

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.164

引用格式: 阳峰, 陆野, 李诗颖, 等. 横琴粤澳深度合作区海域表层沉积物微量元素地球化学特征[J]. 中国地质调查, 2024, 11(6): 76–85. (Yang F, Lu Y, Li S Y, et al. Geochemical characteristics of trace elements in marine surface sediments of Guangdong–Macao In–Depth Cooperation Zone in Hengqin[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(6): 76–85.)

横琴粤澳深度合作区海域表层沉积物 微量元素地球化学特征

阳峰, 陆野, 李诗颖, 林振文, 郑思琦, 罗俊超, 郭峰
(广东省海洋地质调查院, 广东 广州 510080)

摘要: 为了揭示横琴粤澳深度合作区海域表层沉积物微量元素的地球化学特征, 对合作区表层沉积物粒度和14种微量元素进行测试分析, 结合元素相关性分析和因子分析, 对沉积物中微量元素的分布、来源及其控制因素进行探讨, 并对重金属元素的潜在生态风险进行评价。①合作区表层沉积物类型主要有砂(S)、泥质砂(mS)、砂质粉砂(sZ)、粉砂(Z)和泥(M)5种; ②合作区海域表层沉积物中Zn、V、Cr、Zr、Ba含量相对偏高, 平均值均大于 100×10^{-6} , 其中Ba含量最高, 平均值为 431.13×10^{-6} , Cd含量最低, 平均值为 0.73×10^{-6} , 其余元素含量平均值为 $(15.95 \sim 83.03) \times 10^{-6}$, 与珠江沉积物相比, 合作区沉积物明显富集重金属元素Cd、Pb、Zn、As和Cu; ③陆域岩石自然风化释放和人为活动排放作用是合作区沉积物微量元素的主要来源, 沉积物中Sc、Co、Ni、Ga等元素含量的变化主要受控于沉积水动力环境, 重金属元素Ba、Cd含量变化受控于人类活动, Pb、Zn含量变化则受自然来源和人为活动共同影响; ④合作区表层沉积物重金属元素潜在生态风险指数平均值为140.79, 总体上较为严重, 主要由Cd引起, 应加强对Cd的监测。研究成果可为合作区海岸带可持续发展及环境保护和治理提供科学依据。

关键词: 横琴粤澳深度合作区; 表层沉积物; 微量元素; 因子分析; 生态风险

中图分类号: P736.4

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2024)06–0076–10

0 引言

河口近岸地区沉积作用受自然因素和人类活动共同影响, 其沉积物元素地球化学特征是流域基岩风化剥蚀、搬运、沉积, 人为输入及海洋生物沉积等作用的综合体现, 如何较为准确的评估各种作用对沉积物的贡献是一个难点。微量元素因其在元素地球化学循环过程中具有相对较好的稳定性, 成为探讨物质来源和沉积环境演化的重要手段^[1–4]。如孙维萍等^[5]通过对南极普里兹湾表层沉积物开展微量元素研究, 揭示了大陆基岩风化和海洋生源性沉降作用是其主要的物质来源; 张从伟等^[6]利用多元统

计方法分析了三亚近岸海域表层沉积物微量元素的来源、分布特征及其控制因素, 指出Li等元素来源与分布受控于陆源黏土矿物吸附作用, Sr受海洋生物沉积作用控制, Zr主要受重矿物控制, Ba和Rb受区域背景控制, Cd和As则与人类活动密切相关。

横琴粤澳深度合作区位于广东省珠海市南部, 与澳门特别行政区一水相隔。以往研究主要集中于合作区西侧的磨刀门河口, 前人对磨刀门河口地形地貌特征、水文水动力过程、泥沙输运特征以及环境质量进行了大量研究^[7–14], 表明河口地形地貌受径流、潮流和波浪作用共同影响, 磨刀门水道径流下泄至口门后分为东西两汉, 形成了口外拦门沙和东滩、西滩地貌, 磨刀门河口表层沉积物重金属污

收稿日期: 2024–03–14; 修订日期: 2024–12–02。

基金项目: 广东省自然资源厅“广东省海岸带综合地质调查——横琴新区调查示范(编号: 2020–13)”和“广东海陵湾海岸带综合地质调查(编号: 2024–59)”项目联合资助。

第一作者简介: 阳峰(1990—), 男, 工程师, 主要从事区域地质和海洋地质调查工作。Email: 904293846@qq.com。

染生态风险等级较高。以上研究并未涉及微量元素地球化学特征,少数的有关海域表层沉积物微量元素地球化学的研究也仅限于珠江口各大口门^[15-16],并指明了珠江口微量元素的主要物质来源有陆域岩石风化剥蚀、人为排放和海洋生物作用。上述研究存在时限较老、分析采样点远离合作区的不足、不能准确刻画当前合作区近岸海域表层沉积物地球化学特征的问题。本文通过对合作区海域表层沉积物微量元素地球化学特征的分析,结合多元统计方法,探究沉积物中微量元素的来源及其控制因素,并对重金属元素潜在生态风险进行评价,以期合作区海岸带的开发利用和环境保护提供地质支撑。

1 研究区概况

横琴粤澳深度合作区位于珠江口西岸,珠海市南部,毗邻澳门,总面积约 164 km²,其中海域面积约 82 km²(图 1)。合作区大部分处于磨刀门河口,是一个以径流作用占主导的地区,其北侧为马骝洲水道,水深为 -5.5 ~ 1.5 m,西侧为磨刀门水道,水深为 -8.5 ~ 1.0 m,南侧为宽广的浅滩,地形平坦开阔,水深为 -4.0 ~ 1.5 m^[17]。气候类型属于亚热带季风气候,年均气温较高,雨量丰沛。

