

◆环境科学◆

万宁小海海域重金属分布特征研究及其风险评价*

庞巧珠, 陈晓慧, 谢海群, 梁计林**, 邢孔敏**

(海南省海洋与渔业科学院, 海南海口 571126)

摘要: 为了解海南省万宁市小海海水和鱼类生物体中的重金属污染现状及食入健康风险, 选择万宁小海海水和常见的5种经济鱼类作为研究对象, 测定海水和鱼类肌肉组织中6种重金属Cu、Pb、Zn、Cd、Hg和As的含量。采用单因子指数($P_{i,j}$)法和生物富集系数(BCF)法评价生物体污染程度, 采用目标危险系数(THQ)法评估摄入重金属对人体的健康风险。结果表明: 小海海水中Cu、Zn、Cd和As含量符合第一类海水水质标准; Pb和Hg含量整体处于第二类海水水质标准; 潮汐通道处个别站位的Pb含量处于第三类海水水质标准, 超出管理要求水平。与国内其他海域相比, 小海Pb和Cd含量相对较高, Hg含量处于中等水平, Cu、As、Zn含量处于较低水平; 与历史数据相比, Pb和Hg污染加剧。本研究的鱼类体内Zn、Hg和As富集明显, Pb和Cd富集较弱, 部分鱼类As含量超出《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定的限量。单因子指数法和目标危险系数法评价结果显示, 小海常见的鱼类体内不仅出现As、Hg轻度污染, As还是主要的食用健康风险元素。长期适量食用该海域常见的5种经济鱼类不会有健康风险, 但小海海域海水和鱼类生物体中的重金属污染仍应引起关注, 同时应加强对海水中Pb、Hg和鱼类体内As、Hg含量的预警及监测, 防止重金属污染危害人体健康。

关键词: 万宁小海; 海水; 生物体; 重金属; 生物富集; 健康风险

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2024)03-0554-11

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20240910.016

重金属是一类可以对环境产生危害的污染物, 具有沿食物链传递并在生物体内富集的特点^[1]。海水是近海海域海洋环境受到重金属污染的第一层和最直接受体, 溶解在海水中的重金属会被海洋生物吸

收。当海洋生物体内的重金属含量达到一定水平时, 可能引发代谢障碍、生长缓慢等不良影响, 甚至导致畸形或死亡等后果。此外, 人们食用含有过量重金属的海产品也会面临中毒和致癌等风险, 人体健康受到

收稿日期: 2024-04-17 修回日期: 2024-05-20

* 海南省自然科学基金项目(321QN0960)资助。

【第一作者简介】

庞巧珠(1989—), 女, 工程师, 主要从事海洋环境分析与研究, E-mail: 1146828156@qq.com。

【**通信作者简介】

梁计林(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋生态环境评价与研究, E-mail: 4158384@qq.com。

邢孔敏(1989—), 男, 工程师, 主要从事海洋环境分析与研究, E-mail: 308700651@qq.com。

【引用本文】

庞巧珠, 陈晓慧, 谢海群, 等. 万宁小海海域重金属分布特征研究及其风险评价[J]. 广西科学, 2024, 31(3): 554-564.

PANG Q Z, CHEN X H, XIE H Q, et al. Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Wanning Xiaohai [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(3): 554-564.

危害^[2]。因此,开展关于海水及生物体内重金属的现状污染研究具有重要意义。

小海位于海南省万宁市东部沿海海域,面积约43 km²,呈葫芦状,腹大口小,气候温和,雨水充足,海产品丰富,是海南最大的潟湖。周边有东山河、北坡溪、龙首河、龙尾河、白石溪、狗溪河等6条河流自南部、西部汇入,潮汐通道位于潟湖东北部,小海周边养殖点密集。目前,国内学者已对南海海域海水和海洋生物体重金属污染做了一些研究^[3-9],但对小海重金属的研究多侧重于沉积物^[8,9],小海生物体和近期海水重金属污染的研究未见报道。本研究基于2020年小海海域海水和海洋生物体内重金属的调查结果,分析海水重金属分布特征及其来源,采用单因子指数($P_{i,j}$)法和生物富集系数(BCF)法评价生物体重金属污染现状,并用目标危险系数(THQ)法评估人体

暴露健康风险,为小海海域海洋环境保护和治理提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

于2020年春季(5月)和秋季(10月)在小海海域采集20个站位(图1)的表层海水重金属样品,其中S1—S13号站位位于旅游休闲娱乐区,S14—S20号站位位于港北港农渔业区。鱼类生物体样品于春季采集,种类包括点带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)、短棘鲷(*Leiognathus equulus*)、金焰笛鲷(*Lutjanus fulviflamma*)、日本黄姑鱼(*Argyrosomus japonicus*)和红鳍拟鳞鲷(*Paracentropogon rubripinnis*)。样品采集、处理和保存依据《海洋监测规范》^[10]执行。

