

3 种养殖淡水鱼重金属含量测定及健康风险评价

罗 钦, 吴建衍, 潘 葳*

(福建省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所/福建省农产品质量安全重点实验室, 福州 350003)

摘 要: **目的** 了解福建省主要养殖淡水鱼中重金属含量水平及进行鱼类食用安全性评价。**方法** 选择草鱼、罗非鱼和鳊鱼为研究对象, 测定和分析其重金属含量, 运用单因子污染指数法、综合污染指数法和目标危险系数法进行污染评价。**结果** 3 种养殖淡水鱼肌肉中重金属含量最高的是 Cr, 5 种重金属含量均未出现超标现象。单项污染指数表明, 部分草鱼、罗非鱼和鳊鱼均受到 Cd、Cr、Pb、As 的中轻度污染, 但 3 种淡水鱼的 Hg 含量均处于正常背景水平; 综合污染指数表明, 3 种淡水鱼肌肉重金属综合污染均处于正常背景水平, 其卫生质量均正常。**结论** 成人食用该批次生产的草鱼、罗非鱼和鳊鱼不存在潜在健康风险, 但是局部地区的儿童食用该批次生产的 3 种淡水鱼存在重金属铬的潜在健康风险。建议相关部门今后应继续保持高压监管, 并对出现的个别重金属的污染风险进行更精准的管控。

关键词: 淡水鱼; 重金属污染; 健康风险评价

Determination of heavy metal content of 3 kinds of cultured freshwater fish and health risk assessment

LUO Qin, WU Jian-Yan, PAN Wei*

(Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology Research/Fujian Key Laboratory of Agro-products Quality & Safety, Fuzhou 350003, China)

ABSTRACT: Objective To understand the content of heavy metals in main cultured freshwater fish in Fujian province and evaluate the food safety of fish. **Methods** *Ctenopharyngodon idellus*, *Oreochromis mossambicus* and *eel* were selected as the research objects to determine and analyze their heavy metal content, and pollution evaluation was conducted by using single factor pollution index method, comprehensive pollution index method and target risk coefficient method. **Results** The highest content of heavy metals was Cr the in the muscles of the 3 cultured freshwater fish, and the content of the 5 heavy metals did not exceed the standard. The single pollution index showed that some *Ctenopharyngodon idellus*, *Oreochromis mossambicus* and *eel* were mildly polluted by Cd, Cr, Pb and As, but Hg content of the 3 freshwater fish were all at the normal background level. The results of the comprehensive pollution of heavy metals in muscle of the 3 freshwater fish were all in the normal background level and the sanitary quality was normal. **Conclusion** There is no potential health risk associated with adult consumption of *Ctenopharyngodon idellus*, *Oreochromis mossambicus* and *eel* from the batch, but there is a potential health risk

基金项目: 福建省科技厅省属公益类科研专项(2019R1022-7)、福建省农业科学院创新团队项目(STIT2017-1-12)、福建省农业科学院科技服务团项目(KJFW19)

Fund: Supported by the Public Welfare Project of Fujian Province (2019R1022-7), Innovation Team Project of Fujian Academy of Agricultural Sciences (STIT2017-1-12), and Technology Service Team Project of Fujian Academy of Agricultural Sciences (KJFW19)

***通讯作者:** 潘葳, 研究员, 主要研究方向为农产品质量安全风险评估。E-mail: 870993292@qq.com

***Corresponding author:** PAN Wei, Professor, Institute of Quality Standards and Testing Technology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China. E-mail: 870993292@qq.com

associated with the heavy metal Cr in the consumption of 3 freshwater fish from the batch by children in local areas. It is suggested that relevant departments should continue to maintain high pressure supervision in the future and carry out more precise control over the pollution risk of individual heavy metals.