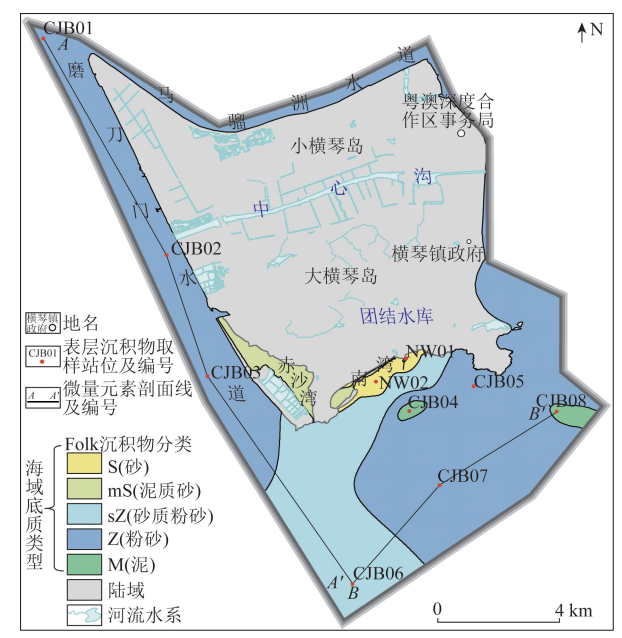


图 1 合作区采样站位及表层沉积物类型分布
Fig.1 Sampling stations and surface sediment types in the cooperation zone

合作区潮汐类型为不正规半日潮,具有日不等

现象,年平均潮差 1.2 ~ 1.6 m。波浪以涌浪为主,常浪向为 SE 向,年平均浪高 1.19 m。

合作区及其周边岩性主要为燕山期中酸性花岗岩,构造受 NE 向莲花山断裂带和 NW 向西江断裂带的影响,发育了一系列的 NE 向和 NW 向断裂,形成棋盘格子状构造格架,第四纪沉积环境主要为三角洲平原相,发育了礼乐组和桂洲组。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

本研究于 2020 年 5 月在合作区采集了 10 个站位(图 1)表层沉积物样品,样品平面分布较为均匀,其中 8 个为抓斗取样,2 个为柱状取样(截取顶部 0 ~ 20 cm 部分作为表层样)。样品粒度分析在南京地理与湖泊研究所完成,首先将样品混合均匀,选取适量样品,用双氧水(体积分数 30% 的 H₂O₂)去除有机质,然后加入盐酸(浓度 3 mol/L)去除钙质胶结物,最后加入去离子水并经过 3 次离心分离,待样品达到洗盐要求后,采用激光粒度仪 Mastersize 2000 进行粒度测定,所有样品均经过重复测试,测试误差小于 2%。沉积物分类命名采用 Folk 分类法^[18]。

样品微量元素分析在澳实矿物实验室(广州)完成,沉积物经冷冻干燥后,研磨至 200 目,并烘干,称取 0.05 g 样品置于聚四氟乙烯消解罐,加入氢氟酸和硝酸(1:1)对沉积物进行消解,置于烘箱 190 ℃ 保持 48 h,冷却后置于电热板上蒸干,加入 3 ml 50% 的 HNO₃,置于烘箱 150 ℃ 继续溶样 8 h 以上,移液后定容待测。样品分析 Co、Cu、Ni、Sr、Zn、V、Ba、Sc、Ga、Pb、Cr、Zr、As 和 Cd 共 14 种微量元素,分析方法采用等离子质谱法,测试中通过插入重复样和标准物质来监控质量,保证测试精度和准确度优于 10%。实验数据的相关性分析和因子分析采用 SPSS 21.0 软件处理。

2.2 评价方法

重金属潜在生态风险评价方法采用 Hakanson^[19]提出的潜在生态风险指数法,选择 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 和 As 进行评价,计算公式为

$$R_i = \sum_i E_r^i \quad (1)$$
$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \quad (2)$$
$$C_r^i = C^i / C_n^i \quad (3)$$

式中： R_i 为参与评价的重金属的综合潜在生态风险指数， E_i^i 为重金属 i 的潜在生态风险指数； T_i^i 为重金属 i 的毒性响应系数； C_i^i 为重金属 i 的污染系数； C_i^i 为沉积物中重金属 i 的实测浓度， 10^{-6} ； C_n^i 为重金属 i 的评价参比值。本研究采用甘华阳等^[20]于 2010 年提出的珠江口沉积物重金属背景值作为参照值，毒性响应系数采用徐争启等^[21]的研究成果，结果见表 1。因本文研究数据未包括 Hg 和 PCB，故对分级原则进行了适当调整，结果见表 2。

表 1 珠江口表层沉积物中重金属背景值和毒性系数

Tab.1 Background value and toxicity coefficient of heavy metals in the surface sediments of Pearl River estuary

重金属元素	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As
珠江口背景值 ^[20] / 10^{-6}	38.6	44.0	100.7	0.2	81.1	22.9
毒性系数 ^[21]	5	5	1	30	2	10

表 2 Hakanson 潜在生态风险等级划分标准

Tab.2 Classification criteriien of Hakanson potential ecological risk

E_i^i	单个重金属潜在生态风险指数	R_i	重金属综合潜在生态风险指数
<30	低	<60	低
[30,60)	中等	[60,120)	中等
[60,120)	较重	[120,240)	重
[120,240)	重	≥ 240	严重
≥ 240	严重		

3 结果与讨论

3.1 沉积物类型与分布

沉积物粒度分析结果显示，合作区海域表层沉积物中值粒径为 2.80 ~ 7.29 Φ (Φ 为粒径单位， $\Phi = -\log_2 D$, D 为颗粒直径, mm)，平均值为 5.83 Φ 。沉积物类型有砂(S)、泥质砂(mS)、砂质粉砂(sZ)、粉砂(Z)和泥(M)5 种(图 2)，其中砂主要分布在近岸海滩；泥质砂分布于潟湖以及沙滩上河道附近；砂质粉砂分布在磨刀门河口区；粉砂分布于合作区西侧、北侧和东南侧；泥呈斑块状分布于横琴岛东南侧。沉积物分布格局具有口内河床—河口—口外，粒度细—粗—细的特征。前人研究显示沉积物粒度较粗主要是由于这一地带泥沙随西江径流以推移方式向下搬运，受阻于河口盐水楔，无法继续向前搬运，形成一粒度增大带，也就是常见的河口拦门沙^[7,10]。近岸海滩沉积物粒度较粗，可能是由于海岸受径流和波浪冲刷带来了粗颗粒沉积物。潟湖等地的沉

