

小龙虾(克氏原螯虾)中铜含量富集现状及其环境来源分析

曾小雨, 申长鑫, 赵飞越, 李 岩, 王 桥*, 刘 言, 宫智勇

(武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023)

摘 要: **目的** 调查小龙虾及其养殖环境中铜的含量, 探讨小龙虾中铜元素的富集现状及其可能的环境来源。**方法** 在我国主要的小龙虾养殖产地采集小龙虾及其养殖环境样本(养殖用水、池塘底泥), 采用微波消解法进行消解, 电感耦合等离子体质谱法进行样品中铜含量的测定。**结果** 小龙虾中铜含量均值为 10.22 mg/kg, 积累量按照头壳、背壳、肝胰腺、虾肉依次递减, 其占完整小龙虾中铜积累量比例分别为 17.74%、15.97%、8.75%、5.11%。小龙虾中铜含量与其养殖池塘底泥中的铜含量具有正相关性, 相关系数为 0.39。A 省小龙虾中铜含量显著高于其他地区($P<0.05$)。**结论** 我国小龙虾及其养殖水体中铜含量均在国家规定的标准限量以内, 但部分地区小龙虾养殖池塘底泥中的铜含量超出国家标准, 池塘底泥是小龙虾中铜重要的环境来源, 可能造成潜在风险。因此, 仍需要加强对小龙虾及其养殖环境中铜含量的监管。

关键词: 小龙虾; 铜; 富集现状; 风险评估; 来源分析

Copper enrichment status in crayfish (*Procambarus clarkii*) and its environmental sources analysis

ZENG Xiao-Yu, SHEN Chang-Xin, ZHAO Fei-Yue, LI Yan, WANG Qiao*,
LIU Yan, GONG Zhi-Yong

(Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the copper content in *Procambarus clarkii* and its culture environment, and explore the exposure status and possible environmental sources of copper in *Procambarus clarkii*. **Methods** *Procambarus clarkii* and their culture environment samples (water for farming, mud from the bottom of a pond) were collected from major *Procambarus clarkii* farms in China, digested by microwave digestion method, and the content of copper in the samples was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry. **Results** The average content of copper in *Procambarus clarkii* was 10.22 mg/kg, and the accumulation of copper decreased according to the head shell, back shell, hepatopancreas and meat, and their proportions in whole *Procambarus clarkii* were 17.74%, 15.97%, 8.75% and 5.11%, respectively. There was a positive correlation between the copper content in *Procambarus clarkii* and the copper content in the bottom mud of aquaculture pond, and the correlation coefficient was 0.39. The

基金项目: 国家重点研发计划食品安全关键技术研发项目(2019YFC1606000)

Fund: Supported by the Food Safety Key Technology Research and Development Project of National Research and Development Program of China (2019YFC1606000)

*通信作者: 王桥, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品安全风险因子检测分析及评估。E-mail: wangqiao8577@163.com

*Corresponding author: WANG Qiao, Ph.D, Lecturer, College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Xuefunan Road 68, Wuhan 430023, China. E-mail: wangqiao8577@163.com

copper content of *Procambarus clarkii* in A Province was significantly higher than that in other areas ($P<0.05$).

Conclusion The copper content in *Procambarus clarkii* and its aquaculture water in China is within the standard limit set by the state, but in some parts of crawfish farming pond sediment of copper content exceeds the national standard, and the pond sediment is an important environmental source of copper content in the *Procambarus clarkii*, which pose a potential risk for the safety of *Procambarus clarkii*. Therefore, it is still necessary to strengthen the supervision of copper content in crayfish and its breeding environment.

KEY WORDS: *Procambarus clarkii*; copper; enrichment status; risk assessment; source analysis

0 引言

铜(Cu)是植物、动物和人类必需的营养元素,是多种蛋白质的重要组成部分,缺乏或过量均有害于健康^[1-3]。水产品是人类摄取铜的重要来源,水生动物可从环境中吸收和富集铜元素^[4-6]。铜缺乏会导致水产动物增重率受到抑制,减慢生长、降低免疫力、增高死亡率,且影响铁等其他营养元素的吸收^[7-9]。而过量的铜会导致水产动物神经系统^[10]、组织结构^[11]、代谢酶活性^[12-13]等受到损伤。不仅如此,当铜元素通过食物链积累到人体时,会增加对铜敏感的个体患阿尔兹海默症^[1]、贫血^[14]、神经性疾病^[15-16]及肝癌^[17]的风险。

