

# 贝类产品镉铜铅锌的含量特征与风险分析

王增焕,王许诺,林 钦

(中国水产科学研究院南海水产研究所,广州 510300)

**摘 要** :根据 2007 年和 2009 年对广东、广西沿海部分海域近江牡蛎(*Crassostrea rivularis*)、太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)、翡翠贻贝(*Perna viridis*)、菲律宾蛤仔(*Ruditapes Philippinarum*)和文蛤(*Meretrix meretrix*)的监测资料,分析了贝类产品中镉(Cd)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)的含量特征及其季节差异,并采用点估计方法对贝类产品中的 Cd、Cu、Zn、Pb 进行了风险分析。结果表明,贝类品种的差异决定了其体内 Cd、Cu、Pb、Zn 含量的差异,近江牡蛎样品中 Cd、Cu、Zn 的含量远远高于另外 4 种贝类,文蛤样品中 Cd、Cu、Pb 的含量明显低于其他 4 种贝类。贝类产品中 Cd、Cu、Pb、Zn 的含量存在一定的季节差异,这可能与海水的温度、盐度、溶解氧等因子的季节变化有关。与《无公害食品 水产品中有毒有害物质限量》标准的限量值相比,贝类产品中 Cd、Cu、Pb 的合格率分别为 65%、67.7%和 100%。与其他海域贝类产品的调查结果相比,此次贝类样品 Cd、Cu、Pb、Zn 的含量处于正常的波动范围内;与世界卫生组织/联合国粮农组织的食品添加剂联合专家委员会推荐的暂定每周耐受摄入量相比,太平洋牡蛎、翡翠贻贝、菲律宾蛤仔和文蛤的 Pb、Cd 的膳食暴露量处于安全范围内,而近江牡蛎的 Cd 膳食暴露量可能存在风险。

**关键词** :贝类;镉;铜;铅;锌;风险分析

中图分类号 :X820.4 文献标志码 :A 文章编号 :1672-2043(2011)06-1208-06

## The Content Variation Characteristics and Risk Analysis for Cadmium, Copper, Lead and Zinc in Some Species of Shellfish

WANG Zeng-huan, WANG Xu-nuo, LIN Qin

(South China Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

**Abstract** :According to the survey data on the shellfish of *Ruditapes Philippinarum*, *Perna viridis*, *Crassostrea rivularis*, *Crassostrea gigas* and *Meretrix meretrix* collected from the coast along South China Sea in 2007 and 2009, the content characteristics and the seasonal variation of cadmium(Cd), copper(Cu), lead(Pb) and zinc(Zn) in the samples were discussed, and the risk caused by these trace heavy metals was analyzed using the method of point estimation. The results showed that the contents of Cd, Cu, Pb and Zn changed with the various species of shellfish with the highest contents(except Pb) in *Crassostrea rivularis* and the lowest contents(except Zn) in *Meretrix meretrix*. There existed some seasonal variation for the contents of Cd, Cu, Pb and Zn in the shellfish which was due to the changes of environmental factors such as temperature, salt and dissolved oxygen in the seawater. Comparing with the other sea area, the contents of Cd, Cu, Pb and Zn in the shellfish from the present survey fluctuated between the normal levels, which showed most of these trace metals were relatively stable and under the control value issued by the standard of "Non-environmental food products-Safe limits for the hazardous chemicals in the aquatic products" (except Cd and Cu in a small amount of samples). The risk analysis results showed that the Pb contents in all the shellfish products were in the safe ranges according to the recommended values of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives(JECFA), and the Cd contents were also in the safe ranges except in the species of *Crassostrea rivularis*. Judged by the contents of the trace heavy metals, the quality of the shellfish products from the present survey was in the edible security level, and just was the same as the products sold in the city markets.