KEY WORDS: freshwater fish; heavy metal pollution; health risk assessment

1 引言

福建省是我国重要的水产品生产大省, 根据《中国渔业统计年鉴》^[1]的数据可知, 福建省的水产品产量逐年上升而且连续多年位居全国第 3, 其中淡水养殖面积达 10.25 万公顷, 淡水鱼养殖产量逐年上升, 其中主要养殖淡水鱼(产量占比大于 10%)为草鱼、罗非鱼和鳊鲢, 这 3 种淡水鱼的产量从 2013 年的 36.91 万吨提高到 2016 年的 43.26 万吨, 这 3 种淡水鱼的总产量从 2013 年至 2016 年连续占福建省养殖淡水鱼产量的 50%以上, 2013 年至 2016 年间养殖草鱼产量占养殖淡水鱼产量的比例为 23.69%~24.61%、罗非鱼的比例为 17.48%~19.03%和鳊鲢的比例为 11.24%~12.17%。近年来, 工业污染物排放使得大量重金属残留于土壤、水域, 全国各水域、海域普遍受到不同程度的重金属污染, 其中福建、浙江等海域地质污染率达 80%^[2], 以铅、镉、铬、汞等为代表的重金属作为一类典型的毒性强、易传递、不易降解的持久性环境污染物, 其通过食物链在各类水产品中富集造成较大的健康安全风险。针对福建省水产养殖环境恶化、养殖资源过度利用、药物不规范使用和违法违规药物使用等问题, 应农业部 2011 年全面规划和推进全国农产品质量安全风险评估体系建设的要求, 近几年福建省逐渐开展了水产品中重金属污染方面的质量安全风险评估。刘海新等^[3]研究表明 2017 年闽南沿海养殖牡蛎的食用健康风险在可接受范围内, 但镉、铅、甲基汞等应是闽南养殖牡蛎食用健康风险监控的重点。马婧等^[4]对 2016 年厦门市售淡水鱼鱼肉中重金属进行检测, 受检鱼类样品的重金属 Cd 的含量均未超标, 但鱼类样品中草鲮鱼和鳊鱼的重金属 Pb 含量超过我国的国家标准。姚清华等^[5]总结分析 2014 年我国鱼、虾、贝、藻等水产品对不同重金属的富集能力、富集部位差异, 介绍如何从污染源、毒性效应、暴露评估、风险描述、风险管理等方面进行水产品重金属风险评估。

近几年, 随着福建省质检体系建设日趋完善, 福建省

的水产品质量安全水平保持稳定, 但是福建省水产品质量安全事件仍然偶有发生、安全风险调控基础仍较薄弱、质量安全风险评估较鲜见, 水产品质量安全风险评估的品种、范围和危害因子亟待扩大和完善, 鲜有针对福建省全地区主要养殖淡水鱼质量安全风险评估方面的研究。

本研究拟通过对福建省各地主养区的草鱼、罗非鱼、鳊鱼肌肉中 Pb、Cd、Cr、Hg 和 As 等 5 种重金属的含量进行检测, 分析鱼类重金属含量间的相关性, 并采用目标危险系数法(target hazard quotients, THQ)评估摄食鱼类的重金属健康风险, 了解鱼类重金属污染现状, 旨在为该区域淡水鱼健康养殖及其产业可持续发展提供科技支撑, 同时为消费者食用福建省养殖鱼类提供安全性参考数据。

2 材料与方法

2.1 样品的采集

鱼类样品均取自福建省淡水鱼养殖场, 从龙岩、南平、三明等闽中西北地区的 33 家养殖场取草鱼样品 33 份, 从漳州、莆田、龙岩等闽中西南地区地区的 13 家养殖场取罗非鱼样品 13 份, 从莆田、三明、宁德、南平等闽中东北地区的 11 家养殖场取鳊鱼样品 11 份, 每份样品均取 3 尾鱼, 采样信息详见表 1。鱼类样品装入聚乙烯自封袋, 放入冷藏箱运回实验室, 置-20℃冷冻保存。

2.2 试剂与仪器

DS-1 组织粉碎机(杭州三永德仪器仪表有限公司); AL-204 分析天平(瑞士梅特勒—托利多公司); PE-900 原子吸收分光光度计(美国 PerkinElmer 公司); AFS-9700 原子荧光光度计(北京海光仪器有限公司)。

镉、铬、铅、汞和砷标准品(光谱纯, 1000 mg/L, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 硝酸、高氯酸(优级纯, 西陇化工股份有限公司)。

