

和庆, 彭自然, 张晨, 等. 长三角地区池塘养殖水产品重金属含量及其健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1070–1077.

HE Qing, PENG Zi-ran, ZHANG Chen, et al. Heavy metals content of pond aquaculture products in Yangtze River Delta and the health risk associated with human consumption[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6): 1070–1077.

长三角地区池塘养殖水产品重金属含量及其健康风险评价

和庆, 彭自然, 张晨, 杨丰源, 李娟英*

(上海海洋大学水产动物遗传育种中心协同创新中心 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306)

摘要:为全面了解长三角地区池塘养殖水产品重金属污染现状及食用风险,于2015年5月至11月分别在上海、江苏和浙江的13个养殖池塘采集了5类共13种水产品并进行了重金属含量的测定,同时根据每周可耐受摄入量(PTWI)及风险评价指标分别评价了其食用安全性和健康风险。实验结果表明,长三角地区水产品体内重金属Cr和As的残留量很低,Cu和Pb有近60%的样点超标,而Cd在所有样点都超标,且底栖类水产品中重金属的浓度高于鱼类。根据每周水产品摄入量进行食用安全性评价的结果表明,Cu、Pb、Cr和As 4种重金属的百分比都小于100%,但Cd的占比远远超过100%,存在较大威胁。健康风险评价结果显示:部分水产品存在食用风险,且该风险主要由重金属Cu和Cd所贡献;就水产品种类而言,鱼类水产品的整体健康风险低于底栖类水产品。通过与沉积物中重金属含量的比较及相关性分析,初步得出长三角地区养殖池塘水产品体内的重金属Cd、Cr和As的残留可能与养殖池塘沉积物中重金属的污染有关。

关键词:重金属;养殖池塘;水产品;健康食用风险;长三角地区

中图分类号:X503.225 文献标志码:A 文章编号:1672–2043(2017)06–1070–08 doi:10.11654/jaes.2016–1594

Heavy metals content of pond aquaculture products in Yangtze River Delta and the health risk associated with human consumption

HE Qing, PENG Zi-ran, ZHANG Chen, YANG Feng-yuan, LI Juan-ying*

(Shanghai Collaborative Innovation Center for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai Ocean University, Shanghai Ocean University College of Marine Ecology and Environment, Shanghai 201306, China)

Abstract: This study aimed to investigate the content of heavy metals in pond aquaculture products in the Yangtze River Delta and the health risk associated with human consumption. Thirteen kinds of aquaculture products that belong to five categories were collected from 13 ponds located in Shanghai, Jiangsu and Zhejiang from May to November in 2015 and analyzed for heavy metals. The results showed that while the levels of Cr and As in the aquaculture products were quite low, the levels of Cu and Pb at 60% sample points and the levels of Cd in almost all samples exceeded the guideline on aquatic product. Besides, and the concentration of heavy metals in benthic was higher than those in fish. Provisional tolerable weekly intake (PTWI) and health risk assessment were then used to evaluate the food safety and the health risks. The AWI/PTWI of Cu, Pb, Cr and As were found all less than 100%, but the AWI/PTWI of Cd was much more than 100%; the risk of nearly half of the aquaculture products was found exceeded the guideline for human beings, and the risk was mainly contributed by the heavy metals of Cu and Cd. Among the studied aquaculture species, the overall health risk of fish was lower than that of the benthic. The heavy metals Cd, Cr and As in aquaculture products from Yangtze River Delta were suggested to be closely related to the contamination of heavy metals in the sediment of the ponds.

Keywords: heavy metals; cultured ponds; aquaculture products; health risk assessment; Yangtze River Delta

收稿日期: 2016–12–13

作者简介: 和庆(1990—),男,硕士生,研究方向为养殖环境中有机污染物的污染与风险研究。E-mail: 437705405@qq.com

*通信作者: 李娟英 E-mail: jyli@shou.edu.cn

基金项目: 上海海洋大学水产动物遗传育种中心协同创新中心(A1–2037–16–0001–12)

Project supported: Shanghai Collaborative Innovation Center for Aquatic Animal Genetics and Breeding(A1–2037–16–0001–12)