**Keywords** :shellfish; cadmium; copper; lead; zinc; risk analysis

收稿日期 2010-12-12

基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2009TS20,2009TS07)

作者简介 王增焕(1969—),男,山东五莲人,副研,从事海洋生态环境与水产品质量安全研究。E-mail zh-wang@people.com.cn

贝类具有高蛋白、高微量元素、高铁、高钙和少脂肪等营养特点,长期以来受欧洲、北美和亚洲很多国家消费者的青睐。我国是世界贝类养殖大国,贝类养殖已成为海水养殖业的重要支柱产业之一,产业规模和产量居世界前列,在世界水产品生产和贸易中占有重要地位。牡蛎、文蛤、贻贝等双壳贝类在广东、广西沿海养殖规模大、产量高,是主要养殖种类。大部分双壳贝类营底栖生活,是滤食性的,其产品质量受到养殖海域的环境影响,许多作者建议用其作为海域重金属污染的监测生物<sup>[1-3]</sup>。本文对广东、广西沿海部分贝类产品重金属镉(Cd)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)的含量特征进行了讨论,并对其风险进行了分析,以期引导贝类的安全消费。

## 1 材料与方法

贝类采样站位如图1所示。太平洋牡蛎采集于南澳(50个),近江牡蛎采集于阳江(10个)、茂名(10个)、钦州(30个)、防城(30个),文蛤采集于合浦(40个),翡翠贻贝采集于江门(20个),菲律宾蛤仔采集于柘林湾(30个)。翡翠贻贝和菲律宾蛤仔分别于2007年6月和9月各进行1次采集,太平洋牡蛎、近江牡蛎和文蛤分别于2009年5月和9月各进行1次采集(阳江、茂名海域于2009年5月采集1次)。所有样品均采集成体产品,现场用海水将外壳冲洗干净,取出软组织冰冻保存。样品的采集、运输按照《海洋监测规范》(GB 17378.3—2007)<sup>[4]</sup>的规定进行。样品带回

实验室后解冻、匀浆,按《食品卫生检验方法理化部分》(GB/T 5009—2003)<sup>[5]</sup>规定测定Cd、Cu、Pb和Zn的含量。所用仪器为日立Z-2000型塞曼效应原子吸收分光光度计。测定结果均以湿重表示。

数据的统计分析采用SPSS18.0软件进行,不同贝类Cd、Cu、Pb、Zn含量差异用Tamhane法多重比较检验,元素含量的季节差异采用独立样本 $t$ 检验,图形以Surfer9.0软件绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 贝类样品重金属元素的含量特征

贝类产品中Cd、Cu、Pb、Zn的调查结果列于表1。从表1数据中可以看出,不同贝类产品中Cd、Cu、Pb、Zn的含量差异很大,近江牡蛎样品中Cd、Cu、Zn的含量远远高于其在菲律宾蛤仔、贻贝和文蛤中的含量,也显著高于其在太平洋牡蛎中的含量( $P<0.05$ )。文蛤样品中Cd、Cu、Pb的含量明显低于牡蛎、贻贝、菲律宾蛤仔中的含量( $P<0.05$ )。海洋生物对重金属的富集取决于元素进入生物体的速率,相对速率的变化决定生物对特定金属的富集,其类型从调节型到净积累型,并且各类型之间有过渡形式<sup>[6]</sup>。研究发现,某些海洋生物能够根据海水的污染程度改变其生理生化状况,从而引起对重金属吸收率和累积量的改变<sup>[7]</sup>,不同的贝类品种,决定了其体内重金属元素含量的差异。

