

广西茅尾海夏季海水和表层沉积物中重金属污染现状及评价*

Pollution Evaluation of Heavy Metals in the Sea Water and Surface Sediments of Maowei Sea in Summer

雷 富,陈宪云,陈 默,许铭本,张荣灿,姜发军

LEI Fu, CHEN Xian-yun, CHEN Mo, XU Ming-ben, ZHANG Rong-can, JIANG Fa-jun

(广西科学院,广西近海海洋环境科学重点实验室,广西南宁 530007)

(Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

摘要:根据 2011 年 6 月的调查数据对广西茅尾海海水和表层沉积物中的重金属(Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As)进行研究,采用单因子指数法和 Hakanson 生态风险指数法对表层沉积物重金属污染特征及潜在生态风险性进行分析和评价。结果表明:茅尾海海域海水中 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As 的含量($\mu\text{g/L}$)范围分别为 1.3~3.2、0~10.0、6.8~29.2、0.06~0.31、0~0.138、0.37~1.00,平均浓度($\mu\text{g/L}$)分别为 2.1、2.7、14.6、0.14、0.067、0.59,其中,海水中的 Pb 和 Hg 平均含量超过国家一类海水水质标准,各种重金属单因子污染程度依次为 Pb>Hg>Zn>Cu>Cd>As。表层沉积物中的 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As 的含量($\mu\text{g/L}$)变化范围分别为 $(0\sim 45.3)\times 10^{-6}$ 、 $(0.4\sim 23.5)\times 10^{-6}$ 、 $(1.1\sim 80.4)\times 10^{-6}$ 、 $(0.01\sim 0.50)\times 10^{-6}$ 、 $(0.01\sim 0.11)\times 10^{-6}$ 、 $(2.30\sim 25.65)\times 10^{-6}$,平均含量($\mu\text{g/L}$)分别为 9.0×10^{-6} 、 13.1×10^{-6} 、 31.5×10^{-6} 、 0.13×10^{-6} 、 0.04×10^{-6} 、 9.48×10^{-6} 。该海域重金属综合污染程度和潜在生态风险性均较低,重金属元素污染程度 As>Cu=Cd>Pb>Hg=Zn,重金属元素对海洋生态系统潜在危害的影响程度 Hg>Cd>As>Cu>Pb>Zn,沉积物中主要潜在生态风险因子为 Hg、Cd 和 As。

关键词:污染评价 海水 沉积物 重金属 茅尾海

中图分类号:X82,X834 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2013)03-0205-05

Abstract: According to the survey data in June 2011, heavy metals (copper, lead, zinc, arsenic, cadmium, and mercury) in seawater and surface sediments were studied in Guangxi Maowei Sea. The results showed that the contents of Cu, Pb, Zn, Cd, Hg and As in surface seawater ranged 1.3~3.2, 0~10.0, 6.8~29.2, 0.06~0.31, 0~0.138 and 0.37~1.00 $\mu\text{g/L}$, and averaged 2.1, 2.7, 14.6, 0.14, 0.067 and 0.59 $\mu\text{g/L}$, respectively. The concentrations of Pb and Hg exceeded the standard of first grade seawater quality of China. The order of single factor index is Pb>Hg>Zn>Cu>Cd>As. The contents of Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, and As in surface sediments ranged $(0\sim 45.3)\times 10^{-6}$, $(0.4\sim 23.5)\times 10^{-6}$, $(1.1\sim 80.4)\times 10^{-6}$, $(0.01\sim 0.50)\times 10^{-6}$, $(0.01\sim 0.11)\times 10^{-6}$ and $(2.30\sim 25.65)\times 10^{-6}$, and averaged 9.0×10^{-6} , 13.1×10^{-6} , 31.5×10^{-6} , 0.13×10^{-6} , 0.04×10^{-6} and 9.48×10^{-6} , respectively. The pollution status and the potential ecological risk of the heavy metals of surface sediments in Maowei Sea were studied by using the index technique of single factor and Hakanson ecological risk index. The result showed that the integrated contamination level of the heavy metals and the potential ecological risk of the heavy metal were low in the sediments of Maowei Sea. The order of the pollution degree was As>Cu=Cd>Pb>Hg=Zn while the order of the potential ecological risk was Hg>Cd>As>Cu>Pb>Zn, The Hg, Cd and As are key factors of the potential ecological risk in surface sediments in Maowei Sea.