重金属由于其毒性、生物富集性与放大性而备受关注^[1-2],其污染问题已成为我国最重要的环境问题之一^[3-4]。海洋、河流和养殖池塘等水体及其沉积物中的重金属可经食物链传递而富集于水生生物体内,之后进入人体损害肝、肾等内脏器官,产生潜在的三致作用^[5-7]。作为终极消费者的人类,如果食用受重金属污染的水产品,健康将会受到直接威胁。近年来,重金属在水产品中的残留已成为我国环境科学和食品安全领域的研究热点^[8-10]。刘平等^[11]研究了北京市主要淡水鱼体内重金属残留,发现 Pb、Cd 和 As 均有超标;谢文平等^[12]对广东养殖水体和罗非鱼(*Oreochromis* spp.)体内的重金属进行健康风险评价,发现 As 存在健康风险问题,且主要来自养殖底泥;王华全等^[13]研究了湖北淡水小龙虾(*Procambarus clarkii chinensis*)体内的重金属含量,发现尽管水体中重金属含量低至几乎检测不出,沉积物的重金属含量符合标准,但龙虾体内重金属仍有部分超标。以上研究结果显示,我国淡水水产品目前正受到重金属污染压力,因而研究养殖产品体内的重金属含量、来源和健康风险对进一步保障水产品质量及消费水产品的人体健康安全有重要意义。

长三角地区经济发展迅速、水面广阔、河湖众多且水产养殖业发达。据统计^[14],2014 年包括江苏、浙江和上海的水产养殖面积达 1 079 566 hm²,其中淡水池塘养殖面积达 47 227 hm²,淡水养殖水产品总量已达 4 492 839 t,占全国淡水养殖水产品总量的 15.30%,是国内重要的淡水养殖区,池塘养殖水产品也已成为淡水水产品的主要来源。随着人们对水产品质量及养

殖环境关注度的提高,开展相关研究具有现实意义。本研究重点关注来自不同地表水源和不同养殖品种的养殖池塘中水产品的重金属含量,同时对水产品体内的重金属来源进行分析并计算健康风险。研究结果不仅可以为该地区池塘养殖水产品质量提供全方位、多层次的参考意见,也为合理规划该地区水产业的发展、有效控制重金属污染提供相关依据,在风险评价的基础上为该地区水产品消费提供安全指导。

1 材料与方法

1.1 样本采集

根据水产品的养殖周期,该研究于 2015 年 5 月至 11 月期间,分别在上海、江苏、浙江的 13 个养殖池塘进行了水产品采集(表 1)。样品由养殖人员随机从养殖池塘中捕捞,选择商品规格基本一致的水产品,装入塑料自封袋中,再置于加有冰袋的保温箱中运回实验室,储存在-80 ℃冰箱中待测。每个养殖池塘按对角线布点法用彼德森采泥器采集 5 个分点的表层沉积物,混匀装入玻璃罐中,置于加有冰袋的保温箱中运回实验室,于-20 ℃冰箱中保存待测。

1.2 实验方法

实验共测定生物样品中 Cu、Pb、Cd、Cr 和 As 5 种重金属,其中 Cu、Pb、Cd 和 Cr 采用石墨炉原子吸收分光光度法测定,As 采用双道原子荧光分光光度计法测定。样品前处理及测定方法均按照国家标准^[15-19]严格执行,沉积物样品消解参考《渔业生态环境监测规范第三部分:淡水》^[20]。

表 1 养殖池塘基本信息
Table 1 Basic information of sampling sites

类别 Category		采样点 Sampling site	水源地 Water source	养殖品种 Breeding species
底栖类 Benthic	蟹类 Crabs	S1	地表Ⅴ类水 Surface class Ⅴ water	中华绒螯蟹 <i>Eriocheir sinensis</i> H.Milne-Edwards
		S2	地表Ⅳ类水 Surface class Ⅳ water	扣蟹 <i>Eriocheir sinensis</i>
		S3	地表Ⅳ类水 Surface class Ⅳ water	扣蟹 <i>Eriocheir sinensis</i>
	鳖类 Turtle	S4	地表Ⅳ类水 Surface class Ⅳ water	鳖 <i>Trionyx Sinensis</i>
	蚌类 Freshwater mussel	S5	地表Ⅳ类水 Surface class Ⅳ water	三角帆蚌 <i>Hyriopsis cumingii</i>
	虾类 Shrimp	S6	地表Ⅴ类水 Surface class Ⅴ water	凡纳滨对虾 <i>Penaeus vannamei</i> Boone
		S7	地表Ⅴ类水 Surface class Ⅴ water	罗氏沼虾 <i>Macrobrachium rosenbergii</i>
		S8	地表Ⅴ类水 Surface class Ⅴ water	罗氏沼虾 <i>Macrobrachium rosenbergii</i>
		S9	地表Ⅴ类水 Surface class Ⅴ water	四脊滑螯虾 <i>Cherax quadricarinatus</i>
鱼类 Fish		S10	地表Ⅳ类水 Surface class Ⅳ water	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>
		S11	地表Ⅳ类水 Surface class Ⅳ water	沙塘鳢鱼 <i>Odontobutis obscurus</i>
		S12	地表Ⅴ类水 Surface class Ⅴ water	鲈鱼 <i>Lateolabrax maculatus</i>
		S13	地表Ⅳ类水 Surface class Ⅳ water	黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>

