PAHs: an Ecotoxicological Perspective*, 2003: 9–33.
- [61] Yang W, Zhang H, Lang Y, et al. Pollution status of PAHs in surface sediments from different marginal seas along China Mainland: A quantitative evaluation on a national scale [J]. *Environmental Pollution*, 2020,263:114431.
- [62] Ramesh A, Archibong A E, Hood D B, et al. Global environmental distribution and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Global Contamination Trends of Persistent Organic Chemicals*, 2011,63:97–126.
- [63] Lang C, Tao S, Liu W, et al. Atmospheric transport and outflow of polycyclic aromatic hydrocarbons from China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008,42(14):5196–5201.
- [64] Cai W J, Dai M, Wang Y, et al. The biogeochemistry of inorganic carbon and nutrients in the Pearl River estuary and the adjacent Northern South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2004,24 (12):1301–1319.
- [65] Lin I I, Wong G T F, Lien C C, et al. Aerosol impact on the South China Sea biogeochemistry: An early assessment from remote sensing [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009,36(17):L17605/1–L17605/5.
- [66] 杨梦茹,徐 雄,王东红,等.长江典型江段水体 PAHs 的分布特征、来源及其生态风险 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(11):5308–5317.
- Yang M R, Xu X, Wang D H, et al. Distribution characteristics, source and ecological risks assessment of PAHs in water bodies of typical sections of the Yangtze River [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(11):5308–5317.
- [67] Wu Z, Lin T, Li Z, et al. Air–sea exchange and gas–particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons over the northwestern Pacific Ocean: Role of East Asian continental outflow [J]. *Environmental Pollution*, 2017,230:444–452.
- [68] Sarría-Villa R, Ocampo-Duque W, Páez M, et al. Presence of PAHs in water and sediments of the Colombian Cauca River during heavy rain episodes, and implications for risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,540:455–465.
- [69] De Maagd P G J, Ten Hulscher D T E M, Van den Heuvel H, et al. Physicochemical properties of polycyclic aromatic hydrocarbons: Aqueous solubilities, n-octanol/water partition coefficients, and Henry's law constants [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*:

- An International Journal, 1998,17(2):251-257.
- [70] Montuori P, De Rosa E, Di Duca F, et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the dissolved phase, particulate matter, and sediment of the Sele River, Southern Italy: a focus on distribution, risk assessment, and sources [J]. *Toxics*, 2022,10(7):401.
- [71] González-Gaya B, Zúñiga-Rival J, Ojeda M J, et al. Field measurements of the atmospheric dry deposition fluxes and velocities of polycyclic aromatic hydrocarbons to the global oceans [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014,48(10):5583-5592.
- [72] Ya M, Wu Y, Li Y, et al. Anthropogenic organochlorine compounds as potential tracers for regional water masses: a case study of estuarine plume, coastal eddy, wind-driven upwelling and long-range warm current [J]. *Chemosphere*, 2017,170:75-82.
- [73] Waite A M, Thompson P A, Pesant S, et al. The Leeuwin Current and its eddies: An introductory overview [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007,54(8-10):789-796.
- [74] Barker P F, Filippelli G M, Florindo F, et al. Onset and role of the Antarctic Circumpolar Current [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007,54(21/22):2388-2398.
- [75] Tremblay L, Kohl S D, Rice J A, et al. Effects of temperature, salinity, and dissolved humic substances on the sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to estuarine particles [J]. *Marine Chemistry*, 2005,96(1/2):21-34.
- [76] Ghosal D, Ahn Y. Current state of knowledge in microbialdegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016,7:208111.
- [77] Haritash A K, Kaushik C P. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009,169(1-3):1-15.
- [78] Zhang L, Zhang L, Sun D. Considering zooplankton as a black box in determining PAH concentrations could result in misjudging their bioaccumulation [J]. *Environmental Pollution*, 2023,316:120672.
- [79] Berrojalbiz N, Lacorte S, Calbet A, et al. Accumulation and cycling of polycyclic aromatic hydrocarbons in zooplankton [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009,43(7):2295-2301.
- [80] Castro-Jiménez J, Berrojalbiz N, Wollgast J, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Mediterranean Sea: Atmospheric occurrence, deposition and decoupling with settling fluxes in the water column [J]. *Environmental Pollution*, 2012,166:40-47.
- [81] Roxy M. Sensitivity of precipitation to sea surface temperature over the tropical summer monsoon region—and its quantification [J]. *Climate Dynamics*, 2014,43:1159-1169.
- [82] Han M, Zhang R, Yu K, et al. Environmental fate and effects of PAHs in tropical mariculture ponds near the northern South China Sea: Rainfall plays a key role [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,847:157442.
- [83] Zhang Y, Dou H, Chang B, et al. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from indoor straw burning and emission inventory updating in China [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008,1140(1):218-227.
- [84] Hafner W D, Carlson D L, Hites R A. Influence of local human population on atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005,39(19):7374-7379.
- [85] Zhang Y, Tao S. Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004[J]. *Atmospheric Environment*, 2009,43(4):812-819.
- [86] Hamid N, Syed J H, Junaid M, et al. Elucidating the urban levels, sources and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Pakistan: Implications for changing energy demand [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,619:165-175.
- [87] Ma W L, Liu L Y, Jia H L, et al. PAHs in Chinese atmosphere Part I: Concentration, source and temperature dependence [J]. *Atmospheric Environment*, 2018,173:330-337.
- [88] Liu J, Xu Y, Li J, et al. The distribution and origin of PAHs over the Asian marginal seas, the Indian, and the Pacific Oceans: Implications for outflows from Asia and Africa [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014,119(4):1949-1961.
- [89] Li R, Hua P, Zhang J, et al. Effect of anthropogenic activities on the occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic suspended particulate matter: Evidence from Rhine and Elbe Rivers [J]. *Water Research*, 2020,179:115901.
- [90] Hu L, Shi X, Qiao S, et al. Sources and mass inventory of sedimentary polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gulf of Thailand: Implications for pathways and energy structure in SE Asia [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,575:982-995.
- [91] Sun C, Soltwedel T, Bauerfeind E, et al. Depth profiles of persistent organic pollutants in the north and tropical Atlantic Ocean [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,50(12):6172-6179.
- [92] Wu X, Wang Y, Zhang Q, et al. Seasonal variation, air-water exchange, and multivariate source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal area of Dalian, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019,244:405-413.
- [93] Zhang A, Zhao S, Wang L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater and sediments from the northern Liaodong Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016,113(1/2):592-599.

作者简介: 杨志辉(2000-),男,江西萍乡人,重庆大学硕士研究生,主要研究方向为海洋环境中持久性有机污染物.1356700195@qq.com.