近江牡蛎体内Cd、Cu、Pb、Zn的含量与海水中的

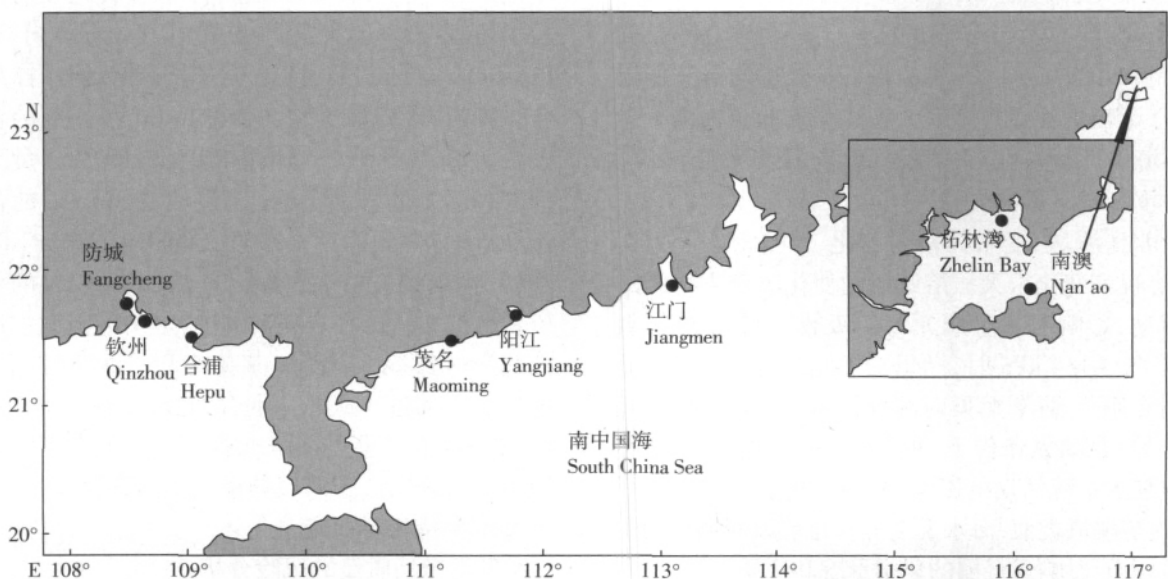


图1 采样站位图

Figure 1 Sampling stations

浓度以及暴露时间呈正相关,Cd、Cu、Zn从牡蛎体内排出的生物学半衰期长,牡蛎对海水中Cd、Cu、Zn的累积是净累积型。实验比较发现,菲律宾蛤仔和翡翠贻贝对Cd的富集系数远远低于近江牡蛎对Cd的生物富集系数<sup>[1]</sup>,翡翠贻贝累积Cu、Zn后置于净水中,其体内的Cu、Zn会逐渐释放<sup>[3]</sup>;菲律宾蛤仔在Zn和Pb浓度分别小于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $32 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的海水中,对Zn和Pb的积累量低<sup>[8]</sup>,天然海水中Zn和Pb的浓度通常都低于这一数值,因此菲律宾蛤仔对Zn和Pb的积累量较低。菲律宾蛤仔、翡翠贻贝和文蛤对进入体内的Cd、Cu、Zn不断排出,导致这些元素在体内的积累量低;而近江牡蛎对Cd、Cu、Zn表现为净累积,其体内含量高。对重金属元素累积类型的差异,使近江牡蛎体内Cd、Cu、Zn的含量远远高于菲律宾蛤仔、翡翠贻贝、文蛤3种样品中的含量。

表1 贝类产品重金属元素的含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )  
Table 1 The contents of heavy metals in the shellfish samples( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

样品名称	Cd	Cu	Pb	Zn
菲律宾蛤仔	0.32±0.27b	1.14±0.07b	0.25±0.08a	9.86±1.12b
翡翠贻贝	0.29±0.05b	1.44±0.17b	0.33±0.05a	8.75±1.10b
近江牡蛎	1.86±0.30a	144±61.8a	0.20±0.09a	409±214a
太平洋牡蛎	0.47±0.11b	12.3±3.53b	0.34±0.09a	50.4±4.50b
文蛤	0.16±0.03c	1.00±0.16c	0.10±0.03b	12.9±1.65b

注:同一列中,不同字母表示存在显著性差异( $P<0.05$ )。

此次调查的统计结果(表2)表明,近江牡蛎Cu的含量,太平洋牡蛎Cd、Cu、Pb的含量,菲律宾蛤仔Cd、Pb的含量均表现出显著的季节差异( $P<0.05$ );翡翠贻贝和文蛤样品中Cd、Cu、Pb、Zn含量的季节差异不显著。影响贝类对重金属元素积累的非生物因子主要是环境条件,包括溶解氧、温度、盐度以及水体和沉积物中重金属元素的含量<sup>[9]</sup>。