1.3 评价方法

1.3.1 食用安全性评价

世界卫生组织(WHO)、联合国粮农组织(FAO)和食品添加剂联合专家委员会(JECFA)制定了污染物每周可耐受摄入量(Provisional tolerable weekly intake, PTWI)作为食用安全性评价依据^[21]。本研究根据水产品中重金属含量以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。评价方法如下:

$$AWI = C_i \times WC \quad (1)$$

式中:AWI(Weekly intake)为成人每周实际重金属摄入量,mg; C_i 为水产品中重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;WC(Weekly consumption)为人均每周水产品消费量,根据2000年中国总膳食研究^[22],以 $0.182 \text{ kg} \cdot \text{周}^{-1}$ 计。

$$PTWI(\text{成人}) = PTWI \times \text{成人体重} \quad (2)$$

式中:PTWI为JECFA制定的污染物每周可耐受摄入量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),Cu、Pb、Cd、Cr、As取值分别是3.5、0.025、0.007、0.0067、0.007 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[23];PTWI(成人)为成人每周可耐受摄入量,mg;成人体重以70 kg计。

以AWI占PTWI(成人)的百分比即 $AWI/PTWI(\text{成人}) \times 100\%$ 对食用安全性进行评价,所占比例越高,其食用安全性越低^[21]。

1.3.2 美国(USEPA)健康风险评价

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^[24-26]。

Cd、Cr和As致癌物所导致的健康风险模型:

$$R_{ci} = \frac{1 - \exp(-D_i \cdot q_i)}{70} \quad (3)$$

式中: R_{ci} 为重金属*i*经食入途径所产生的平均个人致癌年风险, a^{-1} ; D_i 为重金属*i*经食入途径的单位体重日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; q_i 为重金属*i*经食入途径的致癌强度系数,Cd、Cr、As取值分别是6.1、0.91、15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,来自USEPA整合的风险数据系统(IRIS)^[27-28];70为人类平均寿命。

Cu和Pb非致癌物所导致的健康风险模型:

$$R_{ni} = \frac{D_i \cdot 10^{-6}}{P_i \cdot 70} \quad (4)$$

式中: R_{ni} 为重金属*i*经食入途径所导致的非致癌年风险, a^{-1} ; P_i 为重金属*i*经食入途径的调整剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; D_i 为重金属*i*经食入途径的单位体重日均暴露剂量。

$$D_i = \frac{m_i \cdot C_i}{70} \quad (5)$$

式中: m_i 为成人平均每日摄入的水产品肌肉的量,根据2000年中国总膳食研究^[22],以 $0.182 \text{ kg} \cdot \text{周}^{-1}$ 计,即 $0.026 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$; C_i 为水产品肌肉中重金属含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;70为成年人平均体重,kg。

调整剂量 P_i 通过如下公式计算:

$$P_i = \frac{R_i D_i}{A} \quad (6)$$

式中: $R_i D_i$ 为重金属*i*经食入途径的参考剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,其值来自USEPA整合的风险数据系统(IRIS)^[22-23];A为安全因子,本研究中取10^[29]。

为比较不同种类水产品对人体健康风险的差异,假设各重金属对人体健康危害的毒性作用呈加和关系而不是协同或拮抗关系,则不同种类水产品总的健康食用风险($R_{\text{总}}$)^[29]:

$$R_{\text{总}} = \sum_i R_i \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 池塘养殖水产品体内重金属含量

将池塘养殖水产品体内重金属含量与《农产品质量安全无公害水产品安全要求》(GB/T 18406.4—2000)中5种重金属的限量进行比较,结果如图1A所示。重金属Cr和As的比值都小于0.01,说明其含量非常低;Cu和Pb均有40%的样点比值低于1,其余60%的样点比值大于1小于10;所有样点中Cd的比值都高于1,有些样点甚至达到了100。以上数据说明:重金属Cr和As导致池塘养殖水产品超标的风险较低;有近一半样点的重金属Cu和Pb存在超标的风险;所有水产品重金属Cd的含量都超标,且76%的样点超出了标准值约100倍,是威胁水产品质量最主要的重金属元素。另外,计算比较底栖类水产品 and 鱼类体内重金属含量的结果表明,浓度含量较高的Cu、Pb和Cd在底栖类水产品体内的浓度分别是鱼类的7、3倍和4倍左右。这可能是由于一方面大部分重金属常被水体中的悬浮颗粒物和底泥吸附,另一方面鱼虾贝等水生生物对重金属的富集能力有明显差异,且虾贝类对重金属的富集能力明显高于鱼类^[30]。