表 1 3 种淡水鱼采样信息
Table 1 Sampling information of 3 kinds of fresh water fish

种名	养殖场面积	养殖模式	体长范围/cm	体重范围/kg
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	>50 亩	池塘	45.63~62.62	12.63~15.70
罗非鱼 <i>Oreochromis mossambicus</i>	>30 亩	池塘	28.75~37.25	0.42~0.84
鳊鱼 eel	>20 亩	精养池	58.66~72.17	0.33~0.51

2.3 样品处理及重金属测定

鱼类样品用去离子水洗净、吸水纸擦干,去除内脏器官混合物(肾脏、肝脏和清理粪便后的肠道),剔除鱼鳞、鱼刺,取出肉和皮,采用组织粉碎机将每 1 尾鱼做成 1 个肌肉样品(含皮),置于聚乙烯袋中密封和-20 °C 冷冻保存。肌肉样品中 Cd、Cr、Pb、Hg、As 的含量按照 GB 5009.15-2014《食品安全国家标准 食品中镉的测定》^[6]、GB 5009.123-2014《食品安全国家标准 食品中铬的测定》^[7]、GB 5009.12-2017《食品安全国家标准 食品中铅的测定》^[8]、GB 5009.17-2014《食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定》^[9]、GB 5009.11-2014《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》^[10]进行测定。若肌肉样品中 Hg、As 的含量超过标准限量值,则对超标样品再进行甲基汞和无机砷的测定。每份肌肉样品重复测定 3 次。

2.4 重金属污染评价

本研究运用单因子污染指数法和综合污染指数法对鱼体内重金属污染状况进行评价^[11],公式如下:

单因子污染指数法:

$$P = \frac{C}{S}$$

式中, P_i 为重金属的单项污染指数; C_i 为重金属 i 含量实测浓度, mg/kg; S_i 为重金属 i 含量标准值, mg/kg。Cr、Pb、As、Cd、Hg 的标准限量值分别为 2、0.5、0.1、0.1、0.5 mg/kg^[12]。当 $P_i < 0.2$ 时, 为正常背景水平; $0.2 \leq P_i < 0.6$ 时, 为轻度污染; $0.6 \leq P_i < 1.0$ 时, 为中度污染; $P_i \geq 1.0$ 时, 为重度污染。

综合污染指数法:

$$P = \sqrt{\frac{(P) + (P)}{2}}$$

式中, $P_{综}$ 为鱼类重金属综合污染指数; P_{ave} 为鱼类各单项污染指数 P_i 的平均值; P_{max} 为鱼类各单项污染指数中最大值。当 $P_{综} \leq 1.0$ 时, 为正常背景水平; $1.0 < P_{综} \leq 2.0$ 时, 为轻度污染; $2.0 < P_{综} \leq 3.0$ 时, 为中度污染; $P_{综} > 3.0$ 时, 为重度污染。

2.5 重金属健康风险评价

本研究采用目标危害系数法^[13], 评估人体通过食物途径摄入重金属的健康风险。

单一重金属危害系数(THQ)计算公式:

$$THQ = \frac{E_F \times E_D \times F_{IR} \times C}{R_{FD} \times W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3}$$

多种重金属复合危害系数(TTHQ)计算公式:

$$TTHQ = \sum THQ$$

式中, E_F 为人群暴露频率, d/a, 一般设定为 365 d/a^[14];

E_D 为暴露时间, a, 通常等于人均寿命, 一般取 70 a^[15];

F_{IR} 为食物摄入率, g/(person·d), 成人和幼儿平均每人每天摄入水产品分别为 28.6 g^[16]和 25.3 g^[17];

C 为食物中重金属含量水平, mg/kg;

R_{FD} 为口服参考剂量, mg/(kg·人), Cd、Cr、Pb、Hg、As 的 R_{FD} 分别 0.0010、1.5000、0.0040、0.0005、0.0003 mg/kg^[18];

W_{AB} 为人体平均体重, kg, 成人平均体重取 56.7 kg, 3~6 岁儿童人均体重取 16.1 kg^[19];