在养殖海域,受水体富营养化、养殖密度等因素影响,溶解氧变化很大。溶解氧的变化改变生物体的生理活动,影响对重金属元素的吸收<sup>[10]</sup>,水体溶解氧的分压 $P(\text{O}_2)<4 \text{ kPa}$ 时,贻贝对Cd的吸收具有明显的抑制作用<sup>[11]</sup>,翡翠贻贝对溶解态Cd的吸收与其耗氧率有关,在缺氧条件下,重金属向软组织内扩散不受贝类泵水系统活动的影响,而与其机体代谢过程相关<sup>[12]</sup>。同溶解氧类似,海水温度的变化能改变贝类的生理活动,也能影响重金属的化学形态和性质,温度也是影响贝类对重金属累积的重要因子。贻贝对溶解态Cd的吸收与暴露温度有依赖关系<sup>[13]</sup>,在 $15\sim 30^\circ\text{C}$ 对Cd

的吸收随温度升高而升高<sup>[12]</sup>,温度影响牡蛎对Cd的吸收,因为温度变化改变了其代谢机能<sup>[14]</sup>。另外,海水的盐度也随季节更替而变化,水体盐度的变化可能影响水体重金属元素的形态,从而影响其生物可利用性。环境因子如溶解氧、温度、盐度等的季节变化,改变或影响了贝类的生理机能,从而影响其对重金属元素的吸收和累积,使得贝类产品中Cd、Cu、Pb、Zn的含量呈现季节性差异<sup>[15]</sup>。

表2 贝类产品重金属元素含量的季节差异( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 2 The seasonal variations for heavy metal contents in shellfish samples( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

地点	月份	Cd	Cu	Pb	Zn
防城	5月	1.90±0.31	142±58.7	0.19±0.04	499±80.6
	9月	2.00±0.38	186±61.7	0.15±0.03	486±90.3
合浦	5月	0.15±0.04	0.98±0.19	<0.08	11.9±1.29
	9月	0.18±0.02	1.02±0.11	0.10±0.03	13.9±1.33
江门	5月	0.26±0.03	1.53±0.15	0.33±0.04	9.43±0.62
	9月	0.32±0.05	1.35±0.16	0.32±0.06	8.07±1.07
南澳	5月	0.39±0.04*	9.48±1.02*	0.28±0.03*	47.8±5.50
	9月	0.56±0.10*	15.1±2.80*	0.40±0.08*	52.9±4.08
钦州	5月	1.86±0.24	150±23.6*	0.18±0.02	655±114
	9月	1.92±0.13	186±26.1*	0.13±0.03	629±98.6
柘林湾	5月	0.53±0.24*	1.16±0.08	0.18±0.03*	10.8±0.53
	9月	0.12±0.01*	1.11±0.06	0.31±0.04*	8.92±0.67

注:\*表示季节性差异显著( $P<0.05$ )。

贝类对重金属元素的累积受环境因子影响<sup>[9]</sup>,其含量随贝类品种以及海域的污染状况等变化,本文对华南沿海部分海域的贝类产品重金属元素的含量进行了比较(表3)。此次调查,菲律宾蛤仔体内Cd、Cu、Pb、Zn的含量与厦门海域、上川岛海域蛤仔样品中的含量接近,翡翠贻贝和文蛤样品Cd、Cu、Pb的含量低于资料值,太平洋牡蛎体内Cd、Cu、Pb的含量高于白沙湾样品中的含量。近江牡蛎体内Cd、Cu的含量低于2008年钦州的调查结果,但高于2008年防城和2007年白沙湾的调查结果,近江牡蛎体内Pb的含量与资料数据接近。在资料数据中,上川岛与此次调查的江门海域邻近,广澳湾、莱芜湾和白沙湾与此次调查的柘林湾邻近。从总体上看,此次调查贝类产品Cd、Cu、Pb、Zn的含量与资料数据相比,处在正常的波动范围内。表明调查海域的重金属污染程度虽有波动,但基本保持相对稳定。

## 2.2 贝类产品质量的风险分析

根据国家标准《农产品安全质量 无公害水产品安全要求》(GB 18406.4—2001)<sup>[21]</sup>对无公害水产品中

表3 不同海域贝类产品中重金属元素含量比较(mg·kg<sup>-1</sup>)Table 3 The content comparisons for heavy metal in shellfish samples from different area(mg·kg<sup>-1</sup>)

