

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价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11):2049-2058.

DU Bing, SUN Lu-min, HAO Wen-bo, et al. Concentration and risk assessment of heavy metals in aquatic products collected from Taiwan shallow fishery[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(11):2049-2058.

# 台海浅滩渔场不同水产品中重金属含量与暴露风险评价

杜冰<sup>1,2</sup>, 孙鲁闽<sup>1,2\*</sup>, 郝文博<sup>1</sup>, 梁晓萍<sup>1</sup>, 罗霞<sup>1</sup>, 薛骋<sup>1</sup>

(1.河口生态安全与环境健康福建省高校重点实验室(厦门大学嘉庚学院), 福建漳州 363105; 2.近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 福建厦门 361005)

**摘要:**为考察台海浅滩渔场水产品中重金属含量,采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)和原子荧光光谱仪(AFS)分析了台湾浅滩渔场采集的59种[共165尾(只)]典型水产品样品中Hg、Cr、Cu、Zn、Cd与Pb 6种重金属的含量,并使用单因子污染指数( $P_i$ )、重金属污染指数(MPI)、每周可耐受摄入量(PTWI)以及食入健康风险指标( $R_{i\text{total}}$ )分别评估其污染程度、食用安全性与健康风险。浓度结果表明,除Cd(超标率10.4%)外,绝大多数捕捞水产品中各项重金属含量均达到无公害水产品的国家标准(GB 18406.4—2001)。P<sub>i</sub>结果表明:有17.9%的样品中Cr、1.8%的样品中Cu和3.7%的样品中Zn发生轻度污染;有0.6%的样品中Hg与1.9%样品中Pb达到或超过中度污染;Cd的污染程度最高,有5.6%的样品达到重度污染。MPI结果显示,底栖生物与以之为食的肉食性种类水产品污染指数较高,但总体上各种水产品 $X_{\text{MPI}}$ 依然处于较低的水平。PTWI结果显示,Hg、Cu、Zn与Pb均处于低风险或无风险的范畴,但有3.6%的样品中Cd超过推荐阈值,Cr安全性最差,有30.3%的样本超过了推荐阈值。健康风险模型结果显示,所有样品均未超过国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受水平( $5 \times 10^{-6} \cdot \text{a}^{-1}$ )。总体上看,当前台海浅滩渔场水产品尚未出现明显的污染安全问题,但Cd与Cr等元素的潜在风险值得进一步关注。

**关键词:**水产品;重金属;风险评估

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)11-2049-10 doi:10.11654/jaes.2016-0634

## Concentration and risk assessment of heavy metals in aquatic products collected from Taiwan shallow fishery

DU Bing<sup>1,2</sup>, SUN Lu-min<sup>1,2\*</sup>, HAO Wen-bo<sup>1</sup>, LIANG Xiao-ping<sup>1</sup>, LUO Xia<sup>1</sup>, XUE Cheng<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Estuarine Ecological Security and Environmental Health (Xiamen University Tan Kah Kee College), Fujian Province University, Zhangzhou 363105, China; 2.State Key Laboratory of Marine Environmental Science(Xiamen University), Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A total of 165 samples including 59 species of typical aquatic products collected from the Taiwan shallow fishery was analyzed with atomic fluorescence spectrometer (AFS) for Hg and inductively coupled plasma-mass spectrometer (ICP-MS) for Cr, Cu, Zn, Cd and Pb. Pollution level, consumer safety and health risk of the aquatic products were evaluated with single factor pollution index ( $P_i$ ), heavy metal pollution index (MPI), provisional tolerable weekly intake (PTWI) and food health risk index ( $R_{i\text{total}}$ ). The results indicated that except for Cd, the heavy metal concentrations were lowered than the prescript values set by the national standard for aquatic products (GB 18406.4—2001).  $P_i$  results showed that about 17.9%, 1.8% and 3.7% samples were slightly polluted with Cr, Cu and Zn, respectively; more than 0.6% and 1.9% samples reached or exceeded the values of “moderate pollution” set for Hg and Pb, and more than 5.6% samples were at the level of “heavy pollution” for Cd. MPI results indicated that relatively high  $X_{\text{MPI}}$  values were observed on benthic and related fishes.

收稿日期:2016-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41406120);福建省自然科学基金项目(2015J05032)

作者简介:杜冰(1987—),女,黑龙江鹤岗人,在读硕士,主要从事环境监测研究。E-mail:264483083@qq.com

\*通信作者:孙鲁闽 E-mail:sunlumin@vip.qq.com

Overall, the  $X_{MPI}$  values of the aquatic products were at a low level. Analysis with PTWI showed that Hg, Cu, Zn and Pb were at low or none risk level. However, concentrations of Cd in 3.6% samples and Cr in 30.3% samples had exceeded the recommended threshold values. Assessment with health risk model suggested that the pollutant concentrations did not exceed the recommended maximum acceptable levels set by International Commission on Radiological Protection (ICRP). Although no obvious pollution safety problems were found in the aquatic products of Taiwan shallow fishery, potential risks of Cr and Cd still call for continual monitoring and further attention.

Keywords: aquatic product; heavy metal; risk assessment

一直以来,海产品被公认为富含蛋白质、不饱和脂肪酸、维生素和矿物质,其作为人类重要的营养与能量来源,消费市场日益扩大。而海产品同时也是优良的环境污染物载体,这使人们在受用海产品带来的益处时也受其由污染物所引起的健康风险的掣肘。因此,食物链每个环节上的海产品污染物含量与暴露风险评价已经成为大多数卫生部门和学术机构关注的热点<sup>[1]</sup>。

以 Hg、Cr、Cd、Pb 等为代表的重金属作为一类典型的不可降解的持久性环境污染物,其通过食物链在各类海产品中富集与累积造成的健康安全风险不容忽视。目前针对海产品中常见的重金属分析方法包括石墨炉原子吸收光谱法(GFAAS)<sup>[2]</sup>、原子荧光光谱法(AFS)<sup>[3-4]</sup>、电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)<sup>[5]</sup>、电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)<sup>[6]</sup>等。近年来的大量研究结果<sup>[7-9]</sup>显示,各类水生生物均受到不同程度的重金属污染,甚至部分达到重污染水平<sup>[10]</sup>,我国沿海地区水产品已受到巨大的重金属污染压力。但是,国内开展相关研究的样本绝大多数来源于沿海城镇市售水产<sup>[11-12]</sup>、近岸捕捞和养殖<sup>[13-14]</sup>等,针对有明确来源的近海渔场样本的报道则较为鲜见。

闽南-台湾浅滩位于中国台湾海峡南部,地处亚热带,存在良好的上升流,具有丰富的渔业资源<sup>[15]</sup>,是福建省近海捕捞的传统渔区。了解其出产的海产品中重金属的含量以及潜在的食用安全风险具有重要的意义。Hg、Cr、Cu、Cd 和 Pb 是我国农产品质量安全无公害水产品安全要求(GB 18406.4—2001)中明确提出的限制性元素,而 Zn 是重要的生物必需元素,因此本研究选取这 6 种元素作为重金属分析对象。

本文选取台湾海峡南侧一处传统捕捞渔区,考察该处网捕水产品中这 6 种重金属的含量,结合相关标准,利用单因子污染指数法和膳食摄入评估法评价其污染程度和食用安全。研究结果将为初步掌握台湾海峡渔场水产品重金属污染现状以及进一步的污染溯源分析提供相应的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

