

徐阁, 王德鸿, 王诗文, 等. 西沙永兴岛附近海域沉积物的环境质量评价[J]. 海洋学报, 2022, 44(1): 137–146, doi:10.12284/hyxb2022004
Xu Ge, Wang Dehong, Wang Shiwen, et al. Evaluation on sediments quality around the Yongxing Island of Xisha[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(1): 137–146, doi:10.12284/hyxb2022004

西沙永兴岛附近海域沉积物的环境质量评价

徐阁¹, 王德鸿¹, 王诗文¹, 石军¹, 袁超¹, 韩留玉¹

(1. 国家海洋局海口海洋环境监测中心站, 海南海口 570311)

摘要: 根据2009–2017年9个航次对西沙永兴岛附近海域共6个站位的沉积物重金属监测结果, 应用数理统计法估算了该区域7种重金属元素的背景值, 分析了重金属的含量及年际变化, 采用单因子标准指数法和潜在生态危害指数法对其重金属含量进行了评价。结果表明: 研究区域沉积物重金属具有低背景值, 均符合海洋沉积物质量第一类标准, 沉积物质量为优。7种重金属含量的年际变化显著, 变化规律不尽相同, 受岛上开发活动影响较大。从2009年到2017年, 重金属Zn、Cd、Cu、Cr、As和Hg含量变化的总体趋势先增多后减少, Pb的含量则表现为增多。潜在生态风险评价显示, 多年平均潜在生态危害系数由大到小依次为Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn, Cd和Hg是该研究海域潜在的生态风险因子。

关键词: 永兴岛; 沉积物; 重金属; 背景值; 年际变化; 生态风险

中图分类号: P736.21[†]

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2022)01–0137–10

1 引言

重金属污染具有来源广、残毒时间长、蓄积性、污染后不易被发现等特点, 且易通过吸附、络合、离子交换、沉淀和生物作用等过程在沉积物中富集。由于重金属不能被微生物降解^[1], 还可在生物体中积累并通过食物链危害人类健康^[2]。海洋中的生物资源是人类食物的重要来源之一, 因此, 开展海洋环境中重金属的研究具有重要意义。

西沙永兴岛位于16°50'N, 112°20'E, 属于南海西沙群岛东部的宣德群岛的一个岛屿, 是一座由白色珊瑚贝壳沙堆积在礁平台上而形成的珊瑚岛, 呈椭圆形, 四周被沙堤所包围, 中间较低, 是潟湖干涸后形成的洼地。永兴岛是西沙群岛陆地面积最大的岛屿, 是三沙市人民政府和众多上级派出机构、市级单位以及永兴工委管委驻地。2012年6月经国务院正式批准, 撤销海南省西沙群岛、南沙群岛、中沙群岛办事

处, 建立地级三沙市, 政府驻西沙永兴岛。2013年秋冬至2014年填海造陆, 增加了岛屿面积, 由原来的2.13 km² 扩建到约4 km²。

目前, 对西沙永兴岛附近海域重金属的研究多集中于水体以及珊瑚体^[3–6]。如彭加喜等^[4]发现, 永兴岛珊瑚骨骼中Zn、Mn、Cu的污染比较严重, Ni与Cd的污染较轻; 王璐^[5]指出, 永兴岛北部部分站点的海水Cu质量浓度超过了美国国家海洋和大气管理局的慢性安全浓度, 且接近珊瑚的生物性安全浓度; 孙万龙等^[6]研究发现, 永兴岛的建设和开发对其海洋环境产生了一定的影响。重金属易于积累在沉积物中, 沉积物中的重金属含量能真实地反映一个地区的环境质量现状, 更具环境指示意义。但尚未有人对西沙永兴岛在大规模开发建设前后的海洋沉积环境质量进行对比研究。本文通过对2009–2017年西沙永兴岛附近海域沉积物重金属含量分布的调查, 旨在了解该区域小尺度范围的化学要素背景值以及人类活动对

收稿日期: 2021–05–04; 修订日期: 2021–07–23。

基金项目: 国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金(1542)。

作者简介: 徐阁(1986—), 女, 湖南省湘潭市人, 工程师, 从事海洋生态环境监测。E-mail: xuge187@163.com

重金属含量分布的影响和潜在生态风险,以期为三沙市的环境本底状况、开发建设、水产养殖、生态环境保护和可持续发展提供理论依据。

2 材料和方法

2.1 样品采集与测试

2009–2017年,每年8月或9月采集一次研究海域的表层沉积物样品,调查区域为永兴岛周边海域,综合考虑水体功能、潜在污染源、站点周围的航行安全程度,共布设6个取样站位(图1)。利用抓斗式采泥器采集沉积物,用塑料勺取顶部0~5 cm表层沉积物样品,混匀后装入聚乙烯密封袋中,低温保存带回实验室。研究重金属的样品经80~100°C烘干(其中研究Hg的样品经40~60°C烘干)后,研磨过160目尼龙筛;研究有机碳的样品经风干研磨后过80目金属筛,混匀后用四分法缩分分取所需试样。

研究重金属的样品的消化采用微波消解法^[7]。称取约(0.2±0.000 1)g的沉积物干样于消解罐中,先加少许水润湿,再加入9 mL优级纯硝酸和3 mL优级纯盐酸,待反应平稳后加盖旋紧,放入微波消解仪中,按选定的工作条件消解(设置温度程序为梯度升温,目标温度为180°C,升温时间25 min,并在180°C恒温50 min)。待消解罐内温度与室温平衡后,取出并放气,再进行赶酸和定容操作,定容体积为50 mL。