为便于更好地了解水产品对重金属的生物富集效应,可以用生物-沉积物富集因子BSAF=水产品中某重金属污染物的浓度/沉积物中某重金属污染物的浓度^[31]来表征,它描述的是水产品对环境中污染物的累积程度。由计算结果(图1B)可知,Pb、Cr和As的BSAF值基本小于1,Cu的BSAF值介于0.04~21之间,而Cd的BSAF值较大且都在10以上,个别样点

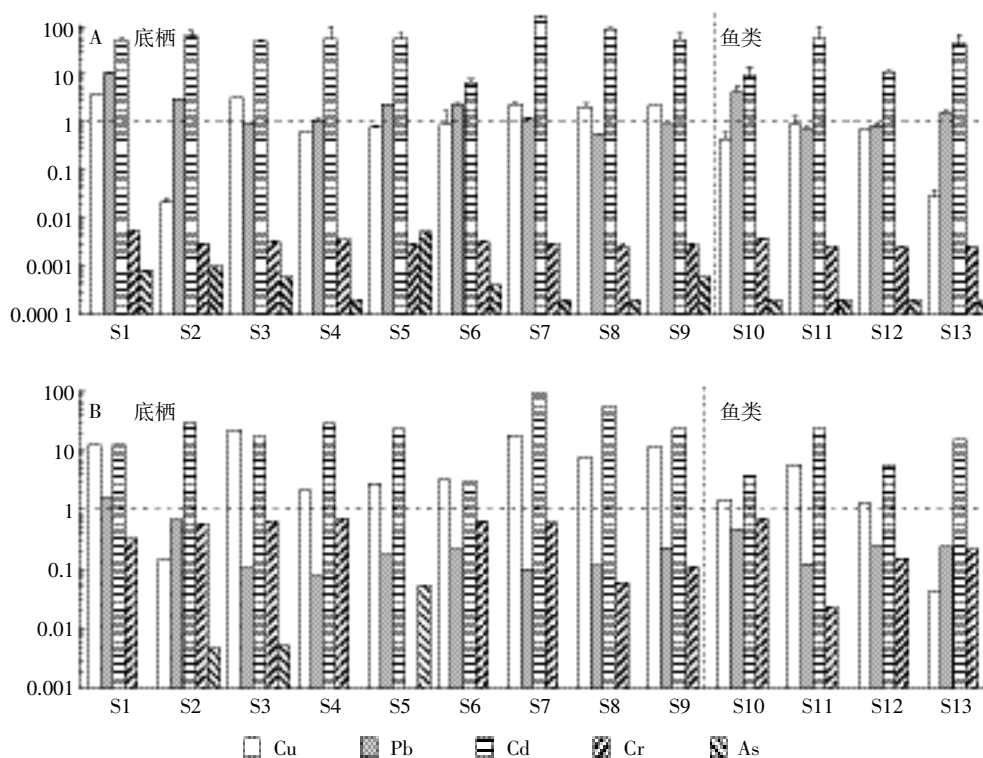


图 1 水产品中重金属浓度(A)及生物-沉积物富集系数(B)

Figure 1 Content of heavy metals in aquatic product(A) and the BSAF of aquatic products(B)

甚至接近 100。以上数据说明所有水产品对重金属 Cd 的富集能力均较强, Cu 的次之, 对 Pb、Cr 和 As 的富集能力都较弱。与实际测得的水产品体内重金属的含量相比, As 和 Cr 都未超标, 与水产品对其富集能力较弱相吻合; Cu 有 60% 的样点超出了标准, 且超标样点与其 BSAF 值较高的样点也基本一致; Cd 则在所有样点中都超标, 与所有样点的水产品种类及其 BSAF 值都较高有关, 且超标倍数大的样点也正是其富集能力高的样点。

