doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.02.011

# 湛江湾表层沉积物微量元素特征及生态风险评价

曹瀚升 1.2, 邓忆雯 1.2, 陈法锦 1.2, 蒲晓强 1.2

(1. 广东海洋大学 海洋与气象学院,广东 湛江 524088; 2. 广东省近海海洋变化与灾害预警重点实验室,

广东 湛江 524088)

摘 要:利用 ICP-MS 和 XRF 方法,对湛江湾表层沉积物样品进行稀土元素和重金属元素丰度测 试,并利用 5 种不同的评价方法进行重金属污染评价,对湛江湾临港产业布局提供参考。结果表 明,沉积物中稀土元素总量高于大洋玄武岩,LREE 和 HREE 存在一定程度的分异,Eu 和 Ce 表现 均为负异常特征,其来源可能主要来源于陆源物质。单因子指数评价法和地质积累指数法表明, 沉积物 Cu 与 Zn 少量超标,具有中等程度污染,而 Cd 超标严重,达到严重污染程度。沉积物质量 基准法分析表明,污染物质对水生生物的毒性发生概率在 21%左右,其中以 Cu,Zn 和 Cd 为主。潜 在生态风险评估结果表明,生态风险等级为 Cd>Cu>Zn>Pb>Cr,其中 Cr 具极强的潜在生态风险, 并且存在增大的趋势,须采取有效措施加以改善。

关键词:湛江湾:表层沉积物:稀土元素:重金属:污染评价

中图分类号: P736.4 文献标志码:A 文章编号:1003-2029(2020)02-0071-07

以重金属为典型的毒害微量元素可以在水生 生物中聚集和积累,进一步通过食物链影响陆地生 物和人类的健康。沉积物中微量元素的积累和释放 可以直接影响水体质量,因此是记录水体微量元素 水平的有效载体,而柱状沉积物更是研究不同阶段 水质微量元素变化的风向标。

广东湛江湾水体交换能力差,水体长期不更换 会导致污染物的聚集,且今年聚集了大量的化工企 业,近海海域环境污染问题日趋严重。前人对湛江 湾环境评价多从单一环境指标进行重金属分布评 价,而近些年研究较少。例如,施玉珍等叩利用酸可 挥发性硫与同步浸提重金属之间的比例关系对湛 江湾进行污染评价;张际标等叩利用表层沉积物重 金属含量参数,采用沉积物富集系数法进行生态风 险评价。本文以柱状沉积物为目标,利用微量元素 的垂向分布特征,并采用单因子指数评价法、地质 积累指数法、沉积物质量基准法以及潜在生态风险 指数法对湛江湾的湾内环境进行重金属污染评价, 有利于全面了解湛江湾重金属丰度变化过程以及 污染状况,对湛江湾的生态保护以及湛江湾资源的 可持续开发与利用提供了一定的理论基础。

### 1 湛江湾区域概况

湛江湾位于我国内陆最南端的雷州半岛,湛江 湾海域东西约 24 km、南北约 15 km,其中水域面积 为 157.9 km<sup>2</sup>。湾内窄中宽口门小,口门处宽 2 km 左 右,纳潮面积约 270 km<sup>2</sup>。湾内上游有遂溪河汇入, 年径流总量为 10.4 亿 m<sup>3</sup>。湛江湾属于原生型的海 湾,是一种半封闭型的河口湾,也可以称为溺谷湾。 它是在全新世海侵时,海水上溯至河流的中上游甚 至是灌进其支流形成的,是一种特殊形态的构造海 湾。湛江湾上段狭长,下端开阔,到湾口处又收紧变 窄,是典型的口小腹大的海湾。这种自然形状使潮 波进入后能量集中,使得湛江湾海域潮差很大,潮 流的冲刷力比较强,稳定了海湾深槽的深度<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2019-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41903067);广东省教育厅创新强校资助项目(230419079)

