

大亚湾表层沉积物中重金属分布特征

吕彦儒¹, 袁 蕾¹, 倪志鑫^{1*}, 林红梅²

(1. 国家海洋局南海环境监测中心, 广东 广州 510300; 2. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了解大亚湾沉积物中重金属分布及污染状况, 于2016年8月对大亚湾海域表层沉积物中重金属元素(As、Cd、Cr、Pb、Zn和Cu)展开调查, 并将获得的各元素含量与粒度、Fe、Mn和总有机碳(TOC)等相关理化要素进行相关性分析。结果表明: 大亚湾沉积物中重金属受陆源输入影响较大, 含量基本呈现为沿岸高、湾内低的趋势, 总体质量较好, 基本符合第一类海洋沉积物质量标准要求; 澳头湾和范和港附近海域人类活动密集, 重金属含量较高。通过相关性分析结果发现, 大亚湾重金属主要来源为岩石的风化和侵蚀、工业污水排放和渔业养殖等; Cu与铁锰氧化物结合性弱于其他元素, 在还原性环境中被沉积物吸附形成金属Cu硫化物可能是喜洲岛附近海域Cu元素含量异常高值的原因; 作为湾内有机质主要来源的水生浮游生物的生长状态对Cr、Zn和Pb含量影响较大; Cr、As和Pb与粉砂结合为主, Zn与粘土结合为主。

关键词: 海洋化学; 重金属; 沉积物; 相关性分析; 大亚湾

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2021.04.011

中图分类号: P734

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2021)04-0643-09

重金属是海洋中一类非常重要的污染物, 因其毒性高、难降解和易累积等特性而受到广泛关注^[1-3]。重金属不仅可以在生物体内富集, 通过食物链危害人类健康, 某些重金属还可以在特定条件下转化为毒性更强的金属有机化合物, 从而对水生生物和人类产生更大的危害^[4]。一般来说, 重金属通过各种途径进入海洋后, 经过沉降、吸附、解吸、络合和水解等一系列复杂的生物地球化学过程后, 最终大部分会从海水迁移到沉积物中累积^[5], 沉积物中重金属的含量一般比水体高一个数量级^[6-7]。同时, 随着水力条件的不断变化, 通过解吸和扩散等过程, 沉积物中的重金属可以重新进入水体^[8], 存在“二次污染”的潜在风险。因此, 对沉积物中重金属的研究一直是了解海洋环境重金属污染状况的重要手段之一。

目前国内已有较多关于海洋中重金属污染的研究^[9-12], 而海湾作为海陆交互作用最强烈的敏感区域之一, 受人类活动影响显著, 一直都是研究的重

点^[9-11]。大亚湾海域面积为516 km², 位于南海北部、广东省东南部, 是国家重点发展区域, 湾内有我国重要的石化基地、原油储运基地、核电堆群和大型港口群等^[13]。大亚湾是典型的亚热带半封闭浅水湾, 沿岸仅有流程甚短的小河(如淡澳河)注入, 潮汐弱, 属于不正规半日潮, 潮波主要是西太平洋潮波经巴士海峡、巴林塘海峡进入南海后, 其中一支前进波沿广东沿岸由湾口传入^[14]。大亚湾是受人类活动影响较为显著的海湾生态系统, 上世纪80年代以来, 大亚湾海洋水产养殖业和石油化工产业快速发展, 两座核电厂相继落成, 城市化进程同步发展^[13, 15]。这些人为活动对大亚湾特别是西部和北部地区的水生环境产生了重大影响^[16-17], 已成为社会关注和科学研究的热点区域^[18-19]。本研究以大亚湾海域为研究对象, 对其表层沉积物中重金属元素进行评价和深入分析, 并运用相关性分析研究重金属的含量分布特征和来源, 为进一步了解该海域重金属污染状况及污染的治理和控制提供数据和技

收稿日期: 2020-06-18

基金项目: 国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金资助项目(1617); 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2013023); 人社部留学回国创业启动支持计划资助项目(2017-43); 自然资源部生物活性物质重点实验室开放基金资助项目(MBSMAT-2015-03)

作者简介: 吕彦儒(1986—), 女, 本科, 助理工程师; E-mail: 63109151@qq.com

* **通讯作者:** 倪志鑫(1982—), 男, 博士, 高级工程师; E-mail: nxz2004@163.com

术支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2016 年 8 月,在大亚湾海域设置 14 个采样站
位(图 1),采用不锈钢蚌式挖泥斗采集表层沉积物

样品。用塑料勺取表层 0~5 cm 沉积物密封于预先
冲入氮气的洁净聚乙烯塑料封口袋内,冷冻保存。
同时,为测定沉积物中硫化物含量,采集表层沉积物
装入预先准备好的棕色宽颈磨口玻璃瓶中,然后快
速加入醋酸锌进行固定,盖上瓶盖,再用蜡封住瓶盖
和瓶颈连接处,运回实验室进行处理和分析。