样品名称	Cd	Cu	Pb	Zn	来源
菲律宾蛤仔	0.32	1.14	0.25	9.86	本文
	0.20	1.40	0.19	15.4	2005 厦门 <sup>[16]</sup>
	0.33	1.14	0.24	—	2003 上川岛 <sup>[17]</sup>
翡翠贻贝	0.29	1.44	0.33	8.75	本文
	0.70	9.29	0.22	—	2003 上川岛 <sup>[17]</sup>
	1.66*	4.90*	0.96*	—	2003 广澳湾 <sup>[18]</sup>
	1.38*	2.96*	1.08*	—	2003 莱芜湾 <sup>[18]</sup>
文蛤	0.16	1.00	0.10	12.9	本文
	0.26	1.39	0.08	—	2003 上川岛 <sup>[17]</sup>
太平洋牡蛎	0.47	12.3	0.34	50.4	本文
	0.28	4.76	0.22	—	2007 白沙湾 <sup>[19]</sup>
近江牡蛎	1.86	144	0.20	409	本文
	1.68	99.7	0.15	—	2008 防城 <sup>[20]</sup>
	2.10	263	0.19	—	2008 钦州 <sup>[20]</sup>
	1.46	95.4	0.21	—	2007 白沙湾 <sup>[19]</sup>

\* 按 5:1 将干重换算成湿重。

有毒有害物质的最高限量要求。此次调查贝类样品中 Cd、Cu、Pb 的合格率为分别为 1.4%、67.7%、97.2%。根据农业行业标准《无公害食品 水产品中有毒有害物质限量》(NY 5073—2006)<sup>[22]</sup> 对无公害水产品有毒有害物质限量要求,此次贝类产品中 Cd、Cu、Pb 的合格率为分别为 65%、67.7%、100%。两个标准对 Cu 的限量值要求相同,而对 Cd、Pb 的限量值要求不同。GB18406.4—2001 对 Cd、Pb 的限量值分别为不超过 0.1 mg·kg<sup>-1</sup> 和不超过 0.5 mg·kg<sup>-1</sup>,该标准没有对水产品的种类进行区分。NY 5073—2006 对 Cd、Pb 的限量按水产品的种类设定了不同的限量值,对于贝类产品 Cd、Pb 的限量值均为不超过 1.0 mg·kg<sup>-1</sup>。不同的评价标准使得 Cd、Pb 的合格率不同。由于贝类对重金属

元素的富集能力高于其他水产种类,对贝类产品的评价采用农业行业标准更合适。

贝类是城市市场中销售的重要水产品种,市售贝类的来源可能是天然海域,也可能是养殖海域等。相对于海域调查中采集的贝类产品,市售贝类体重金属含量反映了贝类产品的质量安全状况。为评价贝类的产品质量,对此次贝类体 Cd、Cu、Pb、Zn 的调查结果,与部分城市市售贝类产品重金属元素含量进行比较,结果列于表 4。此次调查近江牡蛎 Zn 的含量远远高于广州市售样品 Zn 的含量,其他贝类 Cd、Cu、Pb、Zn 的含量低于或比较接近市售产品中的含量。表明此次调查贝类体重金属含量与市售产品的质量基本一致。

按照化学污染物膳食暴露量及每周耐受摄入量点估计方法<sup>[25]</sup>,贝类产品 Cd、Pb 的每周膳食暴露量结果列于表 5(根据国际食品添加剂和污染物法典委员会文件,Cu、Zn 应作为质量指标而不应作为污染物指标,此处未进行相应计算),并与世界卫生组织/联合国粮食和农业组织的食品添加剂联合专家委员会

表4 贝类产品中重金属元素含量比较(mg·kg<sup>-1</sup>)Table 4 The content comparisons for heavy metals in shellfish samples(mg·kg<sup>-1</sup>)

样品名称	Cd	Cu	Pb	Zn	来源
菲律宾蛤仔	0.32	1.14	0.25	9.86	本文
	0.26	1.39	—	7.05	广州 <sup>[23]</sup>
	1.01	—	0.56	—	上海 <sup>[24]</sup>
翡翠贻贝	0.29	1.44	0.33	8.75	本文
	1.71	9.29	—	42.2	广州 <sup>[23]</sup>
	0.52	—	0.74	—	上海 <sup>[24]</sup>
文蛤	0.16	1.00	0.10	12.9	本文
	1.08	—	1.00	—	上海 <sup>[24]</sup>
近江牡蛎	1.86	144	0.20	409	本文
	1.44	118	—	183	广州 <sup>[23]</sup>