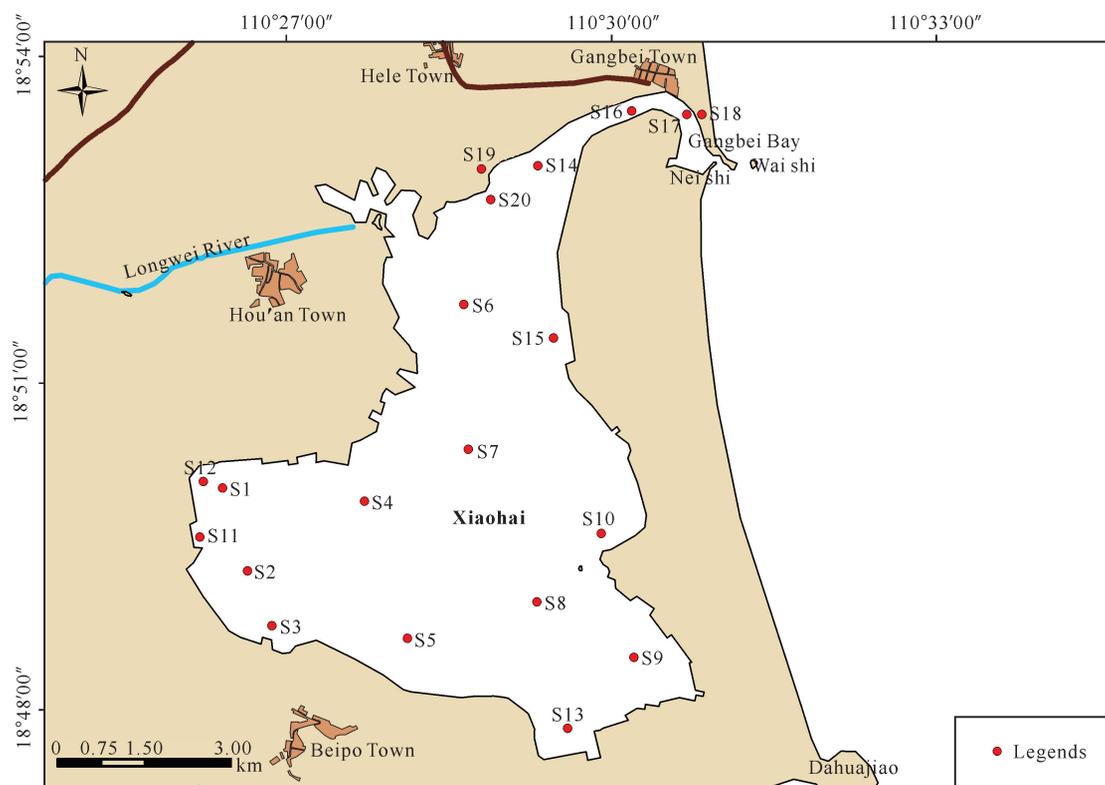


图1 小海采样站位[审图号:GS(2019)3266号]

Fig. 1 Sampling sites in Xiaohai [figure number:GS(2019)3266]

1.2 样品分析

海水中的Hg、As和鱼类生物体中的Hg分析严格参照《海洋监测规范》^[10]的相关规定执行,采用原子荧光光度计(AFS-8230,北京吉天仪器有限公司)测定,其余重金属要素参照《海洋监测技术规程》^[11]执行,采用电感耦合等离子体质谱仪[iCAP PQ,赛默飞世尔科技(中国)有限公司]测定。为确保样品分析

的准确性,采用空白、平行样、加标、有证标准物质等手段进行控制。测定海水Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As的方法检出限分别为0.12、0.07、0.10、0.03、0.007、0.05 μg/L,生物体中Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As的方法检出限分别为0.08、0.03、1.66、0.03、0.002、0.10 μg/g。

1.3 评价方法

1.3.1 单因子指数法^[12]

该法能直接反映测定结果与评价标准的关系,可用于评价生物体重金属的污染情况。单因子指数的计算公式为

$$P_{i,j} = C_i / C_j,$$

式中, C_i 、 C_j 分别为污染物的实测值和评价标准值。关于海洋生物体重金属的评价标准,目前国内尚未正式颁布,海洋科技工作者长期使用全国海涂资源和海岸带综合调查制定的《海洋生物污染评价标准》^[13]作为评价标准,本研究参照此标准进行评价。参照杜冰等^[14]的评判依据划分污染等级:当 $P_{i,j} < 0.2$ 时,表明其为背景水平;当 $0.2 \leq P_{i,j} < 0.6$ 时,为轻度污染;当 $0.6 \leq P_{i,j} < 1.0$ 时,为中度污染;当 $P_{i,j} \geq 1.0$ 时,为重度污染。

1.3.2 生物富集系数法^[15]

该法可反映海洋生物对海水重金属的富集程度。生物富集系数的计算公式为

$$BCF = \frac{C_{oi}}{C_i},$$

式中, C_{oi} 表示重金属 i 在生物体中的重金属浓度 (mg/kg), C_i 表示重金属 i 在海水中的重金属浓度 (mg/L)。当 $BCF > 1000$ 时,表示潜在累积严重。

1.3.3 目标危险系数法^[16]

该法是美国环境保护署于 2000 年建立的人体健康评价法,具体计算方式如下。

$$\text{目标危险系数: } THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times c \times 10^{-3}}{RfD \times W_{AB} \times TA},$$

$$\text{复合目标危险系数: } TTHQ = \sum THQ,$$

式中, EF 为暴露频率 (365 d/年); ED 为暴露年限 (70 年); FIR 为食物摄取率,海南成人水产品的日常人均摄取率为 64.15 g/d^[17]; c 是海产品中重金属的质量含量 (mg/kg); RfD 为口服参考剂量, Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As 分别为 0.04、0.3、0.004、0.001、0.0005、0.0003 mg/(kg·d)^[18]; W_{AB} 为人体平均体重 (60 kg)^[19]; TA 为非致癌暴露平均时间 (365 d×70 年)。当 $THQ \leq 1$ 时,暴露人群无明显非致癌健康风险;当 $THQ > 1$ 时,暴露人群存在非致癌健康风险。 $TTHQ$ 为各重金属目标危险系数之和。

2 结果与分析

2.1 海水中的重金属含量

小海潟湖包括旅游休闲娱乐区和港北港农渔业区,海水按二类海水水质标准执行。表层海水重金属含量见表 1。6 种重金属除 Zn 在春季航次个别站位未检出外,其余重金属在春、秋季航次均有检出。春季 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 含量分别为 0.16—4.87、0.50—8.01、nd—11.35、0.023—0.050、0.017—0.104 和 0.66—1.28 μg/L, 均值分别为 0.89、2.08、4.10、0.034、0.052 和 0.82 μg/L; 秋季 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 含量分别为 0.48—1.68、0.44—5.75、0.30—11.70、0.009—0.057、0.014—0.104、0.20—0.50 μg/L, 均值分别为 1.01、1.86、2.57、0.017、0.061 和 0.31 μg/L。参照《海水水质标准》^[20] (表 2), Cu、Zn、Cd 和 As 均符合第一类海水水质标准。春季 Hg 有 40% 站位符合第二类海水水质标准,其余站位符合第一类海水水质标准, Pb 有 20%、70% 和 10% 站位分别符合第一、第二和第三类海水水质标准; 秋季 Hg 各有 50% 站位符合第一和第二类海水水质标准, Pb 有 15%、80% 和 5% 站位分别符合第一、第二和第三类海水水质标准。春季和秋季 Pb 超标站位均位于潮汐通道处; Hg 含量在旅游休闲娱乐区相对较高,春季和秋季分别是港北港农渔业区的 1.6 和 1.3 倍; Pb 则相反,春季港北港农渔业区相对较高,是旅游休闲娱乐区的 2.4 倍,秋季两个区域 Pb 含量接近。如图 2 所示,春季 As、Pb、Zn 和 Cd 分布特征呈北高南低,北部的潮汐通道相对较高, Cu、Hg 反之,呈南高北低,在潟湖南部较高。秋季 As、Cu、Pb 呈中部低南北高, Zn 和 Cd 由中部至北部的口门处相对较低,南部相对较高, Hg 自南向北大致呈递减趋势 (图 3)。

