

## ◆海洋科学◆

## 广西主要贝类养殖区重金属含量分布特征及污染评价\*

陈继艺<sup>1</sup>, 杨娜<sup>1</sup>, 陈旭阳<sup>2\*\*</sup>, 冀春艳<sup>1</sup>, 刘保良<sup>1</sup>

(1. 自然资源部北海海洋中心, 广西北海 536000; 2. 自然资源部第四海洋研究所, 广西北海 536000)

**摘要:**为探究广西主要贝类养殖区重金属含量的分布状况及污染水平,依据2016–2018年广西主要贝类养殖区的海水、表层沉积物及生物体中重金属元素(Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As)的调查分析数据,分别采用单因子污染指数( $P_i$ )法、地积累指数( $I_{geo}$ )法和生物富集系数(Bioconcentration Factors, BCF)对养殖区重金属进行污染评价。结果表明:海水中各重金属的含量分布为Zn>Cu>As>Pb>Cd>Hg,污染程度为Cu>Hg>Zn=Pb>Cd>As;沉积物中各重金属的含量分布为Zn>Cu>Pb>As>Cd>Hg,污染程度为As>Cd>Pb>Hg>Cu=Zn;近江牡蛎(*Crassostrea rivularis*)贝体中各重金属的含量分布为Zn>Cu>Cd>As>Pb>Hg,污染程度为Zn>Cu>Cd>Pb>Hg>As,生物富集能力为Zn>Cu>Cd>Hg>As>Pb。由此可知,广西主要贝类养殖区的海水水质较好,属于本底水平;沉积物环境属于较清洁水平,适合贝类养殖;生物体中重金属存在不同程度的污染,其中Zn、Cu和Cd的富集积累现象较显著,应引起重视。

**关键词:**贝类养殖区;分布特征;重金属;地积累指数;富集系数;污染评价

中图分类号:X820.2 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2023)04-0683-10

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20230928.007

广西主要的贝类养殖区域集中分布在廉州湾、钦州湾等重要的半封闭型天然良港,湾内滩涂宽阔,适合贝类生物的索饵栖息。随着广西北部湾经济区的高速发展,近海捕捞和海水养殖规模大幅提升,沿海开发产业越发密集,加上近岸海域的人海河流较多<sup>[1]</sup>,自然和人为因素使得养殖海域受到不同程度的污染,导致近岸海水养殖区面临较严重的环境问题<sup>[2-4]</sup>。

海洋环境中的重金属物质是养殖海域污染评价的一个重要指标<sup>[5]</sup>。重金属污染物在海水-沉积物界面不是固定不变的,它可以通过一系列的理化过程重新释放和循环迁移,对养殖海域造成二次污染<sup>[6]</sup>。重金属元素在贝类体内富集和积累到一定浓度会导致贝类畸形甚至死亡<sup>[7]</sup>,最终通过食物链传递影响人体健康<sup>[8]</sup>。目前国内学者对海洋环境重金属的污染调查做了诸多报道<sup>[2,9,10]</sup>,但大多只分析水质或沉积物

收稿日期:2023-03-28

修回日期:2023-05-13

\* 广西科技基地与人才专项项目(桂科AD20159004)资助。

【第一作者简介】

陈继艺(1988-),女,工程师,主要从事海洋生态环境监测研究。

【\*\*通信作者】

陈旭阳(1979-),女,高级工程师,主要从事海洋生态修复研究,E-mail:chenxuyang@4io.org.cn。

【引用本文】

陈继艺,杨娜,陈旭阳,等.广西主要贝类养殖区重金属含量分布特征及污染评价[J].广西科学,2023,30(4):683-692.

CHEN J Y, YANG N, CHEN X Y, et al. Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals from Major Shellfish Culture Areas of Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(4): 683-692.

介质中的重金属污染状况,而针对贝类养殖区水质、底质及生物体重金属的污染研究相对较少。因此,本文以广西沿海的主要贝类养殖区(廉州湾贝类养殖区、茅尾海牡蛎养殖区、红沙牡蛎养殖区)作为研究对象,通过2016–2018年养殖区域的海水、沉积物及牡蛎生物体3种介质中重金属(Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As)的调查分析数据,结合重金属的环境行为特征,对养殖区域不同环境介质中重金属的含量分布特征和污染状况进行综合评价,掌握重金属污染物的积累规律及富集程度,根据尊重海洋、顺应海洋、保护海洋的原则,为广西海洋生态文明建设和贝类养殖海域环境的可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 站位设置

数据来源于2016–2018年广西3个主要贝类养殖区域的海洋环境调查结果。以广西主要贝类养殖区——廉州湾贝类养殖区(站位1–7)、茅尾海牡蛎养殖区(站位8–14)及红沙牡蛎养殖区(站位15–21)为研究区域,共布设21个监测站位,即每个养殖区均设7个站位,具体地理位置如图1所示。

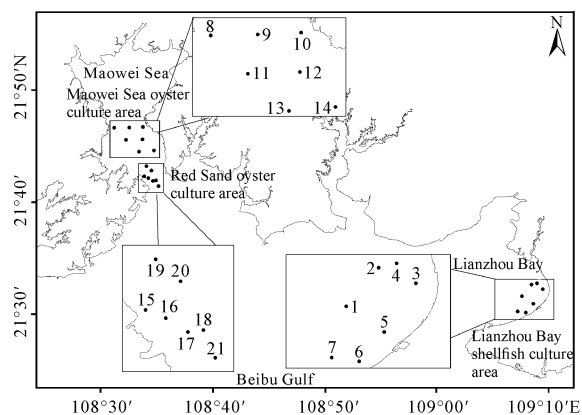


图1 养殖区监测站位

Fig. 1 Monitoring stations in aquaculture areas

### 1.2 方法

#### 1.2.1 样品采集与分析

每年8月分别采集3个养殖区的海水、沉积物和贝类生物体样品。其中海水样品用5 L有机玻璃采水器采集,由于各养殖海域水深均小于10 m,因此每个监测站位只采集水深约0.5 m的表层水样;沉积物样品用不锈钢抓斗式采泥器采集,利用长柄塑料勺挖取未受干扰的表层(0–5 cm)沉积物混合样置于聚乙烯袋中冷藏保存;贝类生物体样品采集已达到商

