

# 三沙湾多介质环境重金属生态风险及生物累积研究

李荣茂

(福建省渔业资源监测中心, 福建 福州 350003)

**[摘要]** 2020—2022年在三沙湾, 采集了11个站位的贝类、沉积物样品, 以及14个站位的表层海水样品, 利用原子荧光分光光度计、原子吸收分光光度计和电感耦合等离子体质谱仪, 测定生物体、沉积物和海水中重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Co、Ni 等的含量。研究结果表明: 1) 三沙湾海水中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Co、Ni 的平均质量浓度分别为 0.48、0.87、27.11、0.22、0.15、0.03、1.93  $\mu\text{g/L}$ , 符合渔业水质标准; 海水中重金属综合潜在生态风险指数 (ERI) 为 1.33~3.66, 处于轻微潜在生态风险等级。2) 沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、As 的平均质量比分别为 24.75、42.41、115.89、0.11、65.50、0.055、9.45  $\text{mg/kg}$ , 大部分站位的重金属含量符合第一类海洋沉积物质量标准。3) 生物体内 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、As 的平均质量比分别为 41.20、0.42、170.80、0.26、0.64、0.015、0.50  $\text{mg/kg}$ 。其中, 4个缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 调查站位的重金属生物-沉积物累积指数 (BSAF) 均小于1, 表明7种重金属在缢蛏体内均无明显累积; 7个福建牡蛎 (*Crassostrea angulata*) 调查站位中 Cu、Zn 和 Cd 的生物累积指数范围分别为 1.35~8.92、0.44~6.38 和 2.35~6.25, 表明这3种重金属在福建牡蛎体内均有一定程度的累积。

**[关键词]** 重金属; 生态风险; 生物累积; 三沙湾

**[中图分类号]** X 82

## Research on the Ecological Risk and Bioaccumulation of Heavy Metals in Multimedia Environment in Sansha Bay

LI Rongmao

(Fujian Fishery Resources Monitoring Center, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** This study collected shellfish, sediment, and surface seawater samples from 11 sites and 14 sites, respectively, in Sansha Bay from 2020 to 2022. The content of heavy metal elements (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Co, Ni, etc.) in organisms, sediments and seawater was determined using atomic fluorescence spectrophotometer, atomic absorption spectrophotometer, and inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS). The results indicate that the average concentrations of Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Co and Ni in the seawater of Sansha Bay were 0.48, 0.87, 27.11, 0.22, 0.15, 0.03 and 1.93  $\mu\text{g/L}$ , respectively, the comprehensive potential ecological risk index (ERI) for different stations ranges from 1.33 to 3.66, all of which were at a mild potential ecological risk level. The average contents of Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg and As in sediment were 24.75, 42.41, 115.89, 0.11, 65.50, 0.055 and 9.45  $\text{mg/kg}$ , respectively. The heavy metal content of most stations meets the quality standards for Class I marine sediments. The average contents of Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg and As in shell-

**[收稿日期]** 2024-05-28

**[基金项目]** 福建省海洋服务与渔业高质量发展专项“福建省海产品放射性监测及其风险评估技术开发与应用”(FJHYF-L-2023-36)

**[作者简介]** 李荣茂 (1972—), 高级工程师, 主要从事海洋渔业生态资源调查与研究。E-mail: lirongmao2006@163.com

fish were 41. 20, 0. 42, 170. 80, 0. 26, 0. 64, 0. 015 and 0. 50 mg/kg, respectively. The values of bio-sediment accumulation index of 7 heavy metals in the four stations of *Sinonovacula constricta* were all less than 1, indicating that *S. constricta* had no accumulation of these seven heavy metals. The values of bio-sediment accumulation index of Cu, Zn and Cd were 1. 35-8. 92, 0. 44-6. 38 and 2. 35-6. 25, indicating that *Crassostrea angulata* showed a certain degree of accumulation of Cu, Zn and Cd.

**Keywords:** heavy metals; ecological risk; bioaccumulation; Sansha Bay

0 引言

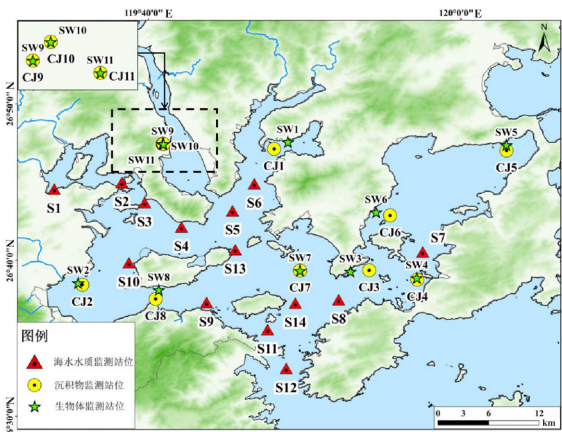
近岸海域重金属污染已成为影响海洋生态系统健康的关键因素之一<sup>[1]</sup>。重金属通常是指铜、铅、锌、镉、铬、汞和砷等密度大于 5 g/cm<sup>3</sup> 的金属。海洋中重金属污染物难以分解，只能在溶解态、悬移态、沉积态等各种形态之间转换<sup>[2]</sup>，一旦进入水体，很容易在生物体内富集并沿食物链传播，而一些重金属会对海洋生态系统乃至人类健康构成潜在的健康风险<sup>[3-5]</sup>。封闭或半封闭海湾的水动力条件不足，重金属更容易在水体和沉积物等自然环境中累积，这可能会加剧生物体内重金属的富集和转化，进而影响海洋植物和动物的生长和代谢，甚至可能导致畸形或死亡等后果<sup>[6]</sup>。因此，海湾或近岸海域的海水、沉积物和生物体中重金属的含量、分布特征及生态风险等长期受到高度关注<sup>[7-8]</sup>。