T_A 为非致癌性暴露平均时间, 取 25550 d^[20]。

当 THQ 值 < 1 时, 则认定暴露人群无明显健康风险; 当 THQ 值 ≥ 1 时, 则认定暴露人群存在健康风险。

2.6 数据统计与分析

应用 Excel2010 软件处理数据, SPSS17.0 进行 Pearson 相关性分析。

3 结果与分析

3.1 3 种淡水鱼肌肉中重金属含量特征

在所有检测样品中, Cd 的检出率为 61.40%, Cr、Pb、As 和 Hg 的检出率均为 100.00%, 测定结果见表 2。整体上看 3 种淡水鱼肌肉中 Cd、Cr、Pb、Hg、As 含量的范围分别为 ND~0.080 mg/kg(小于标准限量值 0.1 mg/kg)、0.016~0.964 mg/kg(小于标准限量值 2 mg/kg)、0.008~0.471 mg/kg(小于标准限量值 0.5 mg/kg)、0.001~0.051 mg/kg(小于标准限量值 0.1 mg/kg)、ND~0.079 mg/kg(小于标准限量值 0.5 mg/kg), 故超标率全都为 0.00%。5 种重金属含量均值大小顺序为 Cr > Pb > As > Hg > Cd。

3.2 3 种养殖淡水鱼肌肉重金属污染评价

3 种养殖淡水鱼肌肉重金属污染评价结果见表 3。单项污染指数表明, 部分草鱼受到 Cd、Cr、Pb、As 的轻度污染, 部分草鱼还受到 Cr、Pb 的中度污染; 部分罗非鱼受到 Cr、Pb、As 的轻度污染, 个别罗非鱼还受到 Cr、Pb、As 的中度污染; 个别鳊鱼受到 Cd、Cr、Pb、As 的轻度污染, 个别鳊鱼还受到 Cd、Cr、Pb、As 的中度污染; 3 种淡水鱼的 Hg 均处于正常背景水平, 5 种重金属也均未出现重度污染的现象。综合污染指数表明, 草鱼、罗非鱼、鳊鱼的综合污染指数值范围分别为 0.04~0.59、0.09~0.58、0.16~0.72, 其数值均小于 1.0, 说明 3 种淡水鱼肌肉重金属综合污染均处于正常背景水平, 其卫生质量均正常。

3.3 3 种淡水鱼食用健康风险评价

从表 4 可知, 对于成人, 草鱼、罗非鱼和鳊鱼的单一重

表 2 3 种淡水鱼肌肉中重金属含量水平(mg/kg, 湿重, n=3)
Table 2 Heavy metal contents level of muscle in 3 kinds of fresh water fish (mg/kg, wet weight, n=3)

含量	镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	汞 Hg	砷 As
平均值 _{草鱼}	0.002±0.004	0.357±0.267	0.092±0.111	0.002±0.002	0.004±0.006
平均值 _{罗非鱼}	0.004±0.003	0.330±0.247	0.102±0.055	0.002±0.002	0.030±0.024
平均值 _{鳊鱼}	0.030±0.026	0.215±0.220	0.110±0.120	0.040±0.024	0.022±0.021
平均值 _总	0.008	0.324	0.098	0.010	0.014
范围	ND~0.080	0.016~0.964	0.008~0.471	0.001~0.119	ND~0.079
超标率	0	0	0	0	0

注:“ND”表示未检出,平均值计算时,“ND”数据作为 0 参与计算。

表 3 3 种淡水鱼肌肉中重金属污染指数
Table 3 Heavy metal pollution indexes of muscle in three kinds of fresh water fish

种名	P _{Cd}				P _{Cr}				P _{Pb}				P _{Hg}				P _{As}				综合评价	
	范围	0.0~0.2 个数	0.2~0.6 个数	0.6~1.0 个数	范围	0.0~0.2 个数	0.2~0.6 个数	0.6~1.0 个数	范围	0.0~0.2 个数	0.2~0.6 个数	0.6~1.0 个数	范围	0.0~0.2 个数	范围	0.0~0.2 个数	0.2~0.6 个数	0.6~1.0 个数	P _{ave}	P _{max}		P _总
草鱼	0.00 ~ 0.21	32	1	/	0.00 ~ 0.47	20	13		0.02 ~ 0.87	25	5	3	0.00 ~ 0.01	33	0.00 ~ 0.22	32	1	/	0.02 ~ 0.29	0.085 ~ 0.87	0.04 ~ 0.59	正常
罗非鱼	0.00 ~ 0.08	13	/	/	0.04 ~ 0.44	9	4		0.04 ~ 0.41	7	6	/	0.00 ~ 0.02	13	0.07 ~ 0.78	8	3	2	0.07 ~ 0.25	0.10 ~ 0.78	0.09 ~ 0.58	正常
鳊鱼	0.03 ~ 0.80	3	5	3	0.02 ~ 0.43	9	2	1	0.06 ~ 0.91	5	5	1	0.03 ~ 0.16	11	0.10 ~ 0.76	5	4	2	0.12~0.45	0.20 ~ 0.91	0.16 ~ 0.72	正常