品规格的牡蛎(共9份),每份牡蛎样品的数量为15–20个,用现场海水冲洗干净后装入聚乙烯袋中冷冻保存。

所有样品的采集、贮存与运输、制备、消化预处理、分析检测均依据《海洋监测规范》(GB 17378–2007)<sup>[11]</sup>第3–6部分的方法进行。其中,海水样品中的Cu、Pb、Zn、Cd采用阳极溶出伏安法测定,沉积物及生物体样品中的Cu、Zn采用火焰原子吸收光谱法测定,Pb、Cd采用无火焰原子吸收光谱法测定,3种介质中的Hg、As采用原子荧光光谱法测定。

#### 1.2.2 单因子污染指数( $P_i$ )法

研究区域海水、贝类生物体中重金属污染程度的评价模式采用单因子污染指数法评价,其计算公式为

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

式(1)中, $P_i$ 为重金属*i*的污染指数; $C_i$ 和 $S_i$ 分别为不同介质中重金属*i*的实测含量及评价标准值,其中海水采用《海水水质标准》(GB 3097–1997)<sup>[12]</sup>中的二类水质标准进行评价,贝类生物体采用《海洋生物质量》(GB 18421–2001)<sup>[13]</sup>中的一类生物质量标准进行评价。

#### 1.2.3 地积累指数法

地积累指数( $I_{geo}$ )<sup>[14]</sup>是德国科学家Müller提出的关于沉积物重金属污染程度的定量指标,是国内外学者广泛应用的一种评价模式<sup>[15]</sup>,其计算公式为

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_n}{k \cdot B_n} \right), \quad (2)$$

式(2)中, $I_{geo}$ 为沉积物中重金属元素的地积累指数; $C_n$ 为重金属*n*在沉积物中的实测含量; $k$ 为成岩作用而取的系数,综合考虑了各地岩石差异可能会引起的背景值变化,一般取值1.5; $B_n$ 为普通页岩中重金属*n*的地球化学背景值。

#### 1.2.4 生物富集系数

通常采用生物富集系数(Bioconcentration Factors, BCF)<sup>[16]</sup>来表示海洋生物对环境中的重金属的富集能力,其计算公式为

$$BCF = C_i / C_s, \quad (3)$$

式(3)中, $C_i$ 为生物体中重金属的含量, $C_s$ 为海水中重金属的含量。当BCF大于1 000时,表明水生生物对某种污染物质有潜在的严重积累风险<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 海水重金属含量分布

广西主要贝类养殖区海水中重金属的含量水平

见表1。从表1可以看出,除廉州湾贝类养殖区2018年的Hg、茅尾海牡蛎养殖区2017年的Hg和2018年的Cu、红沙牡蛎养殖区2016年的Pb和2017年的Hg外,其余重金属平均含量均小于《海水水质标准》(GB 3097-1997)中的一类标准值。

不同养殖区域的海水重金属含量分布特征略有差异,廉州湾贝类养殖区及茅尾海牡蛎养殖区的海水重金属平均含量表现为 $Zn > Cu > As > Pb > Cd > Hg$ ,红沙牡蛎养殖区的海水重金属平均含量( $\mu g \cdot L^{-1}$ )为 $Zn(9.62) > Cu(2.38) > Pb = As(0.95) > Cd$

(0.15)  $> Hg(0.065)$ ,3个养殖区域的海水重金属含量分布规律均为Zn的浓度最高,Cu次之,Hg最小。总体上,研究区域海水中重金属平均含量均小于《海水水质标准》中的二类水质标准值,适合贝类养殖;其中最小含量为2016年茅尾海牡蛎养殖区的Cd,8-14站位含量均为未检出,最大含量为2016年红沙牡蛎养殖区的Cu,超标站位为19号站。