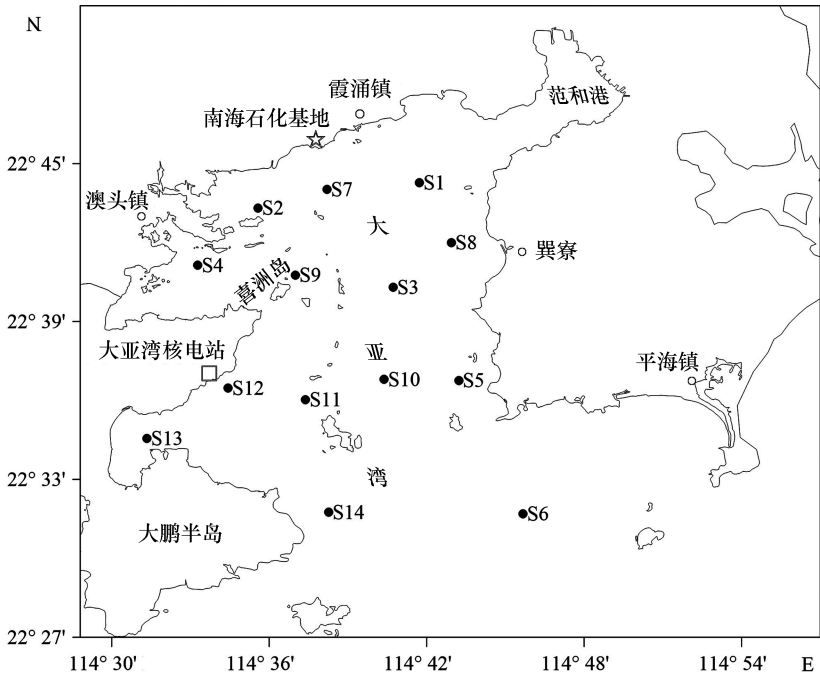


图 1 大亚湾沉积物采样站位图

Fig. 1 Sediment sampling stations in Daya Bay

在实验室内,湿沉积物样品被均匀分成 2 份,一
份用于沉积物粒度分析;另一份样品剔除砾石、贝壳
等杂物后在冷冻干燥器中冷冻干燥,用玛瑙研钵研
磨后用 160 目(近似孔径为 0.01 mm)尼龙筛进行筛
分,之后用四分法缩分分取 10~20 g 制备好的样品,
装入聚乙烯样品袋(已填写样品的站号、层次等),
作为待测样品放入冰箱冷冻保存。

1.2 分析方法

1.2.1 重金属含量的测定 准确称取 0.500 0 g 样
品于聚四氟乙烯消解罐中,分别加入 8 mL 高纯浓硝
酸和 2 mL 高纯氢氟酸后,使用 MARS5 高通量
(40 位)微波密闭消解仪(美国 CEM 公司)进行微
波消解,消解完成后于电热板上赶酸,之后定容至
100 mL,使用 ContrAA 700 高分辨连续光源原子吸
收光谱仪(德国耶拿公司)测定重金属含量。

1.2.2 氧化还原电位(E_h)的测定 按照《海洋调查
规范》^[20]要求,采用雷磁 pHB-4 便携式 pH 计(上海
仪电科学仪器股份有限公司)现场测定 E_h 。

1.2.3 总氮(TN)和总磷(TP)含量的测定 使用过

硫酸盐同步消化法测定沉积物中的 TN 和 TP 含量,
具体步骤参照文献[21]。

1.2.4 总有机碳(TOC)含量的测定 按照《海洋沉
积物中总有机碳的测定》^[22]的要求,采用 TOC-V_{CPH}
(SSM-5000A)总有机碳分析仪(日本岛津公司)进
行沉积物中 TOC 含量的测定,采用外标法定量。

1.2.5 粒度的测定 按照《海洋调查规范》^[23]要
求,使用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪(英国 Malvern
公司),采用激光粒度分析法进行分析。激光粒
度仪的测量范围为 0.02~2 000.00 μm ,分辨率为
0.01 ϕ ,重复测量的相对误差<3%。

1.3 数据处理和评价方法

1.3.1 数据处理 沉积物中重金属含量及其他理
化因子的平面分布图使用 Surfer 软件绘制,数据的
统计分析使用 SPSS 13.0 软件完成。

1.3.2 评价方法 采用单因子污染指数法对沉积
物中的重金属含量进行评价。按照《海洋沉积物质
量》^[24]中规定的第一类海洋沉积物质量标准(适用
于海洋渔业水域、海洋自然保护区、珍稀与濒危生物

自然保护区、海水养殖区、海水浴场、人体直接接触沉积物的海上运动或娱乐区、与人类食用直接有关的工业用水区),判定调查海区表层沉积物中重金属(As、Cd、Cr、Pb、Zn 和 Cu)的污染程度,计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式(1)、(2)中: P_i 为重金属*i*的单因子污染指数; C_i 为重金属*i*含量的实测值(mg/kg); S_i 为重金属*i*含量的评价标准值(mg/kg); $\bar{P}$ 为重金属*i*的单因子污染指数平均值。