沉积物中Cu、Pb、Zn、Cd和Cr含量采用美国瓦里安AA240DUO原子吸收分光光度计测定,砷和总汞含量采用北京吉天AFS-933原子荧光光度计测定,有机碳含量采用重铬酸钾氧化-还原容量法测定,沉积物粒度采用筛析法测定。样品的采集、贮存、运输和测定均严格参照《海洋监测规范 第5部分:沉积物分析》(GB 17378.5-2007)^[8]和《海洋调查规范 第1部分:总则》(GB/T 12763.1-2007)^[9]进行。为了监控测试的准确度,以近海海洋沉积物成分分析标准物质GBW07314作为质控标准,结果见表1。

由表1可见,标准物质的测量值与标准值吻合良好,除了Cd的相对偏差最大为15.0%、Hg的相对偏差最大为12.5%以外,其他重金属的相对偏差均小于10%,准确度较高。此外,测定各重金属含量的标准工作曲线的相关系数均大于0.999,线性关系良好。因此,本文建立的重金属含量测定方法可靠性高。

2.2 研究方法

2.2.1 环境背景值的计算方法

对于采用全样分析数据探讨其沉积物重金属环境背景值时,根据化学要素的分布类型:正态分布、对数正态分布和偏态分布,分别采用以下方法求算背景值^[10]。

(1)若数据符合正态分布,则平均背景值为算术

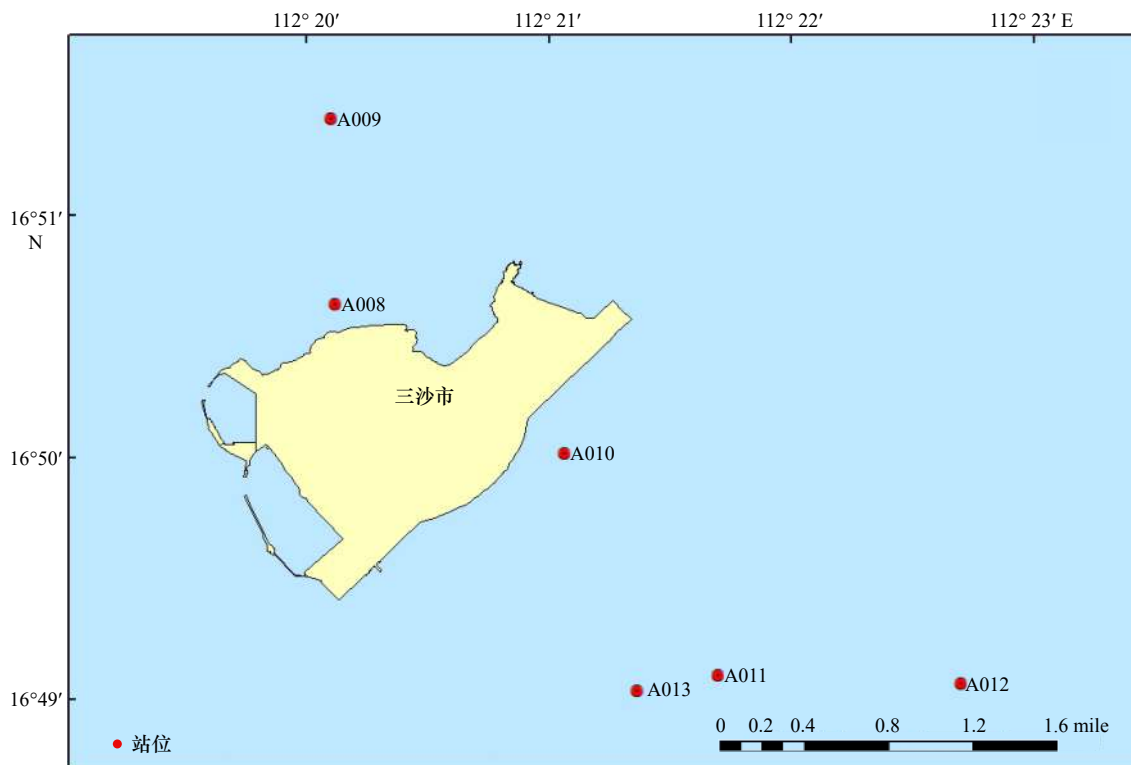


图1 采样站位

Fig. 1 Sampling locations

表 1 重金属元素含量测试值与标准值对比

Table 1 Comparison of test value and standard value of heavy metal contents

	Cu		Pb		Zn		Cd		Cr		As		Hg	
	测定值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	相对 偏差/%	测定值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	相对 偏差/%	测定值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	相对 偏差/%	测定值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	相对 偏差/%	测定值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	相对 偏差/%	测定值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	相对 偏差/%	测定值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	相对 偏差/%
GBW07314 标准值	(31.0±4.0) $\mu\text{g}/\text{g}$		(25.0±4.0) $\mu\text{g}/\text{g}$		(87.0±2.0) $\mu\text{g}/\text{g}$		(0.20±0.04) $\mu\text{g}/\text{g}$		(86.0±4.0) $\mu\text{g}/\text{g}$		(10.3±1.4) $\mu\text{g}/\text{g}$		(0.048±0.012) $\mu\text{g}/\text{g}$	
2009年	30.8	0.6	24.4	2.4	88.4	1.6	0.19	5.0	87.7	2.0	10.20	1.0	0.051	6.2
2010年	31.5	1.6	25.2	0.8	87.5	0.6	0.21	5.0	86.4	0.5	10.46	1.6	0.049	2.1
2011年	31.5	1.6	25.1	0.4	86.4	0.7	0.17	15.0	88.1	2.4	10.34	0.4	0.043	10.4
2012年	28.9	6.8	23.3	6.8	86.8	0.2	0.19	5.0	85.5	0.6	10.18	1.2	0.050	4.2
2013年	31.4	1.3	24	4.0	88.6	1.8	0.19	5.0	87.7	2.0	10.57	2.6	0.043	10.4
2014年	31.3	1.0	25.6	2.4	88.5	1.7	0.22	10.0	87.7	2.0	10.67	3.6	0.054	12.5
2015年	29.9	3.5	24.8	0.8	87.4	0.5	0.17	15.0	83.0	3.5	10.15	1.5	0.042	12.5
2016年	29.9	3.5	24.7	1.2	90.1	3.6	0.20	0	85.6	0.5	10.76	4.5	0.051	6.2
2017年	29.8	3.9	24.9	0.4	86.7	0.3	0.19	5.0	86.5	0.6	11.08	7.6	0.054	12.5
检出限	0.5		1.0		6.0		0.04		2.0		0.06		0.002	