作者简介:曹瀚升(1988-),男,博士,讲师,主要从事沉积地球化学研究。E-mail:chsheng72@163.com

近年来,随着湛江经济的不断发展、人口的增加以及湛江市临港工业的飞速发展,来自各方面的污染物逐年增加,不论是来自工业,还是生活和水产养殖方面的污染都对湛江湾的整体生态环境造成了巨大的影响。仅湛江市区的年排污量已超过1亿t,其通过河流或管道口流进海域污染水域。再加上人类在围垦的土地上进行各种活动,使得陆源对海域的污染或将进一步加剧。湛江湾近年来受到持续开发,再加上生活污水以及养殖和工农业废水大量注海,超过了湛江湾自我修复能力,导致生态环境日益恶化。同时,湛江港出入的货船逐年增加,加剧了对湾内水质的影响<sup>[4-5]</sup>。

## 2 样品采集与测试方法

本次样品采集信息如下:取样点(110°21'05:25″E, 21°05′43.67″N),温度为 19.1 ℃,pH 为 6.23,氧化还 原电位为-194.69。于 2017 年 11 月采集了沉积柱表 层 0~50 cm 样品,使用的是重力式管状采泥器。用 勺子将采集的样品转移至洁净的聚乙烯密封袋,为 了避免或减小外界对样品的干扰,需要立刻排出袋 内的空气,同时马上进行密封,对于每一个密封袋, 都需要进行标记,以便之后拿出使用,最后将样品 送回实验室冷冻。湛江湾地理位置及 2017 年采样 站位如图 1 所示。



图 1 湛江湾地理位置及 2017 年采样站位

REE 含量用电感耦合等离子体质谱分析法 (ICP-MS)测试; Ba, Cr 和 Mn 微量元素含量用压片 法 X 射线荧光光谱(XRF)测定; Cd, Co, Cs, Cu, Ga, Hf, Li, Nb 和 Ni 微量元素含量用 ICP-MS 测试。本 次测试在吉林大学分析测试中心完成,元素测试结 果的相对偏差小于 2%,表明总体分析结果可靠。

## 3 微量元素特征

### 3.1 稀土元素

湛江湾表层沉积物 Σ*REE* 变化范围为 78.24~ 102.41,平均值为 91.35 (表 1)。沉积物中轻稀土 ΣLREE 含量变化范围为 65.84~85.97,平均含量为 76.84,重稀土 ΣHREE 含量变化范围为 14.99~ 19.84,平均含量为 17.52。Σ*REE*,Σ*HREE* 和 Σ*LREE* 三者间含量在垂向上的变化趋势基本一致,体现出 轻、重稀土地球化学性质具有一定的稳定性和相似 性(图 2)。

表 1 湛江湾表层沉积物稀土元素丰度(µg/g)及有关参数

样品	5 cm	9 cm	30 cm	41 cm	平均值
La	23.49	18.03	18.88	23.35	20.94
Ce	29.79	22.66	24.03	29.21	26.42
Pr	5.17	4.00	4.26	5.25	4.67
Nd	21.47	16.58	17.73	22.12	19.48
Sm	4.63	3.64	3.95	4.83	4.26
Eu	1.19	0.93	0.96	1.21	1.07
Gd	5.85	4.53	4.89	6.01	5.32
Tb	0.89	0.70	0.74	0.91	0.81
Dy	5.10	3.96	4.25	5.27	4.65
Но	1.07	0.86	0.91	1.13	0.99
Er	3.03	2.36	2.48	3.12	2.75
Tm	0.42	0.34	0.36	0.44	0.39
Yb	2.44	1.93	2.11	2.55	2.26
Lu	0.39	0.31	0.34	0.42	0.36
$\Sigma LREE$	85.74	65.84	69.81	85.97	76.84
$\Sigma HREE$	19.19	14.99	16.06	19.84	17.52
$\sum REE$	104.93	80.83	85.87	105.81	94.36
$(La/Yb)_N$	6.83	6.61	6.35	6.49	6.57
(La/Sm) <sub>N</sub>	3.17	3.09	2.99	3.02	3.07
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.94	1.90	1.88	1.91	1.91
δΕυ	0.68	0.68	0.64	0.66	0.67