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中重金属的分布及评价

大亚湾表层沉积物中重金属分布情况如图2所示。从图2中可以看出,大亚湾表层沉积物中As含量的分布范围为3.31~6.79 mg/kg,平均值为5.13 mg/kg,其中大亚湾沿岸含量略高于大亚湾内区域;大亚湾沉积物中Cd含量的分布范围为0.063~0.126 mg/kg,平均值为0.085 mg/kg,高值出现在澳头湾的S4站位;大亚湾沉积物中Cr含量的分布范围为17.04~41.11 mg/kg,平均值为32.26 mg/kg,其中大亚湾沿岸含量略高于大亚湾内区域;大亚湾沉积物中Pb含量的分布范围为12.78~34.00 mg/kg,平均值为24.14 mg/kg,其中高值出现在湾东北靠近范和港的S1站位,总体沿岸含量略高于湾内区域;大亚湾沉积物中Zn含量分布范围为23.41~66.61 mg/kg,平均值为47.51 mg/kg,其中高值出现在湾东北靠近范和港的S1站位,总体沿岸含量略高于湾内区域。S1站位Pb、Zn含量高值可能是由于范和港港口工业活动污染所致。李学杰(2003)也在范和港附近海域沉积物中测得较高的Pb、Zn含量,并猜测可能与该区域频繁的人类活动、海水养殖以及较弱的水动力和水体交换能力相关^[25]。

大亚湾表层沉积物中Cu含量的分布范围为4.11~153.10 mg/kg,平均值为22.92 mg/kg,其中最高值出现在靠近湾西北的喜洲岛东北侧的S9站位,达到153.10 mg/kg。该区域沉积物中重金属Cu含量高值与廖敏立等(2016)对大亚湾惠州海洋养殖海域沉积物所做调查结果相当,可能与大亚湾北面惠州惠阳区附近的工业区含Cu污水以及养殖污水排放有关^[26]。另外20世纪90年代大亚湾内大力发展海水网箱养殖作为当地渔业生

产的支柱^[27],而渔业养殖大量使用CuSO₄等含Cu水产养殖杀菌剂,是造成该区域Cu含量较高的另一个因素。次高值出现在湾口的S6站位,与珠江河口在丰水期携带大量含Cu污染物^[28]的水团进入大亚湾内有关。

综上所述,As、Cr、Pb、Zn含量均表现为大亚湾沿岸大于湾内,Cu含量异常高值出现在靠近澳头湾工业区的S9站位,Cd含量高值出现在澳头湾内的S4站位。总体上看,各重金属元素含量分布呈现从湾内沿岸向湾外逐渐减小的趋势,其分布模式主要与近岸陆源污染输入有关。

大亚湾表层沉积物中重金属污染程度的评价结果列于表1。从表1中平均值看,As、Cd、Cr、Pb、Zn和Cu的单因子评价指数范围为0.17~0.65,其中Cd最低,Cu最高,但是都符合第一类海洋沉积物质量标准^[24]。就单个站位来看,As、Cd、Cr、Pb和Zn的单因子评价指数均小于1,即均符合第一类海洋沉积物质量标准;Cu的单因子评价指数最大值为4.37,超出第一类海洋沉积物质量标准的程度较大,但是超标样品均符合第三类海洋沉积物质量标准(≤ 200 mg/kg)^[24]。

整体来看,大亚湾海域表层沉积物中重金属含量处于较低水平,污染水平较低。部分区域较高的Cu含量可能与附近工业区含Cu污水的排放以及临近海域养殖污水的产生和排放有关^[25,27]。

2.2 重金属元素与理化因子相关性分析

表2为该海域表层沉积物中重金属元素与主要环境因子的相关性分析结果。从表中可以看出,沉积物中重金属Cr、Zn、As、Pb均和Fe、Mn、TOC显著正相关,与 E_h 负相关。沉积物中重金属主要受铁锰氧化物和有机物控制^[29]。在氧化条件下,沉积物中铁锰氧化物能够吸附重金属元素^[30];在还原条件下,沉积物中的铁锰氧化物部分或全部溶解,被其吸附的重金属离子获得释放,可以重新与有机物结合或与硫化物共沉淀,或者进入间隙水^[31-32]。本研究中调查海区沉积物 E_h 均为负值,说明处于还原性环境,Cr、Zn、As和Pb主要以有机物和铁锰硫化物结合态存在。Cd与Fe、Mn显著正相关,与TOC正相关,与 E_h 负相关,亦说明主要以有机物和铁锰硫化物结合态存在,可能后者占更大比例。Cu与 E_h 显著负相关,说明Cu主要在还原性环境中存在,沉积物还原性越强(E_h 越低),Cu含量越高。大亚湾S9站位喜洲岛附近出现Cu含量异常高值,而对应的 E_h 也最小,说明属于还原性沉积环境。沉积物属于粘土质粉砂,硫