平均值 \bar{X} , 背景范围为 $\bar{X}\pm S$, S 为算术标准差。

(2)若数据符合对数正态分布, 则平均背景值为几何均值 \bar{X}' , 背景范围为 \bar{X}'/S' 和 $\bar{X}'-S'$, 其中 $\bar{X}'=\text{explg}\bar{X}$, $S'=\text{exp}S_{\text{lg}}$, $\text{lg}\bar{X}$ 为对数算术均值, S_{lg} 为对数算术标准差。

(3)对于不满足(1)和(2)的判别为偏态分布, 则平均背景值为几何均值, 背景范围用10%及90%百分数的实测值表示。

2.2.2 单因子标准指数评价

根据《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)中第一类标准值, 调查海域表层沉积物重金属的质量状况采用单因子标准指数法进行评价, 其计算公式为

$$I_i = C_i/S_i, \quad (1)$$

式中, I_i 为第 i 种重金属的标准指数; C_i 为第 i 种重金属的实测值; S_i 为第 i 种重金属的第一类标准值。当 I_i 不大于1时, 符合第一类沉积物质量标准; 当 I_i 大于1时, 沉积物重金属含量超过第一类标准。

2.2.3 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数(E_{ri})是瑞典科学家 Hakanson^[11]应用沉积学原理来评价重金属污染和潜在生态危害的一种方法。它能综合反映重金属对生态环境的影响程度, 能综合评价沉积物中重金属潜在的生态危害, 并用定量的方法划分出潜在的生态风险程度, 是沉积物质量评价应用公认的方法之一^[12-13], 被我国学者广泛应用于重金属污染评价^[14-16]。单个重金属的潜在生态危害系数为 E_r^i , 计算公式为

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i, \quad (2)$$

式中, T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数(表2), 反映重金属的毒性水平及水体对重金属污染的敏感程度; C_f^i 为第 i 种重金属的污染系数, 计算公式为

$$C_f^i = C_s^i/C_n^i, \quad (3)$$

式中, C_s^i 为沉积物中第 i 种重金属实测含量(单位: $\mu\text{g}/\text{g}$); C_n^i 为第 i 种重金属评价的参比值; 本文采用2.1节计算的背景值作为评价参比值。

多种重金属综合潜在生态风险指数为 RI , 计算公式为

$$RI = \sum E_r^i. \quad (4)$$

表 2 重金属的毒性系数^[12]

Table 2 The toxicity coefficient of heavy metals^[12]

	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	Hg
T_r^i	5	5	1	30	2	10	40

由于 Hakanson^[11]提出的生态风险指数法所包括的监测项目有多氯联苯(PCB)、Hg、Cu、Pb、Cd、Cr、Zn和As共8种。而本研究未考虑PCB, 主要针对其他7种重金属进行分析评价。因此, 需要对 Hakanson提出的综合潜在风险指数值 RI 范围进行调整^[17], 将各等级阈值150、300和600分别调整为130、260和520。单个重金属的潜在生态危害系数 E_r^i 和多种重金属综合潜在生态风险指数 RI 所对应的污染评价等级划分见表3。

表 3 潜在生态风险指数法的污染评价等级划分

Table 3 Pollution level classification of potential ecological risk index

E_r^i 范围	单个重金属污染物生态风险程度分级	RI范围	综合潜在生态风险程度分级
$E_r^i < 40$	低	$RI < 130$	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中	$130 \leq RI < 260$	中
$80 \leq E_r^i < 160$	较高	$260 \leq RI < 520$	较高
$160 \leq E_r^i < 320$	高	$RI \geq 520$	高
$E_r^i \geq 320$	很高		

3 结果与讨论

3.1 沉积物中各要素的背景值

本文采用 2009 年测得的永兴岛附近海域表层沉积物数据进行数理统计分析, 确定其背景值。此时还未设立三沙市, 该岛屿远离大陆, 岛上常住人口较少, 与大陆之间的来往较少, 亦没有大型建筑和排污入海, 受人类活动影响较少, 沉积物中重金属含量具有自然性。根据表 4 可知, 以 2009 年重金属元素含量估算的该区域背景值均低于中国浅海沉积物元素丰度; 与 2009–2017 年重金属的多年平均含量(表 5)相比, 该背景值也基本低于多年平均值, 这也证明了本文估算的背景值能够代表西沙永兴岛附近海域污染物的背景状况(即处于自然本底状况)。

通过统计分布类型的计算发现, 所测定的重金属元素(Zn、Cd、Pb、Cu、Cr、As、Hg)含量均呈正态分

布, 背景值由算术平均值和算术标准差获得, 估算结果见表 4。目前, 还没有确定海洋表层沉积物中污染物的最高允许含量, 通过国内外报道的现代海洋沉积物资料对比, 可以了解所研究区域表层沉积物中污染物背景值水平。由表 4 可知, 各重金属含量在不同海区的背景值有显著差异, 永兴岛周边海域沉积物中重金属含量的背景值远低于南海陆架区、深海盆区的, 仅为南海陆架区重金属含量的 10.5%~51.9%。这与陈泓君等^[18]的研究结论一致, 在南海西北部表层沉积物中, 重金属 Cu、Zn、Cr 等的含量最低值均出现在西沙群岛海域。