积物粒度相对较细是由于潟湖处于半封闭环境，水动力较弱。

3.2 微量元素丰度特征

合作区海域表层沉积物中 Zn、V、Cr、Zr 和 Ba 的含量相对较高，平均值都超过了 100×10^{-6} ，其中 Ba 含量最高，平均值为 431.13×10^{-6} ，Cd 的含量最低，平均值为 0.73×10^{-6} ，其余元素含量平均值为 $(15.95 \sim 83.03) \times 10^{-6}$ (表 3)。除 Sr 和 Ba 外，沉积物中绝大多数微量元素含量均高于上陆壳^[22]、中国大陆沉积物以及南海浅海沉积物^[23]，这可能与区域微量元素背景值较高或者微量元素重金属污染有关。与珠江沉积物^[23]相比，合作区沉积物非常富集 Cd，其含量可达珠江沉积物的 8.1 倍，Pb、Zn、As 和 Cu 也较为富集，其含量分别是珠江沉积物的 1.6 倍、1.9 倍、1.9 倍和 1.3 倍，其余元素含量略微富集或基本相当。与内伶仃洋沉积物^[24]相比，合作区沉积物相对较为富集 Cd 和 As，其含量分别是内伶仃洋沉积物的 2.6 倍和 1.5 倍，而其余元素含量基本相当。与南海浅海沉积物^[23]相比，合作区沉积物非常富集 Cd、As 和 Cu，其含量分别是南海浅海沉积物的 13.8 倍、4.6 倍和 3.9 倍，较为富集 Co、Ni、Zn、V、Ba、Sc、Ga、Pb 和 Cr，其含量是南海浅海沉积物的 1.5 ~ 2.7 倍，Zr 含量基本相当，Sr 含量则相对亏损，其含量仅为南海浅海沉积物的约 1/3。

以上对比表明，相对于上游珠江沉积物，合作区沉积物更为富集 Cd、Pb、Zn、As 和 Cu 等重金属元素，甘华阳等^[16]认为这是由于河口处河道变宽，流速减缓，加之河口咸淡水之间复杂的物理化学过程使大量微量元素随着河流悬浮物而沉淀到河口沉积物中。

然而，河口处河道变宽不能解释 Co、Ni、Ga 等元素并没有明显富集，也不符合陆源补给作用中随离陆源距离和水深的增大沉积物元素含量降低的变化规律^[25]。本研究认为合作区沉积物重金属相对富集可能与河流流经珠三角城镇和工业密集区有关。据 Ouyang 等^[26]的研究，珠三角河水中几乎所有城镇和工业区样品的重金属元素平均含量都偏高，连锁反应下导致合作区沉积物重金属含量偏高。与下游南海浅海相比，合作区沉积物绝大多数微量元素含量明显偏高。但南海浅海沉积物 Sr 的含量明显高于合作区，主要是因为 Sr 是亲生物元素，浅海生物沉积作用较河口更强。

表 3 表层沉积物微量元素含量统计

Tab.3 Statistics of trace element content in the surface sediments

元素	最小值	最大值	平均值	标准偏差	变异系数	上陆壳 ^[22]	中国大陆沉积物 ^[23]	南海浅海 ^[23]	珠江 ^[23]	内伶仃洋 ^[24]
Co	14.50	21.00	18.43	1.96	0.11	10	13	9	18	16.30
Cu	33.60	56.50	50.74	7.62	0.15	25	20	13	38	81.60
Ni	29.40	46.10	41.15	5.42	0.13	20	28	20	35	43.50
Sr	67.30	99.00	83.03	8.85	0.11	350	200	265	100	94.56
Zn	122.00	197.00	162.63	26.92	0.17	71	66	61	85	144.30
V	104.00	171.00	142.88	21.33	0.15	60	80	61	—	121.80
Ba	351.00	521.00	431.13	53.1	0.12	550	510	288	340	368.80
Sc	11.50	17.70	15.95	2.01	0.13	11	11	8	—	13.71
Ga	15.80	24.10	21.44	2.68	0.12	17	15	12	18	22.20
Pb	36.40	54.90	47.86	7.32	0.15	20	25	19	30	48.60
Cr	90.00	120.00	108.75	11.26	0.10	35	70	53	86	94.70
Zr	219.00	443.00	274.75	70.99	0.26	190	260	235	270	240.40
As	22.50	43.50	33.01	6.57	0.20	1.5	12	7.2	17	22.50
Cd	0.38	1.10	0.73	0.29	0.39	0.098	0.18	0.053	0.09	0.28

注：微量元素含量单位为 10⁻⁶；“—”表示无数据。

3.3 微量元素分布特征与控制因素

沉积物微量元素含量与中值粒径的相关性分析结果(表 4)显示,元素含量与粒径的相关性较低,并未表现出明显的“粒控效应”^[27],这可能与分析样品数量较少有关。沉积物中 V、Cr、Co、Ni、Cu、Sc、Ga 等元素含量平面分布特征具有较好的一致性,元素间相关性较高,且含量都在 CJB01 站位出现低值; Pb、

Zn 含量平面分布特征一致,两者相关系数达 0.98,高值区分布在 CJB03 和 CJB05 站位,低值分布在 CJB04 站位; As 平面分布特征表现为在泥质沉积物中含量稍高; Sr 在 CJB01 站位出现低值; Ba 低值站位 CJB04,高值站位 CJB03,与绝大多数元素相关性不明显; Cd 平面分布特征很不均匀; Zr 除 CJB01 站位含量异常高外,其余站位分布比较均一。

表 4 表层沉积物微量元素与沉积物粒径相关系数矩阵

Tab.4 Correlation coefficients matrix of the trace elements and grain size of the surface sediments