2.2 水产品体内重金属污染物的来源分析

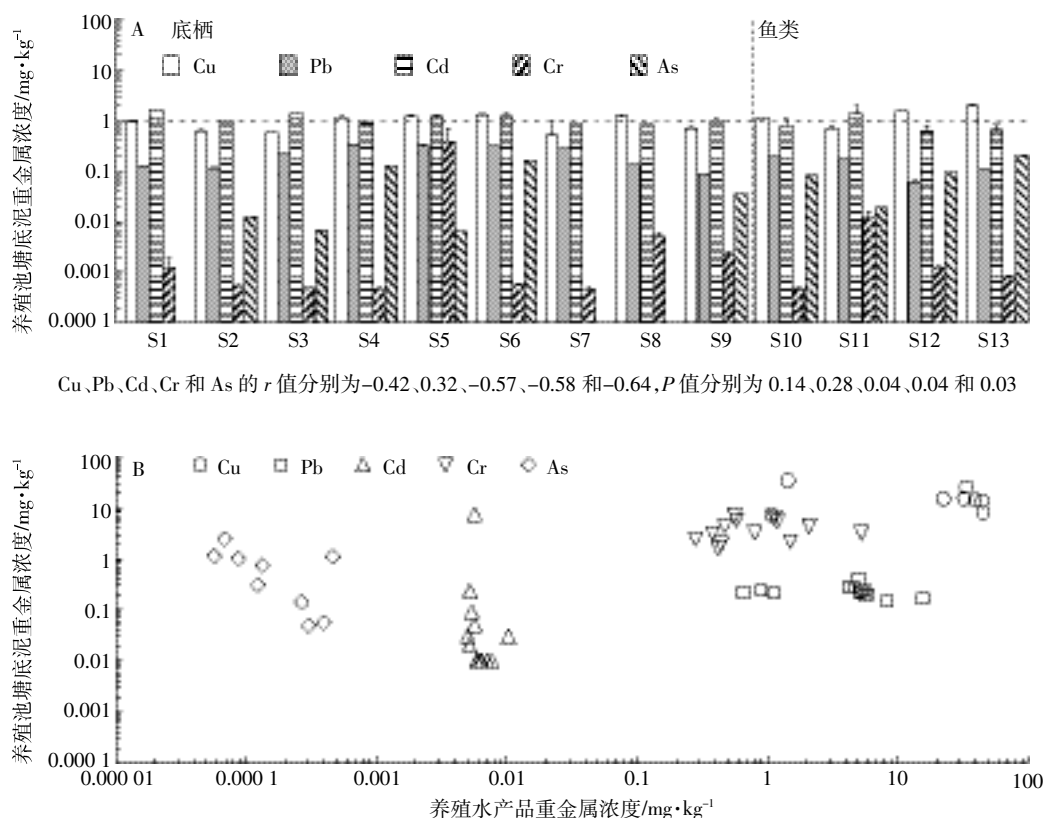
重金属进入池塘养殖水产品的途径主要有水产品通过体内器官的呼吸、摄食及与水体渗透交换作用等^[32-35]。水产品对重金属的积累主要受两大因素影响^[36-37]: 一个是水产品本身, 另一个是非生物因素。根据姚清华等^[30]对水产品重金属富集规律的研究, 鱼类对重金属的富集因食性、栖息水层不同而存有明显差异^[38], 而该研究中养殖池塘水体中重金属含量很低, 因此我们进一步分析了沉积物中重金属污染及其对水产品中重金属富集的影响。

将沉积物中重金属含量与《农产品质量安全无公害水产品产地环境要求》(GB/T 18407.4—2001)中的养殖底泥重金属含量比较可知(图 2A), Pb、Cr 和

As 的比值都低于 1, Cu 和 Cd 都有 60% 左右的样点比值超过 1。以上数据说明沉积物中的 Pb、Cr 和 As 含量低于限值, 即没有造成养殖底泥的污染, 导致水产品超标的风险较低。这与水产品体内超标重金属的种类情况相似。为了进一步验证水产品体内的重金属是否来源于养殖底泥, 又对池塘养殖水产品中重金属含量与沉积物中重金属含量的相关性进行了研究(图 2B), 并分析得出 Cd、Cr 和 As 的 r 值均大于 0.5 且 P 值都小于 0.05, 说明水产品体内的这 3 种重金属与养殖底泥之间存在明显的相关性。因此, 可以认为水产品体内 Cd、Cr 和 As 的累积可能与养殖底泥中重金属的污染密切相关。

2.3 池塘养殖水产品食用安全性评价

根据所检测的水产品中重金属的含量以及我国居民每周水产品消费量, 根据公式(1)计算成人每周实际重金属摄入量(AWI), 并与 PTWI(成人)比较, 评价其食用安全性(图 3)。结果表明, Cu、Pb、Cr 和 As 4 种重金属的百分比都小于 100% (其中 Cr 和 As 的低于 0.1%, Cu 和 Pb 的在 10% 左右), 而重金属 Cd 有 77% 的样点的百分比超过了 100%, 其中 88% 的底栖类样点和 50% 的鱼类样点超过了 100%。以上数据说明 Cu、Pb、Cr 和 As 4 种重金属的摄入量均未超过



Cu、Pb、Cd、Cr 和 As 的 r 值分别为-0.42、0.32、-0.57、-0.58 和-0.64, P 值分别为 0.14、0.28、0.04、0.04 和 0.03

图2 养殖池塘底泥中重金属含量(A)与池塘养殖水产品体内重金属相关性分析(B)

Figure 2 Content of heavy metals in aquatic sediment of aquaculture ponds(A) and correlation of heavy metal contents between sediment and aquatic product(B)