Key words: pollution evaluation, seawater, sediments, heavy metal, Maowei Sea

收稿日期:2013-01-07

修回日期:2013-02-10

作者简介:雷 富(1975-),男,副研究员,主要从事海洋环境科学研究。

* 广西自然科学基金北部湾重大专项项目(2010GXNSFE013001)资助。

茅尾海位于钦州市南部海域,地理位置为 $21^{\circ}45'N \sim 21^{\circ}56'N, 108^{\circ}28'E \sim 108^{\circ}38'E$ 之间。海湾内宽口窄,呈椭圆形,东西北三面为陆地包围,面积约 135km^2 ,水深一般为 $0.1 \sim 5\text{m}$,北部有钦江、大榄江、茅岭江注入,给茅尾海带来丰富的营养物质和矿物质,使茅尾海的渔业资源十分丰富。茅尾海内包括有七十二泾风景旅游区、近江牡蛎增殖区、沿岸养殖区和红树林保护区等,是钦州市重点保护的生态区。近几年来随着钦州港经济区的加速建设,钦州港(包括茅尾海)沿岸生态环境正承受着愈来愈大的压力,工农业污染和生活污水导致湾内重金属污染物在海水和沉积物中迅速蓄积。重金属污染具有来源广、残留时间长、易蓄积、污染后不易被发现并且难于恢复等特征,对水生生物和人体健康有较大的负面影响,并且蓄积在沉积物中的重金属还有二次污染的可能,一旦参与食物链循环并最终在生物体内积累,将会破坏生物体正常生理代谢活动^[1-3]。随着公众对环境污染的关注和重视程度的增加,重金属污染评价在海洋环境质量评价中的作用越来越重要,已经成为海洋环境质量评价体系中十分重要的因子。本文根据2011年6月对广西茅尾海海域海洋环境调查的资料,报道该海域海水和沉积物中的重金属分布及污染水平,为该海域环境保护和可持续发展提供一些科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样与分析

于2011年6月在广西茅尾海海域设置19个站点采集表层海水,16个站点采集表层沉积物。具体采样点见图1。

采用 2.5dm^3 有机玻璃采水器采集表层海水,所有海水样品采集、保存和前处理均按照2007版《海洋监测规范》^[4]的要求操作。表层沉积物用抓斗式采泥器采集,用塑料勺取其中央未受干扰的表层泥样于聚乙烯袋中保存。Cu、Pb、Zn、Cd和As样品在 105°C 烘箱内烘干,用玛瑙研钵将其磨碎并全部通过160目筛,充分混匀后取样以备用;Hg样品经过自然风干,研磨通过80目筛,充分混匀后取样以备用。

海水和沉积物样品重金属含量的测定方法也依据2007版《海洋监测规范》^[4]的要求进行,Cu、Pb、Zn、Cd含量采用原子吸收法测定(PerkinElmer Analyst 800),Hg、As含量采用原子荧光法测定(北京吉天仪器有限公司 AFS-830 双道原子荧光光度计)。

实验所用玻璃器皿均用 $1:3$ 硝酸浸泡至少24h以上,并用电阻率为 $18.2\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 的超纯净水反复

冲洗,所用Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As单元标准溶液均由国家标准物质研究中心提供。质量控制所用的海水标准物质和沉积物标准物质均由国家海洋局第二海洋研究所标准物质中心提供。