	Co	Cu	Ni	Sr	Zn	V	Ba	Sc	Ga	Pb	Cr	Zr	As	Cd	中值粒径
Co	1														
Cu	0.93	1													
Ni	0.88	0.97	1												
Sr	0.89	0.76	0.62	1											
Zn	0.29	0.54	0.69	-0.07	1										
V	0.89	0.91	0.89	0.68	0.42	1									
Ba	-0.21	-0.01	0.15	-0.51	0.73	0.05	1								
Sc	0.96	0.98	0.97	0.78	0.52	0.92	-0.02	1							
Ga	0.75	0.90	0.96	0.48	0.79	0.77	0.20	0.89	1						
Pb	0.30	0.53	0.69	-0.05	0.98	0.37	0.62	0.52	0.81	1					
Cr	0.78	0.88	0.93	0.48	0.62	0.84	0.05	0.87	0.92	0.65	1				
Zr	-0.75	-0.86	-0.90	-0.57	-0.77	-0.70	-0.30	-0.87	-0.90	-0.76	-0.70	1			
As	0.53	0.68	0.55	0.58	0.20	0.65	-0.14	0.59	0.57	0.15	0.52	-0.48	1		
Cd	-0.47	-0.42	-0.34	-0.59	0.14	-0.25	0.74	-0.42	-0.39	0.00	-0.41	0.23	-0.39	1	
中值粒径	0.25	0.23	0.20	0.18	-0.07	0.29	-0.33	0.22	0.25	-0.04	0.46	0.06	0.30	-0.26	1

为探究沉积物微量元素从磨刀门口内河床至河口以及在南湾海域的变化特征,本研究设置了 AA'和 BB'两条剖面(图 1)。从剖面 AA'来看,从磨刀门口内河床至河口,沉积物微量元素 V、Sc、Cr、Co、Ni、Ga、Cu、As、Pb、Zn 等除在磨刀门水道与马骝洲水道分叉处的 CJB01 站位出现低值外,在

口内河床元素含量基本稳定,在河口处元素含量降低(图 2(a),(b),(c),(d)),Sr 含量除在 CJB01 站位较低外,其余站位含量较为一致(图 2(e)),Ba 含量在口内河床上游含量较低,在近河口的 CJB03 站位含量陡增,在河口处又有所降低(图 2(f)),Zr 含量除在 CJB01 站位异常高外,其

余站位分布较均一(图 2(g)),Cd 含量变化呈锯齿状,在 CJB01 和 CJB03 站位较高(图 2(h))。从剖面 BB'来看,从 SW—NE,表层沉积物微量元素 V、Sc、Co、Ni、Ga、Cr、Sr、Cu、As 等含量变化略呈“V”字形,整体含量比较一致,在 CJB07 站位

含量稍低(图 3(a),(b),(c),(e)),Pb、Zn、Ba、Cd 含量变化呈倒“V”字形,CJB07 站位含量稍高,CJB08 站位含量较低(图 3(c),(d),(f),(h)),Zr 含量变化在前段比较平稳,在 CJB08 站位略微上升(图 3(g))。

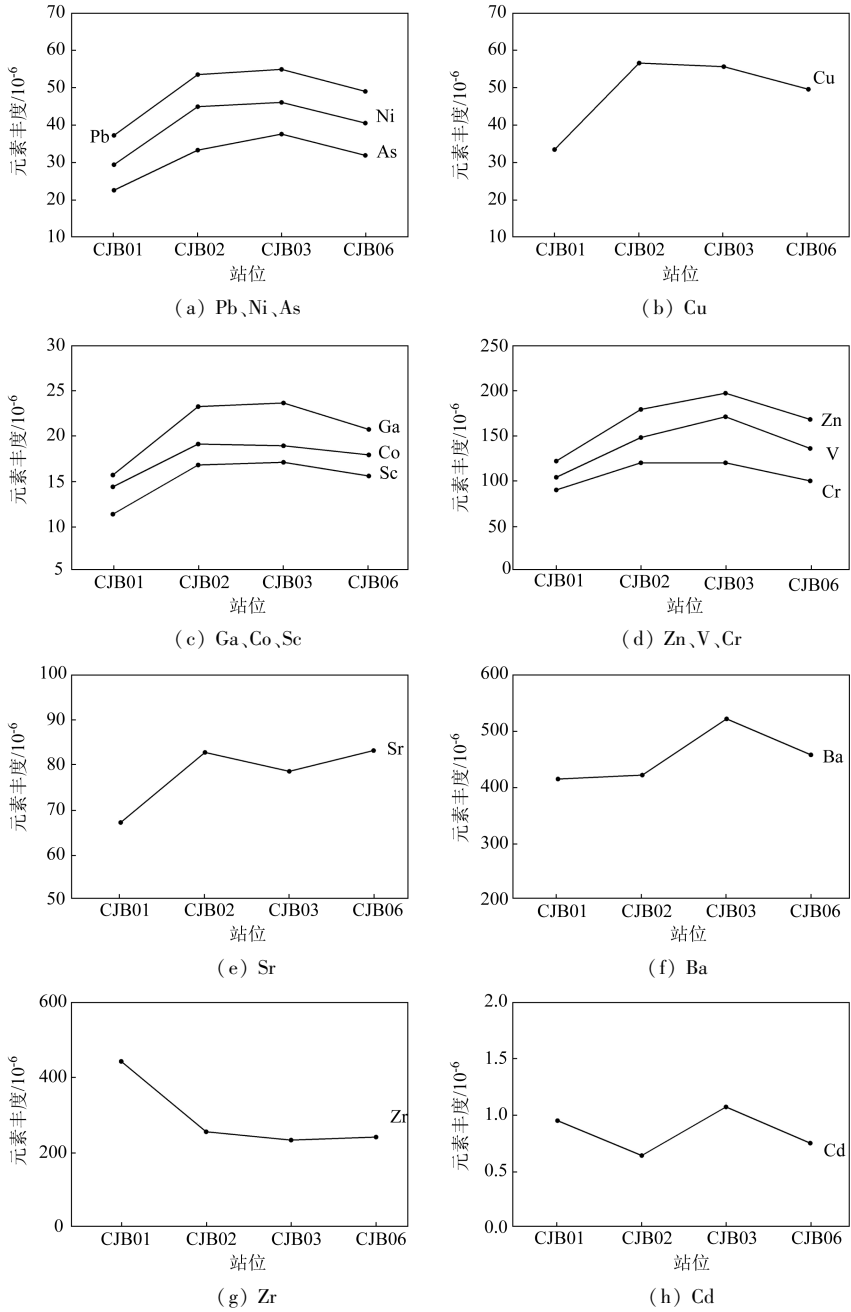


图 2 AA'剖面微量元素含量变化

Fig. 2 Concentration variation of trace elements of the AA' section

已有较多研究证明^[28-30],因子分析在研究沉积物元素来源和影响元素富集的主要因素方面能够提供比较明确的信息。为了探索合作区表层沉积物微量元素来源及其分布特征的控制因素,本研