仪器:Agilent 7700X 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国安捷伦公司),AF-610B 原子荧光分光光度计(AFS,北京瑞利分析仪器公司),KDNX-20 型石墨热消解仪(上海雷磁仪器科学仪器股份有限公司),Free Zone 6.0 L 冷冻干燥机(美国 Labcoco 公司),AUW120D 电子分析天平(岛津(中国)有限公司),HS-1300U 水平层流洁净工作台(江苏苏净集团有限公司)。

试剂:65%硝酸(1.00441.1000,德国 Merck 公司),37%盐酸(1.00317.2510,德国 Merck 公司),多金属元素混合标准溶液(GNM-0083,国家标准物质网),鱼肌肉标准参考物质(ERM-BB422,国家标准物质网)。

### 1.2 样品采集与分析

如图 1 所示,采样区域位于闽南-台湾浅滩渔场南部,属于闽台传统捕捞渔区(渔区编号:304、316、317、318)。于 2015 年 4 月 7 日到 11 日以“闽狮鱼 06733”单拖船(载重 90 t,主机功率 350 kW)作为生产性探捕船进行样品采集。挑选捕获水产中常见的经济性品种与具备典型销售尺寸的个体作为研究对象。样品采集后立即称重分装冰冻保存。样品预处理的方法与文献报道类似<sup>[16]</sup>,首先将样品送回实验室分批于室温初步解冻,用去离子水清洗,并于超净台晾干,之后用陶瓷刀具取肌肉组织 10~15 g 称量湿重。称重后样品经冷冻干燥,用玛瑙研钵磨碎,装入聚乙烯自封袋中冷冻保存。

称取 0.2 g 左右冷干样品至 15 mL 离心管中,加入 65%硝酸 5 mL,置于烘箱 80 °C 消解 10 h 至固形物消失;冷却后以 6000 r·min<sup>-1</sup> 离心 20 min,用移液枪移取 0.5 mL 上清液稀释定容至 10 mL,待测。Cr、Cu、Zn、Cd 与 Pb 采用 ICP-MS 进行总量分析,Hg 元素总量则使用原子荧光光谱仪测定。最终样品重金属含量报告以“最小值~最大值(中位数)”的形式表示。

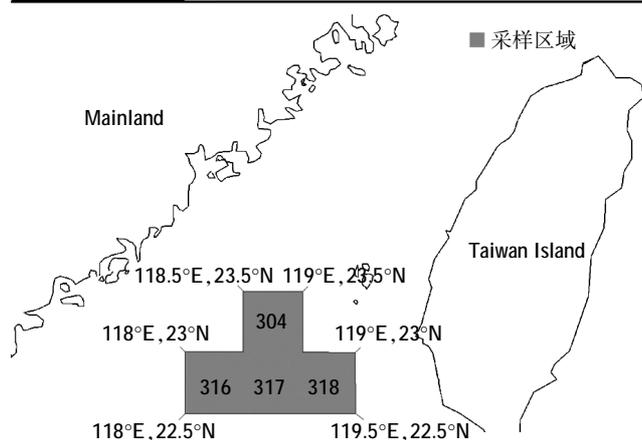


图1 水产样品采集渔区  
Figure 1 Sampling fishery of aquatic products

表1 水产品重金属含量限量值  
Table 1 Maximum levels of heavy metals in aquatic products

重金属 Heavy metal	限值 Maximum level/mg·kg <sup>-1</sup>
Hg	0.3 <sup>[18]</sup>
Cr	2 <sup>[18]</sup>
Cu	50 <sup>[18]</sup>
Zn	150 <sup>[19]</sup>
Cd	0.1 <sup>[18]</sup>
Pb	0.5 <sup>[18]</sup>

每周可耐受摄入量(Provisional Tolerable Weekly Intake, PTWI)作为食用安全性评价依据<sup>[20]</sup>。根据水产品重金属含量及我国居民每周水产品消费量,计算成人每周实际重金属摄入量,并与PTWI值比较,评价其食用安全性。计算公式为

$$AWI=C_i \times WC$$

式中:AWI为成人每周实际重金属摄入量,mg;C<sub>i</sub>为水产品重金属实测值的均值,mg·kg<sup>-1</sup>;WC为人均每周水产品消费量,kg,根据2000年中国总膳食研究<sup>[21]</sup>,以0.182 kg·周<sup>-1</sup>计。

PTWI值的计算公式为:

$$PTWI(成人)=PTWI \times 成人体重$$

式中:PTWI为联合国粮农组织(FAO)食品添加剂联合专家委员会(JECFA)制定的污染物每周可耐受摄入量,mg·kg<sup>-1</sup>,其数值见表2;PTWI(成人)为成人每周可耐受摄入量,mg;成人体重以70 kg计。

表2 水产品重金属每周可耐受摄入量  
Table 2 Weekly tolerable intake levels of heavy metals in aquatic products

重金属 Heavy metal	PTWI/mg·kg <sup>-1</sup>	PTWI(成人 Adult)/mg
Hg	0.005 <sup>[20]</sup>	0.35
Cr	0.006 <sup>[19]</sup>	0.469
Cu	3.5 <sup>[9]</sup>	245
Zn	7.0 <sup>[9]</sup>	490
Cd	0.007 <sup>[9]</sup>	0.49
Pb	0.025 <sup>[9]</sup>	1.75

采用AWI占PTWI(成人)的百分比进行食用安全性评价,其所占比例越高,说明其食用安全性越低<sup>[20]</sup>。

不同类型污染物通过食入途径进入人体后所引起的健康风险包括致癌物所导致的健康风险和非致癌物所导致的健康风险<sup>[22]</sup>。致癌物所导致的健康风险评价方式为:

$$R_{ig}^i = [1 - \exp(-D_{ig} \cdot q_{ig})] / 70$$

式中:R<sub>ig</sub><sup>i</sup>为水产品重金属经食入途径所产生的平均

### 1.3 质量控制

Hg的标准工作曲线线性均大于0.998 5(原子荧光法),试剂空白小于5 pg·mL<sup>-1</sup>,平行样相对标准偏差小于13%;另5种元素标准工作曲线的线性均大于0.999 8(ICP-MS法),试剂空白均小于1.6 pg·mL<sup>-1</sup>,平行样相对标准偏差均小于6%。测定鱼肌肉标准参考物质中各金属的回收率分别是Hg 113.5%、Cr 97.7%、Cu 108.1%、Zn 104.9%、Cd 96.2%、Pb 117.3%。

实验预处理所用容器与材料均为高硼硅玻璃、特氟龙或者玛瑙陶瓷材质,避免因使用金属材质而带来的潜在污染风险。所有容器清洗过程均严格依照USEPA1631执行。

### 1.4 评价标准与方法

采用单因子污染指数法评价福建渔业捕捞水产品重金属污染状况<sup>[9]</sup>,计算公式为:

$$P_i=C_i/S_i$$

式中:P<sub>i</sub>为水产品重金属的单因子污染指数;C<sub>i</sub>为水产品重金属实测值的均值,mg·kg<sup>-1</sup>;S<sub>i</sub>为水产品重金属限量标准,mg·kg<sup>-1</sup>,如表1所示。