三沙湾是福建省最大的海湾，湾内渔业资源丰富，水产养殖业发达，养殖有大黄鱼、海参、鲍、牡蛎、缢蛏、海带和龙须菜等诸多水产品种。牡蛎和缢蛏对重金属有较强的耐受性和累积性，被广泛用于重金属污染累积研究，在福建沿海广泛分布。近年来，有研究<sup>[9-12]</sup>表明重金属在三沙湾水体、沉积物和生物体中普遍存在，其中人为污染源是沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、As 和 Ni 的主要来源<sup>[9]</sup>。鉴于此，本研究以三沙湾为对象，分析三沙湾表层水体、沉积物和生物体中典型重金属污染特征，评估海水潜在的生态风险和生物累积，为保障三沙湾渔业水域生态安全和水产品质量安全提供支撑数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

2020 年 5 月—2021 年 5 月在三沙湾福建牡蛎（*Crassostrea angulata*）栖息地（沿岸礁石）及其附近，以及潮间带滩涂缢蛏（*Sinonovacula constricta*）养殖区，共设置 11 个沉积物和生物体的调查站位，开展沉积物和生物体内重金属含量的调查；2022 年 8 月在三沙湾养殖区、河口区、生态敏感区及临港工业集中区邻近海域，共设置了 14 个站位，开展表层海水中重金属含量的调查（见图 1）。所有样品的采集、保存和前处理均参照 GB 17378. 3—2007《海洋监测规范 第 3 部分：样品采集、贮存运输》的要求进行。使用有机玻璃采水器采集表层（0 ~ 20 cm）海水贮存于 50 mL 无菌聚乙烯离心管中，并置于 4 ℃ 采样箱中保存，待样品送回实验室立即用 0. 45 μm 混合纤维膜过滤后加浓硝酸酸化至 pH < 2，密封于聚乙烯样品瓶内避光保存。采用抓斗式采泥器采集表层（0 ~ 5 cm）沉积物 0. 5 kg，剔除其中的枝棒、叶片、石子等异物后，将混匀的样品装入聚乙烯袋内送回实验室，室内将样品转至瓷蒸发皿中，置烘箱内烘干



S1~S14 为海水调查站位；SW1~SW11 为生物调查站位；CJ1~CJ11 为沉积物调查站位。

图 1 三沙湾采样站位分布图

Fig.1 Distribution of sampling stations in Sansha Bay

将混匀的样品装入聚乙烯袋内送回实验室，室内将样品转至瓷蒸发皿中，置烘箱内烘干

后,用玛瑙研钵碾碎后过筛(筛孔径为160目),采用四分法缩分分取10~20 g制备好的样品,装入样品袋备用。采集7个礁石站位上的福建牡蛎样品(SW1、SW3、SW5、SW7、SW8 站位样品个体壳长40~50 mm,SW2、SW4 站位样品个体壳长约70 mm),每份带壳重约2 kg。采集4个潮间带站位滩涂养殖的缢蛏样品(SW6、SW9、SW10、SW11 站位样品个体壳长42~45 mm),每份带壳重约1.5 kg。生物体样品在现场用海水冲洗干净后,装于双层聚乙烯袋中常温条件下贮存并送回实验室,去壳后取可食部分均质成肉糜,置低温条件下保存备用。在各海水、沉积物及生物体样品采集站位中,同步采集平行样。

海水中重金属Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Co、Ni等元素的检测采用HY/T 147.1—2013《海洋监测技术规程 第1部分:海水》中的电感耦合等离子体质谱法。沉积物中重金属Cu、Pb、Cd、Cr元素的检测采用GB 17378.5—2007《海洋监测规范 第5部分:沉积物分析》中的无火焰原子吸收分光光度法,Zn元素采用GB 17378.5—2007中沉积物分析的火焰原子吸收分光光度法检测,Hg和As元素采用GB 17378.5—2007中沉积物分析的原子荧光法检测。生物体中重金属Cu、Pb、Cd、Cr元素的检测采用GB 17378.6—2007《海洋监测规范 第6部分:生物体分析》中的无火焰原子吸收分光光度法,Zn元素采用GB17378.6—2007中生物体分析的火焰原子吸收分光光度法检测,Hg和总As元素采用GB 17378.6—2007中生物体分析的原子荧光法检测。实验室样品分析过程采用平行、加标、跟标等措施保证数据质量。