与国内其他海域比较(表2),广西主要贝类养殖区海水重金属Zn、Cd和As的平均含量水平相对较低,Cu、Pb和Hg的平均含量相差不大。

表1 广西主要贝类养殖区海水中重金属含量

养殖区 Breeding area	年份 Year	项目 Item	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
Lianzhou Bay shellfish culture area	2016	Content range	2.29-4.36	0.66-0.88	4.05-12.00	0.25-0.27	0.026-0.045	0.64-0.84
		Mean value	3.16	0.78	6.29	0.26	0.037	0.71
	2017	Content range	1.02-2.50	0.36-0.97	2.78-6.97	0.24-0.34	0.041-0.049	0.43-0.73
		Mean value	1.94	0.67	5.29	0.30	0.045	0.61
	2018	Content range	1.68-5.13	0.38-0.89	2.90-41.40	0.13-0.21	0.051-0.070	1.03-1.22
		Mean value	2.75	0.66	12.00	0.17	0.058	1.14
Maowei Sea oyster culture area	2016	Content range	0.85-3.49	ND-1.05	ND-7.92	ND	0.014-0.025	0.45-1.31
		Mean value	1.29	0.66	6.19	ND	0.019	1.14
	2017	Content range	ND-6.53	ND-1.06	2.51-25.20	ND-0.27	0.066-0.095	0.63-1.21
		Mean value	3.69	0.66	8.84	0.24	0.082	0.91
	2018	Content range	2.12-7.79	0.74-0.94	3.56-15.80	ND-0.15	0.015-0.028	0.61-0.80
		Mean value	5.71	0.85	6.09	0.11	0.023	0.73
Red Sand oyster culture area	2016	Content range	0.42-13.0	0.84-1.69	9.12-31.30	0.04-0.31	0.028-0.053	0.74-1.45
		Mean value	4.53	1.08	17.50	0.14	0.038	1.03
	2017	Content range	0.56-1.78	0.61-1.39	3.09-11.60	0.11-0.19	0.118-0.140	0.64-0.75
		Mean value	1.18	0.91	7.50	0.14	0.129	0.69
	2018	Content range	1.24-1.68	0.74-1.05	1.97-5.76	0.13-0.19	0.018-0.043	1.08-1.21
		Mean value	1.42	0.86	3.87	0.17	0.028	1.12
Overall mean			2.85	0.79	8.17	0.18	0.051	0.90
Standard value of Class I seawater			$\leq 5$	$\leq 1$	$\leq 20$	$\leq 1$	$\leq 0.05$	$\leq 20$
Standard value of Class II seawater			$\leq 10$	$\leq 5$	$\leq 50$	$\leq 5$	$\leq 0.20$	$\leq 30$

Note: "ND" denotes not detected.

表2 与国内其他海域海水中重金属含量比较

Table 2 Comparison of heavy metal content in seawater with other sea areas in China

Unit:  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 

海区 Sea area	项目 Item	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
Sanggou Bay <sup>[18]</sup>	Content range	1.14 - 2.88	0.38 - 1.55	4.62 - 6.53	0.18 - 0.92		
	Mean value	1.68	0.83	5.39	0.42		
Hainan <sup>[19]</sup>	Content range	2.76 - 4.04	0.73 - 1.59	8.96 - 12.10	0.15 - 0.27	0.032 - 0.049	
	Mean value	3.38	1.18	10.76	0.22	0.040	
Qisha Peninsula <sup>[20]</sup>	Content range	0.71 - 5.34	0.03 - 0.85	0.60 - 68.60	0.03 - 0.49		0.89 - 4.37
	Mean value	1.91	0.22	16.17	0.08		2.06
Jiangsu <sup>[21]</sup>	Content range	1.18 - 5.55	0.10 - 1.91	4.43 - 19.20	0.04 - 0.18	0.007 - 0.051	0.63 - 2.90
	Mean value	3.14	0.64	10.18	0.09	0.026	1.53
Yellow Sea and Bo-hai Sea <sup>[22]</sup>	Content range	0.60 - 4.62	0.16 - 2.95	4.92 - 10.61	0.14 - 2.95	0.03 - 0.11	0.16 - 1.37
	Mean value						

## 2.2 海水重金属污染评价

采用《海水水质标准》的二类水质标准值( $S_i$ )对广西主要贝类养殖区的海水水质状况进行评价, 评价等级划分列于表3<sup>[23]</sup>。

表3 海水水质污染等级划分

Table 3 Classification of seawater quality pollution level

$P_i$	污染等级 Pollution level	质量评价 Quality assessment
$P_i < 0.4$	1	Natural background
$0.4 \leq P_i < 0.6$	2	Clean
$0.6 \leq P_i < 0.8$	3	Relatively clean
$0.8 \leq P_i < 1.0$	4	Mild pollution
$1.0 \leq P_i < 2.0$	5	Moderate pollution
$P_i \geq 2.0$	6	Heavy pollution

研究区域海水中各重金属的污染指数( $P_i$ )见表4。由表4可知, 广西主要贝类养殖区海水中的重金属元素对水质污染程度依次为  $\text{Cu} > \text{Hg} > \text{Zn} = \text{Pb} > \text{Cd} > \text{As}$ , 总体海水质量状况较好, 水质属于本底水平。从单个养殖海域来看, 廉州湾贝类养殖区2016-2018年的水质均属本底水平; 茅尾海牡蛎养殖区2018年  $\text{Cu}$ (0.57)、2017年  $\text{Hg}$ (0.41)的污染指数稍大, 属于海水清洁水平; 红沙牡蛎养殖区2016年  $\text{Cu}$ (0.45)、2017年  $\text{Hg}$ (0.65)的污染指数略大, 属于海水较清洁水平。

## 2.3 沉积物重金属含量分布

广西主要贝类养殖区表层沉积物重金属的含量分析结果见表5。由表5可知, 除红沙牡蛎养殖区2016年  $\text{As}$  的平均含量略高外, 其余养殖区年际间重

金属的平均含量均低于《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)<sup>[24]</sup>中的一类标准值, 适合养殖。

表4 广西主要贝类养殖区海水重金属  $P_i$  评价Table 4 Evaluation of heavy metal  $P_i$  in seawater of major shellfish culture areas in Guangxi

养殖区 Breeding area	年份 Year	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
Lianzhou Bay Shellfish culture area	2016	0.32	0.16	0.13	0.05	0.19	0.02
	2017	0.19	0.13	0.11	0.06	0.23	0.02
	2018	0.28	0.13	0.24	0.03	0.29	0.04
Maowei Sea oyster culture area	2016	0.13	0.13	0.12	0.00*	0.10	0.04
	2017	0.37	0.13	0.18	0.05	0.41	0.03
	2018	0.57	0.17	0.12	0.02	0.12	0.02
Red Sand oyster culture area	2016	0.45	0.22	0.35	0.03	0.19	0.03
	2017	0.12	0.18	0.15	0.03	0.65	0.02
	2018	0.14	0.17	0.08	0.03	0.14	0.04
Overall mean		0.29	0.16	0.16	0.04	0.26	0.03

Note: "\*" denotes not detected,  $P_i$  is evaluated by the detection limit.