表5 贝类产品 Cd、Pb 的每周膳食暴露量(mg·kg<sup>-1</sup>)Table 5 The diet exposure of cadmium and lead in shellfish samples(mg·kg<sup>-1</sup>)

样品名称	Cd				Pb			
	C	A	Cm	Am	C	A	Cm	Am
菲律宾蛤仔	0.002 2	0.001 1	0.007 5	0.003 7	0.001 8	0.000 9	0.005 8	0.002 9
太平洋牡蛎	0.003 3	0.001 6	0.011 0	0.005 5	0.002 4	0.001 2	0.007 9	0.004 0
近江牡蛎	0.013 0	0.006 5	0.043 4	0.021 7	0.001 4	0.000 7	0.004 7	0.002 3
翡翠贻贝	0.002 0	0.001 0	0.006 8	0.003 4	0.002 3	0.001 2	0.007 7	0.003 9
文蛤	0.001 1	0.000 6	0.003 7	0.001 9	0.000 7	0.000 4	0.002 3	0.001 2
推荐值	0.007				0.025			

注 C:儿童组;A:成年组;Cm:儿童组极限值;Am:成年组极限值。

(JECFA)推荐的暂定每周耐受摄入量(PTWI)比较。在计算过程中,贝类产品中Cd、Pb的含量为所有同类样品中元素含量的算术平均值;贝类产品的每日消费量取30g,极限消费量为100g;消费者分为儿童和成年2组,体重取值分别为30kg和60kg。贝类的消费量和体重数据参照2002年总膳食调查和文献资料<sup>[26-27]</sup>确定。

根据表5的数据,儿童食用近江牡蛎摄入的Cd超过推荐值,而成年人食用近江牡蛎摄入Cd也接近推荐值。在贝类的每日极限消费量的情况下,儿童进食除文蛤外的其他4种贝类,均存在摄入Cd过量的风险;成年人进食近江牡蛎则有摄入Cd过量的风险。在贝类的极限消费情况下,儿童和成年人对Pb的摄入量均低于推荐值,处于安全范围内。

根据对广东沿海城市居民消费调查<sup>[26]</sup>,谷物(大米)、蔬菜中Cd的每周膳食暴露量达到 $0.006\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,Pb的每周暴露量为 $0.019\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。结合表5的数据,儿童和成人Cd的总膳食暴露量接近或超过JECFA的推荐值,存在Cd暴露量偏高的风险。在贝类极限消费情况下,成人Pb的总膳食暴露量低于JECFA推荐值,而儿童Pb的总膳食暴露量可能超过JECFA推荐值,意味着儿童可能存在Pb暴露量偏高的风险。

### 3 结论

不同贝类产品中,Cd、Cu、Pb、Zn的含量差异很大,近江牡蛎样品中Cd、Cu、Zn的含量远远高于菲律宾蛤仔、贻贝和文蛤中的含量,也显著高于其在太平洋牡蛎中的含量,文蛤样品中Cd、Cu、Pb的含量明显低于牡蛎、贻贝、菲律宾蛤仔中的含量。不同的贝类品种,决定了其体内重金属元素含量的差异。不同采样季节,贝类产品中Cd、Cu、Pb、Zn的含量也表现出一定的差异,这可能与环境因子的变化有关。

此次调查,贝类产品中Pb的含量低于无公害水产品质量标准的限量值,而Cd、Cu的含量合格率分别为65%和67.7%。与其他海域贝类重金属含量相比,此次调查的结果处于正常的波动范围内。按照JECFA推荐的暂定每周耐受摄入量进行评价,贝类产品中Pb的膳食暴露量处于安全范围内;除近江牡蛎外,其他4种贝类Cd的膳食暴露量也处于安全范围内;在假设的极限情况下,文蛤中Cd的膳食暴露量也处于安全范围内。考虑膳食结构中谷物、蔬菜等Cd、Pb的暴露量,结合贝类的暴露量,Cd、Pb的总膳食暴露量可能存在一定风险。