表 1 小海海域表层海水重金属含量

Table 1 Content of heavy metals in Xiaohai surface seawater

		Unit: μg/L					
季节	Season	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
Spring	Minimum	0.16	0.50	nd	0.023	0.017	0.66
	Maximum	4.87	8.01	11.35	0.050	0.104	1.28
	Average	0.89	2.08	4.10	0.034	0.052	0.82
Autumn	Minimum	0.48	0.44	0.30	0.009	0.014	0.20
	Maximum	1.68	5.75	11.70	0.057	0.104	0.50
	Average	1.01	1.86	2.57	0.017	0.061	0.31

Note: nd means below the detection limit.

表 2 海水水质标准

Table 2 Seawater quality standard

Unit: $\mu\text{g/L}$

标准等级 Standard grade	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
Class I	≤ 5	≤ 1	≤ 20	≤ 1	≤ 0.05	≤ 20
Class II	≤ 10	≤ 5	≤ 50	≤ 5	≤ 0.20	≤ 30
Class III	≤ 50	≤ 10	≤ 100	≤ 10	≤ 0.20	≤ 50
Class IV	≤ 50	≤ 50	≤ 500	≤ 10	≤ 0.50	≤ 50

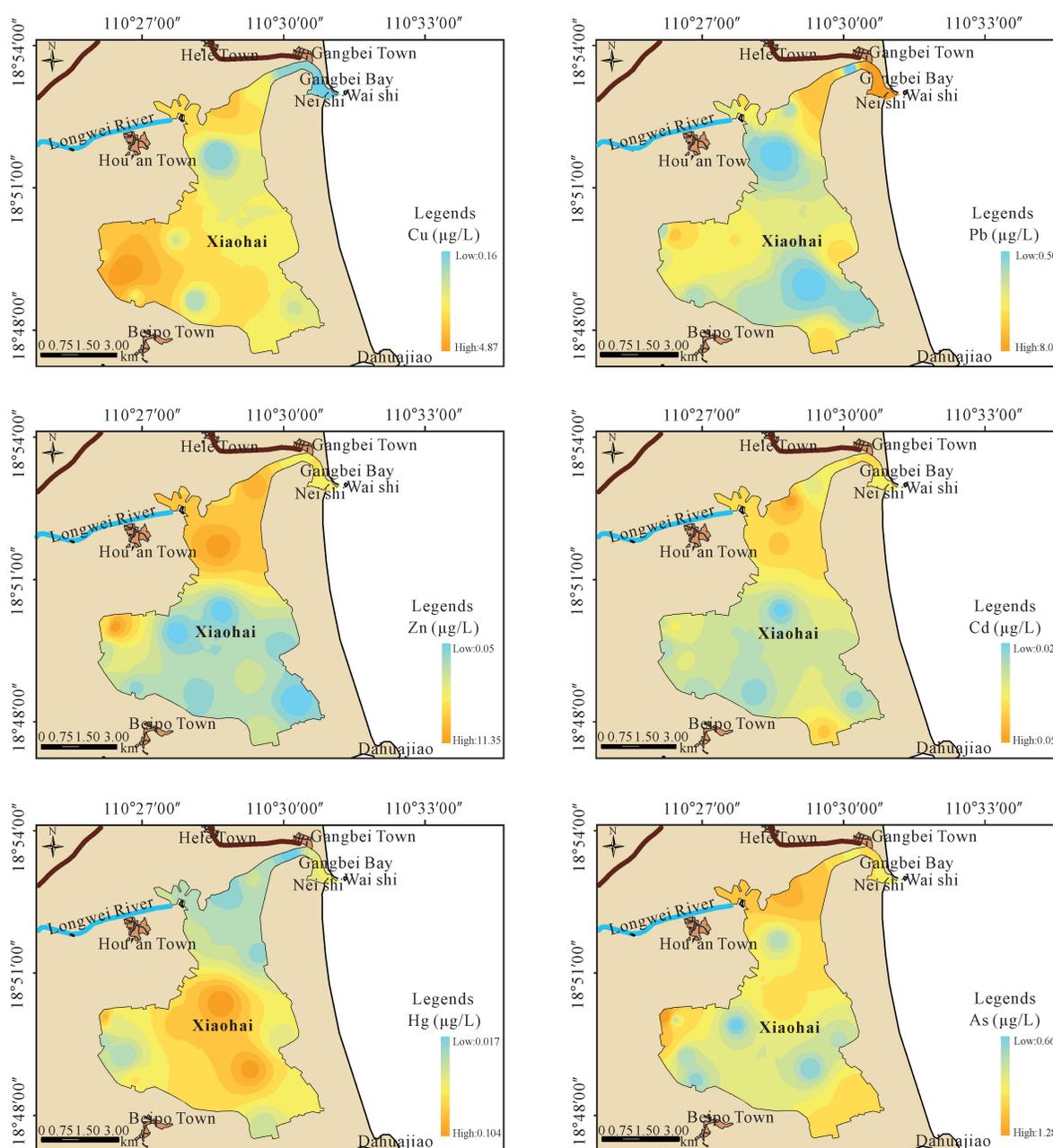


图 2 春季小海海域海水重金属含量分布

Fig. 2 Distribution of heavy metals in Xiaohai seawater in spring

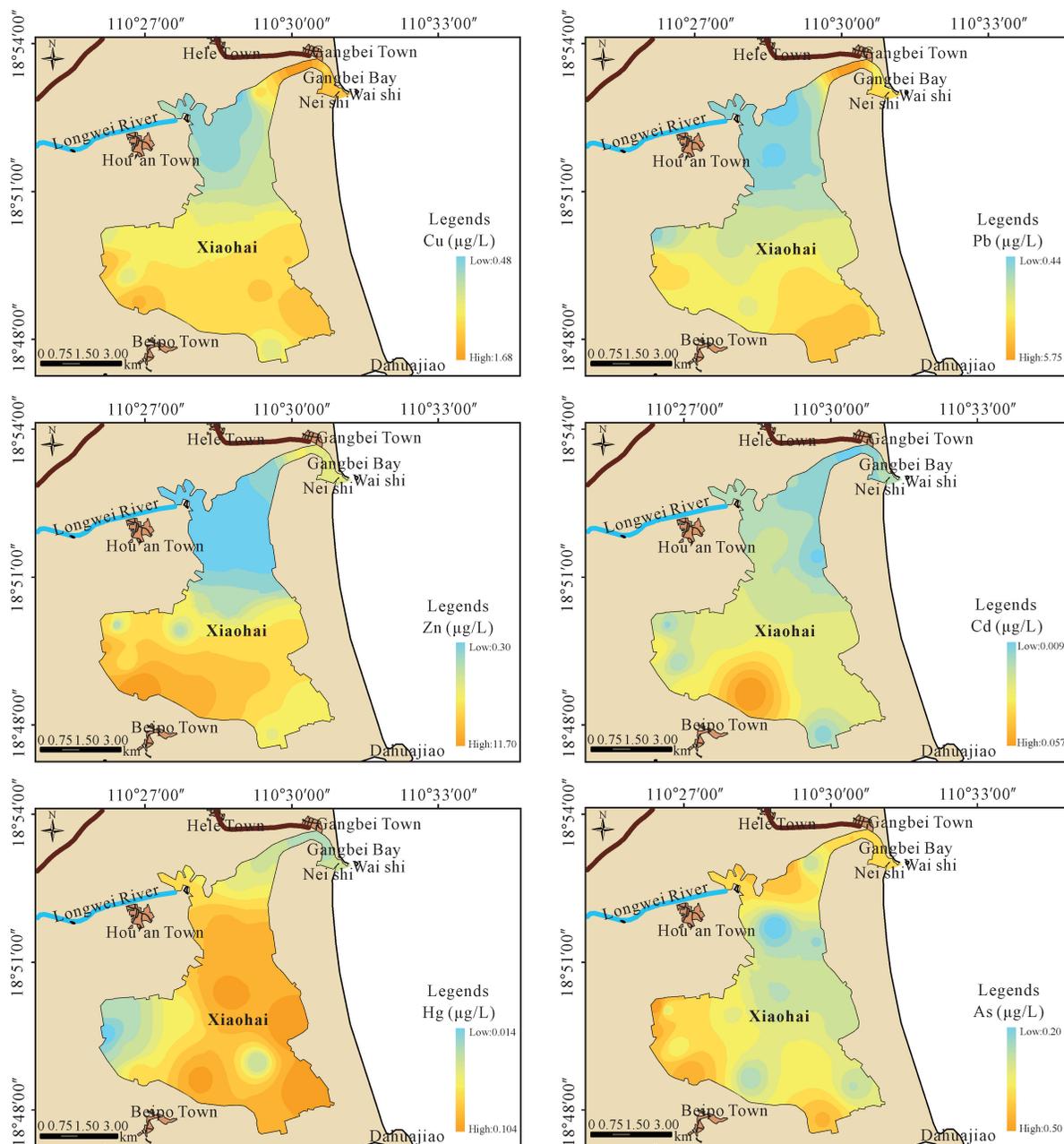


图3 秋季小海海域海水重金属含量分布

Fig. 3 Distribution of heavy metals in Xiaohai seawater in autumn

2.2 鱼类肌肉组织中的重金属含量