表 4 3 种淡水鱼肌肉中金属健康风险评估
Table 4 Health risk assessment of heavy metals of muscle in three kinds of fresh water fish

人群	种 名	单一重金属危害系数 THQ					复合重金属危害系数 TTHQ
		镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	汞 Hg	砷 As	
成人	草鱼	0.0000~0.0116	0.0137~0.4841	0.0058~0.2194	0.0001~0.0065	0.0000~0.0123	0.0391~0.5811
	罗非鱼	0.0000~0.0049	0.0473~0.4863	0.0114~0.1053	0.0003~0.0040	0.0036~0.0395	0.0743~0.5881
	鳊鱼	0.0015~0.0404	0.0195~0.4339	0.0160~0.2376	0.0068~0.0414	0.0049~0.0383	0.0876~0.6242
			1.1454				
			1.2777				
儿童	草鱼	0.0000~0.0360	0.0414~1.4557	0.0128~0.6936	0.0003~0.0204	0.0000~0.0383	0.1429~1.7371
			1.4413				
			1.4557				
			1.3226				
			1.2200				
罗非鱼		0.0000~0.0132	0.1436~1.4524	0.0372~0.3281	0.0009~0.0126	0.0113~0.1240	0.2314~1.8322
			1.0066				
鳊鱼 eel		0.0054~0.1251	1.3409 0.0608~1.3409	0.525~0.7401	0.0212~0.1291	0.0181~0.1193	0.2728~1.8772

金属危害系数值均小于 1, 3 种淡水鱼的复合重金属危害系数值也均小于 1, 表明当地成年居民长期摄食这 3 种鱼类不会造成潜在重金属健康风险。但是, 对于儿童, 有 6 份草鱼样品的单一重金属危害系数值大于 1, 有 2 份罗非鱼样品的单一重金属危害系数值大于 1, 有 1 份鳊鱼样品的单一重金属危害系数值大于 1, 而且出现危害的重金属都是铬元素, 其复合重金属危害系数值也均出现大于 1, 表明局部地区的儿童若长期摄食这 3 种鱼类会存在重金属铬的潜在健康风险。

4 讨论与结论

3 种养殖淡水鱼中 5 种重金属含量总体来看, Cr 明显高于其他元素, 这与匡荟芬等^[21]和 Sivaperumal 等^[22]研究结果一致, 主要是由于 Cr 是生物体本身必需微量元素, 而 Pb、Cd、Hg、As 为非必需元素, 而生命必需元素比非必需元素更易于被生物主动吸收^[23]。

3 种养殖淡水鱼重金属单因子污染评价结果可知, 部分草鱼、罗非鱼和鳊鱼均受到 Cd、Cr、Pb、As 中轻度的污染, 说明福建省 3 种淡水鱼存在重金属污染的风险, 研究表明水生生物对重金属的富集和累计超过其承受能力, 会给它们生殖、发育等方面带来毒性危害^[24]。但是, 综合污染指数表明 3 种淡水鱼均处于正常背景水平, 其卫生质量正常, 说明福建省当地监管部门对生态环境中重金属的管控取得很好效果, 建议后期继续保持高压监管, 并对出现的部分重金属的污染风险进行更精准的管控。