1.2 数据处理方法

本研究采用描述性统计特征值来分析海水中Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Co和Ni的含量水平和特征分布,同时引入了变异系数(coefficient of variation, CV)来反映各站点重金属含量的变异大小。具体计算式为:  $CV = (S/\bar{y}) \times 100\%$ 。其中:S为样本标准差; $\bar{y}$ 为样本平均数。CV可以消除样本平均数相差较大的影响,是一个不带单位的百分数,在三沙湾海域重金属含量分析中,表征重金属分布的空间离散程度。

采样站位图和空间分布图采用ArcGIS 10.8 软件绘制,数据处理和分析绘图采用Excel 2010 和Origin 8.0 软件绘制。参照文献[13],无机As按总As的14.2%计。对小于检出限的数据采用检出限的一半进行统计。

1.3 评价方法

1.3.1 海水重金属生态风险评估方法

本研究采用综合潜在生态风险危害指数法(the potential ecological risk index, ERI)<sup>[14]</sup>评估三沙湾海水重金属生态风险。其计算公式<sup>[14]</sup>为:  $ERI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_n^i}{C_0^i}$ 。其中, $E_r^i$ 为某金属元素的潜在生态风险指数; $T_r^i$ 为某金属元素的毒性响应系数,Cu、Pb、Zn、Cd、Cr和Ni的毒性响应系数分别取值5、5、1、30、2和5<sup>[14]</sup>;  $C_n^i$ 为实际调查数据; $C_0^i$ 为各元素的评估标准值。综合潜在生态风险等级划分参考文献[15](见表1)。水质中Cu、Pb、Zn、Cd、Cr和Ni元素风险评估的标准值采用GB 11607—89 渔业水质标准中的限量值。

1.3.2 生物累积重金属评估方法

采用生物-沉积物累积因子(bio-sediment accumulation factor, BSAF)<sup>[16]</sup>评估生物累积状况:  $BSAF = C_{org}/C_{sed}$ 。其中: $C_{org}$ 为生物体重金属含量; $C_{sed}$ 为沉积物重金属含量。当  $BSAF \leq 1$ ,表示生物对该种重金属没有明显累积;当  $1 < BSAF \leq 2$ ,表示出现轻度累积;当  $BSAF > 2$ ,表示累积程度较大。

表1 综合潜在生态风险等级<sup>[15]</sup>

Tab.1 The comprehensive potential ecological risk levels		
生态风险等级	$E_r^i$	ERI
轻微	$E_r^i < 40$	ERI < 150
中等	$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq ERI < 300$
强	$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq ERI < 600$
很强	$160 \leq E_r^i < 320$	ERI ≥ 600
极强	$E_r^i \geq 320$	-

注:“-”表示无此项。

2 结果与分析

2.1 海水中重金属

2.1.1 海水中重金属含量及空间分布

三沙湾海域 14 个海水站位的重金属含量空间分布见图 2。三沙湾海域表层水体中 Cu 的质量浓度为 0.06 ~ 2.41  $\mu\text{g/L}$ ；Pb 为 0.04 ~ 2.65  $\mu\text{g/L}$ ；Zn 为 21.13 ~ 31.77  $\mu\text{g/L}$ ；Cd 为 0.11 ~ 0.45  $\mu\text{g/L}$ ；Cr 为 0.02 ~ 0.44  $\mu\text{g/L}$ ；Co 为 0.02 ~ 0.12  $\mu\text{g/L}$ ；Ni 为 0.24 ~ 4.95  $\mu\text{g/L}$ 。Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Co 和 Ni 的平均质量浓度分别为 0.48、0.75、27.11、0.22、0.15、0.03 和 1.93  $\mu\text{g/L}$ ，7 种重金属平均质量浓度由低到高排序为：Co < Cr < Cd < Cu < Pb < Ni < Zn。评价结果表明，三沙湾海水中 6 种典型重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Ni 的含量均符合 GB 1160—89 中渔业水质标准要求。