小海采获鱼类肌肉组织中的重金属含量见表3。5种鱼类肌肉组织中重金属含量依次为 $Zn > As > Cu > Hg > Pb \approx Cd$, 其中 Pb 和 Cd 含量极低, 测定值低于方法检出限, 重金属 Cu 含量差异较小, Hg 、 As 、 Zn 差异明显。点带石斑鱼肌肉组织中 Hg 含量明显高于其他鱼类; 红鳍拟鳞鲷 Hg 含量较低; 日本黄姑鱼 As 含量高于其他鱼类, Zn 含量则低于其他鱼类; 点带石斑鱼 As 含量最低; 其余鱼类 As 含量接近。5种鱼类肌肉组织中 Zn 和 As 变异系数分别为 31% 和 44%, 分散性较大, 差异明显, 其他重金属元素变异系

数小于 5%, 分散性小, 差异较小。如表 4 所示, Cu 、 Pb 、 Zn 、 Cd 、 Hg 在 5 种鱼类肌肉组织中的含量均低于《海洋生物污染评价标准》^[13]、《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[21] 和《无公害食品 水产品中有毒有害物质限量》^[22] 中规定的限量, 而 As 在短棘鲷、红鳍拟鳞鲷、日本黄姑鱼和金焰笛鲷肌肉组织中的含量超出《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[21] 中规定的限量, 说明短棘鲷、红鳍拟鳞鲷、日本黄姑鱼和金焰笛鲷肌肉组织中的 As 含量超过安全范围, 小海鱼类受到重金属 As 污染。

表 3 小海鱼类肌肉组织中的重金属含量

种类 Category	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
<i>Epinephelus coioides</i>	0.13	nd	4.60	nd	0.121	0.67
<i>Leiognathus equulus</i>	0.22	nd	6.70	nd	0.043	1.13
<i>Lutjanus fulviflamma</i>	0.28	nd	5.10	nd	0.063	1.08
<i>Paracentropogon rubripinnis</i>	0.36	nd	7.20	nd	0.005	1.50
<i>Argyrosomus japonicus</i>	0.17	nd	4.20	nd	0.046	2.74
Average	0.23	nd	5.56	nd	0.056	1.42

Note: nd means below the detection limit.