不同养殖区域的沉积物重金属含量分布特征有所不同, 廉州湾贝类养殖区的沉积物重金属平均含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 为  $\text{Zn}(53.1) > \text{Pb}(29.3) > \text{Cu}(18.8) > \text{As}(9.37) > \text{Cd}(0.16) > \text{Hg}(0.05)$ , 茅尾海牡蛎养殖区的沉积物重金属平均含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 为  $\text{Zn}$

(48.5) > Cu (19.9) > Pb (15.8) > As (8.20) > Cd (0.10) > Hg (0.060), 红沙牡蛎养殖区的沉积物重金属平均含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 为 Zn (78.7) > As (19.4) > Cu (19.0) > Pb (11.0) > Hg (0.118) > Cd (0.08)。3个养殖海域沉积物中重金属含量的分布规律均为 Zn 最高, 这与海水中 Zn 的分布特征是一致的, 说明水

体中含量较高的 Zn 元素在沉积物中也随之较高。

与国内其他海域分析比较(表6)可知, 广西贝类养殖海域沉积物重金属中 Cu、Pb 和 Zn 的平均含量水平相对较低, Hg 略高, Cd 和 As 的平均含量水平与其他海域差别不大。

表5 广西主要贝类养殖区表层沉积物中重金属含量

Table 5 Heavy metal content in surface sediments of major shellfish culture areas in Guangxi

Unit:  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

养殖区 Breeding area	年份 Year	项目 Item	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
Lianzhou Bay shellfish culture area	2016	Content range	17.4-20.9	36.2-45.2	48.4-51.2	0.20-0.26	0.056-0.090	10.93-17.56
		Mean value	18.9	42.2	49.7	0.22	0.068	13.38
	2017	Content range	15.4-21.2	23.8-28.7	31.8-52.8	0.13-0.17	0.041-0.052	10.65-12.72
		Mean value	19.1	25.6	45.3	0.15	0.045	11.39
	2018	Content range	4.2-26.5	5.2-28.7	36.6-84.2	0.06-0.16	0.047-0.052	3.14-3.51
		Mean value	18.4	20.0	64.3	0.12	0.049	3.34
Maowei Sea oyster culture area	2016	Content range	21.3-32.5	10.6-24.0	31.2-46.8	0.07-0.18	0.012-0.066	13.48-18.82
		Mean value	26.8	15.3	38.8	0.12	0.032	16.87
	2017	Content range	20.4-36.6	20.4-29.8	56.0-89.7	0.10-0.19	0.033-0.078	3.70-6.52
		Mean value	26.0	25.3	75.2	0.13	0.062	5.21
	2018	Content range	3.5-8.7	3.5-8.7	21.1-49.1	ND	0.067-0.121	2.14-3.27
		Mean value	6.9	6.9	31.6	ND	0.086	2.53
Red Sand oyster culture area	2016	Content range	17.5-38.5	15.2-27.0	72.6-112.0	0.12-0.18	0.122-0.173	19.61-30.90
		Mean value	29.2	21.6	94.1	0.15	0.145	26.40
	2017	Content range	3.6-28.0	5.3-13.6	41.9-104.0	0.02-0.09	0.147-0.227	13.21-16.60
		Mean value	18.7	9.4	72.4	0.05	0.179	15.44
	2018	Content range	5.9-11.3	1.3-2.4	53.2-79.3	ND	0.014-0.043	15.20-17.41
		Mean value	9.2	1.9	69.5	ND	0.030	16.37
Overall mean			19.2	18.7	60.1	0.11	0.077	12.33
Standard values for Class I marine sediments			≤35.0	≤60.0	≤150.0	≤0.50	≤0.20	≤20.0
Standard value for Class II marine sediments			≤100.0	≤130.0	≤350.0	≤1.50	≤0.50	≤65.0

Note: "ND" denotes not detected.

表6 与国内其他海域沉积物中重金属含量比较

Table 6 Comparison of heavy metal content in sediments from other sea areas in China

Unit:  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

海区 Sea area	项目 Item	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
Sansha Bay <sup>[10]</sup>	Content range	23.04-36.52	39.07-51.83		0.080-0.200	0.051-0.082	8.47-12.16
	Mean value	30.91	44.40		0.121	0.071	10.24
Jiangsu <sup>[21]</sup>	Content range	8.7-29.5	11.0-28.8	43.9-138.0	0.047-0.255	0.010-0.059	4.7-19.8
	Mean value						
Zhelin Bay <sup>[25]</sup>	Content range	21.33-24.97	50.14-66.91	132.62-193.59	0.07-0.15		
	Mean value	22.94	56.84	149.15	0.11		

续表

Continued table

Unit:  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 

海区 Sea area	项目 Item	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
Dalian <sup>[26]</sup>	Content range	16.46 - 23.51	23.27 - 27.08	60.14 - 93.48	0.120 - 0.143	0.019 - 0.037	
	Mean value	19.93	24.88	66.34	0.130	0.028	
Changjiang river estuary <sup>[27]</sup>	Content range	9.45 - 31.70	18.70 - 28.95	75.50 - 118.50	0.52 - 1.87		9.75 - 20.90
	Mean value	21.04	22.87	91.81	1.04		15.17