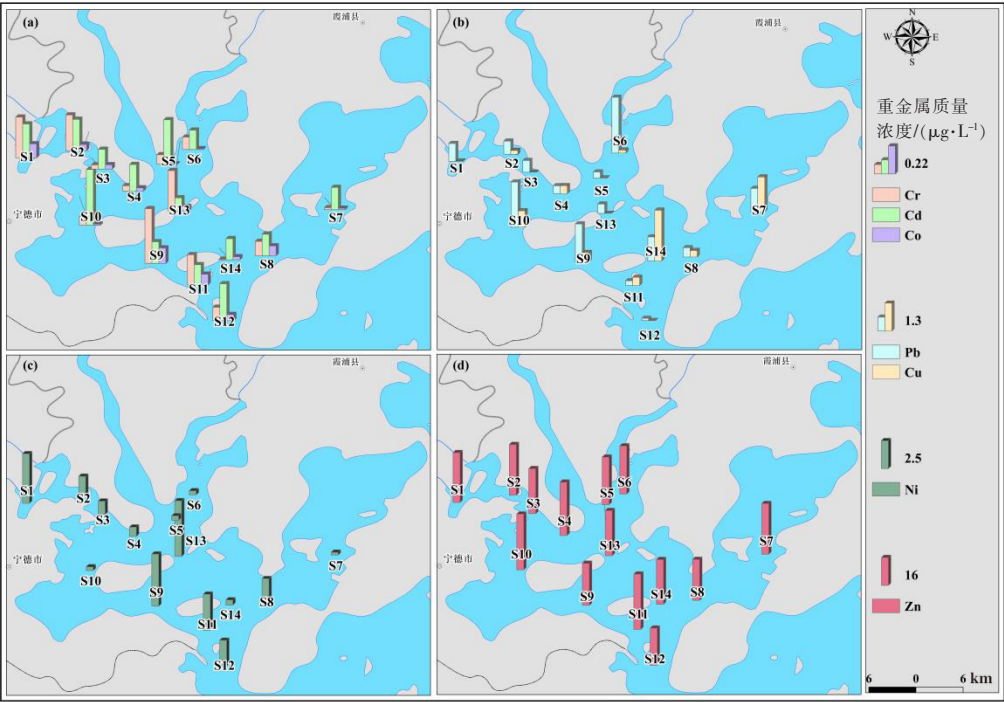


图 2 三沙湾表层海水重金属含量空间分布图

Fig.2 Spatial distribution map of heavy metals content in surface seawater of Sansha Bay

Cu 的含量分布较为分散，在官井洋和东吾洋海域皆出现高值站位，最高值出现在 S14 站位 (2.41  $\mu\text{g/L}$ )。Cu 含量分布整体呈西北海域含量较低，东南海域含量较高的态势。Pb 的质量浓度高值站位分布在三都岛西侧和盐田港港口海域，最高值出现在 S6 站位 (2.65  $\mu\text{g/L}$ )。Zn 的整体质量浓度范围波动较小，高值站位集中在三沙湾西南部海域，最高值出现在 S10 站位 (31.77  $\mu\text{g/L}$ )。调查中 Cd 质量浓度最高值出现在 S10 站位 (0.45  $\mu\text{g/L}$ )，最低值出现在 S13 站位 (0.11  $\mu\text{g/L}$ )。Cr、Ni 和 Co 的高值站位皆集中在河口区附近和三都澳东南海域，在湾口和东吾洋海域含量较低。Cr 和 Co 的最高质量浓度皆出现在 S9 站位 (分别达到 0.44 $\mu\text{g/L}$  和 0.12  $\mu\text{g/L}$ )，Ni 的最高质量浓度出现在 S13 站位 (4.95  $\mu\text{g/L}$ )。

由于各重金属元素在三沙湾海域内的平均含量相差较大，本研究引入变异系数来比较重金属元素含量变异程度的大小。由表 2 可知，重金属的变异系数从高到低排列为 Co > Cu > Pb > Cr > Ni > Cd > Zn，变化范围为 11.54%~166.67%。其中：Co、Cu、Pb、Cr 和 Ni 的变异系数较大 (89.12%~166.67%)，说明所调查的 14 个站位中，Co、Cu、Pb、Cr 和 Ni 的空间离散程度高，元素含量分布不均匀；Cd 和 Zn 的变异系数较小，分别为 40.91% 和 11.54%，说明各站位 Cd 和 Zn 的含量分布较均匀。



表2 重金属含量空间离散程度  
Tab.2 Spatial dispersion degree of heavy metal content

指标	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Ni	Co
标准差 $S/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	0.71	0.80	3.13	0.09	0.15	1.72	0.05
平均值 $\bar{y}/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	0.48	0.75	27.11	0.22	0.15	1.93	0.03
变异系数/%	147.92	106.67	11.54	40.91	100.00	89.12	166.67

2.1.2 海水重金属综合潜在生态风险评估

三沙湾海域各站位海水中重金属综合潜在生态风险评估结果（见图3）表明，三沙湾海域表层海水重金属的综合潜在生态风险指数（ERI）的范围为1.33~3.66，说明重金属综合潜在风险程度较低。其中ERI最高值出现在S10 站位，Cd的贡献率为73.77%。各金属元素的潜在生态风险指数均值从高到低依次为Cd>Zn>Cu>Ni>Pb>Cr，均处于轻微潜在生态风险状态。

2.2 沉积物与生物体中重金属

2.2.1 沉积物及生物体中重金属含量及空间分布

福建牡蛎栖息地沉积物中Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As元素质量比范围分别为（16.6~28.1）、（33.3~49.9）、（72.1~131）、（未检出~0.179）、（43.4~93.6）、（0.042~0.099）和（8.52~14.90）mg/kg。7种重金属元素平均含量由低到高排序为：Hg<Cd<As<Cu<Pb<Cr<Zn，Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As元素的平均质量比分别为23.7、39.9、113、0.099、76.6、0.06和10.65 mg/kg。缢蛏养殖区沉积物中Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As元素质量比范围分别为（23.7~29.8）、（36.3~53.3）、133、（0.092~0.149）、（29~93）、（0.031~0.049）和（4.99~10.2）mg/kg，Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As元素的平均质量比分别为26.6、46.9、133、0.124、46.2、0.04和7.35 mg/kg，7种重金属元素平均质量比由低到高排序为：Hg<Cd<As<Cu<Cr<Pb<Zn。调查的11个沉积物站位中，Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As元素含量均符合第一类海洋沉积物质量标准<sup>[17]</sup>；CJ2~CJ6调查站位的Cr元素含量符合第二类海洋沉积物质量标准<sup>[17]</sup>；CJ1及CJ7~CJ11调查站位的Cr元素含量符合第一类海洋沉积物质量标准<sup>[17]</sup>。