注:  $\Sigma REE$  为稀土总含量,  $\Sigma LREE$  为轻稀土元素总含量,  $\Sigma HREE$  为重稀土元素总含量,  $\delta Eu=2Eu_N(Sm_N+Gd_N)$ ,  $\delta Ce=Ce_V 0.5(LaN+Pr_N)$ 

样品中  $\delta$ Eu 值在 0.64~0.68 之间,平均值为 0.67, 显示了 Eu 负异常。 $\delta$ Ce 值变化从 0.67~0.69,平均值 0.68,同样显示负异常。与  $\Sigma$ *REE* 的变化规律相似,湛 江湾表层沉积物中各层的轻稀土含量  $\Sigma$ *LREE* 和重稀 土  $\Sigma$ *HREE* 含量在 20~40 cm 处减少,在 5~20 cm 增 加,显示了垂向上由低到高的趋势。



垂向变化

 $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 和(La/Yb)N 是反映沉积物中轻、重稀土元素分异程度的特征参数。湛江湾表层沉积物  $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 变化范围在 4.33~4.47,由图 2 可知, $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 比值呈现逐渐增大的变化趋势。(La/Yb)<sub>N</sub> 处于 6.35~6.83 之间,平均值为 6.57。

湛江湾沉积物样品 REE 球粒陨石标准化分布 模式如图 3 所示,分布曲线表现整体右倾的趋势, 轻、重稀土分异比较明显,轻稀土相对于重稀土明 显更富集。同时 Eu 和 Ce 显示出负的异常特征。



图 3 湛江湾表层沉积物球粒陨石标准化 REE 分布模式

#### 3.2 重金属含量特征

重金属含量特征如表 2 所示。湛江湾表层沉积物 中 Zn 含量远大于其他 4 种元素,其次是 Cu 和 Cr,Pb 和 Cd 含量最低。根据统计可知,Cu,Zn,Pb,Cd,Cr 含量的平均值分别为 56.31 mg/kg,192.85 mg/kg, 5.31 mg/kg,2.84 mg/kg 和 17.46 mg/kg,Cu 含量范围 为 48.91~62.8 μg/g;Zn 含量范围为 171.7~215.6 μg/g; Pb 含量范围为 4.59~5.934 μg/g;Cd 含量范围为 2.459~3.184 μg/g;Cr 含量范围为 14.75~20 μg/g。与 2010 年 5 月表层沉积物重金属数据<sup>[2]</sup>相比,湛江湾 表层沉积物总体质量降低,Cr,Pb 的超标率降低,但 Cu,Zn 和 Cd 含量升高。

表 2 湛江湾表层沉积物中各重金属含量

涩 r / am	含量/10-6 g·g-1 沉积物干重						
休皮/cm -	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb		
5	20.00	62.80	215.60	3.18	5.81		
19	15.22	51.44	174.50	2.53	4.59		
30	14.75	48.91	171.70	2.46	4.90		
41	19.87	62.10	209.60	3.17	5.93		
平均值	17.46	56.31	192.85	2.84	5.31		
最大值	20.00	62.80	215.60	3.18	5.93		
最小值	14.75	48.91	171.70	2.46	4.59		

### 4 稀土元素物源分析

REE 具有稳定的地球化学性质,均一化程度高,不易受各种地质作用的干扰。并且,一旦被记录 在沉积物体系中,容易被保存下来,不会以离子态 从矿物中流失,因此是研究物源的良好指示剂。