化物含量相对较高,沉积物容易吸附 Cu 离子形成金属 Cu 硫化物^[33],从而导致沉积物中 Cu 含量偏高。综上所述,在大亚湾沉积环境中,Cu 主要以硫

化物形式存在,而 Cr、Zn、As、Cd 和 Pb 主要以铁锰氧化物和有机物结合态存在。

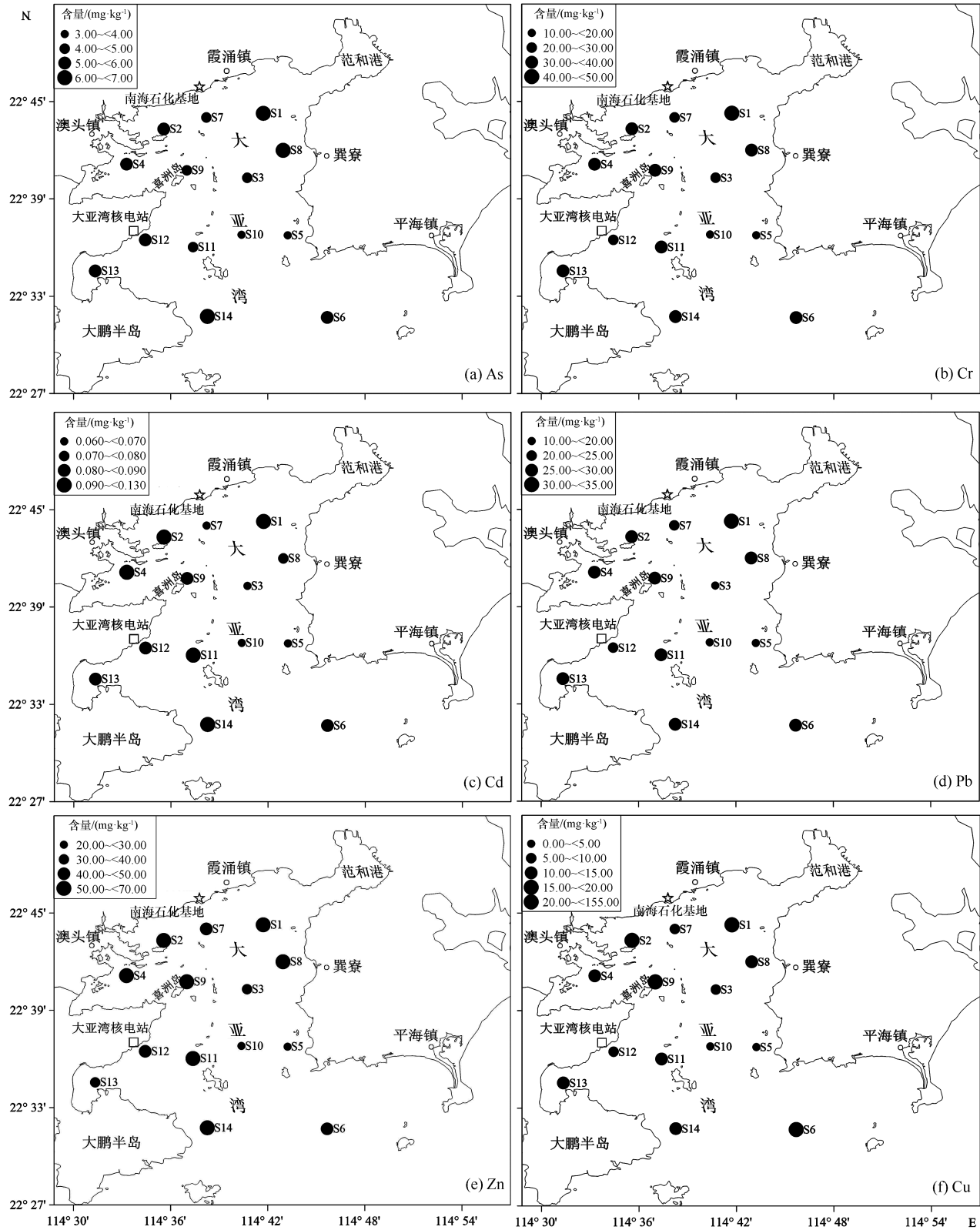


图 2 大亚湾表层沉积物中重金属含量的空间分布
Fig. 2 Distribution of heavy metals in surface sediments of Daya Bay

表 1 大亚湾表层沉积物中重金属元素含量评价结果

Tab. 1 Evaluation of heavy metal contents in surface sediments of Daya Bay

重金属元素	一类评价标准/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	单因子评价指数	
		范围	平均值
As	≤ 20.0	0.17~0.34	0.26
Cd	≤ 0.50	0.13~0.25	0.17
Cr	≤ 80.0	0.21~0.51	0.40
Pb	≤ 60.0	0.21~0.57	0.40
Zn	≤ 150.0	0.16~0.44	0.32
Cu	≤ 35.0	0.12~4.37	0.65

表 2 大亚湾表层沉积物中重金属元素与主要环境因子相关性

Tab. 2 Relationships among heavy metals and environment factors in surface sediments of Daya Bay