表 4 评价标准限量

标准 Standard	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
[13]	20	2.0	40	0.6	0.3	5.0
[21]		0.5		0.1	1.0	1.0
[22]	50	0.5		0.1	1.0	5.0

Note: [13], [21], [22] inorganic arsenic was converted to total arsenic by 1:10.

重金属 Hg、As、Cu、Zn 在不同种类的鱼类生物肌肉组织中存在一定差异, 5 种鱼类 Hg 含量依次为点带石斑鱼>金焰笛鲷>日本黄姑鱼>短棘鲷>红鳍拟鳞鲷; As 含量为日本黄姑鱼>红鳍拟鳞鲷>短棘鲷>金焰笛鲷>点带石斑鱼; Cu 含量为红鳍拟鳞鲷>金焰笛鲷>短棘鲷>日本黄姑鱼>点带石斑鱼; Zn 含量为红鳍拟鳞鲷>短棘鲷>金焰笛鲷>点带石斑鱼>日本黄姑鱼。重金属在不同鱼类肌肉组织中的含量差异可能与其习性、代谢活动有关^[23]。5 种鱼类肌肉组织中 Hg、Pb、Cd 的含量较低, 这与徐阁等^[5]的研究结果一致。

2.3 单因子指数

小海鱼类肌肉组织中重金属的单因子指数 ($P_{i,j}$) 见表 5。鱼类肌肉组织中 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 的单因子指数分别为 0.01—0.02、0.02、0.11—0.18、0.01、0.02—0.40 和 0.13—0.55, 单因子指数均值依次为 As>Hg>Zn>Pb>Cu=Cd。鱼类肌肉组织中 Cu、Pb、Zn、Cd 的单因子指数均小于或等于 0.2, 表明其含量尚处于背景正常值水平; 点带石斑鱼、金焰笛鲷体内 Hg 的单因子指数表明其为轻度污染, 其余鱼类体内 Hg 为无污染; 点带石斑鱼体内 As 为无污染, 其余鱼类体内 As 的单因子指数表明其为轻度污染。

表 5 小海鱼类肌肉组织中重金属的 $P_{i,j}$ 值

种类 Category	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
<i>Epinephelus coioides</i>	0.01	0.02	0.12	0.01	0.40	0.13
<i>Leiognathus equulus</i>	0.01	0.02	0.17	0.01	0.14	0.23
<i>Lutjanus fulviflamma</i>	0.01	0.02	0.13	0.01	0.21	0.22
<i>Paracentropogon rubripinnis</i>	0.02	0.02	0.18	0.01	0.02	0.30
<i>Argyrosomus japonicus</i>	0.01	0.02	0.11	0.01	0.15	0.55
Average	0.01	0.02	0.14	0.01	0.18	0.28

2.4 生物富集系数

小海鱼类肌肉组织中重金属的生物富集系数 (BCF) 见表 6。Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 的 BCF 分别为 26.7—1 062.5、0.9—15.0、752.2—4 187.5、174.4—277.8、294.1—4 653.8 和 1 015.2—3 971.0, 5 种鱼类对海水重金属的富集程度依次为 As>Zn>Hg>Cu>Cd>Pb。不同鱼类对海水重金属 Hg、As、Cu、Zn 的富集存在明显差异, 但对 Pb 和 Cd 的富集差异不大。5 种鱼类肌肉组织中 As 的 BCF 为潜在累积严重; 除了金焰笛鲷外, 其余鱼类 Zn 的 BCF 为潜在累积严重; 点带石斑鱼和金焰笛鲷 Hg 的 BCF 为潜在累积严重。

表 6 小海鱼类肌肉组织中重金属的生物富集系数

种类 Category	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As
<i>Epinephelus coioides</i>	26.7	4.3	1 360.9	241.9	4 653.8	1 015.2
<i>Leiognathus equulus</i>	407.4	4.1	4 187.5	277.8	565.8	1 712.1
<i>Lutjanus fulviflamma</i>	482.5	5.5	752.2	174.4	2 232.1	1 285.7
<i>Paracentropogon rubripinnis</i>	878.0	15.0	1 561.8	187.5	294.1	1 898.7
<i>Argyrosomus japonicus</i>	1 062.5	0.9	1 088.1	250.0	575.0	3 971.0
Average	571.4	6.0	1 790.1	226.3	1 664.2	1 976.6

2.5 健康风险评价

本研究检测的是鱼类的总砷, 但对人体产生危害效应的是无机砷, 无机砷约占总砷的 10%^[24]。海南居民通过摄入在小海捕获的 5 种鱼类而暴露的非致

癌健康风险评估结果见图4。在小海捕获的5种鱼类肌肉组织中 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As 的 THQ 为 0.01–0.98, 均小于 1, 说明食用小海海域的鱼类不会有潜在的非致癌健康风险。日本黄姑鱼肌肉组织中 As 的 THQ 最高。THQ 以 As 最高, 其次是 Hg, TTHQ 风险高低与 As 的 THQ 一致, 依次为日本黄姑鱼 > 红鳍拟鳞鲷 > 短棘鲷 > 金焰笛鲷 > 点带石斑鱼。

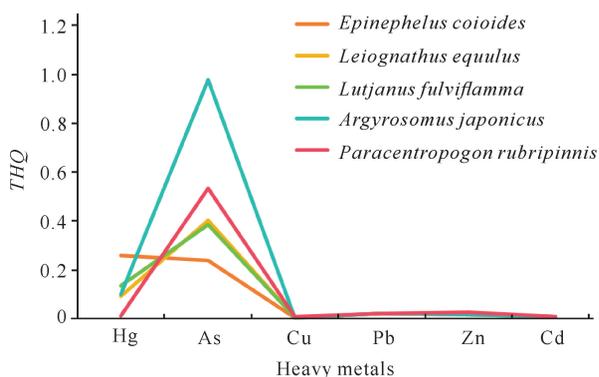


图4 小海5种鱼类肌肉组织内重金属风险评价

Fig. 4 Risk assessment of heavy metals in muscle tissues of five fish species in Xiaohai