湛江湾表层沉积物 ΣREE 的平均值为 91.35, 远高于大洋玄武岩 ΣREE 的平均值 58.64<sup>(6)</sup>。标准化 REE 分配曲线均表现处右倾的趋势,ΣLREE/ ΣHREE 比值较高,沉积物的(La/Yb)<sub>N</sub>大于碳质球 粒陨石中初始值 1.42<sup>(7)</sup>,表明轻、重稀土分异比较明 显,轻稀土相对于重稀土明显更富集,而海水往往同 时富集轻重稀土,并且 REE 含量较低<sup>[8]</sup>。同时,Eu 负 异常平均值 0.67,与大陆地壳(UCC)(0.65)非常接 近,以上特征大致符合陆源沉积物的 REE 特征<sup>[9-10]</sup>。

采用质心聚类法,对湛江湾表层沉积物中的 REE 含量和 Ga,Co,Cd,Zn,Mn 等部分微量元素进 行聚类分析(图 4)。分析结果表明,稀土元素与 Ga, Cd,Pb,Cu,Rb 等外源元素聚类在一起,相关性很 好,而与 Sr,Mn 等水体内源元素相关性次之,该结 果再次证明湛江湾稀土元素主要来源于陆源物质, 可能主要来自上游遂溪河和湛江湾沿岸细流。



## 5 重金属元素特征及污染评价

#### 5.1 重金属元素之间的相关性分析

为了研究 5 种重金属之间的关系,对 Cu,Pb, Zn,Cd 和 Cr 5 种重金属元素的平均进行相关性分 析,利用聚类分析软件并采用 Pearson 相关进行偏 相关分析。分析结果如表 3 所示,在显著水平为 0.05 的条件下,Cr 与 Pb,Zn 与 Pb 以及 Cd 与 Pb 相 关性高达 0.962,0.954 和 0.962,相关性及其显著; 而在显著水平为 0.01 的条件下,Cr 与 Cu,Zn 和 Cd 的相关性分别为 0.997,0.996 和 1.000,Cu 与 Zn,Cd 的相关性为 0.993 和 0.997,Zn 与 Cd 的相关性为 0.996,相关性均极其显著。综上可知,沉积物中 5 种 重金属之间的关系非常密切,说明它们可能有统一 的物源且受到相同的沉积机制。

表 3 湛江湾表层沉积物各金属元素的 Pearson 相关矩阵

	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
Cr	1	0.997**	0.996**	1.000**	0.962*
Cu	0.997**	1	0.993**	0.997**	0.937
Zn	0.996**	0.993**	1	0.996**	0.954*
Cd	1.000**	0.997**	0.996**	1	0.962*
Pb	0.962*	0.937	0.954*	0.962*	1

注:\*\* 代表在 0.01 水平下,相关性显著;\* 代表在 0.05 水平 下,相关性显著

#### 5.2 单因子指数评价法

第一个污染评价方法是单因子指数法,这是最简单的一种污染评价方法,它的原理就是利用实测数据与标准值进行对比。标准值参照《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)<sup>[11]</sup>中三类标准限值(表 4)。对比结果显示,湛江湾表层沉积物中的 Cu,Zn 含量均超过 35 mg/kg 和 150 mg/kg,但未超过第二类标准限值范围,沉积物质量处于中等;Cd 含量均超过 1.5 mg/kg,但是没有超出第三类标准限值范围,沉积物质量较差;Cr 和 Pb 各层位含量远小于 80 mg/kg 和 60 mg/kg,沉积物质量好。

表 4 国家海洋沉积物质量标准中重金属含量的标准值

				(単)	l∑:mg/kg)
项目	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
第一类	≤80.0	≤35	≤150	≤0.50	≤60
第二类	≤150.0	≤100	≤350	≤1.50	≤130
第三类	≤270.0	≤200	≤600	≤5.00	≤250