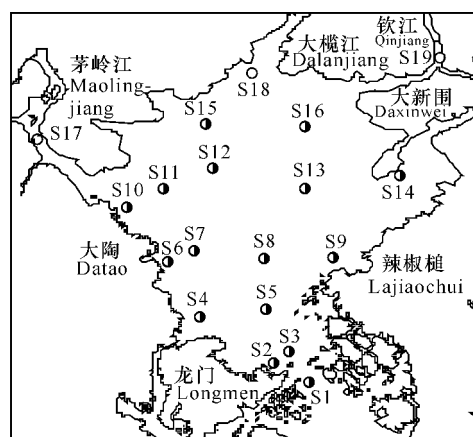


图1 采样站位

Fig. 1 Sampling stations

○:水质站点;●:水质和沉积物站点。
○:Water quality stations; ●:Water quality and surface sediments.

1.2 评价方法

海水水质和沉积物采用单项污染指数(C_f^i)评价^[5,6],以《海水水质标准》^[7]的一类标准限值作为评价标准,当 $C_f^i \leq 1$ 时,表示重金属含量符合标准;当 $C_f^i > 1$ 时,表示重金属含量超过标准。

单项污染指数按下式进行计算:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i,$$

式中, C_s^i 为第 i 测站重金属含量的实测值。 C_n^i 采用一类重金属含量的标准限值。

沉积物中的重金属污染评价方法采用瑞典科学家 Håkanson 的潜在生态危害指数法(PERI)^[8]。该方法不仅考虑到用单因子法得出的金属污染系数,而且引入了重金属的毒性响应系数,二者综合后评价重金属对生态环境的危害,此外它还顾及了背景值的地域分异性^[9]。潜在生态危害指数法的计算方法^[10,11]如下。

沉积物中多种重金属的综合污染效应,通过综合污染指数 C_d 来表征,计算公式为:

$$C_d = \sum_i^6 C_f^i,$$

式中, C_d 是综合污染指数,是沉积物多种重金属污染指数之和。本文以前述所选择的6种重金属元素来评价沉积物中重金属的综合污染情况。

某单个重金属的潜在生态危害系数(E_r^i)为

$$E_r^i = T_f^i \times C_f^i,$$

式中, T_f^i 为重金属的毒性响应系数,反映了重金属的毒性水平和生物对其污染的敏感程度^[11]。Hg,

Cd, As, Pb, Cu, Zn 的毒性响应系数^[12]分别为 40, 30, 10, 5, 5, 1。

沉积物中多个重金属的潜在生态危害指数 (ERI) 如下:

$$ERI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

C_f 、 C_d 、 E_r 、 ERI 值所对应的污染程度及生态风险分级参考文献^[11]的方法。

2 结果与分析

2.1 表层海水中重金属含量的分布特征与污染评价

2.1.1 表层海水中重金属含量的分布特征

2011 年 6 月的调查结果显示,茅尾海海水中重金属的含量均值从高到低的顺序依次是 $Zn > Pb > Cu > As > Cd > Hg$ 。从图 2 可以看出茅尾海域夏季表层海水中重金属元素含量呈现如下分布特征:

(1) Cu 平均含量为 $2.1 \mu\text{g/L}$, 变化范围为 $1.3 \sim 3.2 \mu\text{g/L}$, 含量均达到国家一类海水水质标准, 整个海域 Cu 浓度分布较为均匀, 分布没有明显趋势, 其中最高值出现在茅尾海入海口附近海域 S1 号站, 茅尾海北部的大榄江入海口 S15 号站、钦江入海口 S19 号站附近出现高值区。

(2) Pb 平均含量为 $2.7 \mu\text{g/L}$, 变化范围为 $0 \sim 10.0 \mu\text{g/L}$, 超标率为 57.9%, 最大值出现在茅岭江 S17 号站, 整个海域 Pb 含量分布变化范围很大, 高值区主要出现在各江河入海口附近海域。

(3) Zn 平均含量为 $14.6 \mu\text{g/L}$, 变化范围为 $6.8 \sim 29.2 \mu\text{g/L}$, 超标率为 15.8%, 海区中 Zn 含量差异很大, 最大值出现在北部的 S16 号站, 最小值出现在大榄江入海口 S18 号站, 总体上呈现北部高, 南部低的特点。