3 讨论

3.1 海水重金属含量水平分析

海水是海洋重金属存在的重要载体, 其含量高低能反映海洋水环境的质量状况。通过对小海 20 个站位 6 种重金属含量的分析发现, Cu、Zn、Cd 和 As 含量符合第一类海水水质标准, Hg 和 Pb 整体处于第二类海水水质标准, 个别站位 Pb 处于第三类海水水质标准。小海重金属含量在不同功能区存在较大差异。春季 Hg 和 Cu 含量在旅游休闲娱乐区较高, As、Pb、Zn 和 Cd 含量则在港北港农渔业区较高; 秋季 As、Pb、Zn 和 Hg 含量低于春季, 旅游休闲娱乐区的 Hg、Zn 和 Cd 含量相对较高。这可能与秋季地表

表 7 与其他海域海水重金属含量比较

Table 7 Comparison of heavy metal content in seawater in other sea areas

Unit: $\mu\text{g/L}$

海域 Sea area	年份 Year	Hg	As	Pb	Cu	Zn	Cd
Study area	2020	0.056	0.56	1.97	0.95	3.34	0.26
Wanning Xiaohai ^[3]	2011	0.040		1.18	3.38	10.76	0.22
Beibu Gulf ^[25]	2017	0.100	0.74	0.71	3.03	10.00	0.17
Daya Bay ^[26]	2019			0.8	0.9	4.2	0.01
Tieshangang Bay ^[27]	2021–2022	0.038	0.72	0.72	1.00	10.93	0.10
Northern Bay of Hainan ^[28]	2023	0.057	0.58	2.07	8.68	26.24	0.14

径流的淡化作用增大, 导致水体动力重新分配有关。本研究与中国其他海域相比(表 7), As、Zn 含量低于其他海域, 如北部湾^[25]、大亚湾^[26]和铁山港^[27]; Cu 含量高于大亚湾^[26], 低于北部湾^[25]、铁山港^[27]和海南北部海湾^[28]; Pb 含量高于北部湾^[25]、大亚湾^[26]和铁山港海域^[27], 但低于海南北部海湾^[28]; Hg 含量与海南北部海湾^[28]接近, 低于北部湾^[25], 高于铁山港海域^[27]; Cd 含量高于其他海域; 与朱志雄等^[3]2011 年小海海域海水重金属测定结果相比, 本研究 Pb 和 Hg 污染有加剧趋势。1972 年小海港口北门改造, 致使口门的宽度从 140 m 降到 30 m^[29], 水体交换能力变弱, 可能是导致水质变差的主要原因。春季和秋季 Pb 超标站位均位于港北港农渔业区的潮汐通道处, 与朱志雄等^[3]研究发现航道区个别 Pb 含量较大的结果大致吻合。潮汐通道是渔船进出小海与南海之间的航道, Pb 超标可能与船舶废气排放带来的影响有关。此外, 重金属 Pb 是防污涂料、冶炼等主要的添加材料, 为了防止渔船、养殖设施等受到海水、生物等侵蚀, 大量使用这些添加材料可能会加剧 Pb 的污染^[30]。小海海水中 Hg 的空间分布区域性明显, 春季和秋季均表现出旅游休闲娱乐区含量较高, 空间分布自南部的东山河和北坡溪入海口向北部的潮汐通道递减, 说明 Hg 具有明显的陆源输入特征, 小海南部的东山河和北坡溪为主要陆源输入河。小海内大量的网箱养殖和小海周边的高位池养殖、围垦养殖^[31], 其产生的大量鱼类粪便和未食用饲料中的有机物会显著影响 Hg 循环^[32]。Cao 等^[33]在莱州湾的海洋食物网中发现 Hg 的生物放大作用, 其空间分布表明莱州湾的 Hg 污染主要由沿岸的河流输入造成。综上分析初步推断小海海水中 Hg 主要来源可能与河流输入的陆源污染、水产养殖输入的排泄物和残饵影响有关。

3.2 鱼类重金属含量水平分析

本研究结果显示小海鱼类肌肉组织中重金属含量差异较大。5种鱼类肌肉组织中,Zn含量明显高于其他重金属,而Pb和Cd含量在鱼类肌肉组织中的含量最低。这与Salam等^[34]的研究结果一致。鱼类肌肉组织中不同重金属的含量差异较大,可能与海洋环境中不同重金属的含量差异以及这些重金属在鱼类中的半衰期不同有关^[35]。与国内其他海域相比(表8),本研究小海鱼类肌肉组织中As、Zn含量高于万宁海域^[5];Hg含量高于海南万宁^[5]、海南珊瑚礁区^[6]和荣成湾^[36]海域;Cu、Pb、Cd含量低于其他海域^[5-7,35-37];Zn含量低于渤海^[35]和厦门湾^[37]海域,高于海南万宁^[5]、海南珊瑚礁^[6]、昌化江河口^[7]和荣成湾^[36]海域;除海南珊瑚礁区^[6]和厦门湾^[37]海域外,小海鱼类肌肉组织中As含量高于其他海域^[5,7,35,36]。由于Hg摄入过量会引起水俣病,而As摄入过量会经血液循环分布至全身,导致皮肤、心、脾和肺等多种器官和组织功能受损,长期暴露在高含量的As环境中可能导致肿瘤的发生^[38]。因此,部分鱼类出现Hg和As轻度污染应当引起关注。小海海水重金属含量

表8 与其他海域鱼类体内重金属含量比较

海域 Sea area	年份 Year	Hg	As	Cu	Pb	Zn	Cd	Unit:mg/kg
Study area	2020	0.056	1.42	0.23	nd	5.56	nd	
Hainan Wanning ^[5]	2020	0.019	0.20	0.30	0.06	3.00	0.021	
Hainan coral reef area ^[6]	2012	0.052	4.17	0.32	nd	1.59		
Changhua River estuary ^[7]	2019		0.79	0.60	0.29	3.20	0.008	
Bohai Sea ^[35]	2019		0.959	0.702	0.035	9.697	0.029	
Rongcheng Bay ^[36]	2016	0.049	0.25	0.79	0.19	5.18	0.0288	
Xiamen Bay ^[37]	2019—2020		2.01	0.52	0.11	6.79	0.0037	

Note:nd means below the detection limit.