福建牡蛎生物体中Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As元素质量比范围分别为（35.6~148）、（0.18~0.66）、（56.7~460）、（0.22~0.59）、（0.18~1.6）、（0.008~0.058）和（0.36~1.06）mg/kg，Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As元素的平均质量比分别为61.2、0.439、193、0.391、0.784、0.024和0.73 mg/kg，7种重金属元素平均质量比由低到高排序为Hg<Cd<Pb<As<Cr<Cu<Zn。缢蛏生物体中Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As元素质量比范围分别为（1.6~10.2）、（0.180~0.498）、17、（0.0377~0.0617）、（0.090~0.496）、（0.004~0.010）和0.1 mg/kg，Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As元素的平均质量比分别为6.1、0.359、17、0.048、0.376、0.007和0.1 mg/kg，7种重金属元素平均质量比由低到高排序为Hg<Cd<As<Pb<Cr<Cu<Zn。全部福建牡蛎和缢蛏样品中的Pb、Cd、Cr和As含量符合GB 2762—2022 食品中污染物限量的要求；除SW5、SW7和SW8站位的福建牡蛎外，其余站位生物体的Cu含量符合NY 5073—2006 水产品中有毒有害物质限量的要求。

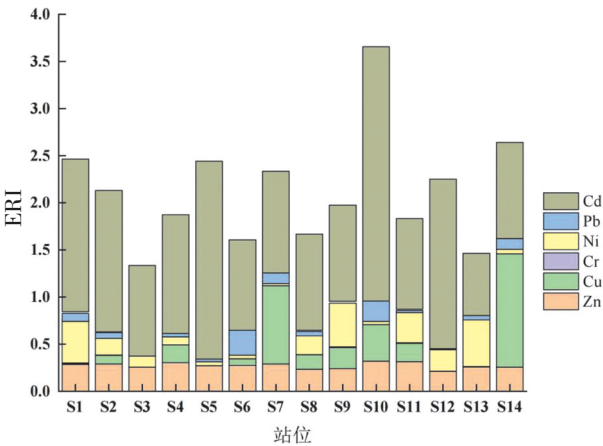


图3 各站位的海水重金属综合潜在生态风险指数  
Fig.3 Comprehensive potential ecological risk index of heavy metal in seawater at each station

2.2.2 生物累积重金属程度评估

11 个调查站位中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、As 的重金属生物-沉积物累积指数（见表 3）表明：个别站位福建牡蛎出现轻度的 Hg 累积现象，累积指数值为 1.04（BSAF>1）；SW5 站位福建牡蛎体内存在 Zn 元素轻度累积，而 SW7 及 SW8 站位福建牡蛎体内 Zn 元素累积程度较高，这 3 个站位累积指数分别为 1.55、3.02 和 6.38；各站位的福建牡蛎体内 Cu 和 Cd 元素均存在不同程度的累积；4 个缢蛏调查站位（SW6、SW9、SW10 和 SW11）的所有重金属累积指数值均<1，说明缢蛏体内 7 种重金属均无明显累积现象。

表 3 各站位重金属生物-沉积物累积指数  
Tab.3 Heavy metals bio-sediment accumulation index of different sampling sites

调查站位	物种	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As
SW1	福建牡蛎	1.84	0.01	0.57	3.54	0.01	0.24	0.04
SW2	福建牡蛎	1.84	0.01	0.99	2.35	0.01	0.20	0.06
SW3	福建牡蛎	1.35	0.02	0.44	3.24	0.02	0.13	0.10
SW4	福建牡蛎	1.77	0.02	0.99	5.37	0.01	0.27	0.08
SW5	福建牡蛎	1.93	0.00	1.55	6.25	0.00	0.37	0.05
SW6	缢蛏	0.05	0.00	0.13	0.54	0.00	0.08	0.01
SW7	福建牡蛎	2.71	0.01	3.02	3.53	0.01	1.04	0.09
SW8	福建牡蛎	8.92	0.01	6.38	—	0.01	0.16	0.07
SW9	缢蛏	0.28	0.01	—	0.28	0.02	0.13	0.02
SW10	缢蛏	0.24	0.01	—	0.36	0.02	0.32	0.01
SW11	缢蛏	0.38	0.01	0.01	0.41	0.01	0.01	0.02