P<sub>i</sub><0.2为正常背景水平;0.2≤P<sub>i</sub><0.6为轻污染水平;0.6≤P<sub>i</sub><1.0为中污染水平;P<sub>i</sub>≥1.0为重污染水平,即重金属含量超标<sup>[10]</sup>。

采用重金属污染指数(MPI)比较福建渔业各种水产品间重金属污染的总体差异<sup>[17]</sup>,计算公式为

$$MPI = (C_1 \times C_2 \times C_3 \times \dots \times C_n)^{1/n}$$

式中:C<sub>n</sub>为第n种水产品重金属实测值的均值,mg·kg<sup>-1</sup>。

以世界卫生组织(WTO)/联合国粮农组织(FAO)食品添加剂联合专家委员会(JECFA)制定的污染物

个人致癌年风险,  $a^{-1}$ ;  $D_{ig}$  为水产品重金属经食入途径的单位体重日均暴露剂量,  $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ ;  $q_{ig}$  为水产品重金属经食入途径的致癌强度系数,  $kg \cdot d \cdot mg^{-1}$ , 其数值见表 3; 70 为人类平均寿命,  $a$ 。

非致癌物所导致的健康风险评价方式为:

$$R_{ig}^n = (D_{ig} \cdot 10^{-6}) / (P_{ig} \cdot 70)$$

式中:  $R_{ig}^n$  为水产品重金属经食入途径所产生的平均个人非致癌年风险,  $a^{-1}$ ;  $P_{ig}$  为水产品重金属经食入途径的调整剂量,  $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ 。

水产品重金属经食入途径的单位体重日均暴露剂量  $D_{ig}$  的计算公式为

$$D_{ig} = m_{ig} \cdot C_i / 70$$

式中:  $m_{ig}$  为成人平均每日摄入的水产品肌肉的量,  $mg$ , 根据 2000 年中国总膳食研究<sup>[21]</sup>, 以  $0.182 kg \cdot 周^{-1}$  计, 即  $0.026 kg \cdot d^{-1}$ ;  $C_i$  为水产品重金属实测值的均值,  $mg \cdot kg^{-1}$ ; 70 为成年人的评价体重,  $kg$ 。

水产品重金属经食入途径的调整剂量  $P_{ig}$  的计算公式为:

$$P_{ig} = R_f D_{ig} / A$$

式中:  $R_f D_{ig}$  为水产品重金属经食入途径的参考剂量,  $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ , 其数值见表 3;  $A$  为安全因子, 取 10。

表 3 水产品重金属经食入途径的致癌强度系数及参考剂量  
Table 3 Carcinogenic potency index of heavy metals in aquatic products by eating way and reference dose

重金属 Heavy metal	$q_{ig}/kg \cdot d \cdot mg^{-1}$	$R_f D_{ig}/mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$
Hg	—	$3 \times 10^{-4}$ [24]
Cr	0.91 [23]	$3 \times 10^{-3}$ [23]
Cu	—	$4 \times 10^{-2}$ [25]
Zn	—	$3 \times 10^{-1}$ [25]
Cd	0.38 [23]	$1 \times 10^{-3}$ [23]
Pb	0.008 5 [23]	$1.4 \times 10^{-3}$ [23]

假设水产品重金属引起的整体健康风险对人体危害的毒性作用呈加和关系而不是协同关系或拮抗关系, 则水产品重金属总食入健康风险 ( $R_{i总}$ ) 为  $R_{i总} = R_{ig}^c + R_{ig}^n$ 。为比较不同种类水产品对人体健康风险的差异, 假设各种重金属对人类健康危害的毒性作用呈加和关系而不是协同关系或拮抗关系, 则不同种类水产品总的食入健康风险 ( $R_{总}'$ ) 为:

$$R_{总}' = \sum_{i=1}^n R_{i总}$$

式中:  $n$  为检测的重金属数, 本文为 6。健康风险评价参照国际辐射防护委员会 (ICRP) 推荐的最大年接受

风险水平  $5.0 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$  进行<sup>[23]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 台海渔场水产中重金属分布特征

本研究航次在目标渔区共采集 59 种共 165 尾 (只) 水产样品。样品重金属含量情况见表 4, 发生超标的品种数据以斜体加粗表示。除一例样品 (青石斑鱼) 检出 Hg 超标, 16 例样品检出 Cd 浓度超标外, 其余指标均符合国家规定的相关限制标准。测定结果表明, 不同种类样品体内重金属浓度顺序呈现近似的规律。在所有样品中 Zn 与 Cu 的浓度较高, 表现为  $Zn > Cu >$  其他金属元素浓度。这与 Zn 和 Cu 为常量元素且与生物体生长发育联系紧密有关, 近似的研究也显现类似的结果<sup>[26]</sup>。

除样品数量为 1 的样品外, Hg 浓度均值最高的水产样品是青石斑鱼 ( $0.244 mg \cdot kg^{-1}$ ), 均值最低的为马鲛鱼 ( $0.004 mg \cdot kg^{-1}$ ); Cr 的均值最高的为老虎斑 ( $0.859 mg \cdot kg^{-1}$ ), 最低为石斑鱼 ( $0.022 mg \cdot kg^{-1}$ ); Cu 最高为章鱼 ( $10.61 mg \cdot kg^{-1}$ ), 最低为石斑鱼 ( $0.096 mg \cdot kg^{-1}$ ); Zn 最高为章鱼 ( $28.99 mg \cdot kg^{-1}$ ), 最低为银头方鱼 ( $2.092 mg \cdot kg^{-1}$ ); Cd 最高为章鱼 ( $0.191 mg \cdot kg^{-1}$ ), 最低为白带鱼 ( $0.001 mg \cdot kg^{-1}$ ); Pb 最高为宽体舌鳎 ( $0.339 mg \cdot kg^{-1}$ ), 最低为白带鱼 ( $0.007 mg \cdot kg^{-1}$ )。没有一种水产品 6 项重金属含量均处于浓度最高的前 20%, 5 项重金属含量均达到前 20% 的品种有灰鳍鲷, 4 项达到的有斑纹蟳、章鱼和目乌贼。谢文平等<sup>[26]</sup>的研究结果表明, 不同种鱼重金属残留基本特征元素与生活习性有关。本研究也呈现类似结果。从食性上看, 灰鳍鲷与斑纹蟳均为杂食性, 食源以小型底栖动物为主, 章鱼和目乌贼均为肉食性, 主要食源为瓣鳃类和甲壳类 (虾、蟹等)。这表明重金属的富集累积与水产品食物链中的营养级有关, 并且在捕捞渔区中目标重金属很可能遵循从沉积物到小型底栖动物, 再进入到网捕水产品的迁移过程。

### 2.2 台海渔场水产中重金属污染程度与体间差异

单因子污染指数评价结果表明, 分析样品中各重金属的污染程度各不相同, 但大多数  $P_i$  值在正常背景与轻度污染区间内 (图 2)。Cr、Cu 与 Zn 发生轻度污染的样品数分别占总数的 17.9%、1.8% 和 3.7%, 其余皆低于 0.2 的背景限值。Hg、Pb 发生中度污染和轻度污染的样品数分别占总数的 0.6%、1.9% 以及 12.4%、16.1%, 其中有一例鲷鱼样品 Hg 的  $P_n$  值达到了 1.53, 为重度污染。污染程度最高的是 Cd, 发生重