## 2.4 沉积物重金属污染评价

根据广西主要贝类养殖区表层沉积物的分析结果,采用地积累指数( $I_{\text{geo}}$ )法对该海区的沉积物重金属进行污染评价。地积累指数作为研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标,不仅考虑了人为污染、环境地球化学背景值等因素,还特别关注自然造岩作用可能引起的背景值的变化。据此,采用中国陆壳丰度<sup>[28]</sup>作为广西主要贝类养殖区沉积物重金属的地球化学背景值,中国陆壳页岩中 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 的背景值分别为 38、15、86、0.055、0.08 和 1.9  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。地积累指数( $I_{\text{geo}}$ )的污染等级划分见表 7。

表 7 地积累指数污染等级划分

Table 7 Classification of geo-accumulation pollution level

$I_{\text{geo}}$	污染等级 Pollution level	质量评价 Quality assessment
$\leq 0$	0	Clean
(0 - 1]	1	Relatively clean
(1 - 2]	2	Moderate
(2 - 3]	3	Relatively serious
(3 - 4]	4	Serious
(4 - 5]	5	Very serious
$> 5$	6	Extremely heavy

表 8 广西主要贝类养殖区沉积物重金属  $I_{\text{geo}}$  污染评价Table 8 Evaluation of heavy metal  $I_{\text{geo}}$  pollution in sediments of major shellfish culture areas in Guangxi

养殖区 Breeding area	年份 Year	Cu		Pb		Zn		Cd		Hg		As	
		$I_{\text{geo}}$	$I_{\text{geo}}$ 级别 $I_{\text{geo}}$ degree	$I_{\text{geo}}$	$I_{\text{geo}}$ 级别 $I_{\text{geo}}$ degree	$I_{\text{geo}}$	$I_{\text{geo}}$ 级别 $I_{\text{geo}}$ degree	$I_{\text{geo}}$	$I_{\text{geo}}$ 级别 $I_{\text{geo}}$ degree	$I_{\text{geo}}$	$I_{\text{geo}}$ 级别 $I_{\text{geo}}$ degree	$I_{\text{geo}}$	$I_{\text{geo}}$ 级别 $I_{\text{geo}}$ degree
Lianzhou Bay shellfish culture area	2016	-1.59	0	0.91	1	-1.38	0	1.42	2	-0.82	0	2.23	3
	2017	-1.58	0	0.19	1	-1.51	0	0.86	1	-1.42	0	2.00	2
	2018	-1.63	0	-0.17	0	-1.00	0	0.54	1	-1.29	0	0.23	1
Maowei Sea oyster culture area	2016	-1.09	0	-0.56	0	-1.73	0	0.54	1	-1.91	0	2.57	3
	2017	-1.13	0	0.17	1	-0.78	0	0.66	1	-0.95	0	0.87	1
	2018	-3.05	0	-1.71	0	-2.03	0	-1.04*	0	-0.48	0	-0.17	0

研究区域表层沉积物中重金属的污染状况列于表 8。结果表明,广西主要贝类养殖区表层沉积物重金属除 As 外,Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 的地积累指数( $I_{\text{geo}}$ )均较小,基本介于 0 - 1,沉积物属于较清洁程度。其中 As 在 3 个养殖海域的  $I_{\text{geo}}$  值与其他 5 项沉积物重金属相比均略高,可能是受养殖饵料与人工投放消毒剂的影响。一般来说,As 受自然环境因素的积累是极少的。从整体上看,广西主要贝类养殖区域沉积物中 6 种重金属的污染程度依次为  $\text{As} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cu} = \text{Zn}$ 。

## 2.5 生物体重金属含量分布

广西主要贝类养殖区生物体中重金属的含量水平如表 9 所示,所采集的生物体均为近江牡蛎(*Crasostrea rivularis*)。由数据可知,除 Hg 和 As 含量水平较低外,3 个养殖海域近江牡蛎贝体中 Cu、Pb、Zn 和 Cd 在不同年际间的重金属含量水平有超出一类海洋生物质量标准的情况,其中廉州湾贝类养殖区 2017 年 1 号站位的 Cu 超标最重,已超出三类海洋生物质量标准。

续表

Continued table

养殖区 Breeding area	年份 Year	Cu		Pb		Zn		Cd		Hg		As	
		$I_{geo}$	$I_{geo}$ 级别 $I_{geo}$ degree	$I_{geo}$	$I_{geo}$ 级别 $I_{geo}$ degree	$I_{geo}$	$I_{geo}$ 级别 $I_{geo}$ degree	$I_{geo}$	$I_{geo}$ 级别 $I_{geo}$ degree	$I_{geo}$	$I_{geo}$ 级别 $I_{geo}$ degree	$I_{geo}$	$I_{geo}$ 级别 $I_{geo}$ degree
Red Sand oyster culture area	2016	-0.96	0	-0.06	0	-0.46	0	0.86	1	0.27	1.00	3.21	4
	2017	-1.61	0	-1.26	0	-0.83	0	-0.72	0	0.58	1.00	2.44	3
	2018	-2.63	0	-3.57	0	-0.89	0	-1.04*	0	-2.00	0	2.52	3
Overall mean		-1.70	0	-0.67	0.33	-1.18	0	0.23	0.78	-0.89	0.22	1.77	2.22

Note: "\*" denotes not detected,  $I_{geo}$  is evaluated by the detection limit.