重金属富集系数 r 由其数值的大小来表示重金 属的污染程度,其计算式为:

$$r = (C_s - C_b)/C_b \tag{1}$$

式中:s和b分别为样品和背景,其背景值采用的是《中国土壤元素背景值》<sup>[12]</sup>中提供的数据,Cr的背景值为50.5 mg/kg,Cu为17 mg/kg,Zn为47.3 mg/kg,Cd为0.056 mg/kg,Pb为36.0 mg/kg。湛江湾表层沉积物中5种重金属的富集系数计算结果如表5所示,各层位Cd,Cu,Zn三者的富集系数均大于1,而Cd元素则远大于1,受人类活动的影响最大,Zn与Cu次之,而Pb和Cr的富集系数均小于0,基本未受到人类活动的影响。

表 5 沉积物中各重金属的富集系数结果

涩度/am	富集系数 r						
休反/cm	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb		
5	-0.604	2.694	3.558	55.857	-0.839		
19	-0.699	2.026	2.689	44.125	-0.873		
30	-0.708	1.877	2.630	42.911	-0.864		
41	-0.607	2.653	3.431	55.607	-0.835		
平均值	-0.654	2.313	3.077	49.625	-0.853		
最大值	-0.604	2.694	3.558	55.857	-0.835		
最小值	-0.708	1.877	2.630	42.911	-0.873		

#### 5.3 地质积累指数法

第二个污染评价方法是地质积累指数法(Index of Geo-Accumulation)<sup>[13]</sup>也可称为 Muller 指数,计算 方法如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (1.5 \times B_i)]$$
(2)

式中:*C<sub>i</sub>*和*B<sub>i</sub>*分别为样品中*i*金属的实际测量 值和背景值;系数1.5是为了校正风化等效应所引 起的背景值差异。计算结果对应的污染等级如表6 所示。

表 6 I mm 所对应的等级

等级描述
无污染
轻度污染
偏中度污染
中度污染
偏重污染
重污染
严重污染

根据各金属的实测值和背景值,*I*goo的计算结果如表7所示。与表6对应的各等级相照应,Cd的*I*goo平均值为5.066,反映了严重污染;Cr与Pb的*I*goo平

均值为-2.132和-3.355,皆为负值,说明无污染;Cu的 *I*geo 平均值为 1.134,Zn的 *I*geo 平均值为 1.435,Cu与 Zn 两者皆位于 1~2之间,处于偏中度污染范围。 从各个层位的 *I*geo 值可以看出,Cu有 1个层位符合轻度污染,其他为偏中度污染;Zn 全位于偏中度污染;Cd有 2个层位为重度污染,2个层位为严重污染;Cr与 Pb 在所有层位皆为无污染。综上所述,湛江湾沉积物重金属元素的污染程度最大的是 Cd,其次为 Zn 和 Cu,而 Cr与 Pb 污染程度较小。

表 7 湛江湾表层沉积物中 5 种重金属的地质积累指数结果

涩re/am			$I_{ m geo}$		
(木)支/CIII	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
5	-1.921	1.3	1.603	5.244	-3.216
19	-2.315	1.012	1.298	4.911	-3.556
30	-2.361	0.94	1.275	4.872	-3.462
41	-1.931	1.284	1.563	5.238	-3.186
平均值	-2.132	1.134	1.435	5.066	-3.355
最大值	-1.921	1.3	1.603	5.244	-3.186
最小值	-2.361	0.94	1.275	4.872	-3.556

#### 5.4 沉积物质量基准法

沉积物质量基准 (Sediment Quality Guideline, SQG)方法不同于前两种方法,前两种方法侧重分析 重金属的污染状况,该方法重点在于分析污染物质 对水生生物的毒性<sup>[14]</sup>。计算公式如下:

$$m - ERM - Q = \sum_{i=1}^{n} \left[ \frac{C_i}{ERM_i} / n \right]$$
(3)