表4 目标渔区捕捞水产品重金属含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 4 Heavy metal contents in different aquatic products from targeted fishery

分类与种名		Hg	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
软骨鱼纲 Chondrichthyes	须鲨目条纹斑竹鲨 <i>Chiloscyllium plagiosum</i> (n=3)	0.107~0.112 (0.111)	0.141~0.225 (0.163)	0.271~1.398 (0.304)	2.662~13.53 (4.135)	0.006~0.022 (0.008)	0.041~0.252 (0.095)
	真鲨目灰星鲨 <i>Mustelus griseus</i> (n=2)	0.006~0.036 (0.021)	0.147~0.585 (0.366)	0.370~1.199 (0.785)	2.999~8.809 (5.904)	0.004~0.008 (0.006)	0.050~0.073 (0.062)
软甲纲 Malacostraca	十足目斑节对虾 <i>Penaeus monodon</i> (n=1)	0.035 (0.035)	0.186 (0.186)	10.57 (10.57)	43.56 (43.56)	0.184 (0.184)	0.068 (0.068)
	十足目斑纹蛄 <i>Charybdis feriatata</i> (n=2)	0.021~0.061 (0.041)	0.018~0.077 (0.047)	0.587~4.239 (2.413)	11.47~14.44 (12.95)	0.017~0.225 (0.121)	0.014~0.150 (0.082)
	十足目脊尾白虾 <i>Palaemon carinicauda</i> (n=1)	0.047 (0.047)	0.193 (0.193)	7.373 (7.373)	37.11 (37.11)	0.027 (0.027)	0.051 (0.051)
	十足目日本对虾 <i>Marsupenaeus japonicus</i> (n=1)	0.009 (0.009)	0.047 (0.047)	1.584 (1.584)	11.56 (11.56)	0.038 (0.038)	0.062 (0.062)
	十足目三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i> (n=1)	0.014 (0.014)	0.042 (0.042)	6.859 (6.859)	16.69 (16.69)	0.162 (0.162)	0.079 (0.079)
	十足目章鱼 <i>Octopus vulgaris</i> (n=2)	0.005~0.014 (0.010)	0.080~0.342 (0.211)	7.298~13.92 (10.61)	25.89~32.09 (28.99)	0.075~0.307 (0.191)	0.177~0.207 (0.192)
	十足目枪乌贼 <i>Loligo chinensis</i> (n=1)	0.002 (0.002)	0.097 (0.097)	2.612 (2.612)	10.82 (10.82)	0.035 (0.035)	0.026 (0.026)
头足纲 Cephalopoda	乌贼目乌贼 <i>Sepia aculeata</i> (n=2)	0.012~0.019 (0.016)	0.072~0.187 (0.129)	2.325~14.47 (8.400)	8.064~23.66 (15.85)	0.014~0.233 (0.123)	0.040~0.132 (0.086)
	灯笼鱼目龙头鱼 <i>Harpadon nehereus</i> (n=6)	0.007~0.039 (0.016)	0.034~0.548 (0.182)	0.104~0.886 (0.566)	3.293~13.76 (9.813)	0.005~0.111 (0.011)	0.018~0.140 (0.065)
	灯笼鱼目皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belangerii</i> (n=2)	0.007~0.102 (0.054)	0.207~0.236 (0.221)	0.194~5.715 (2.954)	2.746~15.01 (8.877)	0.005~0.280 (0.142)	0.021~0.038 (0.029)
	鲷形目大鳞舌鲷 <i>Cynoglossus macrolepidotus</i> (n=1)	0.019 (0.019)	0.028 (0.028)	0.157 (0.157)	2.823 (2.823)	0.002 (0.002)	0.037 (0.037)
	鲷形目宽体舌鲷 <i>Cynoglossus robustus</i> (n=2)	0.028~0.037 (0.033)	0.116~0.351 (0.234)	0.189~1.299 (0.744)	6.458~37.18 (21.82)	0.008~0.013 (0.010)	0.216~0.462 (0.339)
	鲱形目金色小沙丁鱼 <i>Sardinella aurita</i> (n=4)	0.009~0.023 (0.021)	0.023~0.449 (0.118)	0.146~2.433 (1.242)	2.862~12.83 (6.640)	0.000~0.024 (0.003)	0.006~0.229 (0.065)
	海鲢目海鲢 <i>Bruguiera sexangula</i> (n=4)	0.013~0.054 (0.014)	0.087~0.228 (0.161)	0.298~0.862 (0.520)	2.788~18.79 (6.385)	0.000~0.018 (0.006)	0.015~0.179 (0.043)
	颌针鱼目斑尾柱颌针鱼 <i>Strongylura strongylura</i> (n=2)	0.011~0.033 (0.022)	0.254~0.603 (0.428)	0.264~0.366 (0.315)	6.532~6.656 (6.594)	0.005~0.014 (0.009)	0.016~0.078 (0.047)
	鲈形目白带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i> (n=2)	0.013~0.034 (0.024)	0.029~0.033 (0.031)	0.160~0.172 (0.166)	2.770~4.656 (3.713)	0.000~0.001 (0.001)	0.005~0.009 (0.007)
	鲈形目白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i> (n=1)	0.037 (0.037)	0.021 (0.021)	0.126 (0.126)	2.541 (2.541)	0.002 (0.002)	0.008 (0.008)
硬骨鱼纲 Osteichthyes	鲈形目刺鲷 <i>Psenopsis anomala</i> (n=6)	0.002~0.036 (0.013)	0.048~0.508 (0.268)	0.046~8.292 (0.489)	0.656~23.45 (6.344)	0.002~0.458 (0.006)	0.009~0.076 (0.033)
	鲈形目大黄鱼 <i>Larimichthys crocea</i> (n=1)	0.009 (0.009)	0.020 (0.020)	0.312 (0.312)	2.738 (2.738)	0.003 (0.003)	0.008 (0.008)
	鲈形目带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i> (n=5)	0.005~0.240 (0.024)	0.026~0.847 (0.436)	0.062~1.119 (0.465)	1.472~35.61 (5.432)	0.001~0.145 (0.010)	0.006~0.195 (0.058)
	鲈形目短尾大眼鲷 <i>Priacanthus macracanthus</i> (n=2)	0.011~0.200 (0.016)	0.056~0.081 (0.068)	0.205~0.529 (0.367)	4.525~10.60 (7.560)	0.006~0.030 (0.018)	0.059~0.080 (0.070)
	鲈形目二长棘鲷 <i>Paerargyrops edita</i> (n=7)	0.000~0.040 (0.016)	0.036~0.829 (0.267)	0.135~0.923 (0.216)	0.862~12.89 (6.252)	0.003~0.086 (0.011)	0.021~0.193 (0.047)
	鲈形目颌圆鲹 <i>Decapterus lajang</i> (n=3)	0.033~0.175 (0.061)	0.051~0.116 (0.096)	0.245~0.694 (0.257)	2.591~9.185 (2.733)	0.009~0.103 (0.071)	0.004~0.094 (0.012)
	鲈形目褐篮子鱼 <i>Siganus fuscissens</i> (n=4)	0.010~0.024 (0.011)	0.009~0.279 (0.129)	0.085~3.882 (0.550)	1.825~26.02 (11.15)	0.001~0.083 (0.023)	0.010~0.170 (0.075)