本研究对 3 种淡水鱼肌肉中重金属含量进行健康风险评估, 结果表明对于成人, 3 种淡水鱼的单一重金属危害系数值均小于 1, 说明食用该批次生产的草鱼、罗非鱼和鳊鱼不存在潜在健康风险。但是, 对于儿童, 共有 9 份淡水鱼样品的单一重金属 Cr 的危害系数值大于 1, 说明局部地区的儿童若长期摄食这 3 种鱼类会存在重金属铬的潜在健康风险。同时成人的单一重金属危害系数和复合重金属危害系数均小于儿童, 且儿童的复合重金属危害系数约是成人的 3 倍, 这与杨涛^[25]的研究结果相似, 说明儿童对重金属的敏感度要高于成人, 更容易受到重金属的危害, 因此应该对儿童食用的鱼类产品实施更为严格的检测与管控。

综上所述, 福建省 3 种养殖淡水鱼肌肉中重金属含量最高的是 Cr, 5 种重金属含量均未出现超标现象, 部分草鱼、罗非鱼、鳊鱼受到 Cd、Cr、Pb、As 的中轻度污染, 但 3 种淡水鱼未受到这 5 种重金属的综合污染, 成人食用该批次生产的草鱼、罗非鱼和鳊鱼不存在潜在健康风险, 但是局部地区的儿童食用该批次生产的 3 种淡水鱼存在重金属铬的潜在健康风险。建议相关部门今后应继续保持高压监管, 并对出现的个别重金属的污染风险进行更

精准的管控。

参考文献

- [1] 中国渔业统计年鉴[Z]. China fishery statistical yearbook [Z].
- [2] 王伟, 刘国庆. 水产品中重金属镉污染安全评估[J]. 现代农业科技, 2011, (11): 326–327.
Wang W, Liu GQ. Security assessment of metal cadmium pollution in aquatic products [J]. Mod Agric Sci Technol, 2011, (11): 326–327.
- [3] 刘新海, 余颖, 席英玉, 等. 福建闽南沿海养殖牡蛎食用健康风险评估[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(6): 921–932.
Liu XH, Yu Y, Xi YY, et al. Health risk assessment of the cultured oyster along the southern coast of Fujian province in China [J]. J Shanghai Ocean Univ, 2017, 26(6): 921–932.
- [4] 马婧, 孙鲁闽, 张佳荣. 厦门市售淡水鱼铅、镉含量及食用风险评估初探[J]. 渔业研究, 2016, 38(4): 302–309.
Ma Q, Sun LM, Zhang GR. Preliminary study of lead and cadmium in ten kinds of freshwater fish sold in Xiamen markets and their edible risk assessment [J]. J Fujian Fisher, 2016, 38(4): 302–309.
- [5] 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 QH, Yan SA, Lin Q, et al. Enrichment regularity and risk assessment of heavy metal in aquatic products [J]. Fujian J Agric Sci, 2014, 29(5): 498–504.
- [6] GB 5009.15-2014 食品安全国家标准 食品中镉的测定[S].
GB 5009.15-2014 National food safety standard-Determination of cadmium in foods [S].
- [7] GB 5009.123-2014 食品安全国家标准 食品中铬的测定[S].
GB 5009.123-2014 National food safety standard-Determination of chromium in foods [S].
- [8] GB 5009.12-2017 食品安全国家标准 食品中铅的测定[S].
GB 5009.12-2017 National food safety standard-Determination of lead in foods [S].
- [9] GB 5009.17-2014 食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定[S].
GB 5009.17-2014 National food safety standard-Determination of total mercury and organic-mercury in foods [S].
- [10] GB 5009.11-2014 食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定[S].
GB 5009.11-2014 National food safety standard-Determination of total arsenic and abio-arsenic in food [S].
- [11] 刘金苓, 李华丽, 唐以杰, 等. 珠海淇澳岛红树林湿地经济鱼类的重金属污染现状及对人体健康风险分析[J]. 生态科学, 2017, 36(5): 186–195.
Liu JL, Li LH, Tang YJ, et al. Heavy metal pollution and risk analysis to human in economic fish of Mangrove wetland in Qi'ao island, Zhuhai [J]. Ecol Sci, 2017, 36(5): 186–195.
- [12] GB 2762-2017 食品安全国家标准食品中污染物限量[S].
GB 2762-2017 National food safety standard-Maximum levels of contaminants in food [S].
- [13] Liang G, Gong WW, Li BR, et al. Analysis of heavy metals in foodstuffs and an assessment of the health risks to the general public via consumption in Beijing, China [J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(6): 1–10.
- [14] US EPA. Risk based concentration table [R]. Washington DC: United