注：“—”表示未检测该项目。

3 讨论

本研究调查的 14 个海水站位中，Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 Ni 元素含量均符合渔业水质标准要求，表明三沙湾海水重金属的污染程度较低，总体综合潜在生态风险程度较低。与福建省兴化湾<sup>[18]</sup>、厦门湾<sup>[19]</sup>、湄洲湾<sup>[20]</sup>、东山湾<sup>[21]</sup> 4 个海湾的对比结果显示，三沙湾海水中 Cu 元素含量处于较低水平，Pd、Zn、Cd 和 Cr 元素含量处于中等水平。与外省广西北部湾<sup>[22]</sup>、广东吴川近岸海域<sup>[23]</sup>、山东乳山湾<sup>[24]</sup> 3 个海湾的调查结果进行对比，发现三沙湾海水中 Pb 和 Zn 元素含量处于中等水平，Cu 和 Cr 元素含量处于较低水平，Cd 元素含量略高于省外部分海湾。就单个重金属而言，Cd 元素的毒性响应系数相对较高。Cd 元素是一种致癌物，生物半衰期长且生物富集作用显著，是我国重点监控的污染排放指标之一<sup>[25]</sup>。三沙湾的海水中 Cd 元素的污染也需要引起重视。本研究除 Zn 元素外，海水中 Cu、Pb、Cd、Cr、Ni 元素的变异系数均大于 20%，说明人类活动可能是影响三沙湾重金属空间分布差异的主要因素。例如，三沙湾海水中 Ni 和 Co 元素的高值区主要出现在河口及沿岸站位，因此推测其来源与沿岸工业废水排放及生产环节中使用、贮存材料的释放有关。

本研究调查的 11 个沉积物站位中，沉积物重金属的污染程度总体较低，在霍云龙等<sup>[9]</sup>和房易玄等<sup>[26]</sup>的调查结果范围内。但是，全部站位的 Cd 元素及部分站位的 Cu、Zn、Pb、Cr 元素含量超过福建近岸浅海沉积物背景值<sup>[27]</sup>，达到一定的累积水平。与大亚湾<sup>[28]</sup>、安海湾<sup>[29]</sup>、珍珠湾<sup>[30]</sup>、钦州湾<sup>[30]</sup>、廉州湾<sup>[30]</sup>、胶州湾<sup>[31]</sup> 6 个海湾相比，本研究调查的三沙湾沉积物中 Zn 和 Cr 元素的含量高于这 6 个海湾；Cu 元素含量低于廉州湾，但高于其余 5 个海湾；Pb、Cd 和 Hg 元素含量处于 6 个海湾

的中等水平。

就不同生物体的栖息地沉积物中重金属平均含量的比较, 福建牡蛎栖息地附近沉积物中 Cu、Pb、Zn 和 Cd 的含量低于缢蛏养殖区, 而 Cr、Hg 和 As 的含量则高于缢蛏养殖区。缢蛏养殖区沉积物站位 (CJ9 ~ CJ11) 主要位于白马港, Pb 和 Cd 元素的高值区也是位于白马港, 其上游是三沙湾内最大的淡水输入河流——交溪, 附近分布有码头、造船厂和金属冶炼厂等<sup>[10]</sup>, 因此工业废水和生活污水排放可能是该区域沉积物中 Pb 和 Cd 含量较高的主要原因之一。Zn 和 Cu 的分布较为相似, 相对高值主要分布于东吾洋, 其中缢蛏养殖区监测站位 CJ6 的值最高。Zn 和 Cu 属于亲铜元素, 可与泥沙中矿物共生。Zn 和 Cu 可能来源于工业和生活污水排放, 船舶、旅游和养殖等相关设施的涂料脱落, 养殖过程中的饵料、杀虫剂和养殖生物的排泄物等<sup>[26-27,32]</sup>。东吾洋属于三沙湾的内湾, 湾内水动力相对较弱, 且养殖规模较大<sup>[27]</sup>, 这可能使沉积物中 Cu 和 Zn 含量相对较高。Cr 的高值区也位于东吾洋, 已有研究<sup>[26]</sup>发现三沙湾养殖区附近 Cr 比非养殖区高, 这可能与养殖区附近船舶活动有关。

本研究调查的 11 个生物样品中, 除个别站位福建牡蛎 Cu 元素含量超标外, 其余指标均符合我国食品中污染物限量或无公害食品标准限量的要求。与东海三门湾<sup>[33]</sup>、浙江沿岸<sup>[34]</sup>、黄海沿岸<sup>[35]</sup> 贝类重金属富集含量相比, 本研究调查的 11 个生物样品中 Pb 元素含量略高于黄海沿岸贝类, 但在浙江三门湾、乐清湾和沿浦湾近江牡蛎和缢蛏的含量范围内。三沙湾调查的福建牡蛎样品中 Cd 元素含量低于三门湾, 且与浙江沿岸和黄海沿岸调查的贝类范围一致; 福建牡蛎样品中 Hg 元素的平均含量与三门湾的近江牡蛎接近, 但在黄海沿岸贝类富集含量范围内; 福建牡蛎和缢蛏体内的 As 元素含量略高于浙江沿岸近江牡蛎和缢蛏, 但在黄海沿岸贝类调查的结果范围内。