究对沉积物微量元素进行了因子分析,取特征值大于 1 的因子,进行最大方差旋转,对 Pb、Sc、Zr、Zn、Cd、Ni、Ba 7 种微量元素进行了分析(分析前的 Bartlett 球度检验给出相伴概率小于 0.01,且 KMO 检验

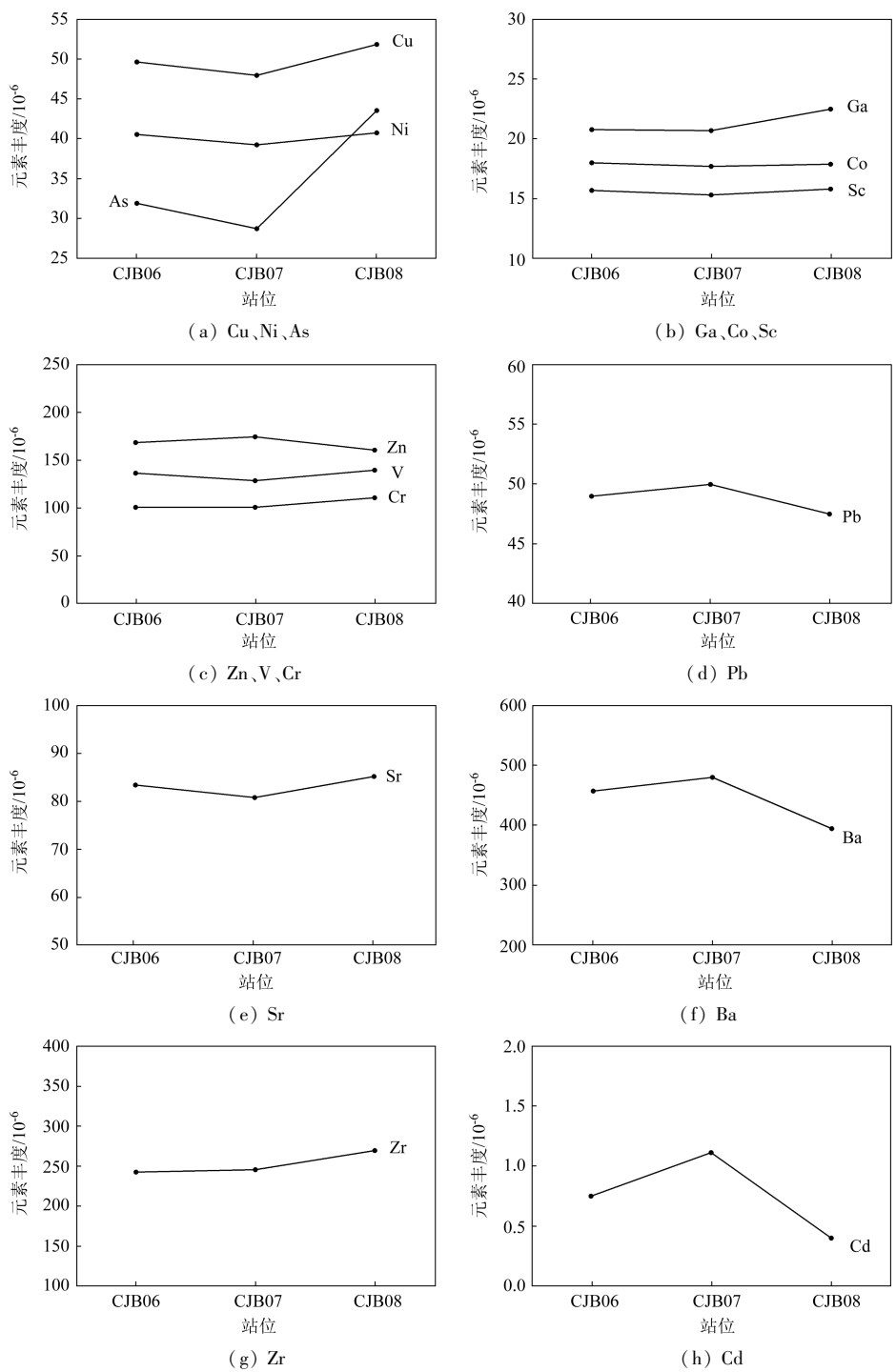


图 3 BB'剖面微量元素含量变化
Fig. 3 Concentration variation of trace elements of the BB' section

值为 0.529,表明可以进行因子分析),因子分析结果见图 4。根据因子载荷绝对值最大化原则进行元素归类,合作区表层沉积物元素组合可归并为两个因子,这两个因子可以解释原始数据 91.86% 的信息。

因子 I 中 Sc、Ni、Pb、Zn 具有较高正载荷,Zr 具有较高负载荷。前人研究认为 Sc、Ni、Zr 等元素主

要赋存于陆源碎屑沉积物中,且在风化、剥蚀、运移和沉积等地质过程中具有较好的稳定性^[1, 31],保存了源岩的化学组成特征,且沉积物中 Sc、Ni、Zr 具有良好的相关性(表 4),因子 I 可能代表了微量元素的自然来源主要来自于沉积物物源。Zr 在因子 I 中呈负载荷,Zr 元素集中赋存于重矿物中,常以锆