- States Environment Protection Agency, 2000.
- [15] Bennett D, Kastenber WE, Mckone TE. A multimedia, multiple pathway risk assessment of atrazine: The impact of age differentiated exposure including joint uncertainty and variability [J]. *Reliab Eng System Saf*, 1999, 63(2): 185–198.
- [16] 苏畅, 王志宏, 贾小芳, 等. 2015 年中国十五省(区、市)18-59 岁居民水产品类食物摄入状况分析[J]. *营养学报*, 2018, 40(1): 23–26.
- Su C, Wang ZH, Jia XF, *et al*. An analysis on marine food consumption among chinese adults aged 18 to 59 years old in 15 provinces in 2015 [J]. *Acta Nutr Sin*, 2018, 40(1): 23–26.
- [17] 李子一, 张雅蓉, 王金子, 等. 中国 3–12 岁儿童膳食种类及摄入量调查[J]. *中国食物与营养*, 2014, 20(9): 78–82.
- Li ZY, Zhang YR, Wang JZ, *et al*. Investigation on dietary types and intakes of children aged 3 to 12 in China [J]. *Food Nutr China*, 2014, 20(9): 78–82.
- [18] 张小磊, 王晶晶, 安春华, 等. 郑州沿黄地区养殖鱼类中重金属污染与健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(2): 350–355.
- Zhang XL, Wang JJ, An CH, *et al*. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in cultured fish species along the Yellow River in Zhengzhou [J]. *Ecol Environ Sci*, 2018, 27(2): 350–355.
- [19] 巴义名, 闫保庆, 王志强. 2000 年贵州省国民体质身体形态的现状特征和变化规律[J]. *北京体育大学学报*, 2002, (2): 218–221.
- Ba YM, Yan BQ, Wang ZQ. Characteristic of people's constitution and body shape in Guizhou province of China and its law of change [J]. *J Beijing Univ Phys Ed*, 2002, (2): 218–221.
- [20] 高培培, 肖冰, 刘文菊, 等. 莲藕中重金属含量特征及其健康风险评价[J]. *环境化学*, 2020, 39(2): 362–370.
- Gao PP, Xiao B, Liu WJ, *et al*. Analysis and health risk assessment of heavy metal in lotus root [J]. *Environ Chem*, 2020, 39(2): 362–370.
- [21] 匡芸芬, 胡春华, 孙丽丽, 等. 鄱阳湖鱼类重金属积累特征及其健康风险评价[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2018, 42(6): 578–583.
- Kuang HF, Hu CH, Sun LL, *et al*. Accumulation characteristics and health risk assessment of heavy metals in fish species from Poyang lake [J]. *J Nanchang Univ (Nat Sci)*, 2018, 42(6): 578–583.
- [22] Sivaperumal P, Sankar TV, Nair PGV. Heavy metal concentrations in fish, shellfish and fish products from internal markets of India vis-a-vis international standards [J]. *Food Chem*, 2006, 102(3): 612–620.
- [23] 蔡深文, 倪朝辉, 刘斌, 等. 赤水河主要经济鱼类重金属含量及风险评价[J]. *淡水渔业*, 2017, 47(3): 105–112.
- Cai SW, Ni ZH, Liu B, *et al*. Concentration and risk assessment of heavy metals in the main economic fishes from Chishui River [J]. *Freshwater Fisher*, 2017, 47(3): 105–112.
- [24] 陈中智, 朱琳, 姚琨, 等. Ca^{2+} 与 Pb^{2+} 相互作用对斑马鱼胚胎毒性效应的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(4): 1205–1209.
- Chen ZZ, Zhu L, Yao K, *et al*. Interaction between Calcium and lead affects the toxicity to embryo of Zebrafish (*Daniorerio*) [J]. *Environ Sci*, 2009, 30(4): 1205–1209.
- [25] 杨涛. 赣南钨矿区农田土壤重金属污染特征及风险评价[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
- Yang T. Characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil in tungsten ore area of southern Jiangxi province [J]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



罗 钦, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全与风险评估。
E-mail: 33044390@qq.com

潘 葳, 研究员, 主要研究方向为农产品质量安全风险评估。
E-mail: 870993292@qq.com