(4) Cd 平均含量为 $0.14 \mu\text{g/L}$, 变化范围为 $0.06 \sim 0.31 \mu\text{g/L}$, 均达到国家一类海水水质标准, 最大值在茅尾海入海口附近海域 S1 号站, 从等值线分布图可以看出, 茅尾海海域 Cd 含量差别不大。

(5) Hg 含量变化范围为 $0 \sim 0.138 \mu\text{g/L}$, 平均值为 $0.067 \mu\text{g/L}$, 超标率为 83.3%。Hg 含量最高值出现在茅尾海入海口附近海域 S2 号站, 最低值出现在 S10 号站, Hg 分布大体呈东部高西部低的特点。

(6) As 含量变化范围为 $0.37 \sim 1.00 \mu\text{g/L}$, 平均值为 $0.59 \mu\text{g/L}$ 。所有站位的 As 含量均到一类海水水质标准。As 含量最高值出现在钦江入海口 S19 号站, 最低值出现在 S11 号站, 整个海域 As 浓度分布较为均匀。

2.1.2 表层海水中重金属污染评价

茅尾海表层海水中各重金属元素 (Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, As) 平均单项污染指数的计算结果如下: 表层海水的 Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, As 单项污染指数变化范围分别为 $0.28 \sim 0.68$, $0 \sim 10.00$, $0.34 \sim 1.46$, $0.06 \sim 0.31$, $0 \sim 2.76$, $0.02 \sim 0.25$, 单项平均污染指数分别为 0.42 , 2.72 , 0.73 , 0.14 , 1.34 , 0.03 。其中, 茅尾海 Pb, Hg 的平均单项污染指数均大于 1, 表明两种重金属平均含量均超国家一类海水水质标准, 其余元素平均含量均未超过一类标准限值, 各重金属污染程度由高到低的排序分别是 $Pb > Hg > Zn > Cu > Cd > As$ 。

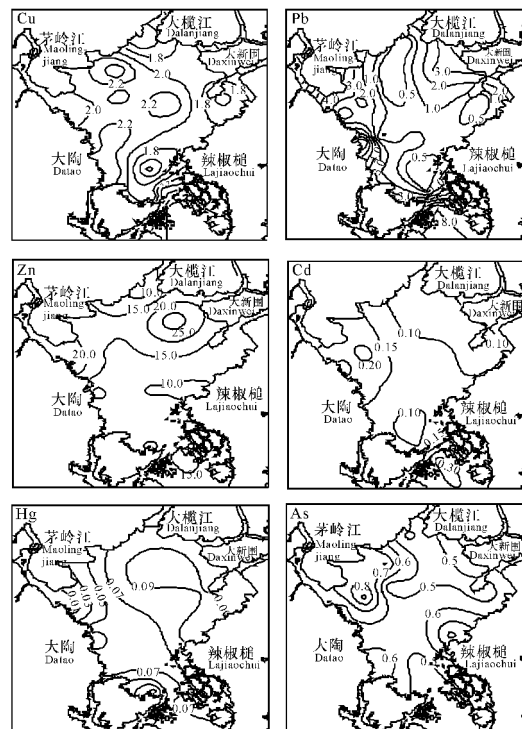


图 2 茅尾海表层海水中重金属含量 ($\mu\text{g/L}$) 的平面分布
Fig. 2 Horizontal distributions of heavy metal contents ($\mu\text{g/L}$) in surface seawater of Maowei Sea

2.1.3 影响茅尾海表层海水溶解态 Cu, Pb, Zn, Cd, Hg 和 As 分布的主要因素

从 2011 年 6 月茅尾海表层海水重金属的分布可以看出, 高值区主要集中在江河入海口和茅尾海出海口以及航道区, 这种分布模式是受人类活动影响的体现。茅尾海有钦江、大榄江、茅岭江 3 条河流入海, 这些河流携带上游大量的生活污水入海, 同时, 茅尾海周边地区人口主要集中在龙门港镇, 生活生产等人类活动向茅尾海排放的大量污水, 造成江河入海口和龙门港镇附近海域的重金属含量明显升高。