3.3 健康风险分析

小海5种常见经济鱼类的THQ均小于1,说明食用这5种鱼类不会有非致癌健康风险,符合健康要求。日本黄姑鱼肌肉组织中As的THQ为0.98,接近风险临界值,因此有必要减少日本黄姑鱼在食品摄入量中所占的比例。6种重金属中,As的非致癌健康风险最大,未来As可能成为食用小海鱼类对人体非致癌健康的潜在威胁元素。这与吴昊等^[37]对厦门湾常见海洋经济生物的研究结果相似。旷泽行等^[7]对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结果也表明鱼类对As富集

量依次为Zn>Pb>Cu>As>Hg>Cd,相较于鱼类肌肉组织内重金属含量的排序可知,生物体对重金属的富集不全取决于海水重金属含量^[39,40]。本研究中不同鱼类对重金属的富集能力相似,对Hg、Zn和As的富集能力较强,潜在累积严重,而对Pb的富集能力较弱。鱼类对Hg的富集能力强,是由于水中的无机汞经微生物作用会被甲基化,生成可与鱼体SH-蛋白质牢固结合的甲基汞,因此,即便水中含有极微量的甲基汞,但鱼类长期生活其中,也会富集到千倍甚至上万倍的含量。Zn为鱼体内的必需元素之一,参与鱼类的新陈代谢过程,通常更容易被鱼类吸收^[41]。此外,海洋生物对海水中Zn的富集能力较强,这可能与我国独特的海洋环境与生物种类有关^[42]。鱼类对As的富集能力强,可能与其摄食方式有关,以海藻类和甲壳类动物为食的海洋生物体内往往具有较高的As含量^[43]。本研究中点带石斑鱼、金焰笛鲷、日本黄姑鱼为海洋中下层鱼类;红鳍拟鳞鲷为底层鱼类,通常以底栖甲壳类、鱼类为食;短棘鲷为广盐性鱼类,以食浮游动物为主,而食浮游动物以食浮游藻类为主,因此体内As含量相对较高。

最明显,As是主要食用健康风险元素。

4 结论

2020年春秋两季海南省万宁市小海海水中Cu、Pb、Zn、Cd、Hg和As的平均含量分别为0.95、1.97、3.34、0.26、0.056和0.56 μg/L,Hg和Pb含量整体处于第二类海水水质标准;潮汐通道处个别站位的Pb含量处于第三类海水水质标准,超出管理要求的水平;其余4种重金属含量符合第一类海水水质标准。与国内其他海域相比,小海Pb和Cd含量相对较高,Hg含量处于中等水平,Cu、As、Zn含量处于较

低水平;与历史数据相比,Pb和Hg污染加剧。小海5种常见经济鱼类体内Zn、Hg和As富集明显,Pb和Cd的富集能力较弱,部分鱼类As含量超出《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[21]中规定的限量。5种鱼类体内不仅出现As、Hg轻度污染,As还是主要的食用健康风险元素。长期适量食用这5种鱼类不会有健康风险,但小海海域海水和鱼类生物体内重金属污染仍需引起关注,当地应加强对海水中Pb、Hg和鱼类生物体内As、Hg含量的监测及预警。为保护和改善小海的海洋生态环境,应加强对陆源污染输入的监控;合理控制小海的养殖规模,尽可能地使用重金属含量低的养殖饲料和防污涂料;对养殖尾水进行处理,达标后再排放。