永兴岛表层沉积物重金属含量的这一低背景值主要与其生物成因有关, 该区域为珊瑚骨架沉积、珊瑚碎块沉积和生物碎屑沉积, 几乎没有陆源碎屑组分, 黏土含量低^[19–20]。此外, 沉积物的粒度和有机质对沉积物重金属含量有显著影响^[18–20]。根据同步测定的沉积物粒度和有机碳含量, 永兴岛周边海域沉积物类型为砂, 其中砂质组分质量分数大于 98%, 粉砂和黏土组分质量分数基本小于 1%; 2009–2017 年沉积物有机碳含量介于 0.06%~0.77%, 多年平均值为 0.27%。这表明了研究区域的沉积物具有粒度较大、有机质含量较低的特征, 相比于细粒沉积物具有更小的比表面积, 不利于重金属的吸附和积累。

3.2 沉积物重金属含量及年际变化

由表 5 可以看出, 西沙永兴岛附近海域表层沉积物重金属含量均较低, 2009–2017 年重金属含量变化范围分别为 Zn(未检出~128.3 $\mu\text{g/g}$)、Cd(未检出~

表 4 永兴岛周边海域表层沉积物中重金属含量的背景值(单位: $\mu\text{g/g}$)Table 4 Background values of heavy metals contents in the surface sediments of Yongxing Island and its surrounding sea area (unit: $\mu\text{g/g}$)

项目	Zn	Cd	Pb	Cu	Cr	As	Hg
样品数	6	6	6	6	6	6	6
测值范围	9.1~15.5	未检出~0.04	5.9~9.2	0.7~1.1	4.8~7.3	0.78~1.51	0.006~0.009
算术平均值	11.0	0.03	8.1	0.9	6.5	1.02	0.008
算术标准差	2.4	0.01	1.2	0.1	1.0	0.29	0.001
平均背景值	11.0	0.03	8.1	0.9	6.5	1.02	0.008
背景值范围	8.5~13.4	0.02~0.04	6.9~9.3	0.7~1.0	5.4~7.5	0.73~1.32	0.006~0.009
南海陆架区沉积物背景值 ^[21]	54.4	0.18	15.6	7.43	39.3	9.71	0.020
中国浅海沉积物背景值 ^[22]	65	0.065	20	15	60	7.7	0.025
南海北部陆架区沉积物背景值 ^[23]	16.9	0.79	23.0	9.0	25.5	—	—
南海深海区沉积物背景值 ^[24]	149.0	0.21	22.4	54.1	69.3	7.24	0.089

注: —代表无此结果。

表 5 2009–2017 年永兴岛附近海域表层沉积物重金属含量 (单位: $\mu\text{g/g}$)Table 5 Contents of heavy metals in the surface sediments of Yongxing Island and its surrounding sea area from 2009 to 2017 (unit: $\mu\text{g/g}$)

项目	Zn	Cd	Pb	Cu	Cr	As	Hg	
2009年	范围	9.1~15.5	未检出~0.04	5.9~9.2	0.7~1.1	4.8~7.3	0.78~1.51	0.006~0.009
	平均值	11.0	0.03	8.1	0.9	6.5	1.02	0.008
	变异系数	0.2	0.3	0.1	0.2	0.5	0.3	0.2
2010年	范围	9.5~14.2	未检出~0.11	10.4~32.9	0.6~2.5	未检出~9.3	1.64~3.33	0.010~0.020
	平均值	11.7	0.06	21.0	1.6	5.8	2.45	0.015
	变异系数	0.2	0.6	0.5	0.4	0.5	0.3	0.3
2011年	范围	未检出~14.4	未检出~0.28	4.6~29.3	1.5~4.5	2.4~6.7	2.59~3.58	0.002~0.033
	平均值	10.6	0.16	15.7	2.5	4.3	3.06	0.008
	变异系数	0.4	0.7	0.7	0.4	0.4	0.1	1.5
2012年	范围	未检出~128.3	0.05~0.32	3.1~27.6	1.4~8.8	3.1~12.9	1.11~2.57	0.004~0.016
	平均值	33.7	0.12	12.1	4.1	6.5	1.87	0.007
	变异系数	1.4	0.8	0.7	0.7	0.6	0.4	0.7
2013年	范围	16.6~25.5	0.12~0.44	3.5~8.0	1.0~5.8	3.6~40.0	2.06~10.32	0.008~0.015
	平均值	19.5	0.25	5.8	3.3	22.6	5.42	0.011
	变异系数	0.2	0.6	0.3	0.5	0.7	0.6	0.3
2014年	范围	未检出~6.1	0.12~0.20	5.4~13.9	未检出~2.6	4.2~10.1	2.70~4.27	0.024~0.035
	平均值	2.3	0.15	8.9	1.6	6.7	3.62	0.030
	变异系数	0.8	0.2	0.4	0.5	0.3	0.2	0.1
2015年	范围	22.9~29.3	未检出~0.15	3.2~24.8	1.6~3.5	未检出~4.1	0.20~0.78	0.002~0.009
	平均值	26.1	0.08	13.8	2.3	1.5	0.42	0.004
	变异系数	0.1	0.7	0.7	0.3	1.1	0.5	0.6
2016年	范围	10.1~35.6	0.04~0.07	23.7~52.4	0.8~3.6	未检出	2.88~4.55	0.015~0.020
	平均值	22.9	0.06	42.8	1.5	0.5	3.60	0.018
	变异系数	0.6	0.2	0.3	0.8	0.0	0.2	0.1
2017年	范围	6.2~10.9	未检出~0.06	14.9~38.6	0.5~1.2	未检出~2.2	1.27~2.90	0.004~0.011
	平均值	8.5	0.03	26.1	0.9	0.8	1.89	0.008
	变异系数	0.2	0.5	0.3	0.3	0.9	0.3	0.3
多年变化范围	未检出~128.3	未检出~0.44	3.1~52.4	未检出~8.8	未检出~40.0	0.20~10.32	0.002~0.035	
多年平均值	16.2	0.11	17.1	2.1	6.1	2.59	0.012	
《海洋沉积物质量》第一类标准值 ^[25]	150.0	0.50	60.0	35.0	80.0	20.0	0.20	
中国浅海沉积物元素丰度 ^[21-22]	65	0.065	15	20	60	7.7	0.025	