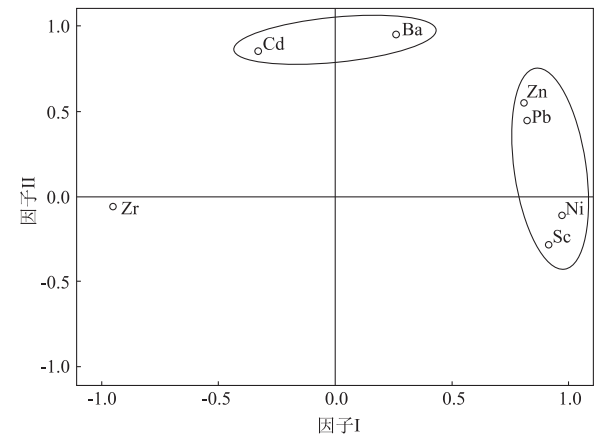


图4 各变量因子载荷

Fig.4 Loading of the variable factors

石碎屑的形式搬运沉积^[6],而这种矿物化学性质稳定且比重较大,在运移过程中较早沉积。因子 II 中 Ba、Cd 具有较高正载荷,两者都为重金属元素,研究表明,除自然来源外,工农业生产、水产养殖以及废物排放等人类活动也会带来大量的 Cd、Ba^[32-33]。所以因子 II 可能代表了微量元素的人为活动输入。同时注意到 Pb 和 Zn 在因子 II 中也有一定的正载荷,表明其除了受自然来源影响外,还受到人类活动的影响。研究区工业与城镇化建设高速发展,水道纵横,航运繁忙,同时在合作区西侧的赤沙湾和南侧南湾分布有大片的海水养殖场,这些人类活动带来的污染必然会影 响沉积物中微量元素 的分布。

磨刀门水道与马骝洲水道分汊处 Zr 含量高,而 Sc、V、Cr、Co、Ni、Pb、Sr、Zn 和 Ga 等元素含量较低,主要是因为该处流面变宽,流速变缓,比重较大

的锆石大量沉积,锆石的沉积导致沉积物 Zr 含量增高,同时也对其余元素起到了稀释作用。当然,沉积物中 V、Cr、Co、Ni 等过渡金属元素含量变化还与氧化还原条件密切相关,在还原条件下有利于在沉积物中富集。本研究对合作区海水理化因子分析结果显示,海水溶解氧浓度为 6.4 ~ 7.8 mg/L,化学需氧量为 0.92 ~ 1.28 mg/L^[17],根据《GB 3097—1997 海水水质标准》^[34]均达到国家一类水质标准,表明合作区海域水体总体上处于富氧条件,氧化还原条件不是合作区沉积物中微量元素丰度差异的主控因素。Cd 含量较高,主要是合作区位于航道,且邻近渔港,各类船只来往频繁,化石燃料的燃烧排放了大量的 Cd^[35]。Sc、Co、Ni、Pb、Zn 和 Ga 等在磨刀门口内河床含量基本稳定,而在口门位置含量降低,可能是由于口门处沉积物粒度较粗,不利于元素的富集,此外河海的混合沉积作用稀释了元素含量。Ba 和 Cd 含量在近河口含量骤增,可能与该处靠近赤沙湾海水养殖场有关,养殖场杀虫剂的使用导致 Ba 含量升高,同时该处往返的渔船活动导致 Cd 含量增加。Pb、Zn 含量变化与 Sc、Co、Ni、Ga 等被认为是自然来源的元素变化趋势并不完全一致,表明了 Pb、Zn 除受自然来源因素控制外,还受到了人为因素影响,船只汽油、柴油的燃烧带来了一定的 Pb、Zn。

3.4 重金属元素生态风险评价

根据沉积物重金属潜在生态风险的计算公式及确定生态风险分级的各项指标,计算得到全部站位各重金属的潜在生态风险指数及综合潜在生态风险指数(表 5)。

表 5 表层沉积物重金属元素的潜在生态风险指数
Tab.5 Potential ecological risk index of heavy metal elements in the surface sediments

样品编号	E_r^i						R_i	评价分级
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As		
CJB01	4.35	4.23	1.21	142.50	2.22	9.83	164.34	重
CJB02	7.32	6.08	1.78	96.00	2.96	14.54	128.68	重
CJB03	7.20	6.24	1.96	160.50	2.96	16.42	195.28	重
CJB04	7.25	4.14	1.22	85.50	2.71	16.51	117.33	中等
CJB05	7.11	6.18	1.77	57.00	2.96	12.58	87.60	中等
CJB06	6.42	5.57	1.67	112.50	2.47	13.93	142.56	重
CJB07	6.20	5.68	1.73	166.50	2.47	12.53	195.11	重
CJB08	6.71	5.40	1.59	60.00	2.71	19.00	95.40	中等
平均值	6.57	5.44	1.61	110.06	2.68	14.42	140.79	重

除 Cd 外,其余重金属的潜在生态风险指数 E_r^i 值均小于 30,属于低潜在生态风险程度,Cd 由于生态毒性系数较大,其生态风险系数较高,50% 站位的 Cd 潜在生态风险指数 E_r^i 值 ≥ 60 ,属较重风险等级,37.5% 站位的 Cd 潜在生态风险指数 E_r^i 值 ≥ 120 ,属重风险等级。

综合潜在生态风险指数 R_i 平均值为 140.79,属重风险等级,其中有 3 个站位 $R_i \geq 60$,属中等风险等级,占比 37.5%,5 个站位 $R_i \geq 120$,属重风险等级,占比 62.5%。重综合潜在生态风险等级主要分布在航道以及海水养殖场附近,表明人类活动已经对合作区海域环境造成了一定影响。Cd 对 R_i 的贡献最大,虽然其含量较低,但其生态毒性系数大。在今后的环境管理工作中可以将 Cd 作为主要监测指标。

4 结论

(1)横琴粤澳深度合作区海域表层沉积物类型主要有有砂(S)、泥质砂(mS)、砂质粉砂(sZ)、粉砂(Z)和泥(M)5 种。砂主要分布在近岸海滩;泥质砂分布于瀉湖以及沙滩上河道附近;砂质粉砂分布在磨刀门河口区;粉砂分布于合作区西侧、北侧和东南侧;泥呈斑块状分布于横琴岛东南侧。

(2)合作区海域表层沉积物中 Zn、V、Cr、Zr、Ba 的含量相对偏高。相对于珠江沉积物,合作区沉积物 Cd、Pb、Zn、As、Cu 等相对富集。

(3)因子分析及元素相关性分析表明,合作区沉积物微量元素来源主要为陆域岩石的自然风化释放和人为活动排放。沉积物中 Sc、Co、Ni、Ga 等元素含量的变化主要受控于沉积水动力环境;Ba、Cd 等重金属含量变化受控于人类活动;Pb、Zn 含量变化受自然来源和人为活动共同影响。

(4)合作区重金属元素潜在生态风险指数总体上较为严重,Cd 是影响合作区重金属元素潜在生态风险等级最主要的因素,在今后的环境管理中应加强对 Cd 的监测。

参考文献(References):

[1] 金秉福,林振宏,季福武.海洋沉积环境和物源的元素地球化学记录释读[J].海洋科学进展,2003,21(1):99-106.
Jin B F, Lin Z H, Ji F W. Interpretation of element geochemical records of marine sedimentary environment and provenance[J].