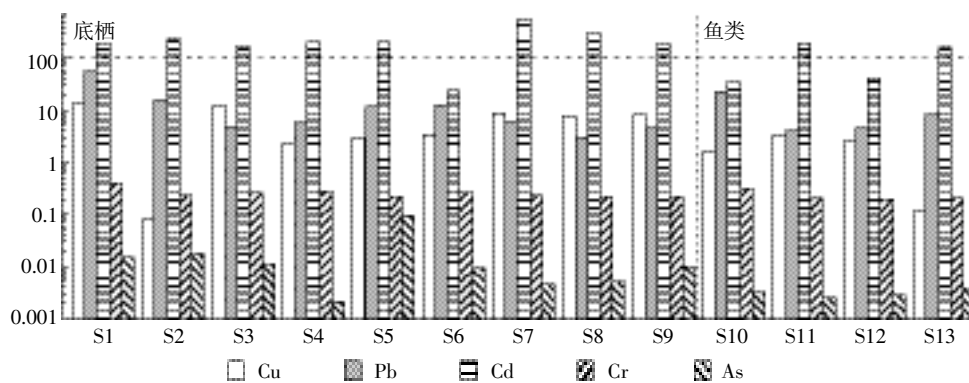


图3 AWI 占 PTWI(成人)的百分数

Figure 3 The percentage ratio of AWI to PTWI(adult)

PTWI 值,仅有 Cd 的百分数远远超过 100%,且最高值达到了 576%,显示 Cd 的摄入风险较大,存在食用安全隐患。

2.4 池塘养殖水产品健康风险评价

因为重金属的摄入会损坏生物体肝、肾等内脏器官,并产生潜在的三致作用,所以通过健康风险评价分析水产品的食用安全性是十分重要的。用总的健康风险来评价重金属对人体的危害水平,是一种

典型的的风险评价方法,可以准确评估重金属对人体的影响^[24]。健康风险评价结果可以为水产品质量控制及当地居民的饮食健康提供科学依据。

水产品总的摄入健康风险通过公式(7)计算得到(图 4),有接近一半的样点超出了 ICRP 推荐的最大可接受水平 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ^[39-40],且所有样点的健康风险都由重金属 Cu 和 Cd 所造成,其中 30%的样点健康风险主要由 Cu 造成,剩余样点的风险主要由 Cd 造

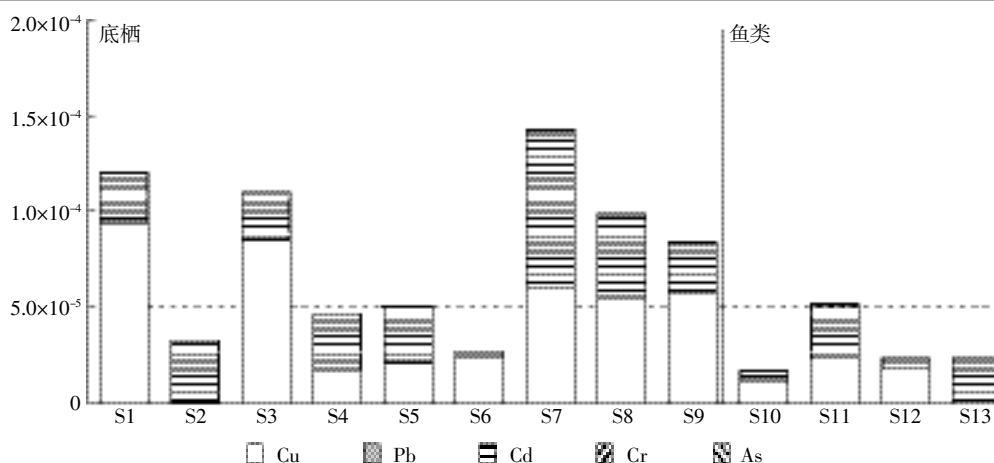


图4 池塘养殖水产品健康风险水平

Figure 4 Health risk level of pond aquaculture products

成。这与水产品体内重金属 Cu 和 Cd 的含量较高、富集能力强的结果一致,说明长三角地区的池塘养殖水产品由于 Cd 和 Cu 的超标,导致该地区的水产品存在一定的食用安全风险。就水产品种类而言,鱼类的整体健康风险要低于底栖类,鱼类仅有 25% 的样点超标,且超标程度较低,而底栖类有 55% 的样点超标严重,对人体健康可能会产生一定威胁。

3 结论

(1)长三角地区养殖池塘水产品体内,重金属 As 和 Cr 完全达标,重金属 Cu 和 Pb 有近一半的样点超标,超标最严重的是重金属 Cd,且底栖类水产品体内重金属浓度总体高于鱼类;通过与沉积物中重金属含量的比较以及相关分析,可以初步得出长三角地区养殖池塘水产品体内的重金属 Cd、Cr 和 As 与养殖环境沉积物中重金属的污染密切相关。