式中:*m*-*ERM*-*Q*即为反映毒害程度的参数<sup>[15]</sup>; *ERM<sub>i</sub>*(效应中值)是指重金属*i*的*ERM*值,参考 Long<sup>[15]</sup>提出的参考标准,Cr的*ERM*值取 370 mg/kg, Cu的*ERM*值取 270 mg/kg,Zn的*ERM*值取 410 mg/kg,Cd的*ERM*值取 9.6 mg/kg,Pb的*ERM*值取 218 mg/kg;*C<sub>i</sub>*为样品中*i*金属的实测值;*n*为测定元 素的个数,本研究中*n*取值5,计算结果如表 8 所示。

深度/cm	m-ERM-Q值
5	0.234
19	0.188
30	0.184
41	0.230
平均值	0.209

表 8 表层沉积物质量基准结果

*ERL*(效应低值)和*ERM*(效应中值)均研究各种元素的单一毒害程度的重要参数。各金属的 *ERM* 值在上面已经给出,参考 Long<sup>[15]</sup>提出 *ERL* 值 参考标准可知, Cr, Cu, Zn, Cd, Pb 所对应的 *ERL* 值 分别为 80 mg/kg, 34 mg/kg, 150 mg/kg, 1.2 mg/kg 和47 mg/kg。

根据表 9 中各个金属元素对应的毒害程度等级可知, Cr 和 Pb 含量分别远小于 80 mg/kg 和 47mg/kg,说明这两种元素对底栖生物造成毒害极小;全部层位的 Cu 值、Zn 值和 Cd 值均大于 ERL 值,同时也都没有超过 ERM 值,说明所有层位的 Cu, Zn 和 Cd 3 种元素对水生生物毒害效应很少发生,根据公式(3)计算可得,所有沉积物样品 m-ERM-Q 平均值为 0.209,位于 0.1~0.5 之间,有 21%的毒害可能性。

表 9	ERL, ERM,	m-ERM-Q	所对应的等级
			1111 June 11 June 11

参数	等级描述
$C_i \leq ERL$	最小效应
$ERL < C_i \leq ERM$	生物效应偶尔发生
Ci>ERM	生物效应经常发生
$m$ - $ERM$ - $Q \leq 0.1$	9%的毒害可能性
$0.1 < m - ERM - Q \le 0.5$	21%的毒害可能性
$0.5 < m - ERM - Q \le 1.5$	49%的毒害可能性
m– $ERM$ – $Q$ >1.5	76%的毒害可能性

#### 5.5 潜在生态风险指数法

潜在生态危害指数法于 20 世纪 80 年代初由 瑞典科学家 Hakanson 提出,这种分析方法相对于前 面几种更加的完整,综合了单因子指数评价法、地 质积累指数法以及沉积物质量基准法的优点,同时 将重金属含量、环境效应以及毒理学有机结合,能 较为简便、快速、准确地综合评价重金属对海域环 境的危害程度<sup>[16]</sup>。计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_{r}^{i} = \sum_{i=1}^{n} T_{r}^{i} \times C_{r}^{i} = \sum_{i=1}^{n} T_{r}^{i} \times \frac{C_{d}^{i}}{C_{r}^{i}}$$
(4)

式中:*RI*为总的潜在生态风险指数; $E_r^i$ 表示样 品中单一重金属*i*的潜在生态风险系数,而 $E_r^i$ 又可 以当作 $T_r^i$ 与 $C_r^i$ 的乘积; $T_r^i$ 指的是重金属*i*的毒性响 应系数,参考方明等<sup>IDI</sup>的研究结果,Cr,Cu,Zn,Cd, Pb 所对应的 $T_r^i$ 值分别为2,5,1,30,5。 $C_r^i$ 可以进一 步看成是 $C_d^i$ 与 $C_r^i$ 的比值,前者是样品中重金属*i*的 实测值,后者为相应的背景值。