项目	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Mn	0.697 * *	0.167	0.917 * *	0.795 * *	0.538 *	0.815 * *
Fe	0.819 * *	0.204	0.947 * *	0.836 * *	0.638 *	0.862 * *
E_h	-0.252	-0.541 *	-0.341	-0.158	-0.061	-0.221
TP	0.793 * *	0.276	0.789 * *	0.647 *	0.595 *	0.774 * *
TN	0.784 * *	0.418	0.859 * *	0.576 *	0.559 *	0.728 * *
TOC	0.753 * *	0.344	0.826 * *	0.553 *	0.495	0.701 * *
TOC/TN	-0.641 *	-0.333	-0.643 *	-0.523	-0.504	-0.577 *
砂	-0.813 * *	-0.230	-0.797 * *	-0.654 *	-0.475	-0.723 * *
粉砂	0.762 * *	0.078	0.645 *	0.716 * *	0.475	0.696 * *
粘土	0.544 *	0.347	0.676 * *	0.294	0.277	0.458

注:“*”表示在 0.05 水平(两侧)上显著相关,“**”表示在 0.01 水平(两侧)上极显著相关。

Mn、Fe、TP、TN 等营养物质指标均与 Cr、Zn、As、Cd、Pb 成正相关性,说明大亚湾表层沉积物中 Mn、Fe、TP、TN 营养物质与 Cr、Zn、As、Cd 和 Pb 等重金属具有同源性,均来自于陆源污染输入。

Zhang 等(2009)对珠江河口及其邻近海域沉积物有机碳的研究发现,河口内沉积物有机质来源由陆源和海源(藻类等残体)共同组成,而近海沉积物有机质主要来源于海洋藻类^[34]。大亚湾沉积物的 TOC 与 TN 的含量比值(TOC/TN)在 5.14~9.28 之间,平均值为 6.52,而藻类的 TOC/TN 为 4~10^[35]。比值低表示藻类产生的 TOC 贡献多^[34],因此大亚湾沉积物中有机质主要来源于水生浮游生物的贡献,而 TOC/TN 与 Cr、Zn、Pb 3 种元素成负相关性,说明当来自于藻类生产贡献的有机物越多时(TOC/TN 越低),沉积物中 Cr、Zn、Pb 含量越高,可

能是因为浮游生物生长时对 Cr、Zn、Pb 有一定吸收,或当藻类细胞死亡时,产生的有机碎屑容易吸附水体中的 Cr、Zn、Pb 元素,当藻类死亡时一起沉降进入沉积物中。

Cr、Zn 与砂显著负相关,与粉砂和粘土显著正相关,说明 Cr、Zn 与粉砂和粘土结合为主,并且 Zn 与粘土相关性比 Cr 更好,说明相对来说 Cr 与粉砂结合为主,Zn 与粘土结合为主。As、Pb 与砂显著负相关,与粉砂显著正相关,说明 As、Pb 与粉砂结合为主。

2.3 大亚湾表层沉积物中重金属含量水平与其他河口海湾的比较分析

在 20 世纪 80 年代以前,国外主要以背景值作为环境重金属污染评价标准,各国学者对重金属本底值选择各有侧重,Hakanson(1980)提出以现代工

业化前沉积物重金属含量的最高背景值作为潜在生态风险指数法的参考值^[36],而 Turekian(1961)通过比较沉积物中与全球页岩中重金属含量均值,从而评估沉积物中重金属的累积情况,此外还可以用地方土壤背景值作为比较参考等^[37]。对大亚湾表层沉积物中重金属含量均值与各种背景值比较(图3)

发现,大亚湾 Cr、Pb、Zn 和 Cd 含量较低,均低于各类背景值;Cu 仅高于广东省土壤背景值,说明大亚湾有一定的人为源 Cu 污染输入;As 仅高于全球页岩均值。与南海区主要海湾河口比较(表3),大亚湾 Cd、Zn 污染相对较低,Cr、Cu、Pb、As 污染与其他海湾相差不大。

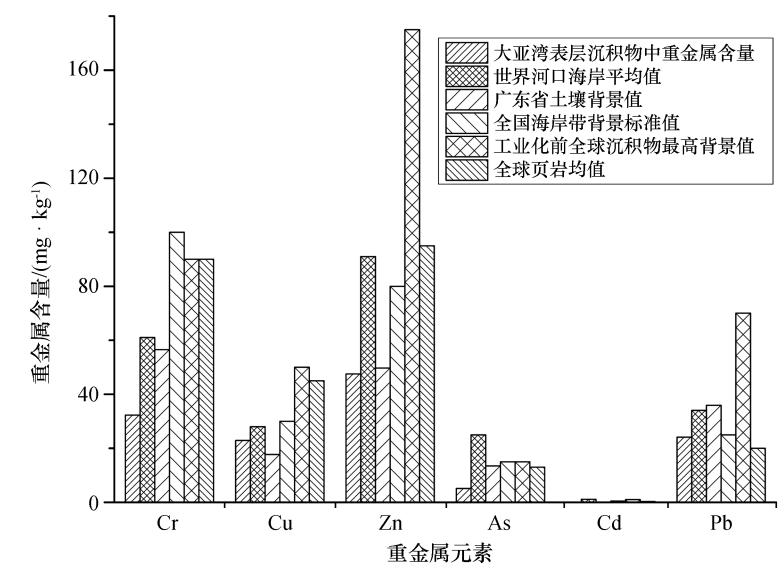


图3 大亚湾表层沉积物中重金属含量与不同环境背景值的对比

Fig. 3 Comparison of heavy metal contents in surface sediments of Daya Bay with different environmental backgrounds
世界河口海岸平均值参考文献[38]、广东省土壤背景值参考文献[39]、全国海岸带背景标准值参考文献[40]、
工业化前全球沉积物最高背景值参考文献[36]、全球页岩均值参考文献[37]。