Advances in Marine Science,2003,21(1):99-106.
[2] Sun Y, Liu B L, Zheng H Y, et al. Trace element geochemistry of sediments in the Pearl River Estuary and its implication for provenance[J]. Regional Studies in Marine Science, 2024, 70: 103388.
[3] Sirocko F, Garbe - Schönberg D, Devey C. Processes controlling trace element geochemistry of Arabian Sea sediments during the last 25,000 years[J]. Global and Planetary Change, 2000, 26(1-3):217-303.
[4] Heimbürger L E, Cossa D, Thibodeau B, et al. Natural and anthropogenic trace metals in sediments of the Ligurian Sea (Northwestern Mediterranean)[J]. Chemical Geology, 2012, 291: 141-151.
[5] 孙维萍,扈传昱,韩正兵,等.南极普里兹湾表层沉积物微量元素分布特征及其物源指示意义[J].沉积学报,2016,34(2):308-314.
Sun W P, Hu C Y, Han Z B, et al. Distribution and sources of trace metals in the surface sediments of Prydz Bay, Antarctica[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(2):308-314.
[6] 张从伟,瞿洪宝,熊元凯,等.三亚近岸海域表层沉积物微量元素地球化学特征[J].海洋学研究,2021,39(3):72-83.
Zhang C W, Qu H B, Xiong Y K, et al. Geochemical characteristics of trace elements in surface sediments from Sanya offshore area[J]. Journal of Marine Sciences, 2021, 39(3):72-83.
[7] 杨蕾.珠江磨刀门河口的沉积化学环境研究[D].广州:中山大学,2006.
Yang L. Study on Environmental Geochemistry of the Sediments in Modaomen Estuary of the Pearl River[D]. Guangzhou: Sun Yat - Sen University, 2006.
[8] 李平,郭晓娟,杨清书,等.珠江磨刀门河口表层沉积物中重金属的分布特征及生态风险评价[J].海洋环境科学,2017,36(5):746-753.
Li P, Guo X J, Yang Q S, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments in Modaomen distributary mouth of Pearl River Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(5):746-753.
[9] 高时友,何用,卢陈,等.磨刀门口夏冬季沿岸流特征及成因分析[J].海洋学报,2017,39(5):1-9.
Gao S Y, He Y, Lu C, et al. The characteristics of alongshore current in flood and the dry season in Modaomen Estuary of the Pearl River and the reason analysis[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(5): 1-9.
[10] 陈晖,刘坤松,郭晓娟,等.珠江磨刀门河口表层沉积物磁性特征及其动力沉积环境意义[J].海洋学报,2017,39(3):44-54.
Chen H, Liu K S, Guo X J, et al. Magnetic properties of surficial sediment and its implication for sedimentation dynamic environment in the Modaomen Outlet of the Pearl River Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(3):44-54.
[11] 蔡华阳,杨昊,郭晓娟,等.珠江磨刀门河口径潮动力耦合条件下余水位的多时空尺度分析[J].海洋学报,2018,40(7):