(2)对长三角地区养殖池塘 13 种水产品进行风险评价结果表明,安全性评价中所有水产品对重金属 Cd 的富集能力最强;总的健康风险评价中,有接近一半样点的风险主要由重金属 Cu 和 Cd 所贡献,存在 Cd 摄入的安全性风险。

参考文献:

- [1] Bocher P, Caurant F, Miramand P, et al. Influence of the diet on the bioaccumulation of heavy metals in zooplankton-eating petrels at Kerguelen archipelago, Southern Indian Ocean[J]. *Polar Biology*, 2003, 26(12):759-767.
- [2] 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.

SUN Wei-ping, LIU Xiao-ya, PAN Jian-ming, et al. Levels of heavy

metal in commercial fish species from the near-shore of Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang University(Science Edition)*, 2012, 39(3):338-344.

- [3] 夏泽惠, 王兴明, 楼巧婷, 等. 合肥市场 6 种淡水鱼体内 Cu、Pb 和 Cd 的分布及食用风险[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(3):311-315.
- XIA Ze-hui, WANG Xing-ming, LOU Qiao-ting, et al. Distribution and consumption risk assessment of Cu, Pb and Cd in six freshwater fishes from the main market in Hefei[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(3):311-315.
- [4] 蔡深文, 倪朝辉, 李云峰, 等. 长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区鱼体肌肉重金属残留调查与分析[J]. *中国水产科学*, 2011, 18(6):1351-1357.
- CAI Shen-wen, NI Chao-hui, LI Yun-feng, et al. Heavy metal residues in the muscle of fishes from the rare and endemic fishes national nature reserve in the upper reaches of the Yangtze River, China[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(6):1351-1357.
- [5] 余刚, 黄俊, 张彭义, 等. 持久性有机污染物:倍受关注的全球性环境问题[J]. *环境保护*, 2001(4):37-39.
- YU Gang, HUANG Jun, ZHANG Peng-yi, et al. Persistent organic pollutants: One of the important global environmental problems[J]. *Environmental Protection*, 2001(4):37-39.
- [6] Luckey T D, Venugopal B. Metal toxicity in mammals. Volume 1. Physiology and chemical basis for metal toxicity[J]. *Biochemical Society Transactions*, 1977, 6(4):819-820.
- [7] 张东杰. 重金属危害与食品安全[M]. 北京:人民卫生出版社, 2011.
- ZHANG Dong-jie. Heavy metal hazard and food safety[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2011.
- [8] 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.
- [9] 肖明松, 王松, 鲍方印, 等. 淮河蚌埠段采样点鱼虾贝类重金属的

- 富集[J]. 环境科学研究, 2011, 24(8):942-948.
- XIAO Ming-song, WANG Song, BAO Fang-yin, et al. Enrichment of heavy metals in economic aquatic animals in Huaihe River segment of Bengbu sampling points[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(8):942-948.
- [10] 黄长江, 赵 珍. 湛江港海域海产品中重金属残留及评价[J]. 汕头大学学报(自然科学版), 2007, 22(1):30-36.
- HUANG Chang-jiang, ZHAO Zhen. Assessment on contents of heavy metals in seafoods from Zhanjiang Harbor[J]. *Journal of Shantou University(Natural Science)*, 2007, 22(1):30-36.
- [11] 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-qí, ZANG Li-jie. Investigation of heavy metal contamination in four kinds of fishes from the different farmer markets in Beijing[J]. *Environmental Sciences*, 2011, 32(7):2062-2068.
- [12] 谢文平, 朱新平, 郑光明, 等. 广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(12):4663-4670.
- XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, et al. Residues and health risk assessment of HCHs, DDTs and heavy metals in water and Tilapias from fish ponds of Guangdong[J]. *Environmental Sciences*, 2014, 35(12):4663-4670.
- [13] 王华全, 沈伊亮. 湖北出口淡水小龙虾重金属污染监测与分析[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(9):2140-2142.
- WANG Hua-quan, SHEN Yi-liang. Monitoring and analysis of heavy metal pollution of Hubei exported cawfish[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(9):2140-2142.
- [14] 农业部渔业渔政管理局. 2015 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- Fisheries and Fishery Administration of the Ministry of Agriculture. 2015 China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.
- [15] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5009.13—2003 食品中铜的测定[S]. 北京: 中国质检出版社, 2003.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB/T 5009.13—2003 Determination of copper in food[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2003.
- [16] 中华人民共和国卫生部. GB/5009.12—2010, 食品中铅的测定[S]. 北京: 中国质检出版社, 2010.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB/5009.12—2010, Determination of lead in food[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2010.
- [17] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5009.15—2003 食品中镉的测定[S]. 北京: 中国质检出版社, 2003.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB/T 5009.15—2003 Determination of cadmium in food[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2003.
- [18] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5009.123—2003 食品中铬的测定[S]. 北京: 中国质检出版社, 2003.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB/T 5009.123—2003 Determination of chromium in food[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2003.
- [19] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5009.11—2003 食品中总砷及无机砷的测定[S]. 北京: 中国质检出版社, 2003.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB/T 5009. 11—2003 Determination of total arsenic and inorganic arsenic in foods[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2003.
- [20] 中华人民共和国农业部. SC/T9102.3—2007 渔业生态环境监测规范第 3 部分: 淡水[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. SC/T 9102.3—2007 Code for the monitoring of fishery ecological environment Part 3: Freshwater[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] U. S. EPA. Available information on assessment exposure from pesticides in food: A users guide[R]. U. S. Environmental Protection Agency Office of Pesticide Programs, 2000.
- [25] Wang X, Sato T, Xing B, 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(1/2/3):28-37.
- [26] Qiu Y W, Lin D, Liu J Q, et al. Bioaccumulation of trace metals in farmed fish from South China and potential risk assessment[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2011, 74(3):284-293.
- [27] 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.
- [28] 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 the drinking water source in Kaifeng City[D]. Kaifeng: Henan University, 2011.
- [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.
- [30] 姚清华, 颜孙安, 林 虬, 等. 水产品重金属富集规律与风险评估[J].