根据式(4)对已知数据进行计算(表 10),根据 *E*,平均值可知,Cd 最大,高达 1 518.75,远大于其他 4 种元素,由表 11 可知,Cd 具有极强的潜在生态风险,而 Cr,Cu,Zn 与 Pb 的值均不大于 40,都显示为 轻微的潜在生态风险。

表 10 沉积物重金属潜在生态风险指数

		潜在生态风险系数 $E_r^i$				
	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	κı
最小值	0.584	14.385	3.630	1 317.321	0.638	1 336.601
最大值	0.792	18.471	4.558	1 705.714	0.824	1 730.342
平均值	0.691	16.563	4.077	1 518.750	0.737	1 540.818

$\overline{E}_{r}^{i}$	RI	潜在生态风险程度
$E_{r}^{i} < 40$	<i>RI</i> <150	轻微
$40 \le E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \le E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \le E_r^i < 320$	<i>RI</i> ≥600	很强
$E_r^i \ge 320$		极强

结合表 11 可知,由于 Cd 存在严重生态风险 程度,导致湛江湾沉积物各层位的 RI 平均值为 1 540,远大于 600,表明湛江湾各层沉积物重金属 整体均具有很强生态风险。与 2004 年 12 月份表层 沉积物重金属数据<sup>1181</sup>相比,Pb 含量降低,而 Cd 的超 标率升高。湛江湾流域钢铁、石油加工、养殖等企业 众多,沉积物中的 Cd 主要很可能来自于流域内的 工业废水和农业污水。此外,前人研究表明,在风场 和湾流的作用下,藻类可以吸附 Cd 并在沉积物中 不断聚集,导致叶绿素 a 和沉积物中 Cd 总量往往 存在较好的相关性<sup>19</sup>,这意味着沉积物中过高的 Cd 含量很可能与湾内富营养化程度逐渐增加有关。湛 江湾富营养化问题已是当下亟待解决的问题,早在 20 世纪 90 年代无机氮含量就已经超过国家海水水 质标准四类标准极限值。如今在 Cd 不断超标并且 存在严重生态风险的情况下,更需要相关职能部门 在环境治理和产业布局方面更多予以考虑。

# 6 结论

(1) 湛江湾表层沉积物中 Σ*REE* 高于大洋玄武 岩, *ΣLREE*/*ΣHREE* 及(La/Yb)<sub>N</sub>等比值表明轻、重稀 土分异比较明显,分布模式为明显的 LREE 富集、 HREE 较为平坦, Eu 表现为负异常。

(2)通过稀土元素特征与微量元素的聚类分析 表明,湛江湾表层沉积物中的稀土元素主要来自于 陆源物质。

(3)利用综合单因子指数法、地质积累指数法 计算可知,与标准值对比,表明湛江湾表层沉积物 Cd超标严重,达到严重污染程度;Cu与Zn少量超 标,有中等程度的污染;Cr与Pb未超出标准值。沉 积物质量基准法表明,污染物质对于水生生物产生 毒害性的风险较小,但在生态风险评估方面,相比 其他重金属元素,Cd具有极强的潜在生态风险,并 且存在增大的趋势。这可能与湛江湾流域内的工、 农废水以及湾内的富营养化程度有关。