表3 大亚湾表层沉积物中重金属含量与珠江口和南海其他海湾对比结果

Tab.3 Comparison of heavy metal contents in surface sediments of Daya Bay and other bays of the South China Sea

海域	重金属含量/(mg·kg ⁻¹)						来源
	Cr	Cu	Pb	Zn	Cd	As	
大亚湾	32.26	22.92	24.14	47.51	0.085	5.13	本研究
珠江口	56.4	39.02	59.43	110.85	0.344	5.24	文献[41]
海南洋浦港	—	23.83	23.83	85.59	0.10	—	文献[42]
广东红海湾	15.32	6.29	25.44	57.87	0.03	7.97	文献[43]
广东拓林湾	31.4	19.2	40.0	89.0	0.11	9.7	文献[44]

注:“—”表示无数据。

3 结论

大亚湾表层沉积物中重金属含量基本呈现为沿岸高、湾内低的分布趋势,除 Cu 外均符合第一类海洋沉积物质量标准要求,总体质量较好。大亚湾受岩石的风化和侵蚀及近岸陆源污染输入影响较大,

存在一定重金属污染,但与南海区其他海湾相比,处于中等水平。澳头湾和范和港附近海域重金属含量较高,与这些海区密集的人类活动、工业污水排放和渔业养殖等原因有关。

通过对重金属与沉积物主要环境因子的相关性分析发现,Cr、Zn、As、Cd、Pb 均和 Fe、Mn 呈正相关,

主要以铁锰氧化物结合态形式存在,可能主要来源于岩石的风化和侵蚀;Cu 与铁锰氧化物结合性弱于其他元素,主要以硫化物形式存在,喜洲岛附近的含量异常高值可能为还原性环境中被沉积物吸附形成

的金属 Cu 硫化物导致;湾内有机质主要来源于水生浮游生物的贡献,浮游生物的生长状态对 Cr、Zn、Pb 含量影响较大;Cr 与粉砂结合为主,Zn 与粘土结合为主,As 和 Pb 与粉砂结合为主。

参考文献:

- [1] NATH B, BIRCH G, CHAUDHURI P. Trace metal biogeochemistry in mangrove ecosystems: a comparative assessment of acidified (by acid sulfate soils) and non-acidified sites[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 463: 667-674.
- [2] CHAI M, SHI F, LI R, et al. Heavy metal contamination and ecological risk in *Spartina alterniflora* marsh in intertidal sediments of Bohai Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 84: 115-124.
- [3] 霍云龙, 陈金民, 林彩, 等. 三沙湾表层沉积物重金属含量分布及生态风险评估[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(3): 356-364.
HUO Y L, CHEN J M, LIN C, et al. Distribution of heavy metal contents in surface sediments of Sansha Bay and ecological risk assessment[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2015, 34(3): 356-364.
- [4] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
DAI S G. Environmental chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 1995.
- [5] 蔡龙炎. 基于主成分分析法的泉州湾表层沉积物中重金属污染可能来源分析[J]. *台湾海峡*, 2010, 29(3): 325-331.
CAI L Y. Analysis of the source of heavy metal contamination in surface sediments of Quanzhou Bay based on principal component analysis (PCA) [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2010, 29(3): 325-331.
- [6] CHENG Q, ZHOU W, ZHANG J, et al. Spatial variations of arsenic and heavy metal pollutants before and after the water-sediment regulation in the wetland sediments of the Yellow River Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 145: 138-147.
- [7] SUN Z, MOU X, TONG C, et al. Spatial variations and bioaccumulation of heavy metals in intertidal zone of the Yellow River Estuary, China[J]. *Catena*, 2015, 126: 43-52.
- [8] JAHAN S, STREZOV V. Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metals in the sediments of seaports of NSW, Australia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 128: 295-306.
- [9] 范文宏, 张博, 张融, 等. 锦州湾沉积物中重金属形态特征及其潜在生态风险[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(1): 54-58.
FAN W H, ZHANG B, ZHANG R, et al. Speciation characteristics and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Jinzhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(1): 54-58.
- [10] LI H, LIN L, YE S H, et al. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in the seawater and sediment of Yalujiang Estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 117(1/2): 499-506.
- [11] SUNDARAMANICKAM A, SHANMUGAM N, CHOLAN S H, et al. Spatial variability of heavy metals in estuarine, mangrove and coastal ecosystems along Parangipettai, Southeast coast of India[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 186-195.
- [12] 王建华, 黄楚光, 倪志鑫, 等. 珠江口伶仃洋沉积物中重金属元素分布、赋存形态及来源分析[J]. *海洋通报*, 2014, 33(3): 259-267.
WANG J H, HUANG C G, NI Z X, et al. Analysis on distribution, speciation and source of heavy metals in superficial sediments in the Pearl River Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(3): 259-267.
- [13] 袁国明, 何桂芳. 大亚湾水环境质量变化与环境容量评估[J]. *台湾海峡*, 2012, 31(4): 472-478.
YUAN G M, HE G F. Assessment of water environment quality and environmental capacity of Daya Bay[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2012, 31(4): 472-478.
- [14] 王聪, 林军, 陈丕茂, 等. 大亚湾水交换的数值模拟研究[J]. *南方水产*, 2008, 4(4): 8-15.
WANG C, LIN J, CHEN P M, et al. Numerical simulation on water exchange in Daya Bay[J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(4): 8-15.
- [15] 武文, 严聿晗, 宋德海, 等. 大亚湾的潮汐动力学研究: I 潮波系统的观测分析与数值模拟[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(3): 34-45.
WU W, YAN Y H, SONG D H, et al. Study on the tidal dynamics in Daya Bay, China—Part I. observation and numerical simulation of tidal dynamic system[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2017, 36(3): 34-45.
- [16] 丘耀文, 王肇鼎, 朱良生. 大亚湾海域营养盐与叶绿素含量的变化趋势及其对生态环境的影响[J]. *台湾海峡*, 2005, 24(2): 131-139.
QIU Y W, WANG Z D, ZHU L S. Variation trend of nutrient and chlorophyll contents and their effects on ecological environment in Daya Bay [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2005, 24(2): 131-139.
- [17] 宋淑华, 王朝晖, 付永虎, 等. 大亚湾大鹏澳海域微表层浮游植物群落研究[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(2): 181-185.
SONG S H, WANG C H, FU Y H, et al. Research on phytoplankton community at micro-layer in Dapengao Area of Daya Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2009, 28(2): 181-185.
- [18] YAO W. Bioaccumulation of heavy metals both in wild and mariculture food chains in Daya Bay, South China[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 7-14.
- [19] SUN R, LIN Q, KE C H, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments and marine organisms from the Daya Bay, South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 103(1/2): 325-332.
- [20] 国家海洋局. 海洋调查规范: 第 4 部分 海水化学要素调查: GB/T 12763.2—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
State Oceanic Administration. Specifications for oceanographic survey—Part 4: survey of chemical parameters in sea water: GB/T 12763.2—2007