2.2 表层沉积物中重金属含量的分布特征与污染评价

2.2.1 表层沉积物中重金属含量的分布特征

表层沉积物中的 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As 的含量变化范围分别为 $(0 \sim 45.3) \times 10^{-6}$ 、 $(0.4 \sim 23.5) \times 10^{-6}$ 、 $(1.1 \sim 80.4) \times 10^{-6}$ 、 $(0.01 \sim 0.50) \times 10^{-6}$ 、 $(0.01 \sim 0.11) \times 10^{-6}$ 、 $(2.30 \sim 25.65) \times 10^{-6}$ ，平均含量分别为 9.0×10^{-6} 、 13.1×10^{-6} 、 31.5×10^{-6} 、 0.13×10^{-6} 、 0.04×10^{-6} 、 9.48×10^{-6} 。沉积物平均含量大小顺序为：Zn>Pb>As>Cu>Cd>Hg。

2.2.2 表层沉积物中重金属综合污染指数

从表 1 可以看出，本次调查茅尾海海域重金属综合污染指数均小于 6，污染程度均为低污染。其中，重金属综合污染指数最大值出现在茅尾海中部海域 S8 号站， C_d 为 4.14，最小值出现 S6 号站， C_d 为 0.39。本次调查，茅尾海海域沉积物综合质量状况较好，综合污染指数 C_d 仅为 1.63，污染水平为低污染，表明茅尾海海域沉积物尚未被玷污，沉积物环境质量状况良好，各海区重金属综合污染指数最大值出现在茅尾海中部海域的航道上，这可能与船舶通航有关。从污染程度角度看，茅尾海海域重金属元素的排列顺序为：As>Cu=Cd>Pb>Hg=Zn。

表 1 茅尾海沉积物重金属污染程度及分布状况

Table 1 Distribution of heavy metals pollution indexes and pollution status of Maowei Sea

站位 Stations	C_f						C_d	污染程度 分级 Pollution degree
	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As		
S1	0.27	0.31	0.35	0.20	0.15	0.81	2.09	低污染*
S2	0.00	0.01	0.01	0.02	0.05	1.28	1.37	低污染*
S3	0.04	0.10	0.13	0.16	0.05	0.93	1.40	低污染*
S4	0.04	0.06	0.05	0.04	0.12	0.52	0.82	低污染*
S5	0.26	0.22	0.33	0.22	0.17	0.57	1.77	低污染*
S6	0.00	0.01	0.04	0.12	0.06	0.17	0.39	低污染*
S7	0.18	0.19	0.22	0.28	0.07	0.17	1.10	低污染*
S8	1.29	0.37	0.54	1.00	0.41	0.53	4.14	低污染*
S9	0.02	0.18	0.04	0.22	0.26	0.31	1.03	低污染*
S10	0.54	0.22	0.35	0.50	0.55	0.68	2.84	低污染*
S11	0.06	0.19	0.13	0.40	0.21	0.33	1.32	低污染*
S12	0.29	0.26	0.20	0.18	0.09	0.18	1.19	低污染*
S13	0.35	0.39	0.34	0.26	0.34	0.34	2.00	低污染*
S14	0.20	0.28	0.19	0.18	0.25	0.18	1.28	低污染*
S15	0.37	0.39	0.28	0.28	0.44	0.46	2.22	低污染*
S16	0.19	0.31	0.18	0.12	0.23	0.12	1.15	低污染*
均值 Average	0.26	0.22	0.21	0.26	0.21	0.47	1.63	低污染*

:低污染。:Low pollution.