0.44 $\mu\text{g/g}$)、Pb(3.1~52.4 $\mu\text{g/g}$)、Cu(未检出~8.8 $\mu\text{g/g}$)、Cr(未检出~40.0 $\mu\text{g/g}$)、As(0.20~10.32 $\mu\text{g/g}$)、Hg(0.002~0.035 $\mu\text{g/g}$)。与《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)^[25]中第一类标准值相比,均低于海洋沉积物质量第一类标准值,单因子标准指数均小于1,

沉积物质量为优。

在空间分布上,沉积物中重金属含量表现出由近岸向外海方向降低的趋势,其中Pb、Hg、Zn和Cd的含量变化相对明显;在含量上,由多到少依次为Pb、Zn、Cr、As、Cu、Cd、Hg。Pb通常被认为是典型的工

业污染源^[24], 而永兴岛上并没有显著的工业活动, 所以 Pb 相对较高的含量可能是受到渔船和岛屿开发工程作业船只的影响或者其他含铅物质经大气传输最终沉降至该海域导致的。将重金属的多年平均含量与中国浅海沉积物元素丰度进行比较, 由表 5 可知, 研究区域重金属元素 Cd 和 Pb 平均含量出现不同程度的超标, 超标倍数分别为 1.69 和 1.14。

2009–2017 年重金属含量的年平均值的年际变化情况如图 2 至图 4 所示。由图可知, 不同重金属含量的年际变化规律不尽相同。除 Pb 外, 其余各元素基本表现为: 在永兴岛大规模开发建设活动期间, 重金属含量出现较大的波动, 在 2012 年或者 2013 年前后达到最高, 尤其是 Cd 含量增加到环境背景值的 7.6 倍; 随着岛上开发建设项目的稳定以及生态环境意识的增强, 重金属含量逐渐降低并趋于稳定, 在 2017 年基本都回落到环境背景值水平。重金属 Pb 的含量变化表现为: 以 2013 年为界, 在此之前和之后均有一个增多和降低的过程, 且在 2013 年, Pb 含量与背景值相当; 但将 2017 年的 Pb 含量与 2009 年的相比, 总体趋势是 Pb 含量有所上升。2017 年的 Pb 含量为背景值的 3.2 倍, 未能完全恢复到开发利用之前的生态环境。

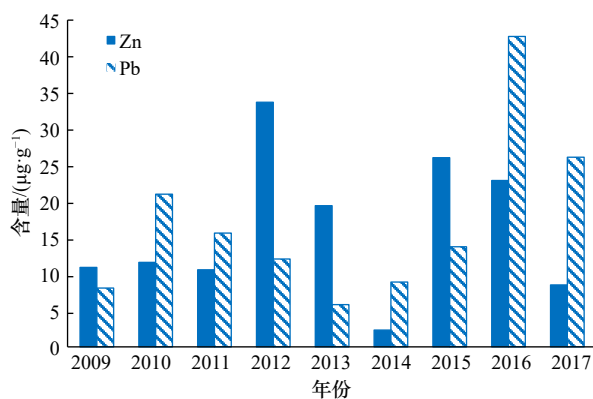


图 2 Zn 和 Pb 含量的年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of contents of Zn and Pb