- [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [21] 王文婷, 王朝晖, 刘磊, 等. 东海典型港湾表层沉积物中主要生源要素分布及污染状况分析[J]. 海洋通报, 2019, 38(6): 690-697.
WANG W T, WANG C H, LIU L, et al. Analysis of distribution and pollution status of main biogenic elements in surface sediments of typical harbors in the East China Sea[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(6): 690-697.
- [22] 国家海洋局. 海洋沉积物中总有机碳的测定 非色散红外吸收法: GB/T 30740—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
State Oceanic Administration. Determination of total organic carbon in marine sediment—Nondispersive infrared absorption: GB/T 30740—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [23] 国家海洋局. 海洋调查规范: 第 8 部分 海洋地质地球物理调查: GB/T 12763.8—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
State Oceanic Administration. Specifications for oceanographic survey—Part 8: marine geology and geophysics survey: GB/T 12763.8—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [24] 国家海洋局. 海洋沉积物质量标准: GB 18668—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
State Oceanic Administration. Marine sediment quality: GB 18668—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [25] 李学杰. 广东大亚湾底质重金属分布特征与环境质量评价[J]. 中国地质, 2003, 30(4): 429-435.
LI X J. Distribution of heavy metals in substrate of the Daya Bay, Guangdong, and assessment of the quality of the seafloor environment[J]. Geology in China, 2003, 30(4): 429-435.
- [26] 廖敏立, 谷敏, 许少广, 等. 广东沿海海洋沉积物中重金属含量状况分析[J]. 广东化工, 2016, 43(10): 78-79.
LIAO M L, GU M, XU S G, et al. An analysis of the content of heavy metals in coastal marine sediments in Guangdong Province[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(10): 78-79.
- [27] 曹玲珑, 王建华, 黄楚光, 等. 大亚湾表层沉积物重金属元素形态特征、控制因素及风险评价分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(6): 1 988-1 999.
CAO L L, WANG J H, HUANG C G, et al. Chemical form, control factor and risk assessment of trace heavy metals in superficial sediment of Daya Bay[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(6): 1 988-1 999.
- [28] 李翠田, 王淑红, 于红兵, 等. 珠江口海域表层沉积物中重金属含量分布特征及其环境质量评价[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(5): 535-538.
LI C T, WANG S H, YU H B, et al. Distribution and environment quality evaluation on heavy metals in surface sediments of Pearl River Estuary [J]. Marine Environmental Science, 2009, 28(5): 535-538.
- [29] 陈松, 廖文卓, 许爱玉. 河口重金属在沉积物-海水的界面转移[J]. 海洋学报, 1989, 11(6): 713-721.
CHEN S, LIAO W Z, XU A Y. Transfer of heavy metals at sediment-water interface in estuary[J]. Haiyang Xuebao, 1989, 11(6): 713-721.
- [30] IP C C M, LI X D, ZHANG G, et al. Trace metal distribution in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding coastal area, South China[J]. Environmental Pollution, 2007, 147(2): 311-323.
- [31] THOMAS C A, BENDELL-YOUNG L I. The significance of diagenesis versus riverine input in contributing to the sediment geochemical matrix of iron and manganese in an intertidal region[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 48(6): 635-647.
- [32] 曾建军. 大亚湾海域沉积物重金属的分布特征及赋存形态研究[D]. 中山: 中山大学, 2010.
ZENG J J. The distribution and fraction of heavy metals in sediments of Daya Bay[D]. Zhongshan: Sun Yat-Sen University, 2010.
- [33] TORO D M D, MAHONY J D, HANSEN D J, et al. Toxicity of cadmium in sediments: the role of acid volatile sulfide[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1990, 9(12): 1 487-1 502.
- [34] ZHANG L, YIN K D, WANG L, et al. The sources and accumulation rate of sedimentary organic matter in the Pearl River Estuary and adjacent coastal area, South China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 85: 190-196.
- [35] MEYERS P, ISHIWATARI R. Lacustrine organic geochemistry: an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments[J]. Organic Geochemistry, 1993, 20(7): 867-900.
- [36] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14: 975-1 001.
- [37] TUREKIAN K, WEDEPOHL K. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust[J]. Geological Society of America Bulletin, 1961, 72: 175-192.
- [38] CANTILLO A Y, O'CONNOR T P. Trace element contaminants in sediments from the NOAA National Status and Trends Programme compared to data from throughout the world[J]. Chemistry and Ecology, 1992, 7(1/2/3/4): 31-50.
- [39] 广东省环境监测中心站. 广东省土壤环境背景值数据集[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
Guangdong Province Environmental Monitoring Center. Atlas of soil environmental background values in Guangdong Province[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [40] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第九分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1998: 221-268.
Committee for the Compilation of Annals of China's Bays. Annals of China's Bays (Volume 9)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1998: 221-268.
- [41] 刘芳文, 颜文, 黄小平, 等. 珠江口沉积物中重金属及其相态分布特征[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(5): 16-24.
LIU F W, YAN W, HUANG X P, et al. Distributional characteristics of heavy metal and its available phases in sediments from Zhujiang River Mouth[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(5): 16-24.
- [42] 阳杰, 曹玲珑, 姜万钧, 等. 洋浦港近岸海域沉积物中重金属含量分布特征及污染评价[J]. 海洋湖沼通报, 2012(4): 121-128.
YANG J, CAO L L, JIANG W J, et al. Distribution and evaluation of heavy metal pollutions for surface sediments near Yangpu Port[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2012(4): 121-128.
- [43] 孙钦帮, 张冲, 乌立国, 等. 广东红海湾表层沉积物中重金属含量的空间分布特征与污染状况评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(5):