福建牡蛎和滩涂养殖缢蛏对不同重金属的富集和累积能力存在较大的差异, 说明这两种生物对环境重金属的吸收和富集具有选择性。就不同重金属富集水平而言, 两种贝类体内的 Cu 和 Zn 的含量均较高, 而 Hg 元素的富集含量最低, 这与其他关于牡蛎和缢蛏等双壳贝类体内重金属含量研究<sup>[36-37]</sup>的结论一致。Zn 和 Cu 是生物体必需的营养元素, 参与了众多酶的合成<sup>[38]</sup>, 贝类因此可能会优先选择吸收环境中的 Cu 和 Zn 元素<sup>[39]</sup>, 使得这两种元素含量及累积指数较高; 还有, 生物体中 Cu 和 Zn 的含量呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 说明牡蛎和缢蛏体内 Cu、Zn 可能同源/同步污染; 此外, 牡蛎和缢蛏等生物体中重金属受海水以及滩涂沉积物中重金属含量的影响显著。相比其他指标, 三沙湾水体和沉积物样品中的 Zn 和 Cu 的含量也相对较高, 而 Hg、Cd 和 As 等含量较低, 这可能是福建牡蛎和缢蛏体中 Cu 和 Zn 含量显著高于其他重金属指标的另一原因。就不同重金属累积程度而言, 福建牡蛎和缢蛏对 Cd 的累积程度最大, 累积指数值范围分别为 2.35 ~ 6.25 和 0.28 ~ 0.54 (见表 3), 文献 [36, 40] 也表明牡蛎和缢蛏对 Cd 的富集能力较强。已有研究<sup>[32]</sup>表明, 牡蛎对海洋环境中 Cd 的吸收为净累积, 半衰期长, 排出量少。水体和沉积物中的重金属污染物是生物体内重金属的重要来源之一。若环境中 Cd 的污染加剧, 牡蛎和缢蛏体内 Cd 富集的潜在风险更大, 因此, 水体和沉积物中 Cd 的富集问题不容忽视。另外, 由于不同生物自身的生理特性, 以及水体温度、盐度和生物摄入量等的差异, 不同种类生物对重金属的富集能力存在差异<sup>[41]</sup>。总体而言, 福建牡蛎样品中 7 种重金属元素平均含量均高于缢蛏, 且 Cu、Zn 和 Cd 的生物-沉积物积累指数明显高于缢蛏, 说明与缢蛏相比, 福建牡蛎对重金属的富集能力更强, 尤其是对 Cu、Zn 和 Cd。文献 [42] 也表明, 牡蛎是 Zn 和 Cu 的强富集生物, 对 Zn 和 Cu 的半衰期极长, 释放较弱。

## 4 结论

1) 本研究中三沙湾 14 个站位海水中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 Ni 元素的平均含量符合渔业水质标准, 海水重金属污染程度总体较轻, Zn 和 Cd 元素空间分布较均匀, Cu、Cr、Pb 和 Ni 等元素空间离散程度较高。海水重金属综合潜在生态风险评估为“轻微”等级。

2) 11 个沉积物调查站位中除 CJ2 ~ CJ6 的 Cr 元素外, 其余站位及重金属指标均符合第一类海洋

沉积物质量标准。沉积物中重金属的污染程度总体较轻, Cr 的污染需要引起重视。

3) 11 个生物体调查站位中, 除个别站位 Cu 元素超标外, 其余重金属指标均符合我国食品中污染物限量或无公害食品标准, 总体处于安全水平。生物累积程度评估结果显示, 福建牡蛎对 Cu、Zn 和 Cd 表现出一定程度的累积现象, 缢蛏则对 7 种重金属无明显累积现象, 表明福建牡蛎更容易受到 Cu、Zn 和 Cd 的污染。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] OTA Y, SUZUKI A, YAMAOKA K, et al. Geochemical distribution of heavy metal elements and potential ecological risk assessment of Matsushima Bay sediments during 2012-2016[J]. Science of the Total Environment, 2021, 751: 141825.
- [2] 张明强. 渤海湾海河大沽口表层沉积物及其近海海洋生物体内重金属的研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2012.
- [3] 龚书椿, 陈应新, 朱兴, 等. 河口地区重金属元素环境化学[J]. 海洋环境科学, 1983(3): 28-44.
- [4] CHEN L F, CAI X Y, CAO M X, et al. Long-term investigation of heavy metal variations in mollusks along the Chinese Bohai Sea[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 236: 113443.
- [5] 李奇龙, 夏斌, 隋琪, 等. 渤海渔业生物重金属污染及风险评价[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(2): 39-49.
- [6] 董汉英, 苏娟, 周声圳, 等. 南海西沙海域冬季海水重金属质量浓度水平及来源分析[J]. 热带海洋学报, 2023, 42(2): 169-177.
- [7] RAJESHKUMAR S, LIU Y, ZHANG X Y, et al. Studies on seasonal pollution of heavy metals in water, sediment, fish and oyster from the Meiliang Bay of Taihu Lake in China[J]. Chemosphere, 2018, 191: 626-638.
- [8] NAIK S, PRADHAN U, KARTHIKEYAN P, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in the coastal sediment in the South-Western Bay of Bengal[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1255466.
- [9] 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.
- [10] 陈凯, 黄智伟, 陈艳梅, 等. 三沙湾表层沉积物中重金属赋存形态及环境风险评价[J]. 渔业研究, 2019, 41(2): 121-129.
- [11] 王萱, 刘义峰, 郭伟. 近十年三沙湾海水增殖区环境质量状况与变化趋势评价[J]. 渔业研究, 2019, 41(6): 519-525.
- [12] SONG Y, LI M T, FANG Y X, et al. Effect of cage culture on sedimentary heavy metal and water nutrient pollution: case study in Sansha Bay, China[J]. Science of the Total Environment, 2023, 899: 165635.
- [13] 席英玉, 林娇, 林永青, 等. 福建闽南沿海养殖僧帽牡蛎中汞和砷的时空分布特征及风险评价[J]. 环境化学, 2017, 36(5): 1009-1016.
- [14] 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.
- [15] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [16] 霍素霞. 渤海沉积物重金属分布特征及生态风险研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局. 海洋沉积物质量标准: GB 18668-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [18] 王恩康, 丰爱平, 张志卫, 等. 兴化湾海域水体和表层沉积物中重金属分布及其源解析[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(4): 696-708.
- [19] 林彩, 李文权, 刘洋, 等. 厦门湾表层海水重金属元素的迁移过程规律研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2013, 52(3): 388-394.
- [20] 谢丽云. 湄洲湾海水、沉积物及水产生物体内重金属的分析与评价[J]. 环境科学, 2012(7): 33-37.
- [21] 蔡真珍, 郑盛华, 杨妙峰, 等. 福建东山湾八尺门海域水体及沉积物中的重金属污染评价[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(2): 259-267.
- [22] 王毅, 李师. 广西北部湾海洋环境与生物体内重金属研究进展[J]. 人民珠江, 2020, 41(7): 25-32.
- [23] 赵明杰, 孙志佳, 闫兴国, 等. 广东吴川近岸海域表层海水重金属含量及生态风险分析[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(1): 70-76.