续表4 目标渔区捕捞水产品重金属含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Continued to table 4 Heavy metal contents in different aquatic products from targeted fishery

分类与种名	Hg	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
硬骨鱼纲 Osteichthyes						
鲈形目红鳍笛鲷 <i>Lutjanus erythropterus</i> (n=1)	0.005 (0.005)	0.064 (0.064)	0.113 (0.113)	2.753 (2.753)	0.002 (0.002)	0.005 (0.005)
鲈形目黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i> (n=4)	0.014~0.050 (0.035)	0.064~0.804 (0.354)	0.167~0.618 (0.415)	2.599~14.90 (4.911)	0.009~0.054 (0.012)	0.051~0.126 (0.085)
鲈形目灰鳍鲷 <i>Sparus berda</i> (n=2)	0.012~0.029 (0.021)	0.236~0.557 (0.396)	0.387~3.429 (1.908)	5.983~20.25 (13.12)	0.007~0.114 (0.060)	0.057~0.127 (0.092)
鲈形目剑鱼 <i>Xiphias gladius</i> (n=2)	0.038~0.057 (0.047)	0.061~0.235 (0.148)	0.143~5.318 (2.730)	3.997~13.01 (8.504)	0.014~0.032 (0.023)	0.008~0.014 (0.011)
鲈形目金线鱼 <i>Nemipterus virgatus</i> (n=3)	0.013~0.059 (0.024)	0.026~0.165 (0.119)	0.134~1.004 (0.421)	3.766~11.35 (9.769)	0.004~0.025 (0.017)	0.015~0.359 (0.017)
鲈形目鲷鱼 <i>Therapon theraps</i> (n=4)	0.004~0.163 (0.056)	0.048~0.320 (0.266)	0.176~1.145 (0.265)	3.375~26.01 (5.593)	0.001~0.016 (0.002)	0.018~0.087 (0.032)
鲈形目蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i> (n=8)	0.003~0.076 (0.017)	0.065~0.931 (0.221)	0.345~7.270 (0.771)	3.800~29.19 (10.13)	0.005~0.440 (0.085)	0.010~0.187 (0.035)
鲈形目老虎斑 <i>Epinephelus fuscoguttatus</i> (n=2)	0.008~0.011 (0.010)	0.776~0.942 (0.859)	0.170~1.098 (0.634)	1.487~6.001 (3.744)	0.001~0.031 (0.016)	0.058~0.073 (0.065)
鲈形目卵形鲳鲹 <i>Trachinotus ovatus</i> (n=2)	0.005~0.025 (0.015)	0.037~0.045 (0.041)	0.208~0.518 (0.363)	4.285~10.85 (7.565)	0.001~0.005 (0.003)	0.018~0.091 (0.054)
鲈形目马鲛鱼 <i>Scomberomorus niphonius</i> (n=3)	0.002~0.008 (0.002)	0.199~0.666 (0.302)	0.065~0.342 (0.076)	1.505~7.432 (1.674)	0.001~0.040 (0.002)	0.014~0.078 (0.070)
鲈形目七星底灯鱼 <i>Benthosema pterotum</i> (n=1)	0.162 (0.162)	0.101 (0.101)	0.100 (0.100)	4.706 (4.706)	0.010 (0.010)	0.382 (0.382)
鲈形目青石斑鱼 <i>Epinephelus awoara</i> (n=2)	0.031~0.458 (0.244)	0.076~0.223 (0.150)	0.108~1.116 (0.612)	6.536~7.449 (6.993)	0.006~0.045 (0.026)	0.035~0.053 (0.044)
鲈形目日本真鲈 <i>Lateolabrax japonicus</i> (n=1)	0.043 (0.043)	0.111 (0.111)	0.187 (0.187)	4.696 (4.696)	0.003 (0.003)	0.051 (0.051)
鲈形目石斑鱼 <i>Epinephelus</i> sp.(n=2)	0.011~0.016 (0.014)	0.019~0.025 (0.022)	0.093~0.098 (0.096)	3.234~6.690 (4.966)	0.000~0.002 (0.001)	0.002~0.012 (0.007)
鲈形目鲈鱼 <i>Pneumatophorus japonicus</i> (n=5)	0.003~0.036 (0.031)	0.007~0.694 (0.032)	0.059~4.869 (0.869)	1.256~22.29 (7.610)	0.000~0.024 (0.009)	0.006~0.060 (0.041)
鲈形目条纹鲷 <i>Upeneus moluccensis</i> (n=2)	0.021~0.097 (0.059)	0.076~0.139 (0.108)	0.140~0.464 (0.302)	3.045~4.279 (3.662)	0.017~0.020 (0.018)	0.020~0.076 (0.048)
鲈形目乌鲷 <i>Formio niger</i> (n=2)	0.008~0.009 (0.008)	0.026~0.035 (0.030)	0.121~0.387 (0.254)	4.355~4.597 (4.476)	0.003~0.012 (0.007 2)	0.008~0.018 (0.013)
鲈形目银鲷 <i>Pampus argenteus</i> (n=5)	0.006~0.039 (0.022)	0.016~0.340 (0.234)	0.101~4.686 (0.266)	2.737~22.43 (8.715)	0.001~0.031 (0.005)	0.014~0.234 (0.088)
鲈形目银头方鱼 <i>Branchiostegus argentatus</i> (n=3)	0.001~0.144 (0.046)	0.045~0.398 (0.046)	0.087~0.160 (0.090)	1.801~2.300 (2.173)	0.001~0.004 (0.003)	0.001~0.045 (0.005)
马鲛目四指马鲛 <i>Eleutheronema tetradactylum</i> (n=2)	0.018~0.029 (0.024)	0.068~0.108 (0.088)	1.333~2.041 (1.687)	9.285~11.45 (10.37)	0.032~0.032 (0.032)	0.172~0.319 (0.246)
鳗鲡目海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i> (n=5)	0.013~0.051 (0.027)	0.110~0.516 (0.199)	0.098~0.391 (0.212)	3.575~11.97 (4.389)	0.003~0.051 (0.017)	0.020~0.176 (0.052)
鳗鲡目花鳗鲡 <i>Anguilla marmorata</i> (n=2)	0.084~0.147 (0.115)	0.086~0.293 (0.190)	0.168~3.069 (1.619)	7.750~17.89 (12.82)	0.012~0.226 (0.119)	0.014~0.027 (0.020)
鲶形目黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i> (n=2)	0.015~0.022 (0.019)	0.044~0.111 (0.077)	0.177~0.226 (0.202)	3.119~4.267 (3.393)	0.002~0.049 (0.026)	0.007~0.025 (0.016)
鲶形目鳊鲃 <i>Plotosus lineatus</i> (n=4)	0.006~0.013 (0.009)	0.019~0.673 (0.217)	0.271~0.776 (0.447)	2.889~15.37 (8.129)	0.004~0.089 (0.011)	0.011~0.100 (0.078)
鲇形目横纹东方鲀 <i>Takifugu oblongus</i> (n=6)	0.005~0.127 (0.012)	0.053~0.688 (0.315)	0.103~0.810 (0.432)	1.941~19.90 (6.333)	0.004~0.029 (0.006)	0.020~0.070 (0.046)
鲇形目绿鳍马面鲀 <i>Thamnaconus modestus</i> (n=5)	0.011~0.030 (0.015)	0.096~0.622 (0.225)	0.192~0.688 (0.413)	2.514~44.24 (7.465)	0.003~0.015 (0.006)	0.019~0.120 (0.071)