843-849.
SUN Q B, ZHANG C, WU L G, et al. Concentration distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in Honghai Bay [J]. Ecology and Environment Sciences, 2017, 26(5): 843-849.
[44] 袁国明, 何桂芳. 广东柘林湾至大埕湾海域表层沉积物重金属分布与环境地球化学特征[J]. 地球与环境, 2015, 43(2): 190-197.
YUAN G M, HE G F. Distribution and environmental geochemistry characteristics of heavy metals in surface sediment from Zhelin Bay to Dacheng Bay, Guangdong Province, China[J]. Earth and Environment, 2015, 43(2): 190-197.

Distribution of heavy metals in surface sediments of Daya Bay

LÜ Yanru¹, YUAN Lei¹, NI Zhixin^{1*}, LIN Hongmei²

(1. South China Sea Environmental Monitoring Center, SOA, Guangzhou 510300, China;

2. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to understand the distribution and pollution situation of heavy metals in the sediments of Daya Bay, the concentrations of As, Cd, Cr, Pb, Zn and Cu in the surface layer of sediments in Daya Bay were investigated in August 2016. Correlation analysis was carried out between heavy metal contents and the physical and chemical parameters of the sediments, such as grain size, contents of Mn, Fe and TOC. Results indicated that distributions of heavy metals in the sediments basically had a pattern of lower concentrations in the Bay central than the coastal, which indicated that terrigenous input was a main source. Moreover, due to intensive human activities, higher concentrations of heavy metals were found near Aotou Bay and Fanhe Port. Overall, most of heavy metals in the surface sediments of Daya Bay meet the first class of the national standard of marine sediment quality, characterizing a low risk level of heavy metal pollution. The results of correlation analysis showed that heavy metals in surface sediments of Daya Bay were rather influenced by the weathering and erosion of rocks, industrial sewage discharge and marine aquaculture. The binding of Cu and oxide of Fe and Mn is weaker than other form of bindings. Thus, metallic copper sulfide may be formed after Cu being adsorbed by sediments in reducing environment, which is why much higher content of Cu observed near Xizhou Island. Plankton growths, as the main source of organic matter in the Bay, had great influence on the contents of Cr, Zn and Pb in the sediments. Besides, Cr, As and Pb were mainly combined with silt while Zn was mainly combined with clay.

Key words: marine chemistry; heavy metal; sediments; correlation analysis; Daya Bay

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2021.04.011

(责任编辑:王 静)