参考文献

- [1] 郝喆,王成龙,冯子岳,等.海洋环境及生物体内多环芳烃及重金属研究综述[J],环境生态学,2020,2(Z1):89-92.
- [2] 魏思翔.水体重金属污染的危害与防治对策[J].化学工程与装备,2022(2):240-242.
- [3] 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.
- [4] 文求信,王言思,吴淑倩,等.海南万宁乌场海域海水及沉积物重金属含量分析[J].海洋技术学报,2023,42(5):79-85.
- [5] 徐阁,王德鸿,韩留玉,等.海南万宁海域海洋生物重金属分析与评价[J].生态科学,2023,42(3):106-113.
- [6] 刘金铃,徐向荣,丁振华,等.海南珊瑚礁区鱼体中重金属污染特征及生态风险评估[J].海洋环境科学,2013,32(2):262-266.
- [7] 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估[J].海洋环境科学,2021,40(5):699-706.
- [8] 李杰,祁士华,王向琴,等.海南小海沉积物中的重金属分布特征及潜在生态风险评估[J].安全与环境工程,2008,15(2):18-22.
- [9] 谢海群,孙婆媛,庞巧珠,等.万宁小海表层沉积物中重金属物质的空间分布特征及生态风险分析[J].中国无机分析化学,2024,14(5):538-546.
- [10] 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.海洋监测规范:GB 17378-2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [11] 国家海洋局.海洋监测技术规程:HY/T 147-2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [12] 环境保护部.近岸海域环境监测规范:HJ 442-2008[S].北京:中国环境科学出版社,2009.
- [13] 广东省海岸带和海涂资源综合调查大队,广东省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室.广东省海岸带和海涂资源综合调查报告[M].北京:海洋出版社,1988.
- [14] 杜冰,孙鲁闽,郝文博,等.台海浅滩渔场不同水产品中重金属含量与暴露风险评估[J].农业环境科学学报,2016,35(11):2049-2058.
- [15] KENAGA E E. Predicted bioconcentration factors and soil sorption coefficients of pesticides and other chemicals [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1980,4(1):26-38.
- [16] USEPA. Risk-based concentration table [R]. Washington DC:United States Environmental Protection Agency,2000.
- [17] 高磊,刘宝林,吕林阳,等.海南省市售海产品中重金属/类金属含量分析及人体健康风险评估[J].安徽农学通报,2022,28(4):18-21.
- [18] EPA U. Screening level ecological risk assessment protocol. Appendix E: toxicity references values [R]. Washington DC:IRIS,1999.
- [19] 郑娜,王起超,郑冬梅.基于THQ的锌冶炼厂周围人群食用蔬菜的健康风险分析[J].环境科学学报,2007,27(4):672-678.
- [20] 国家环境保护局,国家海洋局.海水水质标准:GB 3097-1997[S].北京:环境科学出版社,2004.
- [21] 国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局.食品安全国家标准 食品中污染物限量:GB 2762-2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [22] 中华人民共和国农业部.无公害食品 水产品中有毒有害物质限量:NY 5073-2001[S].北京:中国标准出版社,2001.
- [23] BASHIR F A, SHUHAIMI-OTHTMAN M, MAZLAN A G. Evaluation of trace metal levels in tissues of two commercial fish species in kapar and mersing coastal waters, peninsular Malaysia [J]. Journal of Environmental and Public Health, 2012;352309.
- [24] WANG J X, SHAN Q, LIANG X M, et al. Levels and human health risk assessments of heavy metals in fish tissue obtained from the agricultural heritage rice-fishing system in China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 386:121627.
- [25] 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.
- [26] 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]. 应用海洋学学报, 2022, 41(3): 462-474.
- [27] 粟启仲, 雷学铁, 申友利, 等. 广西铁山港及其近岸海域不同海洋功能区重金属污染特征研究[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(6): 876-885.
- [28] 曾维特, 张东强, 刘兵, 等. 海南岛北部海湾表层海水重金属分布特征、主控因素及污染评价[J]. 热带海洋学报, 2023, 42(6): 156-167.
- [29] 刘兴健, 葛晨东, 陈平平, 等. 人类活动对海南省小海泻湖沉积环境的影响[J]. 环境化学, 2007, 26(3): 384-387.
- [30] LAO Q B, CAI S J, HUANG P, et al. Contaminant characteristics and influencing factors of heavy metals in seawater and sediments in a typical mariculture bay in South China [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 923494.
- [31] 李杰, 祁士华, 王向琴, 等. 海南小海沉积物中的重金属分布特征及潜在生态风险评价[J]. 安全与环境工程, 2008, 15(2): 18-22.
- [32] XU Z T, WU S C, CHRISTIE P, et al. Impacts of estuarine dissolved organic matter and suspended particles from fish farming on the biogeochemical cycling of mercury in Zhoushan Island, Eastern China Sea [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135921.
- [33] CAO L, LIU J H, DOU S Z, et al. Biomagnification of methylmercury in a marine food web in Laizhou Bay (North China) and associated potential risks to public health [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 150: 110762.
- [34] SALAM M A, PAUL S C, NOOR S N B M, et al. Contamination profile of heavy metals in marine fish and shellfish [J]. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2019, 5(2): 225-236.
- [35] 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.
- [36] 孙玲玲, 宋金明, 于颖, 等. 荣成湾 14 种海洋经济生物体中的重金属水平与食用风险初步评价[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(1): 52-61.
- [37] 吴昊, 张乐蒙, 黄智伟, 等. 厦门湾常见海洋经济生物重金属污染特征及风险评价[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(3): 395-406.
- [38] 孙维萍, 刘小涯, 潘建明, 等. 浙江沿海经济鱼类体内重金属的残留水平[J]. 浙江大学学报(理学版), 2012, 39(3): 338-344.
- [39] 王增焕, 林钦, 王许诺, 等. 大亚湾经济类海洋生物体的重金属含量分析[J]. 南方水产, 2009, 5(1): 23-28.
- [40] BRIFFA J, SINAGRA E, BLUNDELL R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans [J]. *Heliyon*, 2020, 6(9): e04691.
- [41] 李纯毅, 崔正国, 白莹, 等. 循环水养殖系统重金属的分布特征及鱼体风险评估[J]. 环境化学, 2023, 42(3): 733-742.
- [42] 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.
- [43] BONSIGNORE M, MANTA D S, MIRTO S, et al. Bioaccumulation of heavy metals in fish, crustaceans, molluscs and echinoderms from the Tuscany coast [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 162: 554-562.

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Wanning Xiaohai

PANG Qiaozhu, CHEN Xiaohui, XIE Haiqun, LIANG Jilin^{**}, XING Kongmin^{**}

(Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou, Hainan, 571126, China)

Abstract: In order to understand the pollution status and the health risk of heavy metals in the seawater and fish organisms of Wanning Xiaohai, this study measured the content of 6 heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, and As) in seawater and the muscle tissue of five common economic fish species in Wanning Xiaohai. Single-factor index ($P_{i,j}$) and BioConcentration Factor (BCF) were used to evaluate the contamination degree in

fish, and Target Risk Factor (*THQ*) was adopted to assess the health risk of heavy metals to humans. The results showed that the content of Cu, Zn, Cd, and As in the seawater was below the first class seawater standard, while that of Hg and Pb was within the scope of the second class seawater quality standard. The content of Pb in some stations at the tidal channel was within the range of the third class seawater quality standard, exceeding the management requirement. Compared with that in other sea areas in China, the seawater in Wanning Xiaohai demonstrated high content of Pb and Cd, moderate content of Hg, and low content of Cu, As, and Zn. Compared with the historical data, Pb and Hg pollution aggravated. In this study, fish showed obvious concentration of Zn, Hg, and As, weak concentration of Pb and Cd, and the As content in some fish exceeding the limits specified in *National Food Safety Standard Limits for Contaminants in Food*. The evaluation based on $P_{i,j}$ and *THQ* showed that the common fish in Wanning Xiaohai had mild pollution of As and Hg, and As was the main health risk element. Long-term moderate consumption of the five common fish species in this sea area will not pose health risks, while the metal pollution of seawater and fish here should still be concerned. The regulatory authorities should strengthen the early warning and monitoring of Pb and Hg in seawater and As and Hg in fish to prevent heavy metal pollution from harming human health.

Key words: Wanning Xiaohai; seawater; organism; heavy metal; bioconcentration; health risk

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: gxxk@gxas.cn

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