续表4 目标渔区捕捞水产品重金属含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Continued to table 4 Heavy metal contents in different aquatic products from targeted fishery

分类与种名	Hg	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
硬骨鱼纲 Osteichthyes						
鲟形目匙吻鲟 Polyodon spathula(n=2)	0.025~0.042 (0.034)	0.030~0.140 (0.085)	0.108~0.181 (0.145)	4.173~4.369 (4.271)	0.002~0.005 (0.004)	0.009~0.045 (0.027)
鲉形目博氏孔鲷 Cymbacephalus beauforti(n=3)	0.024~0.099 (0.041)	0.074~0.247 (0.075)	0.113~0.152 (0.121)	3.046~5.083 (4.349)	0.002~0.024 (0.006)	0.014~0.032 (0.020)
鲉形目短鳍红娘鱼 Lepidotrigla micropterus(n=1)	0.046 (0.046)	0.029 (0.029)	0.070 (0.070)	1.516 (1.516)	0.010 (0.010)	0.004 (0.004)
鲉形目鬼鲉 Inimicus japonicus(n=2)	0.073~0.108 (0.091)	0.131~0.346 (0.238)	0.419~0.553 (0.486)	4.201~22.84 (13.52)	0.011~0.270 (0.140)	0.015~0.088 (0.051)
鲉形目红娘鱼 Lepidotrigla microptera Günther(n=2)	0.009~0.012 (0.011)	0.226~0.777 (0.501)	0.230~0.451 (0.344)	4.435~6.774 (5.604)	0.004~0.016 (0.010)	0.029~0.049 (0.039)
鲷形目鲷鱼 Mugil cephalus(n=3)	0.008~0.013 (0.009)	0.227~0.277 (0.248)	0.227~0.670 (0.413)	2.072~5.661 (5.406)	0.002~0.005 (0.003)	0.013~0.111 (0.055)

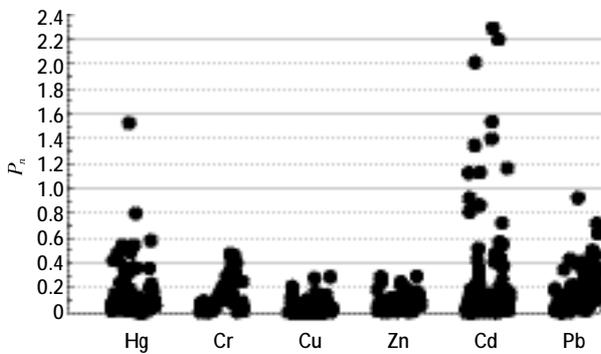


图2 不同重金属元素的单因子污染指数分布  
Figure 2 Distribution of  $P_i$  on different heavy metals

污染样品数的比例达到了5.6%，中度污染与轻度污染也分别有2.5%和10.5%。发生Cd重污染的非鱼类与鱼类样品占到各自样品数量的13.0%与4%，表明该渔场受到Cd的污染威胁显著大于其他5种重金属。本研究中各重金属的污染程度的大致顺序为Cd>Hg、Pb>Cr>Zn、Cu，与彭加喜等<sup>[27]</sup>对广东红海湾海产品的调查结果有明显的差异，其污染程度顺序为Cr>Cu>Zn>Cd、Pb，而与黄家钿等<sup>[28]</sup>对宁波市售海产品的研究结论接近，其污染程度顺序为Cd>Hg>Pb。广东红海湾的样品来自湾内养殖与捕捞，而黄家钿研究中的样品有较大比例来自外海捕捞，说明海产品中的重金属污染特征与相应的捕捞渔区密切相关。

重金属污染指数分析如图3所示。结果表明，所有测定样品的均值为0.203，中位数为0.124，本研究各样品的重金属污染指数相较其他研究结果(广东红海湾均值>1<sup>[27]</sup>，江苏盐城地区均值>0.9<sup>[29]</sup>)，仍处于较低的水平。这可能是渔区位置距离大陆较远，受陆源污染物影响较小的缘故。污染指数均值最高的前五种水

产品为石斑鱼(0.533)、斑纹鲷(0.421)、章鱼(0.343)、目乌贼(0.324)与三疣梭子蟹(0.316)。斑纹鲷与三疣梭子蟹为底栖生物，由于通常生活在受污染的河口和沿岸，在滤食大量底质颗粒过程中，吸附在颗粒上的重金属也被吸收，从而使重金属累积在其体内<sup>[10]</sup>。石斑鱼、章鱼与目乌贼均为肉食性，尤其石斑鱼喜以底栖甲壳类和头足类为食，较高的食物链等级增大了体内重金属污染风险。

硬骨鱼纲所获样品种类与数量较多，同样按均值高低排序：马鲛目(0.314)>鲈形目(0.276)>鳗鲡目(0.232)>灯笼鱼目(0.188)、鲈形目(0.185)、鲈形目(0.185)>海鲢目(0.177)>鲈形目(0.150)、颌针鱼目(0.149)、鲈形目(0.146)>鲈形目(0.138)>鲈形目(0.105)。马鲛目的重金属污染指数最高可能是由于采集所得的马鲛目样品为四指马鲛，属于肉食性鱼类，在食物链中营养级较高所致。类似地，鲈形目中所获样品为舌鳎属的大鳞舌鳎与宽体舌鳎，主要食源多

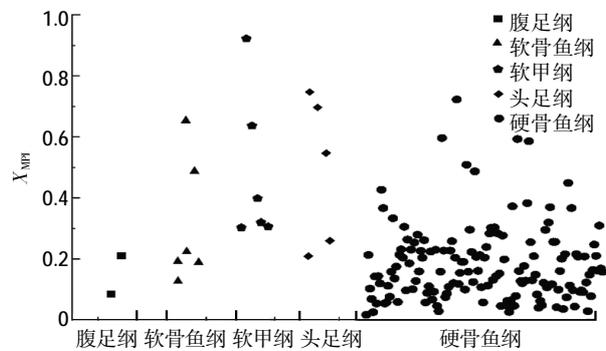


图3 不同种类水产品重金属污染指数分布  
Figure 3 Distribution of  $X_{MPI}$  on different aquatic products

为污染指数相对较高的软甲纲与头足纲的底栖无脊椎动物,故其  $X_{MPI}$  值位居前列。

### 2.3 食用安全性与健康风险评价

根据不同水产品中重金属含量及我国人均每周水产品消费量,计算成人每周实际重金属摄入量,与表2所示PTWI(成人)值相比较,评价福建渔业捕捞水产品的食用安全性。

评价结果如图4所示。所有样品中Cu、Zn、Pb的AWI占PTWI(成人)的百分比均不足10%,食用安全性较高,风险较小。Hg除青石斑鱼(占比23.8%)与带鱼(占比12.5%)外,其余样品的AWI占PTWI(成人)的百分比亦小于10%,食用风险属于较低的水平。Cd的食用安全性略低,有3.6%的样品超过10%的推荐阈值,超标的主要品种为蓝圆鲹(占比16.3%)、刺鲃(占比17.0%)、鬼鲉(占比10.1%)、皮氏叫姑鱼(占比10.4%)等。Cr的食用安全性最差,高达30.3%的样品超过10%的安全阈值(有18.1%占比在10%~20%之间,有12.1%占比20%以上),其中占比最高的前三位样品分别来自于蓝圆鲹(占比36.1%)、带鱼(占比32.9%)和黄姑鱼(占比31.2%)。总体上看,Cr是目标渔区水产品食用安全的主要威胁,发生明显超标的品种多集中于硬骨鱼纲。