### 参考文献:

- [1] 陈海刚,林钦,蔡文贵.3种常见海洋贝类对重金属Hg、Pb和Cd的积累与释放特征比较[J].农业环境科学学报,2008,27(3):1163-1167.  
CHEN Hai-gang, LIN Qin, CAI Wen-gui. Comparisons on the accumulation and elimination characteristic of Hg, Pb and Cd in three kinds of marine bivalve molluscs[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 1163-1167.
- [2] 李学鹏,励建荣,段青源,等.泥蚶对重金属铜、铅、镉的生物富集动力学[J].水产学报,2008,32(4):592-600.  
LI Xue-peng, LI Jian-rong, DUAN Qing-yuan, et al. Kinetic study on the bioconcentration of three heavy metals (Cu, Pb, Cd) in *Tegillarca granosa* Linnaeus[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2008, 32(4): 592-600.
- [3] 马胜伟,林钦,陈海刚,等.混合重金属对翡翠贻贝的积累与排放规律研究[J].南方水产,2008,4(6):78-82.  
MA Sheng-wei, LIN Qin, CHEN Hai-gang, et al. Accumulation and elimination of mixed heavy metals in green mussel *Mytilus edulis* [J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(6): 78-82.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. GB 17378-2007, 海洋监测规范[S].北京:中国标准出版社,2008.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China., GB 17378-2007, The specification of marine monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [5] 中华人民共和国卫生部. GB/T5009-2003, 食品卫生检验方法-理化部分[S].北京:中国标准出版社,2003.  
Ministry of health of the people's republic of China. GB/T5009-2003, Methods of food hygienic analysis-physical and chemical section[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [6] Rainbow P S. The signification of trace metal concentration in marine invertebrates[G]//Dallinger R, Rainbow P S. Ecotoxicology of metals in invertebrates. Boca Raton, Lewis Publisher, 1993: 4-23.
- [7] Blackmore G, Wang W X. Uptake and efflux of Cd and Zn by the green mussel *Perna viridis* after metal pre-exposure[J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36: 989-995.
- [8] 蔡立哲,洪华生,洪丽玉.菲律宾蛤仔对锌、铅的积累特征[J].环境科学学报,1999,19(3):319-322.  
CAI Li-zhe, HONG Hua-sheng, HONG Li-yu. Accumulation of zinc and lead in *Ruditapes philippinarum* and its tolerance[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(3): 319-322.
- [9] 励建荣,李学鹏,王丽,等.贝类对重金属的吸收转运与累积规律研究进展[J].水产科学,2007,26(1):51-55.  
LI Jian-rong, LI Xue-peng, WANG Li, et al. Advances in uptake, transportation and bioaccumulation of heavy metal ions in bivalve[J]. *Fisheries Science*, 2007, 26(1): 51-55.
- [10] Wang W X. Cd and Se aqueous uptake and exposure of green mussels *Perna viridis*: Influences of quantity[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 226(1): 211-221.
- [11] Fischer H. Influence of temperature, salinity, and oxygen on the cadmium balance of mussels *Mytilus edulis* [J]. *Marine Ecology Progress*