- 55–65.
- Cai H Y, Yang H, Guo X J, et al. Investigation of temporal – spatial distribution patterns of residual water level under the influence of tide – river interaction in the Modaomen Estuary, Zhujiang River[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(7): 55–65.
- [12] 贾良文, 吕晓莹, 程聪, 等. 珠江口磨刀门月际尺度地貌演变研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(9): 65–77.
- Jia L W, Lü X Y, Cheng C, et al. Study on the morphological evolution of the Modaomen Estuary in monthly scale[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(9): 65–77.
- [13] 蒋陈娟, 周佳楠, 杨清书. 珠江磨刀门河口潮汐动力变化对人类活动的响应[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(6): 66–76.
- Jiang C J, Zhou J N, Yang Q S. Effects of human intervention on tidal dynamics in the Modaomen Estuary, Pearl River[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2020, 39(6): 66–76.
- [14] 覃业曼, 陆虎, 谢子强, 等. 珠江口磨刀门水域水质状况调查研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(8): 61–65.
- Qin Y M, Lu H, Xie Z Q, et al. Investigation research on water quality of Modaomen waters of the Pearl River Estuary[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(8): 61–65.
- [15] 蓝先洪. 珠江口表层沉积物的地球化学特征[J]. 海洋湖沼通报, 1989, 39(4): 53–61.
- Lan X H. Geochemical characteristics of surface sediment in the Pearl River Estuary[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1989, 39(4): 53–61.
- [16] 甘华阳, 梁开, 郑志昌. 珠江口表层沉积物中微量元素地球化学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 131–139.
- Gan H Y, Liang K, Zheng Z C. Trace elements geochemical characteristics of the surface sediments of Pear River Estuary[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(4): 131–139.
- [17] 广东省海岸带综合地质调查 – 横琴新区调查示范项目成果报告[R]. 广州: 广东省海洋地质调查院, 2021.
- The Reports of Comprehensive Geological Survey of Coastal Zone in Guangdong Province – Survey Demonstration Project of Henqin New Aera[R]. Guangzhou: Marine Geological Survey Institute of Guangdong Province, 2021.
- [18] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar [Texas]: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3–26.
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975–1001.
- [20] 甘华阳, 梁开, 郑志昌. 珠江口沉积物的重金属背景值及污染评价分区[J]. 地球与环境, 2010, 38(3): 344–350.
- Gan H Y, Liang K, Zheng Z C. Background values, contamination assessment and zoning of heavy metals in sediments of the Pearl River Estuary[J]. Earth and Environment, 2010, 38(3): 344–350.
- [21] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112–115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 112–115.
- [22] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Pub, 1985: 29–45.
- [23] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- Zhao Y Y, Yan M C. Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [24] 马胜中, 倪玉根, 林进清, 等. 1:5 万珠江口内伶仃洋海洋区域地质调查(试点)成果报告[R]. 广州: 广州海洋地质调查局, 2015.
- Ma S Z, Ni Y G, Lin J Q, et al. The Reports of Geological Survey of 1:50 000 Lingdingyang, Pearl River Estuary[R]. Guangzhou: Guangzhou Marine Geological Survey, 2015.
- [25] 王惠艳, 胡树起, 汤丽玲, 等. 珠江口海域与南黄海域表层沉积物地球化学特征[J]. 物探与化探, 2014, 38(1): 51–57.
- Wang H Y, Hu S Q, Tang L L, et al. Geochemical characteristics of surface sediments from the sea areas of Pearl River Estuary and South Yellow Sea[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(1): 51–57.
- [26] Ouyang T P, Zhu Z Y, Kuang Y Q, et al. Dissolved trace elements in river water: spatial distribution and the influencing factor, a study for the Pearl River Delta Economic Zone, China[J]. Environmental Geology, 2006, 49(5): 733–742.
- [27] 张晓东, 翟世奎, 许淑梅, 等. 长江口外缺氧区沉积物中氧化还原敏感性元素的“粒控效应”[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(5): 868–874.
- Zhang X D, Zhai S K, Xu S M, et al. The “Grain Size Effect” of redox sensitive elements in the sediments in the Hypoxia Zone of the Changjiang Estuary[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(5): 868–874.
- [28] Hu B Q, Cui R Y, Li J, et al. Occurrence and distribution of heavy metals in surface sediments of the Changhua River Estuary and adjacent shelf (Hainan Island)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 76(1–2): 400–405.
- [29] Cai Y Q, Mao L J, Deng X Q, et al. Trace elements in surface sediments from Xinyanggang River of Jiangsu Province, China: spatial distribution, risk assessment and source appointment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 187: 114550.
- [30] 王建丰, 雷天柱, 张生银, 等. 刘家峡水库表层沉积物微量元素地球化学特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2018, 38(3): 51–59.
- Wang J F, Lei T Z, Zhang S Y, et al. Trace element geochemistry of the surface sediments in the Liujiaxia Reservoir, Gansu[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2018, 38(3): 51–59.
- [31] 蔡观强, 邱燕, 彭学超, 等. 南海西南海域表层沉积物微量和稀土元素地球化学特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(5): 53–62.
- Cai G Q, Qiu Y, Peng X C, et al. the geochemical characteristics

of trace elements and REES in surficial sediments of the south-western South China sea and their implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(5): 53 – 62.

[32] 张从伟,李亮,龙根元,等. 三亚东部近岸海域表层沉积物重金属元素地球化学特征及环境质量评价[J]. *海洋学研究*, 2018, 36(2): 55 – 63.

Zhang C W, Li L, Long G Y, et al. Geochemical characteristics and environmental assessment of heavy metal elements in surface sediments from the offshore area of eastern Sanya[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2018, 36(2): 55 – 63.

[33] 罗昆,李亮,龙根元,等. 海南岛南部海域沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(1): 85 – 93.

Luo K, Li L, Long G Y, et al. Heavy metal pollution and their ecological risk assessment in sediments from southern Hainan Island[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, 26(1): 85 – 93.

[34] 国家环境保护局. GB 3097—1997 海水水质标准[S]. 北京: 环境科学出版社, 1997.

State Bureau of Environment Protection. GB 3097—1997 Sea Water Quality Standard[S]. Beijing: Environmental Science Press, 1997.

[35] 熊春晖,张瑞雷,吴晓东,等. 漏湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2016, 37(3): 925 – 934.

Xiong C H, Zhang R L, Wu X D, et al. Distribution and pollution assessment of nutrient and heavy metals in surface sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(3): 925 – 934.

Geochemical characteristics of trace elements in marine surface sediments of Guangdong – Macao In – Depth Cooperation Zone in Hengqin

YANG Feng, LU Ye, LI Shiyong, LIN Zhenwen, ZHENG Siqi, LUO Junchao, GUO Feng
(Marine Geological Survey Institute of Guangdong Province, Guangdong Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to reveal the geochemical characteristics of trace elements in marine surface sediments in Guangdong – Macao in – depth cooperation zone in Hengqin, the authors analyzed the grain size of surface sediments and 14 trace elements. The distribution, source and control factors of trace elements in surface sediments were discussed, combined with element correlation analysis and factor analysis, and the potential ecological risk of heavy metal elements were evaluated. The results are as follows. ① There are five types of surface sediments in the cooperation zone, including sand (S), muddy sand (mS), sandy silt (sZ), silt (Z) and mud (M). ② The content of Zn, V, Cr and Ba in surface sediments of the cooperation zone is relatively high, with an average of more than 100×10^{-6} . The content of Ba is the highest with an average of 431.13×10^{-6} , and content of Cd is the lowest with an average of 0.73×10^{-6} . The average content of other elements is between 15.95×10^{-6} to 83.03×10^{-6} . The surface sediments in the cooperation zone are enriched in the heavy metals, such as Cd, Pb, Zn, As, and Cu, compared with the sediments in Pearl River. ③ Natural weathering of land rock and artificial discharge are the main source of the trace elements in surface sediments of the cooperation zone. The content variation of Sc, Co, Ni and Ga are mainly controlled by sedimentary hydrodynamic environment, while the content variation of Ba and Cd are controlled by human activities. And the contents variation of Pb and Zn are influenced by both natural source and human activities. ④ The average potential ecological risk index of heavy metals in surface sediments in the cooperation zone is 140.79, in generally serious state. This is mainly caused by Cd, indicating the monitoring of Cd should be strengthened. The research results could provide scientific basis for the sustainable development, environmental protection and governance of Guangdong – Macao in – depth cooperation zone in Hengqin.

Keywords: Guangdong – Macao in – depth cooperation zone in Hengqin; surface sediments; trace elements; factor analysis; ecological risk

(责任编辑: 王晗)