以国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大年接受风险水平  $5.0 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$  为标准,对样品进行潜在总食入健康风险评价,结果如图5所示<sup>[23]</sup>。所有样品各重金属的总食入健康风险均小于  $5.0 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ ,即经食入途径所产生的非致癌风险、致癌风险及总食入健康风险均处于可接受范围内。所有分析元素的食入健康风险值均小于推荐限值,表明相应的健康风险较低。各样品Cr元素的食入健康风险值虽然均小于  $5.0 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ ,较之限值小一个数量级,但其均值达到了  $1.1 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ ,比其他重金属的最大食入健康风险值的

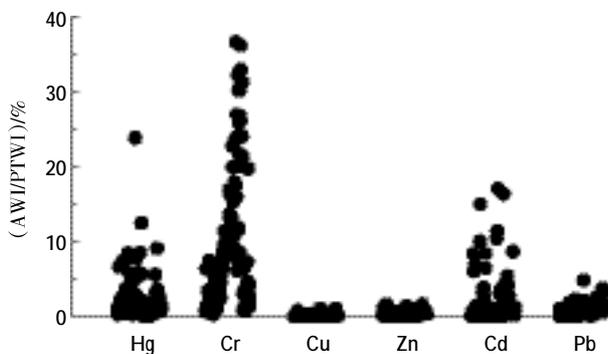


图4 不同重金属的食用安全性评价分布

Figure 4 Distribution of AWI/PTWI (%) on different heavy metals

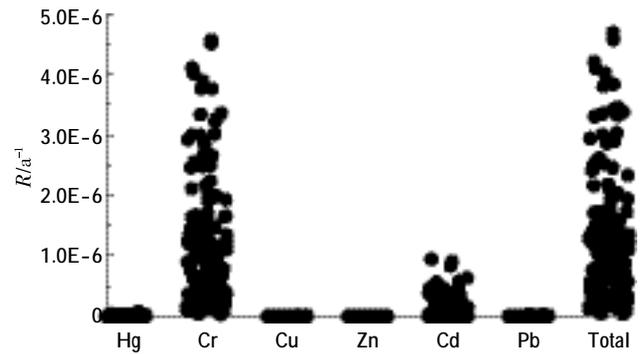


图5 不同重金属的总食入风险分布

Figure 5 Distribution of  $R_{i\text{total}}$  on different heavy metals

10倍还多。这说明在目标渔区Cr是主要的潜在食入健康风险来源,与食用安全性的分析结果一致。从种类上看,各类水产食入健康风险值差距不明显,可能与样品数量不一致有关。腹足纲(蛞蝓,  $n=2$ )均值为  $2.0 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ ,软骨鱼纲( $n=5$ )为  $1.3 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ ,软甲纲( $n=6$ )为  $0.7 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ ,头足纲( $n=5$ )为  $1.1 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ ,硬骨鱼纲( $n=144$ )为  $1.2 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ 。在硬骨鱼纲中,各种鱼类的食入健康风险值范围在  $3.8 \times 10^{-8} \cdot a^{-1}$  至  $4.7 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$  之间,风险值最高的前3种鱼分别为老虎斑( $4.2 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ ,  $n=2$ )、红娘鱼( $2.5 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ ,  $n=2$ )和带鱼( $2.3 \times 10^{-6} \cdot a^{-1}$ ,  $n=5$ )。需要指出的是,在总食入健康风险的计算过程中,Cr元素以风险指数最高的六价铬进行评估,使得计算的理论值将高于实际值。此外,水产品作为食材的运输、加工与烹饪过程中都有可能引起食入重金属含量的变化,故该总食入风险评估的结果仅作为总量和外剂量的评价形式。

### 3 结论

本研究目标渔区捕捞水产品体内的重金属总体污染水平较低,大多数水产品的6种重金属含量符合无公害水产品的国家标准,表明该处渔场受到重金属污染的程度较低。发生超标的情况主要发生在Cd元素,超标率为9.7%。各类水产品中重金属含量存在一定的差异,非鱼类水产品体内Zn、Cu与Cd的含量总体上显著高于鱼类。样品体内重金属含量顺序浓度大体一致,呈现出  $Zn > Cu >$  其他重金属元素的特征。单因子污染指数评价显示出各重金属的污染程度为  $Cd > Hg, Pb > Cr > Zn, Cu$ ,与近岸捕捞和养殖水产品中重金属的污染程度顺序有明显区别,表明重金属的污染特征与捕捞区域有一定的相关性。水产品的重金属污染指数总体上处于低风险水平,受到食性与营养级的明显影响。食用安全性和健康风险评价结果则表明,Cr