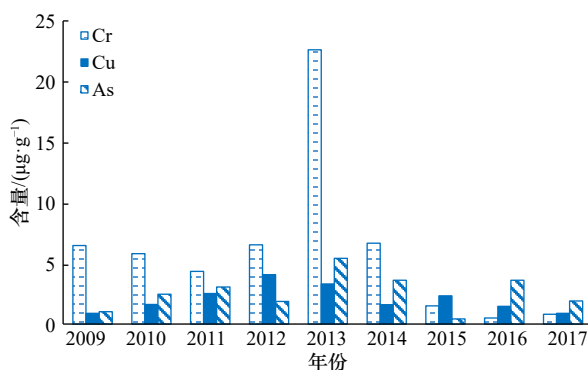


图 3 Cr、Cu 和 As 含量的年际变化

Fig. 3 Inter-annual variation of contents of Cr, Cu and As

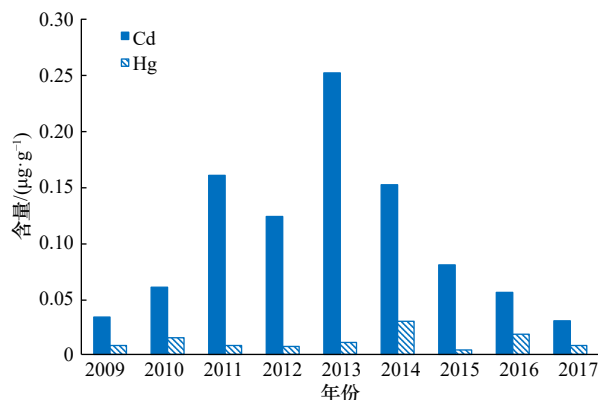


图 4 Cd 和 Hg 含量的年际变化

Fig. 4 Inter-annual variation of contents of Cd and Hg

随着三沙市的建立, 人工填海、机场和防波堤等基础设施的建设、旅游业的推广以及供水、污水、垃圾处理等一系列项目的建设, 必然会产生污染问题从而影响环境, 重金属含量的变化较好地反映了人类的这一开发利用过程。这也与李雪瑞等^[26]对三沙市成立前后永兴岛及周边海域的生态环境质量遥感解译结果一致: 在人类活动驱动下, 1989–2013 年永兴岛及周边海域生态环境质量不断下降, 特别是在 2012 年三沙市建市后下降明显, 但到 2014 年又有所恢复。其中, Pb 含量在 2017 年时未能恢复至背景值水平, 可能是因为它的主要来源的特殊性——来自汽油、煤炭燃烧和工业过程释放的 Pb 通过大气沉降进入海洋^[27], 这些人为活动一方面可能来自于永兴岛上, 如渔船、岛屿开发工程作业船只等; 另一方面, 在大气环流作用下, 周边局地范围内的人为活动也可能对其产生影响。此外, 也可能与重金属 Pb 的性质有关, 在海洋中 Pb 表现为吸附–清扫型元素, 在沿海低能环境中, Pb 由吸附或清扫作用能迅速沉积、聚集到海底沉积物中^[28], 而重金属的释放、恢复过程为一个缓慢过程。关于 Pb 的具体来源、转移路径、沉积原理等有待结合永兴岛周边区域的环境特征进一步研究确认。

3.3 重金属潜在生态危害评价

利用重金属的潜在生态风险指数法对各航次表层沉积物重金属的潜在生态风险进行评价(表 6)。由表 6 可知, 2009–2017 年, 调查海域重金属 Zn、Pb、Cu、Cr 和 As 的年平均潜在生态风险系数 E_i^p 均小于 40, 根据污染评价等级划分(表 3), 属于低生态风险水平。重金属 Cd 和 Hg 在 2009 年和 2017 年时均属于低生态风险水平, 而在 2010–2016 年, Cd 具有中程度至高程度的潜在生态风险, Hg 具有低程度至较高程度的潜在生态风险。

表 6 2009–2017 年永兴岛附近海域表层沉积物重金属潜在生态危害风险指标

Table 6 The risk index of potential ecological risk of heavy metals in the surface sediments of Yongxing Island and its surrounding sea area from 2009 to 2017

年份		E_r^i							RI
		Zn	Cd	Pb	Cu	Cr	As	Hg	
2009	最小值	0.83	20.00	3.64	3.89	1.48	7.65	30.00	71.36
	最大值	1.41	40.00	5.68	6.11	2.25	14.80	45.00	106.85
	平均值	1.00	33.33	5.01	4.91	1.99	10.02	38.33	94.59
2010	最小值	0.86	20.00	6.42	3.33	0.31	16.05	50.00	130.10
	最大值	1.29	110.00	20.31	13.89	2.86	32.65	100.00	266.41
	平均值	1.06	61.67	12.97	8.98	1.78	24.04	74.17	184.67
2011	最小值	0.27	20.00	2.84	8.33	0.74	25.39	10.00	86.12
	最大值	1.31	280.00	18.09	25.00	2.06	35.10	165.00	353.65
	平均值	0.96	160.00	9.67	13.98	1.33	29.97	41.25	257.17
2012	最小值	0.27	50.00	1.91	7.78	0.95	10.88	17.50	107.24
	最大值	11.66	320.00	17.04	48.89	3.97	25.20	80.00	441.13
	平均值	3.07	123.33	7.48	22.59	2.01	18.33	33.33	210.15
2013	最小值	1.51	120.00	2.16	5.56	1.11	20.20	40.00	264.70
	最大值	2.32	440.00	4.94	32.22	12.31	101.18	75.00	549.72
	平均值	1.77	251.67	3.60	18.33	6.96	53.12	53.33	388.78
2014	最小值	0.14	120.00	3.33	1.39	1.29	26.47	120.00	315.24
	最大值	0.55	200.00	8.58	14.44	3.11	41.86	175.00	396.07
	平均值	0.21	151.67	5.50	9.12	2.05	35.47	148.33	352.36
2015	最小值	2.08	20.00	1.98	8.89	0.15	1.96	10.00	51.56
	最大值	2.66	150.00	15.31	19.44	1.26	7.65	45.00	230.70
	平均值	2.37	78.33	8.52	12.87	0.45	4.10	20.00	126.64
2016	最小值	0.92	42.68	14.61	4.36	0.15	28.24	75.00	201.20
	最大值	3.24	72.49	32.35	20.14	0.15	44.61	97.50	232.85
	平均值	2.08	55.42	26.39	8.11	0.15	35.32	87.92	215.40
2017年	最小值	0.57	20.00	9.17	2.63	0.15	12.45	20.00	81.43
	最大值	0.99	55.91	23.84	6.41	0.69	28.43	55.00	130.12
	平均值	0.78	33.92	16.12	4.90	0.24	18.55	38.33	112.84
多年变化	最小值	0.14	20.00	1.91	1.39	0.15	1.96	10.00	51.56
	最大值	2.08	120.00	14.61	8.89	1.48	28.24	120.00	315.24
	平均值	1.48	105.48	10.59	11.53	1.89	25.44	59.44	215.84

2009–2017年,西沙永兴岛附近海域共计9个航次7种重金属的多年平均潜在生态风险系数 E_r^i 的大小顺序为Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn,其中Cd的多年平均潜在生态风险系数 E_r^i 为105.48,属于较高生