#### 参考文献:

- [1] 施玉珍,张际标,李雪英,等. 湛江湾沉积物中酸可挥发性硫和重金属含量分布及重金属生态风险评[J]. 台湾海峡, 2012, 31(4): 466-471.
- [2] 张际标,刘加飞,张才学,等. 湛江湾表层沉积物重金属分布及污染评价[J].海洋环境科学, 2012, 31(5):644-648.
- [3] 张义丰, 贾大猛, 谭杰. 海湾型城市定位对湛江城市发展的影响分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(1): 1-8.
- [4] 张志飞, 褚玉良, 何杰. 多年围填海工程对湛江湾水动力环境的影响[J].水利水运工程学报, 2016(3):96-104.
- [5] 陈涛,杨波,张际标,等. 湛江湾表层海水悬浮物分布特征及影响因素[J].环境科学与技术, 2016, 39(S5): 422-428.
- [6] Frey F A, Haskin L. Rare earths in oceanic basalts[J]. Journal of Geophysical Research, 1964, 69(4):775–780.
- [7] Boynton, William V. [Developments in Geochemistry] Rare Earth Element Geochemistry Volume 2 || Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies[J]. Developments in Geochemistry, 1984: 63–114.
- [8] 邓义楠,任江波,郭庆军,等.太平洋西部富稀土深海沉积物的地球化学特征及其指示意义[J].岩石学, 2018, 34(3): 733-747.
- [9] 彦斌, 苗莉, 黄蔚霞, 等. 广东近海湾表层沉积物的稀土元素特征及其物源失踪[J].热带海洋学报, 2012,31(2):67-69.
- [10] 张学敏, 岳琼申. 地球化学方法在化学风化作用和物源判别中的应用综述[J].华南地质与矿产, 2018, 34(1): 41-58.
- [11] 国家海洋局. GB 18668—2002. 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

- [12] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [13] Muller G. Index of geoaccumulation in sediment of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, 2(3): 108-118.
- [14] Macdonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. Archives Environmental Contamination Toxicology, 2000, 39(1): 20–31.
- [15] Long E R. Calculation and uses of mean sediment quality guideline quotients: a critical review [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(6): 1726–1736.
- [16] Han D, Cheng J, Hu X, et al. Spatial distribution, risk assessment and source identification of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 115(1-2): 141–148.
- [17] 方明,吴友军,刘红,等.长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J].环境科学学报,2013,33(2):563-569.

[18] 张才学,孙省利,陈春亮. 湛江港湾表层沉积物重金属的分布特征及潜在生态危害评价[J]. 湛江海洋大学学报, 2006(3): 45-49.

[19] 倪利晓, 耿宏, 马艳艳, 等. 太湖北部湖区水体与沉积物中 Cd 污染现状分析[J]. 环境科技, 2013, 26(2): 51-54.

# Analysis of Trace Element Characteristics and Ecological Risk Assessment in the Surface of Sediments in the Zhanjiang Bay

CAO Han-sheng<sup>1,2</sup>, DENG Yi-wen<sup>1,2</sup>, CHEN Fa-jin<sup>1,2</sup>, PU Xiao-qiang<sup>1,2</sup>

1. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong Province, China;

2. Guangdong Province Key Laboratory for Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction, Zhanjiang 524088, Guangdong Province, China

Abstract: In this study, ICP-MS and XRF methods were used to test the abundance of rare earth elements (REE) and heavy metal elements in the surface sediments in the Zhanjiang Bay, and five different evaluation methods were used to conduct the pollution assessment of heavy metals, which can provide a reference for the industrial layout in the Zhanjiang Bay. The total REE content is lower than those from the oceanic basalt. There are a certain degree of differentiation between light rare earth elements (LREE) and high rare earth elements (HREE) in sediment as well as negative anomalies of Eu and Ce. The REE in sediments of the Zhanjiang Bay probably generated from terrestrial input. In this study, the single factor index evaluation method and the index of geological accumulation method showed that a small amount of Cu and Zn in sediments exceeded the standard and had a moderate degree of pollution, while Cd exceeded the standard and reached a severe degree of pollution. The sediment quality guideline showed that the probability of Cu, Zn and Cd poisoning in aquatic organisms of Zhanjiang Bay was approximately 21%. The assessment results of potential ecological risk indicate that the ecological risk grade was as follows: Cd > Cu > Zn > Pb > Cr. Among them, Cr has a strong potential ecological risk with an increasing trend, which must be taken by effective measures to improve it.

Key words: Zhanjiang Bay; surface of sediments; rare earth element(REE); heavy metal; pollution assessment