是目标渔区水产品食用安全的主要威胁,同时也是增大食入监控风险的主导因素,有必要引起相应的重视,其余测定金属的食用安全及健康风险水平均处于可接受的范围内。

#### 参考文献:

- [1] Domingo, J L. Nutrients and chemical pollutants in fish and shellfish: Balancing health benefits and risks of regular fish consumption[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(6): 979-988.
- [2] 李万杰, 马春, 张新欣, 等. 微波消解-石墨炉原子吸收法检测海产品中痕量重金属[J]. *大连工业大学学报*, 2015, 34: 111-113.  
LI Wan-jie, MA Chun, ZHANG Xin-xin, et al. Determination of trace heavy metal in marine products by microwave digestion-graphite furnace atomic absorption spectrometry[J]. *Journal of Dalian Polytechnic University*, 2015, 34: 111-113.
- [3] 梅光明, 郭远明, 张小军, 等. 浙江沿海海产品中汞形态分析测定与分布特征[J]. *食品科学*, 2015, 36: 229-234.  
MEI Guang-ming, GUO Yuan-ming, ZHANG Xiao-jun, et al. Analysis and distribution characteristics of mercury species in seafood from the coast of Zhejiang Province[J]. *Food Science*, 2015, 36: 229-234.
- [4] 刘守廷, 蒋天成, 李健梅, 等. HPLC-AFS 联用测定海产品中砷的形态[J]. *化学分析计量*, 2013, 22: 11-14.  
LIU Shou-ting, JIANG Tian-cheng, LI Jian-mei, et al. Determination of arsenic speciation in seafood by HPLC-AFS [J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2013, 22: 11-14.
- [5] 满兆红, 梁睿, 赵萍, 等. ICP-OES 法对水产品中重金属污染状况监测分析[J]. *食品科技*, 2015, 40: 361-366.  
MAN Zhao-hong, LIANG Rui, ZHAO Ping, et al. Analysis and evaluation on the contamination status of heavy metal in fresh aquatic product by ICP-OES[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40: 361-366.
- [6] 蒋天成, 刘守廷, 罗平, 等. 微波样品消解-电感耦合等离子体质谱法测定北部湾海产品中重金属的含量[J]. *理化检验(化学分册)*, 2014, 50(1): 93-96.  
JIANG Tian-cheng, LIU Shou-ting, LUO Ping, et al. ICP-MS determination of heavy metals in seafood from Beibu Gulf with microwave assisted sample digestion[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2014, 50(1): 93-96.
- [7] German C S, Isabelle S, Griet V, et al. Integrated risk index for seafood contaminants (IRISC): Pilot study in five European countries[J]. *Environmental Research*, 2015, 143: 109-115.
- [8] 刘平, 周益奇, 臧利杰. 北京农贸市场 4 种鱼类体内重金属污染调查[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 2062-2068.  
LIU Ping, ZHOU Yi-qi, ZANG Li-jie. Investigation of heavy metal contamination in four kinds of fishes from the different farmer markets in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 2062-2068.
- [9] 顾佳丽, 赵刚. 辽宁沿海城市海鱼和贝类中重金属含量的测定及评价[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(8): 63-67.  
GU Jia-li, ZHAO Gang. Determination and safety evaluation of heavy metals in fish and shellfish from Liaoning coastal city[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(8): 63-67.
- [10] 秦春艳, 方展强, 唐以杰, 等. 珠江口伶仃洋习见水生动物体内重金属含量测定与评价[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2010(3): 104-109.  
QIN Chun-yan, FANG Zhan-qiang, TANG Yi-jie, et al. Contents and evaluation of heavy metals in common aquatic from Lingding Yang in Pearl River Estuary, South China[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2010(3): 104-109.
- [11] 黄坚, 包贤艳. 2011 年北海市海产品污染状况[J]. *职业与健康*, 2012, 28(19): 2370-2371.  
HUANG Jian, BAO Xian-yan. Contamination situation of seafood in Beihai City in 2011[J]. *Occupation and Health*, 2012, 28(19): 2370-2371.
- [12] 何佳璐, 张乾通, 陈艳. 舟山市市售不同种类海产品中重金属污染现状[J]. *中国食品卫生杂志*, 2015, 27(1): 81-84.  
HE Jia-lu, ZHANG Qian-tong, CHEN Yan. Status for heavy metal contamination in different kinds of seafood from Zhoushan City[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2015, 27(1): 81-84.
- [13] 吴建兰. 南通市近岸海域主要海产品重金属残留监测与评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2012, 24: 47-51.  
WU Jian-lan. Assessment on the pollution of heavy metals in seafood from coast of Nantong[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2012, 24: 47-51.
- [14] 李张伟, 郭婷子. 粤东拓林湾海产动物的重金属污染检测与评价[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30: 664-667.  
LI Zhang-wei, GUO Ting-zi. Assessment on pollution of heavy metal in seafood of Tuolin Harbor in east of Guangdong Province [J]. *Marine Environmental Science*, 2011, 30: 664-667.
- [15] 陈方平. 浅谈闽南-台湾浅滩渔场渔业资源可持续利用[J]. *福建水产*, 2006(2): 12-15.  
CHEN Fang-ping. Discussion on continuable utilization of Minnan-Taiwan Bank fishery resources[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2006(2): 12-15.
- [16] Silvia Z, Katinka de B, Maura P, et al. Human exposure in Italy to lead, cadmium and mercury through fish and seafood product consumption from Eastern Central Atlantic Fishing Area[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2015, 40: 148-153.
- [17] Yap C K, Ismail A, Tan S G. Background concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn in the green-lipped mussel *Perna viridis* (Linnaeus) from Peninsular Malaysia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46(8): 1044-1048.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18406. 4—2001 农产品安全质量无公害水产品安全要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of PRC. GB 18406. 4—2001 Safety qualification for agricultural product-Safety requirements for non-environmental pollution aquatic products[S]. Beijing: China Standards Press, 2001.
- [19] Anon G. Report on revised standard for metals in food[R]//Appendix I-V. Canberra: Commonwealth Government Printers. 1979, 60-70.
- [20] 叶海媚, 吴永宁. 鱼及加工产品中重金属指标的比较[J]. *中国食品卫生杂志*, 2009, 21(3): 273-276.

- YE Hai -mei, WU Yong -ning. Comparison of lead arsenic cadmium and mercury contamination on fish and fish products[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2009, 21(3):273-276.
- [21] 高俊全, 李筱薇, 赵京玲. 2000年中国总膳食研究——膳食铅、镉摄入量[J]. 卫生研究, 2006, 35(6):750-754.
- GAO Jun-quan, LI Xiao-wei, ZHAO Jing-ling. 2000 Chinese total diet study—the dietary lead and cadmium intakes[J]. Journal of Hygiene Research, 2006, 35(6):750-754.
- [22] Wang X L, Sato T, Xing B S, et al. Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish [J]. Science of the Total Environment, 2005, 350(1-3):28-37.
- [23] 马挺军, 林炳荣, 贾昌喜. 再生水养殖鱼体内重金属残留及食用风险分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5):332-336.
- MA Ting-jun, LIN Bing-rong, JIA Chang-xi. Reclaimed water farming fish heavy metal residues and edible risk assessment[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(5):332-336.
- [24] 张晓惠, 陈红, 焦永杰, 等. 饮用水功能区水环境健康风险阈值体系研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(7):88-93.
- ZHANG Xiao-hui, CHEN Hong, JIAO Yong-jie, et al. Study on the water environmental health risk threshold system of drinking water function areas[J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37(7):88-93.
- [25] 侯千. 开封市饮用水源水及食鱼健康风险评价[D]. 开封:河南大学, 2011.
- HOU Qian. Assessment of human health risks posed by water contaminants and consumption of fish from drinking water source in Kaifeng City[D]. Kaifeng: Henan University, 2011.
- [26] 谢文平, 陈昆慈, 朱新平, 等. 珠江三角洲河网区水体及鱼体内重金属含量分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10):1917-1923.
- XIE Wen-ping, CHEN Kun-ci, ZHU Xin-ping, et al. Evaluation on heavy metal contents in water and fishes collected from the waterway in the Pearl River Delta, South China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(10):1917-1923.
- [27] 彭加喜, 徐向荣, 刘金铃, 等. 红海湾海产品体内重金属水平及人体暴露风险评估[J]. 生态科学, 2014, 33:825-831.
- PENG Jia-xi, XU Xiang-rong, LIU Jin-ling, et al. Heavy metal levels in seafood from Honghai Bay and its human dietary exposure assessment[J]. Ecological Science, 2014, 33:825-831.
- [28] 黄家钿, 周碧红, 石予白, 等. 浙江省部分沿海地区海产品中铅、砷、镉、汞的污染调查[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25:2786-2788.
- HUANG Jia-tian, ZHOU Bi-hong, SHI Yu-bai, et al. Survey on lead, arsenic, cadmium and mercury pollution of seafoods in parts of the coastal regions of Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2015, 25:2786-2788.
- [29] 刘洋, 付强, 高军, 等. 江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价[J]. 环境科学, 2013, 34(10):4081-4089.
- LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, et al. Concentrations and safety evaluation of heavy metals in aquatic products of Yancheng, Jiangsu Province[J]. Environmental Science, 2013, 34(10):4081-4089.