表9 广西主要贝类养殖区生物体中重金属含量

Table 9 Heavy metal content in organisms from major shellfish culture areas in Guangxi Unit: mg · kg<sup>-1</sup>

养殖区 Breeding area	年份 Year	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
Lianzhou Bay shellfish culture area	2016	86.70	ND	47.0	1.08	ND	0.06
	2017	108.00	0.23	31.4	0.60	0.020	0.14
	2018	6.99	ND	43.4	0.08	0.011	0.19
Maowei Sea oyster culture area	2016	63.50	ND	111.0	1.65	0.003	0.25
	2017	4.12	ND	245.0	0.07	0.029	0.38
	2018	38.70	0.31	439.0	0.16	0.008	0.67
Red Sand oyster culture area	2016	5.54	0.04	23.3	0.17	0.011	0.06
	2017	5.55	0.06	140.0	0.14	0.088	0.14
	2018	9.75	0.09	63.0	0.09	0.020	0.10
Overall mean		36.50	0.10	127.0	0.45	0.021	0.22
Class I biological quality standard values		≤10	≤0.1	≤20	≤0.2	≤0.05	≤1.0
Class II biological quality standard values		≤25	≤2.0	≤50	≤2.0	≤0.10	≤5.0

Note: "ND" denotes not detected.

不同养殖区域的生物体重金属含量分布特征亦存在一定差异,廉州湾贝类养殖区的生物体重金属平均含量(mg · kg<sup>-1</sup>)依次是 Cu(67.2) > Zn(40.6) > Cd(0.59) > As(0.13) > Pb(0.10) > Hg(0.011),茅尾海牡蛎养殖区及红沙牡蛎养殖区的生物体重金属平均含量均表现为 Zn > Cu > Cd > As > Pb > Hg。总

表10 与国内其他海域贝类生物体中重金属含量比较

Table 10 Comparison of heavy metal content in shellfish organisms from other sea areas in China

Unit: mg · kg<sup>-1</sup>

海区 Sea area	种类 Species	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
Qinzhou Port <sup>[29]</sup>	<i>Crassostrea rivularis</i>	126.96	0.02	532.03	0.52	0.009	0.40
Hainan Island <sup>[30]</sup>	<i>M. meretrix</i>	3.2 ± 0.18	0.49 ± 0.18	10.90 ± 1.44	0.028 ± 0.004		0.38 ± 0.13
Yantai <sup>[31]</sup>	<i>Chlamys farreri</i>	6.26 ± 0.03	0.92 ± 0.24	15.51 ± 1.11	0.50 ± 0.07	0.07 ± 0.02	
Qinzhou <sup>[32]</sup>	<i>Ostreidae</i>	63.50	ND	111.00	1.65	0.003	0.250
Tianjin <sup>[33]</sup>	<i>Scapharca subcrenata</i>	0.308	0.127		0.0849	0.0272	0.749

Note: "ND" denotes not detected.

体上来看,研究区域生物体中重金属平均含量的总顺序亦与茅尾海、红沙养殖区相同,这与赵鹏等<sup>[29]</sup>对北部湾钦州港近江牡蛎重金属污染分析的研究结果是一致的。

与国内其他海域贝类生物体重金属含量比较(表10)可以看出,广西主要贝类养殖区生物体重金属中Pb和As与其他海域相比含量较低,Cu、Zn、Cd和Hg的含量变化差别不大。

## 2.6 生物体重金属污染评价及富集程度

采用《海洋生物质量》<sup>[13]</sup>中一类海洋生物质量标准值( $S_i$ )对广西主要贝类养殖区生物体重金属进行 $P_i$ 评价,结果如表11所示。结果表明,研究区域2016-2018年近江牡蛎生物体中Cu、Pb、Zn、Cd和Hg存在不同程度的超标现象,仅As符合一类海洋生物质量标准值,其中廉州湾贝类养殖区近江牡蛎重金属污染程度依次为Cu(6.72) > Cd(2.93) > Zn(2.03) > Pb(1.03) > Hg(0.22) > As(0.13),茅尾海牡蛎养殖区的污染顺序为Zn(13.28) > Cu(3.54) > Cd(3.13) > Pb(1.30) > As(0.43) > Hg(0.27),红沙牡蛎养殖区的污染顺序为Zn(3.77) > Hg(0.79) > Cu(0.70) > Cd(0.67) > Pb(0.63) > As(0.10)。总体上,广西主要贝类养殖区生物体中6种重金属的污染程度表现为Zn > Cu > Cd > Pb > Hg > As。

表 11 广西主要贝类养殖区生物体重金属  $P_i$  评价及 BCFTable 11 Evaluation of heavy metal  $P_i$  in biomass and BCF in major shellfish culture areas in Guangxi

养殖区 Breeding area	年份 Year	Cu		Pb		Zn		Cd		Hg		As	
		$P_i$	BCF	$P_i$	BCF	$P_i$	BCF	$P_i$	BCF	$P_i$	BCF	$P_i$	BCF
Lianzhou Bay shellfish culture area	2016	8.67	27 437	0.40*	51	2.35	7 472	5.40	4 154	0.04*	54	0.06	85
	2017	10.80	55 670	2.30	343	1.57	5 936	3.00	2 000	0.40	444	0.14	230
	2018	0.70	2 542	0.40*	61	2.17	3 617	0.40	471	0.22	190	0.19	167
Maowei Sea oyster culture area	2016	6.35	49 225	0.40*	61	5.55	17 932	8.25	18 333	0.06	158	0.25	219
	2017	0.41	6 242	0.40*	61	12.30	27 715	0.35	292	0.58	354	0.38	418
	2018	3.87	6 778	3.10	365	22.00	72 085	0.80	1 455	0.16	348	0.67	918
Red Sand oyster culture area	2016	0.55	1 223	0.40	37	1.17	1 334	0.85	1 214	0.22	289	0.06	58
	2017	0.56	4 703	0.60	66	7.00	18 667	0.70	1 000	1.76	682	0.14	203
	2018	0.98	6 866	0.90	105	3.15	16 279	0.45	529	0.40	714	0.10	89
Overall mean		3.65	17 854	0.99	128	6.36	19 004	2.24	3 272	0.43	359	0.22	265

Note: "\*" denotes not detected,  $P_i$  is evaluated by the detection limit.