[24] 鞠青,张婷婷,邱玮茜. 乳山湾水体重金属含量的季节变化与养殖贝类对水体重金属的生物富集效应[J]. 河北渔业,2020(1): 29-34.

[25] 闻海波,李升福. 连云港海域缢蛏中 Cu、Pb、Cd 的含量分析及评价[J]. 河北渔业,2015(9): 18-20.

[26] 房易玄,李茂田,刘晓强,等. 福建三沙湾表层沉积物重金属分布对网箱养殖的响应[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2024(1): 144-156.

[27] 卢欣. 闽东近海水产养殖区表层沉积物重金属元素分布特征及来源解析[D]. 福州: 福建师范大学,2020.

[28] 田丰歌,倪志鑫,黄彬彬,等. 大亚湾海水、表层沉积物中重金属含量及其分布特征[J]. 应用海洋学报,2022,41(3): 462-474.

[29] 陈艳梅,黄智伟,陈凯,等. 安海湾表层沉积物重金属含量分布特征[J]. 应用海洋学学报,2017,36(1): 111-118.

[30] 苏琼源,王才广,黄亮亮,等. 广西主要海湾表层沉积物营养物和重金属研究:分布特征及风险评估[J]. 中国环境科学,2023,43(S1): 221-232.

[31] 李婷婷. 黄海胶州湾多介质重金属空间分布及风险评价[D]. 重庆: 西南大学,2016.

[32] 王晓丽,孙耀,张少娜,等. 牡蛎对重金属生物富集动力学特性研究生态学报[J]. 生态学报,2004,24(5): 1086-1096.

[33] 冉茂霞,莫晓,史永富,等. 东海三门湾主要海产品中典型重金属累积状况[J]. 生态毒理学报,2024,19(2): 350-358.

[34] 孟庆辉,刘伟,何辉,等. 浙江沿海重点养殖区域主要贝类重金属监测分析及膳食暴露评估[J]. 浙江农业科学,2023,64(3): 681-687.

[35] 许道艳,张悦,于彩芬,等. 我国黄海沿岸贝类重金属污染状况及健康风险评价[J]. 安徽农业科学,2022,50(9): 65-71.

[36] 吕海燕,王正方,周青松,等. 三门湾养殖缢蛏中重金属元素的含量及其食用安全性[J]. 海洋学研究,2010,28(3): 85-89.

[37] 盛华峰. 浙江地区养殖缢蛏中的重金属分布及健康风险评估[D]. 杭州: 浙江农林大学,2023.

[38] STORELLI M M. Intake of essential minerals and metals via consumption of seafood from the Mediterranean Sea[J]. Journal of Food Protection,2009,72(5): 1116-1120.

[39] 孙珊,赵玉庭,王立明,等. 山东省主要贝类养殖区重金属环境状况及贝类安全风险分析[J]. 渔业科学进展,2017,38(4): 118-125.

[40] 张玉龙,尹晓斐,屈佩,等. 汞、砷、镉在秦皇岛近海几种典型底栖生物体内的富集特征[J]. 福州大学学报(自然科学版),2024,52(1): 120-126.

[41] 陆昱养,周伦敏,何云亚. 象山县养殖水产品重金属污染与环境相关性研究[J]. 农村科学实验,2024(10): 66. DOI: 3969/j. issn. 2096-0743. 2024. 10. 066.

[42] 林怡辰. 重金属在近岸海域海产品中的富集及其影响机制研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所,2021.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄力行)