2.2.3 表层沉积物中重金属潜在生态风险

表 2 结果显示，从总体污染程度上看，茅尾海海域的重金属潜在生态风险指数 ERI 值范围在 7.73

~60.54，平均值为 23.70，远小于 110，表明该海域表层沉积物重金属对海洋生态系统的潜在风险较低。重金属潜在生态风险性最高的测站为茅尾海中部海域 S8 号站，最低为 S6 号站。从单个重金属污染来看，Hg 的潜在生态风险系数 E_r^i 平均值最高，但所有 E_r^i 值均未超过 25，为轻微潜在生态风险；其余重金属 Cu、Pb、Zn、Cd 和 As 的潜在生态风险系数 E_r^i 较低，为轻微潜在生态风险，对海洋生态系统的危害性较低。该海域各种重金属元素对海洋生态系统潜在危害的影响程度从大到小顺序是：Hg>Cd>As>Cu>Pb>Zn。

表 2 茅尾海沉积物重金属的潜在生态危害系数和危害指数
Table 2 Potential ecological risk factors and risk index of sediment heavy metals of Maowei Sea

站位 Stations	E_r^i						ERI	生态风险 分级 Ecological risk classification
	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As		
S1	1.33	1.57	0.35	6.00	5.80	8.10	23.15	低 Low
S2	0.00	0.06	0.01	0.60	2.00	12.83	15.49	低 Low
S3	0.21	0.48	0.13	4.80	1.80	9.25	16.67	低 Low
S4	0.19	0.32	0.05	1.20	4.60	5.23	11.57	低 Low
S5	1.31	1.10	0.33	6.60	6.80	5.71	21.85	低 Low
S6	0.00	0.03	0.04	3.60	2.40	1.66	7.73	低 Low
S7	0.90	0.93	0.22	8.40	2.80	1.72	14.96	低 Low
S8	6.47	1.85	0.54	30.00	16.40	5.29	60.54	低 Low
S9	0.09	0.91	0.04	6.60	10.20	3.12	20.96	低 Low
S10	2.69	1.11	0.35	15.00	22.00	6.76	47.91	低 Low
S11	0.30	0.94	0.13	12.00	8.40	3.28	25.05	低 Low
S12	1.44	1.30	0.20	5.40	3.40	1.82	13.55	低 Low
S13	1.74	1.94	0.34	7.80	13.40	3.36	28.57	低 Low
S14	0.99	1.41	0.19	5.40	10.00	1.83	19.81	低 Low
S15	1.86	1.94	0.28	8.40	17.60	4.63	34.70	低 Low
S16	0.94	1.57	0.18	3.60	9.20	1.15	16.64	低 Low
平均值 Average	1.28	1.09	0.21	7.84	8.55	4.73	23.70	低 Low

2.2.4 不同重金属对 ERI 的贡献率

由图 3 可以看出 Hg、Cd、As 的贡献率分别为 36.1%、33.1%和 20.0%，几乎占了所有重金属贡献率的 90%，Zn 的贡献率最小，只占 0.9%，因此，Hg、Cd、As 为茅尾海海域的主要风险因子，对海洋生态具有较高的潜在生态危害性。因此，在今后应该加强对 Hg、Cd、As 的监测。

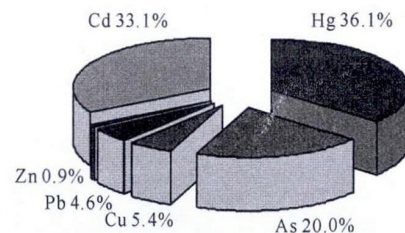


图 3 不同重金属对 ERI 的贡献率
Fig. 3 Contribution of different heavy metals for potential ecological risk index