- 福建农业学报, 2014, 29(5):498-504.
- YAO Qing-hua, YAN Sun-an, LIN Qiu, et al. Enrichment regularity and risk assessment of heavy metal in aquatic products[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 29(5):498-504.
- [31] 苏秋克, 祁士华, 吴辰熙, 等. 洪湖特色水产品对湖水及沉积物中有机氯农药的积累模式[J]. 地质科技情报, 2007, 26(4):85-90.
- SU Qiu-ke, QI Shi-hua, WU Chen-xi, et al. Organism productions accumulating model of organochlorine pesticides in water and sediments from Honghu Lake, Hubei Province, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(4):85-90.
- [32] 赵红霞, 周 敏, 詹 勇, 等. 重金属对水生动物毒性的研究进展[J]. 中国兽医杂志, 2004, 40(4):39-41.
- ZHAO Hong-xia, ZHOU Min, ZHAN Yong, et al. Research progress on the toxicity of heavy metals to aquatic animals[J]. *Chinese Journal of Veterinary Medicine*, 2004, 40(4):39-41.
- [33] Mckim J M. Physiological and biological mechanisms that regulate the accumulation and toxicity of environmental chemicals in fish[J]. *Marine Environmental Research*, 1994, 16:56-63.
- [34] Sheng P X, Ting Y P, Chen J P, et al. Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel by marine algal biomass: Characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2004, 275(1):131-141.
- [35] Davis T A, Volesky B, Mucci A. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae[J]. *Water Research*, 2003, 37(18):4311-4330.
- [36] 刘 丽, 邓时铭, 黄向荣, 等. 浅谈水产动物中的重金属污染[J]. 河北渔业, 2011(7):51-54.
- LIU Li, DENG Shi-ming, HUANG Xiang-rong, et al. Of heavy metal pollution in aquatic animal[J]. *Journal of Hebei Fisheries*, 2011(7):51-54.
- [37] 沈益绿, 马继臻, 平仙隐, 等. 褶牡蛎对重金属的生物富集动力学特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4):783-788.
- SHEN Ang-lv, MA Ji-zhen, PING Xian-yin, et al. The kinetic characteristics of bioconcentration of heavy metals in *Crassostrea plicatula*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4):783-788.
- [38] 陆超华. 南海北部海域经济水产品的重金属污染及其评价[J]. 海洋环境科学, 1995, 14(2):12-19.
- LU Chao-hua. Pollution and evaluation of heavy metals in the seafoods—from the Northern Area of the South China Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 1995, 14(2):12-19.
- [39] 于沛芬. 松花江水系鱼体中痕量重金属锌、铜、铅、镉的监测[J]. 水产学杂志, 1994, 7(2):96-97.
- YU Pei-fen. Monitoring of trace heavy metal Zn, Cu, Pb and Cd in fish of Songhua River[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 1994, 7(2):96-97.
- [40] 乔胜英, 蒋敬业, 向 武, 等. 武汉市湖泊中重金属污染状况[J]. 水资源保护, 2007, 23(1):45-48.
- QIAO Sheng-ying, JIANG Jing-ye, XIANG Wu, et al. Heavy metals pollution in lakes of Wuhan City[J]. *Water Resources Protection*, 2007, 23(1):45-48.