- Series, 1986, 32(1) :265-278.
- [12] 王静凤, 张学成, 单宝田. 环境因子对贝类累积溶解态重金属的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2005, 35(3) :382-386.  
WANG Jing-feng, ZHANG Xue-cheng, SHAN Bao-tian. Effects of environmental factors on the accumulation of dissolved metals in bivalves [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2005, 35(3) :382-386.
- [13] Watkins B, Simkiss K. The effect of oscillating temperatures on the metal ion metabolism of *Mytilus edulis*[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1988, 68(1) :93-100.
- [14] Hung Y W. Effects of temperature and chelating agents on cadmium uptake in the American oyster[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1982, 28(5) :546-551.
- [15] Valentine K M, Ronny B. Effects of temperature on scope for growth and accumulation of Cd, Co, Cu and Pb by the marine bivalve *Mytilus edulis*[J]. *Marine Environmental Research*, 2007, 63 :219-233.
- [16] 阮金山. 厦门海域养殖贝类体内重金属的初步研究 [J]. 海洋科学, 2009, 33(2) :32-37.  
RUAN Jin-shan. Preliminary study of heavy metals concentrations in the culture shellfish from Xiamen coastal waters, China[J]. *Marine Sciences*, 2009, 33(2) :32-37.
- [17] 唐以杰, 林 炜. 上川岛沿岸经济贝类体内重金属含量分析 [J]. 广东教育学院学报, 2005, 25(3) :87-90.  
TANG Yi-jie, LIN Wei. The study on heavy metals in the economic shellfish along the coast of Hailing Island[J]. *Journal of Guangdong Education Institute*, 2005, 25(3) :87-90.
- [18] 孙 萍, 黄长江, 乔永民, 等. 汕头港及其邻近水域潮间带海产动物体内重金属污染的调查[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(4) :56-62.  
SUN Ping, HUANG Chang-jiang, QIAO Yong-min, et al. An investigation on heavy metal contamination of marine animals in Shantou harbor[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23(4) :56-62.
- [19] 王许诺, 王增焕, 林 钦, 等. 广东沿海贝类 4 种重金属含量分析和评价[J]. 南方水产, 2008, 4(6) :83-87.  
WANG Xu-nuo, WANG Zeng-huan, LIN Qin, et al. Analysis and assessment of the content of four heavy metals in shellfish along Guangdong coastal waters[J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(6) :83-87.
- [20] 张 兰, 叶开富, 李 健, 等. 广西近江牡蛎重金属污染状况初探 [J]. 大众科技, 2008, (12) :100-101.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局. GB18406. 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, 2008.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18406. 4—2001, Safety qualification for agricultural product—safety requirements for non-environmental pollution aquatic products[S]. Beijing :Standards Press of China, 2002.
- [22] 中华人民共和国农业部. NY 5073—2006 无公害食品水产品中有毒有害物质限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.  
Ministry of agriculture of the people's republic of China. NY 5073—2006, Non-environmental pollution food – the limit for the deleterious matters in the aquatic product[S]. Beijing :Standards Press of China, 2006.
- [23] 杨丽华, 方展强, 郑文彪, 等. 广州市场食用鱼和贝类重金属含量及评价[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(6) :15-17.  
YANG Li-hua, FANG Zhan-qiang, ZHENG Wen-biao, et al. Evaluation of heavy metals in edible fishes and bivalves available in a market in Guangzhou city[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 25(6) :15-17.
- [24] 纪焕红, 徐 韧, 程祥圣, 等. 上海市售海产贝类食用安全质量评价及分级[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(2) :193-197.  
JI Huan-hong, XU Ren, CHENG Xiang-sheng, et al. Assessment and grade of food safety quality for retail shellfish in Shanghai[J]. *Marine Environmental Science*, 2009, 28(2) :193-197.
- [25] 王增焕, 林 钦, 王许诺. 大亚湾海洋生物体内铅的含量与风险评估[J]. 南方水产, 2010, 6(1) :54-58.  
WANG Zeng-huan, LIN Qin, WANG Xu-nuo, et al. Analysis of lead content in marine organisms and risk assessment in Daya Bay[J]. *South China Fisheries Science*, 2010, 6(1) :54-58.
- [26] 孟祥周, 余莉萍, 郭 英, 等. 滴滴涕类农药在广东省鱼类中的残留及人体暴露水平初步评价[J]. 生态毒理学报, 2006, 1(2) :116-122.  
MENG Xiang-zhou, YU Li-ping, GUO Ying, et al. DDT residues in typical fishes of Guangdong province and human exposure via fish consumption[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1(2) :116-121.
- [27] 唐洪磊, 郭 英, 孟祥周, 等. 广东省沿海城市居民膳食结构及食物污染状况的调研 对持久性卤代烃和重金属的人体暴露水平评价 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2) :329-336.  
TANG Hong-lei, GUO Ying, MENG Xiang-zhou, et al. Nutritional status in dietary intake and pollutants via food in coastal cities of Guangdong province, China :Assessment of human exposure to persistent halogenated hydrocarbons and heavy metals [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2) :329-336.

致谢 本文承蒙蔡文贵研究员对英文摘要进行斧正, 在此表示衷心感谢。