态风险水平,是研究区主要的潜在生态风险因子;其次是Hg,属中生态风险水平。与重金属多年平均含量大小排序相比,潜在生态风险系数 E_r^i 的排序基本呈逆序排列,原因可能是永兴岛附近海域较低的重金

属背景值,且Cd和Hg的毒性响应系数 T_i^* 比较大,其毒性水平以及生物对其敏感程度较高。虽然Pb、Zn含量相对较高,但由于其较低的生态毒性,潜在生态风险相对较低;而Cd、Hg由于其较高的生态毒性,虽然其含量较低,其潜在生态风险明显大于其他重金属。

2009–2017年,西沙永兴岛附近海域综合潜在风险指数 RI 的变化趋势如图5所示,总体上表现为先增大后降低,在2013年前后综合潜在生态风险较高,到2017年时综合潜在生态风险恢复到低水平。分析2013年的综合潜在风险指数,Cd和Hg分别贡献了64.7%和13.7%,说明Cd和Hg是该研究海域潜在的生态风险因子。因此,在对西沙永兴岛进行后续开发、旅游发展以及生态修复过程中,要注重对这两种

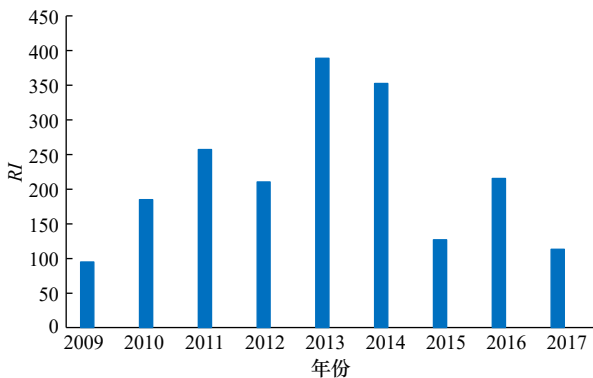


图5 重金属的综合潜在风险指数 RI 年际变化

Fig. 5 Inter-annual variation of comprehensive potential risk index RI of heavy metals

生态风险因子的控制,以更好地保证三沙市的海洋生态环境质量。

4 结论

(1)西沙永兴岛附近海域沉积物7种重金属元素含量(Zn、Cd、Pb、Cu、Cr、As、Hg)均呈正态分布,环境背景值较低。

(2)2009–2017年西沙永兴岛附近海域沉积物重金属含量处于较低水平,含量由多到少依次为Pb、Zn、Cr、As、Cu、Cd、Hg,均符合海洋沉积物质量第一类标准,沉积物质量为优。

(3)7种重金属含量的年际变化显著,变化规律不尽相同。重金属Zn、Cd、Cu、Cr、As和Hg含量变化的总体趋势是先增多后降低,在2012–2013年永兴岛大规模开发建设活动期间达到最高值,在2017年基本都回落到环境背景值水平。重金属Pb含量变化的总体趋势自2009–2017年有所上升,2017年时的含量为该区域背景值的3.2倍。

(4)对研究海域表层沉积物重金属采用潜在生态风险进行评价后发现,多年平均 E_i^* 由大到小依次为Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn。2009–2017年,综合潜在风险指数总体上表现为先增大后降低,在经历2013年较高水平的综合潜在风险后在2017年恢复到低水平,Cd和Hg是该研究海域潜在的生态风险因子。

参考文献:

- [1] 樊邦棠. 环境化学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.
Fan Bangtang. Environmental Chemistry[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1991.
- [2] Diaz-de Alba M, Galindo-Riaño M D, Casanueva-Marengo M J, et al. Assessment of the metal pollution, potential toxicity and speciation of sediment from Algeciras Bay (South of Spain) using chemometric tools[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190(1/3): 177–187.
- [3] 周静, 杨东, 彭子成, 等. 西沙海域海水中溶解态重金属的含量及其影响因子[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(8): 1036–1042.
Zhou Jing, Yang Dong, Peng Zicheng, et al. The concentrations of dissolved heavy metals in Xisha waters and their influential factors[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(8): 1036–1042.
- [4] 彭加喜, 刘金铃, 徐向荣, 等. 西沙永兴岛珊瑚重金属水平及其富集效应[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(6): 848–853.
Peng Jiayi, Liu Jinling, Xu Xiangrong, et al. Heavy metal levels in coral skeletons from Yongxing Island and their enrichment effects[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(6): 848–853.
- [5] 王璐. 南海中、西沙群岛珊瑚礁区的重金属分布特征及其生态影响评估[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
Wang Lu. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in coral reefs of Zhongsha and Xisha Island, South China Sea[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [6] 孙万龙, 田兆雪, 刘雪华. 西沙永兴岛不同功能区环境质量状况研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(S2): 280–285.
Sun Wanlong, Tian Zhaoxue, Liu Xuehua. Study on environmental quality in different functional areas of Yongxing Island, Xisha[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 42(S2): 280–285.
- [7] 国家海洋局. HY/T 132–2010, 海洋沉积物与海洋生物体中重金属分析前处理 微波消解法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
State Oceanic Administration. HY/T 132–2010, Pretreatment guideline of heavy metals analysis in the marine sediments and organisms-microwave assisted acid digestion[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.5-2007, 海洋监测规范 第5部分: 沉积物分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.5-2007, The specification for marine monitoring—Part 5: Sediment analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.1-2007, 海洋调查规范 第1部分: 总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.1-2007, Specifications for oceanographic survey—Part 1: General[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [10] 鲍永恩, 刘娟. 葫芦岛湾沉积物中重金属集散特征及环境背景值[J]. 海洋环境科学, 1995, 14(1): 1-8.
Bao Yongen, Liu Juan. The feature of concentration and dispersion of the heavy metals and the environmental background values in the sediments of Liaoning Hulushan bay[J]. Marine Environmental Science, 1995, 14(1): 1-8.
- [11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [12] 唐银健. Hakanson指数法评价水体沉积物重金属生态风险的应用进展[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(3): 66-68, 72.
Tang Yinjian. Application of Hakanson index method assessing ecological risk of heavy metal from sediments in the water[J]. *Environmental Science Survey*, 2008, 27(3): 66-68, 72.
- [13] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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 Zhengqi, Ni Shijun, Tu Xianguo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
- [14] 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 Jie, Cao Linglong, Jiang Wanjuan, 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.
- [15] 马德毅, 王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 521-525.
Ma Deyi, Wang Juying. Evaluation on potential ecological risk of sediment pollution in main estuaries of China[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5): 521-525.
- [16] 陈亮, 李团结, 杨文丰, 等. 南海北部近海沉积物重金属分布及来源[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3): 464-470.
Chen Liang, Li Tuanjie, Yang Wenfeng, et al. Distribution and sources of heavy metals in surface sediments, northern South China Sea[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2016, 25(3): 464-470.
- [17] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2002, 15(5): 33-37.
Liu Cheng, Wang Zhaoyin, He Yun, et al. Evaluation on the potential ecological risk for the river mouths around Bohai Bay[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(5): 33-37.
- [18] 陈泓君, 蔡观崔, 崔兆国, 等. 南海西北部表层沉积物重金属分布特征与污染评价[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(1): 43-50.
Chen Hongjun, Cai Guanqiang, Cui Zhaoguo, et al. Distribution of heavy metals in surface sediments of northwestern South China Sea and pollution assessment[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(1): 43-50.
- [19] 余克服, 宋朝景, 赵焕庭. 西沙群岛永兴岛地貌与现代沉积特征[J]. 热带海洋, 1995, 14(2): 24-31.
Yu Kefu, Song Chaojing, Zhao Huanting. The characters of geomorphology and modern sediments of Yongxing Island, Xisha Islands[J]. *Tropic Oceanology*, 1995, 14(2): 24-31.
- [20] 沈建伟, 杨红强, 王月, 等. 西沙永兴岛珊瑚礁坪的群落动态和浅水碳酸盐沉积特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 56(9): 1471-1486.
Shen Jianwei, Yang Hongqiang, Wang Yue, et al. Coral community dynamics and shallow-water carbonate deposition of the reef-flat around Yongxing Island, the Xisha Islands[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(9): 1471-1486.
- [21] 张远辉, 杜俊民. 南海表层沉积物中主要污染物的环境背景值[J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 161-166.
Zhang Yuanhui, Du Junmin. Background values of pollutants in sediments of the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2005, 27(4): 161-166.
- [22] 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 Yiyang, Yan Mingcai. Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [23] 甘居利, 贾晓平, 李纯厚, 等. 南海北部陆架区表层沉积物中重金属分布和污染状况[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(1): 36-42.
Gan Juli, Jia Xiaoping, Li Chunhou, et al. Characteristics of distribution and pollution of heavy metals in surficial sediments from continental shelf of northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22(1): 36-42.
- [24] 李粹中. 南海深海沉积物微量元素的地球化学特征[J]. 中国科学(B辑), 1985(6): 571-578.
Li Cuizhong. Geochemical characteristics of trace elements in deep-sea sediments of the South China Sea[J]. *Science China (Part B)*, 1985(6): 571-578.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18668-2002, 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB18668-2002, Marine sediment quality[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [26] 李雪瑞, 王娜, 田松. 永兴岛及周边海域1989-2014年生态环境质量评价[J]. 海洋通报, 2019, 38(4): 470-480.
Li Xuerui, Wang Na, Tian Song. Eco-environmental quality evaluation of the Yongxing Island and its surrounding sea area from 1989 to 2014[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(4): 470-480.
- [27] Li Xiangdong, Wai O W H, Li Y S, et al. Heavy metal distribution in sediment profiles of the Pearl River estuary, South China[J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 15(5): 567-581.
- [28] 刘明, 范德江, 郑世雯, 等. 渤海中部沉积物铅来源的同位素示踪[J]. 海洋学报, 2016, 38(2): 36-47.
Liu Ming, Fan Dejiang, Zheng Shiwen, et al. Tracking lead origins in the central Bohai Sea based on stable lead isotope composition[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(2): 36-47.

Evaluation on sediments quality around the Yongxing Island of Xisha

Xu Ge¹, Wang Dehong¹, Wang Shiwen¹, Shi Jun¹, Yuan Chao¹, Han Liuyu¹

(1. Haikou Marine Environmental Monitoring Center Station, State Oceanic Administration, Haikou 570311, China)

Abstract: Based on the investigations of surface sediments at six sampling stations of nine cruises carried out in the sea around the Yongxing Island of Xisha from 2009 to 2017, the background values of seven heavy metals are determined through the process of mathematical statistics, the contents and inter-annual variations of heavy metals are analyzed, and the contents of the heavy metals are evaluated by means of single factor standard index and potential ecological risk index. The results show that the background values of heavy metals in the sediments of the study area are low, the average level of them meet the first class of marine sediment quality, and the quality of sediment is excellent. The inter-annual variations of seven heavy metals in the sediments of the study area are slightly different and generally significant and affected obviously by the development activities on the Yongxing Island. From 2009 to 2017, the contents of Zn, Cd, Cu, Cr, As and Hg are to increase first and then decrease, while the content of Pb is to increase. The assessment by means of potential ecological risk index shows that the multi year average of potential ecological risk indexes are in the order of Cd, Hg, As, Cu, Pb, Cr, Zn, and Cd and Hg are the main potential ecological risk factors of the study area.

Key words: Yongxing Island; sediment; heavy metals; background values; inter-annual variations; ecological risk