综合上述两种评价结果可以看出，从污染程度角

度看,茅尾海海域表层沉积物中重金属元素的排列顺序为:As>Cu=Cd>Pb>Hg=Zn,从生态危害的角度看,各金属元素的潜在生态风险性排列顺序为:Hg>Cd>As>Cu>Pb>Zn。可以看出两种结果的排列顺序并不一致,这可能是由于有些重金属元素具有亲颗粒性,容易被悬浮物迁移进入沉积物中矿化埋藏,使它们对生物的毒性降低^[13],同时,各种金属元素对海域生物的毒性不同,污染程度较高的不一定对生态系统的危害就高,因此,只有把两种方法相结合得出的结果,才能更全面地反映茅尾海海域重金属的污染特征和对海洋生态系统的危害性。

3 结论

通过对2011年6月广西茅尾海海域表层海水和沉积物中的重金属的调查和评价,得到以下结论:

(1)该海域海水中Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As的含量范围($\mu\text{g/L}$)分别为1.3~3.2、0~10.0、6.8~29.2、0.06~0.31、0~0.138、0.37~1.00,平均浓度($\mu\text{g/L}$)分别为2.1、2.7、14.6、0.14、0.067、0.59,其中,海水中的Pb和Hg平均含量超过国家一类海水水质标准,各种重金属单因子污染程度依次为Pb>Hg>Zn>Cu>Cd>As。

(2)该海域表层沉积物中的Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As的含量($\mu\text{g/L}$)变化范围分别为(0~45.3) $\times 10^{-6}$ 、(0.4~23.5) $\times 10^{-6}$ 、(1.1~80.4) $\times 10^{-6}$ 、(0.01~0.50) $\times 10^{-6}$ 、(0.01~0.11) $\times 10^{-6}$ 、(2.30~25.65) $\times 10^{-6}$,平均含量($\mu\text{g/L}$)分别为 9.0×10^{-6} 、 13.1×10^{-6} 、 31.5×10^{-6} 、 0.13×10^{-6} 、 0.04×10^{-6} 、 9.48×10^{-6} 。

(3)从污染程度角度分析,广西北部湾近岸海域表层沉积物重金属元素污染的排列顺序为:As>Cu=Cd>Pb>Hg=Zn。

(4)该海域表层沉积物重金属对海洋生态系统的潜在风险较低,各种重金属元素对海洋生态系统潜在危害的影响程度从大到小顺序是:Hg>Cd>As>Cu>Pb>Zn。Hg、Cd、As为茅尾海海域的主要风

险因子。

参考文献:

- [1] 温琰茂,韦照韬. 广州城市污泥化学成分和农业利用的环境容量[J]. 中山大学学报:自然科学版,1996,35(2):124-128.
- [2] 林祖亨,梁舜华. 珠江河口的现代沉积环境与底质重金属的含量分布[J]. 海洋通报,1995,14(4):43-49.
- [3] 娄性义. 固体废物处理与利用[M]. 北京:冶金工业出版社,1996.
- [4] 徐恒振,马永安,于涛,等. GB17378-2007 海洋监测规范第3部:样品采集、贮存与运输[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [5] 孙书涵,王冬艳,胡克,等. 双台子河口区水中重金属污染评价及其生态效应分析[J]. 世界地质,2007,26(1):75-79.
- [6] 国家环境保护局环境工程评估中心. 环境影响评价技术方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2005.
- [7] 黄自强,张克,许昆灿,等. GB 3097-1997 海水水质标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,1997.
- [8] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research,1980(14):975-1001.
- [9] 张鑫,周涛发,杨西飞,等. 河流沉积物重金属污染评价方法比较研究[J]. 合肥工业大学学报,2008,28(11):1419-1423.
- [10] 冯慕华,龙江平,喻龙,等. 辽东湾东部浅水区沉积物中重金属潜在生态评价[J]. 海洋科学,2003,27(3):52-56.
- [11] 黄宏,郁亚娟,王晓栋,等. 淮河沉积物中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 环境污染与防治,2004,26(3):207-208,231.
- [12] 陈静生,周家义. 中国水环境重金属研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,1992:168-170.
- [13] 贾振邦,梁涛. 香港河流重金属污染及其潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报,1997,33(4):185-192.

(责任编辑:尹 闯)