海洋生物的富集状况可以通过生物体中重金属和海水中的含量比值来反映。由表 11 得知, 广西主要贝类养殖区近江牡蛎体内重金属的富集能力为  $Zn > Cu > Cd > Hg > As > Pb$ 。除 Pb、Hg 和 As 外, Zn、Cu、Cd 的 BCF 均大于 1 000, 说明这 3 种重金属在研究区域近江牡蛎贝体中的富集积累较为严重, 这与高淑英等<sup>[34]</sup>对福建湄洲湾的研究结果是一致的, 牡蛎对 Cu、Zn 和 Cd 的富集能力比其他海洋生物要高得多。

研究发现, 海水中 Zn 和 Cu 的含量相对较高, 近江牡蛎贝体中 Zn 和 Cu 的含量亦较高, 这与其在海水中的栖息环境是密切相关的。通常情况下, Zn 和 Cu 是海洋生物生长过程中必须吸收的微量元素, 其他几种非生命所需的重金属元素与这两种元素的富集量相比较低。广西主要贝类养殖区近江牡蛎贝体中重金属的富集能力与其含量的高低并不完全一致, 一方面受海水和沉积物中重金属的化学元素背景值相对较高的影响, 另一方面也与海洋生物的种类、生命周期和摄食特征等因素有关<sup>[35]</sup>。

### 3 结论

①3 个贝类养殖区海水中各类重金属含量的空间分布差异较小, 含量分布规律均表现为 Zn 最高, Cu 次之, Hg 最小。研究区域贝类养殖区海水中重金属的含量依次是  $Zn > Cu > As > Pb > Cd > Hg$ , 重金属污染程度顺序为  $Cu > Hg > Zn = Pb > Cd > As$ , 符合二类海水水质标准。总体来看, 广西主要贝类养殖区海水质量状况较好, 属于本底水平。

②各贝类养殖区表层沉积物中重金属的含量分布规律均表现为 Zn 最高、Hg 最低, 这与海水中 Zn 和 Hg 的含量分布特征是一致的; 6 种沉积物重金属的含量总顺序是  $Zn > Cu > Pb > As > Cd > Hg$ , 除 2016 年红沙牡蛎养殖区 As 的平均含量略高外, 其余年间重金属的平均含量均符合一类海洋沉积物质量标准; 地积累指数 ( $I_{geo}$ ) 法评价结果表明, 广西主要贝类养殖区除 As 的  $I_{geo}$  值略高外, Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 的  $I_{geo}$  值基本介于 0-1, 沉积物环境属于较清洁水平, 适合贝类养殖。

③广西主要贝类养殖区近江牡蛎贝体中重金属的平均含量顺序是  $Zn > Cu > Cd > As > Pb > Hg$ , 这与海水和沉积物重金属中 Zn、Cu 的含量较高是一致的; 近江牡蛎贝体中 6 种重金属的污染程度顺序是  $Zn > Cu > Cd > Pb > Hg > As$ , 其富集能力为  $Zn > Cu > Cd > Hg > As > Pb$ , Zn、Cu 和 Cd 的富集系数相对较高, 在贝体内的蓄积情况较突出, 应加以关注。

### 参考文献

- [1] 劳齐斌, 刘国强, 申友利, 等. 北部湾入海河流营养盐的分布特征及入海通量研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(12): 93-100.
- [2] LAO Q B, SU Q Z, LIU G Q, et al. Spatial distribution of and historical changes in heavy metals in the surface seawater and sediments of the Beibu Gulf, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 146: 427-434.
- [3] LIU G Q, LAO Q B, SU Q Z, et al. Spatial and seasonal characteristics of dissolved heavy metals in the aquaculture areas of Beibu Gulf, South China [J]. Human and



- Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020, 26(7):1957-1969.
- [4] 劳齐斌, 刘国强, 高劲松, 等. 钦州湾养殖区营养盐分布特征及富营养化状况研究[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(3):407-416.
- [5] 詹文毅, 王南平, 叶辉, 等. 江苏如东文蛤大面积死亡原因探究[J]. 海洋水产研究, 2003, 24(4):62-65.
- [6] 余辉, 张文斌, 余建平. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 2011, 32(2):437-444.
- [7] 葛奇伟, 徐永健, 葛君远. 象山港养殖区缢蛏和泥蚶的Cu、Cd、Pb含量及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8):2042-2048.
- [8] 蔡圣伟, 张树刚, 华丹丹, 等. 温州市售贝类中重金属含量的分析与评价[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(S2):234-236.
- [9] 陈继艺, 冀春艳, 陈旭阳, 等. 广西廉州湾贝类养殖区重金属的含量变化及潜在生态风险评价[J]. 应用海洋学报, 2018, 37(4):568-576.
- [10] 郑钦华. 三沙湾海水增养殖区沉积物重金属变化特征及污染状况评价[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版), 2019, 31(4):432-440.
- [11] 全国海洋标准化技术委员会. 海洋监测规范:GB 17378-2007 [S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- [12] 中华人民共和国环境保护部. 海水水质标准:GB 3097-1997 [S]. 北京:中国标准出版社, 1997.
- [13] 国家海洋标准计量中心. 海洋生物质量:GB 18421-2001 [S]. 北京:中国标准出版社, 2001.
- [14] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediment of the Rhineriver [J]. Geological Journal, 1969, 2(3):108-118.
- [15] PORSTNER U. Lecture notes in earth sciences (contaminated sediments) [M]. Berlin: Springer Verlag, 1989:107-109.
- [16] HAO Z, CHEN L H, WANG C L, et al. Heavy metal distribution and bioaccumulation ability in marine organisms from coastal regions of Hainan and Zhoushan, China [J]. Chemosphere, 2019, 226:340-350.
- [17] KENAGA E E. Predicted bioconcentration factors and soil sorption coefficients of pesticides and other chemicals [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1980, 4:26-38.
- [18] 孙业皎, 黄翠玲, 隋琪, 等. 桑沟湾表层海水中重金属含量季节变化及污染分析[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(5):752-759.
- [19] 朱志雄, 骆丽珍, 陈石泉, 等. 海南小海海水富营养化和重金属特征分析与评价[J]. 海洋湖沼通报, 2020(5):131-138.
- [20] 阎琨, 庞国涛, 邢新丽, 等. 广西企沙半岛近岸表层海水重金属分布、来源及生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(1):89-96.
- [21] 裘奕斐, 王静, 徐敏. 江苏滨海县近岸海域海水、沉积物和生物体重金属分布及健康风险评价[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2021, 44(1):71-78.
- [22] 孙铭阳, 张旭志, 夏斌, 等. 休渔期和捕捞作业期黄、渤海区沿海中心渔港表层海水重金属分布及生态风险评估[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(6):857-864.
- [23] 贾晓平, 杜飞雁, 林钦, 等. 海洋渔场生态环境质量状况综合评价方法探讨[J]. 中国水产科学, 2003(2):160-164.
- [24] 国家海洋标准计量中心. 海洋沉积物质量:GB 18668-2002 [S]. 北京:中国标准出版社, 2002.
- [25] 张婷, 刘爽, 宋玉梅, 等. 柘林湾海水养殖区底泥中重金属生物有效性及生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2019, 39(3):706-715.
- [26] 刘萱, 赵慧敏, 王华, 等. 大连典型滩涂养殖区沉积物中抗生素协同重金属和环境因素对抗性基因分布的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(2):229-238.
- [27] 符运拓, 杨红, 王春峰. 长江口邻近海域表层沉积物重金属赋存形态及生态危害评估[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(4):534-542, 553.
- [28] 黎彤. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度[J]. 地球化学, 1994, 23(2):140-145.
- [29] 赵鹏, 张荣灿, 覃仙玲, 等. 北部湾钦州港近江牡蛎重金属污染分析[J]. 水产学报, 2017, 41(5):806-815.
- [30] 旷泽行, 汪慧娟, 谷阳光, 等. 海南岛昌化江河口海域生物体重金属富集特征与概率健康风险评价[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(5):699-706.
- [31] 徐晓莹, 胡丽萍, 赵强, 等. 栉孔扇贝烟台养殖区海水水质及扇贝体内重金属含量评价[J]. 中国渔业质量与标准, 2022, 12(4):36-41.
- [32] 莫小荣, 管超毅, 罗良娟, 等. 近年钦州沿海海水、沉积物及牡蛎重金属污染分析和评价[J]. 南方农业学报, 2019, 50(3):554-561.
- [33] 何荣, 刘洋. 天津北部近岸增养殖区重金属污染的调查与评价[J]. 海洋湖沼通报, 2015, 147(4):149-154.
- [34] 高淑英, 邹栋梁. 湄洲湾生物体内重金属含量及其评价[J]. 海洋环境科学, 1994, 13(1):39-45.
- [35] 韦丽丽, 周琼, 谢从新, 等. 三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(1):325-334.

# Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals from Major Shellfish Culture Areas of Guangxi

CHEN Jiyi<sup>1</sup>, YANG Na<sup>1</sup>, CHEN Xuyang<sup>2\* \* \*</sup>, JI Chunyan<sup>1</sup>, LIU Baoliang<sup>1</sup>

(1. Beihai Marine Center, Ministry of Natural Resources, Beihai, Guangxi, 536000, China; 2. Fourth Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Beihai, Guangxi, 536000, China)

**Abstract:** In order to explore the distribution and pollution level of heavy metal content in major shellfish culture areas of Guangxi, based on the investigation and analysis data of heavy metal elements (Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, As) in seawater, surface sediments and organisms of major shellfish culture areas of Guangxi during 2016–2018, the single factor index  $P_i$  method, geo-accumulation index  $I_{geo}$  method and Bioconcentration Factors (BCF) were used to evaluate the pollution of heavy metals in culture areas. The results show that the content distribution of all heavy metals in seawater is  $Zn > Cu > As > Pb > Cd > Hg$ , and the pollution degree is  $Cu > Hg > Zn = Pb > Cd > As$ . The content distribution of heavy metals in sediments is  $Zn > Cu > Pb > As > Cd > Hg$ , and the pollution degree is  $As > Cd > Pb > Hg > Cu = Zn$ . The contents of heavy metals in the shellfish of *Crassostrea rivularis* is  $Zn > Cu > Cd > As > Pb > Hg$ , the pollution degree is  $Zn > Cu > Cd > Pb > Hg > As$ , and the bioaccumulation ability was  $Zn > Cu > Cd > Hg > As > Pb$ . It can be seen that the seawater quality of the main shellfish culture areas in Guangxi is better, which belongs to the background level. The sediment environment belongs to relatively clean level and suitable for shellfish culture. There are different degrees of pollution of heavy metals in organisms, among which the accumulation of Zn, Cu and Cd is more significant, which should be paid attention to.

**Key words:** shellfish culture areas; distribution characteristics; heavy metal; index of geo-accumulation; enrichment coefficient; pollution assessment

责任编辑: 陆媛峰



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>