小龙虾,中文学名克氏原螯虾,拉丁名为 *Procambarus clarkii*,是深受大众喜爱的甲壳类水产品。由于小龙虾对生长环境要求不高,且其食物种类复杂,具有食腐性和底栖性,因此,极易受环境中重金属污染物的影响^[18]。小龙虾蓄积重金属的能力很强,对食用安全造成危害,例如,在西班牙重污染地区,小龙虾肌肉组织中铜含量为 12.00~82.30 $\mu\text{g/g}$ (干重),而未受污染地区小龙虾肌肉组织铜含量仅为 2.00~40.00 $\mu\text{g/g}$ (干重)^[12]。1929 年,小龙虾经日本传入中国后,长江中下游地区成为小龙虾主要的生产和消费地^[19-20]。自“十三五”以来,小龙虾产业呈现爆发式增长,消费市场持续升温,已成为当前我国最火爆的餐饮和网红食品之一^[21-22]。与此同时,小龙虾食品安全问题也引起我国消费者的高度重视。魏唯等^[23]和梁正其等^[24]对江苏省盱眙、泰州和连云港地区小龙虾样本进行检测,结果表明,盱眙小龙虾肌肉中铜含量为 0.18 mg/kg ,泰州小龙虾铜含量为 15.16 mg/kg ,连云港小龙虾铜含量为 24.53 mg/kg ,均符合 NY 5073—2006《无公害食品 水产品中有毒有害物质限量》所规定的水产品中铜小于等于 50 mg/kg 的要求。

关于小龙虾中铜含量的文献报道,自 1998 年乃至更早就已出现,此后也陆续有学者对其进行研究,但大都是针对其自身所在地域进行的小范围研究,很少有大范围、多省份的采样报道,并且缺乏对其环境来源和分布的深入研究。因此,本研究根据《小龙虾产业报告(2020 年)》^[25],选择我国小龙虾养殖产量排名靠前的 8 个县市,对小龙

虾及其养殖环境进行采样,分析小龙虾体内铜元素富集现状并探究其环境富集来源,为小龙虾产业健康发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

PX124ZH 电子天平(精度 0.1 mg , 美国奥豪斯仪器有限公司); Multiwave PRO 超高压微波消解系统(奥地利 Anton Paar 公司); 09A24S 赶酸仪(上海博通化学科技有限公司); Milli-Q Integral 超纯水制备装置(美国 Millipore 公司); FSH-2A 均质机(天津泰斯特有限公司); NexION 350X 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Perkin Elmer 公司); 0.22 μm 、0.45 μm 聚醚砜滤膜(天津市津腾实验设备有限公司)。

硝酸(优级纯,德国默克集团); 大虾质控样品[GBW 10050 (GSB-28), 地球物理地球化学勘查研究所]; 铜标准储备液、铍标准储备液(1000 $\mu\text{g/mL}$, 国家有色金属及电子材料分析测试中心)。

1.2 样品采集及前处理

依据《小龙虾产业发展报告(2020)》选取我国 4 个主要养殖省份中年产量排名靠前的 8 个地区作为取样地,选择当地养殖量较大的池塘进行采样,共采集 47 份小龙虾及其生长环境样本。每份小龙虾样本包含 3 个平行,分别取自取样池塘 3 个不同的捕捞点,每次捕捞在前一天晚上下网,第二天清晨取网,每网捕捞量在 2.00~3.00 kg 之间,单个小龙虾质量约 30.00 g ,符合 SC/T 3016—2004《水产品抽样方法》的要求;养殖环境样本取自小龙虾捕捞点周围,收集水样 3.00 L ,泥样 1.00 kg ,其中水样取自池塘表面,泥样取自池塘底部 20.00 cm 深处。采样点位置及数量信息见表 1。

样品收集后,用泡沫箱冰浴保存,24 h 内将样品运送到实验室进行处理。对采集的小龙虾样品进行体重测量,保留一部分完整虾样,在剩余虾样中选择 15 只大小相近、状态良好的小龙虾进行解剖并对各部分进行称量和记录,随后用均质机将各部分粉碎匀浆装入自封袋中并编号。对于养殖环境中的水样本,依照 HJ 493—2009《水质采样样品的保存和管理技术规定》,取 10.00 mL 样本,用 0.45 μm

滤膜过滤于 15 mL 离心管中, 加入 100.00 μL 硝酸使 $\text{pH}<2$, 储存于 5 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱。对于采集的小龙虾养殖池塘底泥样品, 参照 HJ 803—2016《土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法》, 除去样品中的枝棒、叶片、石子等异物, 对土壤进行风干、粗磨、细磨至过孔径 0.15 mm (100 目) 筛, 装入自封袋储存于阴凉干燥处。

表 1 采样点位置及数量
Table 1 Location and number of sampling points

省份	县市	采样点数
A 省	JL	6
	HH	6
	SS	6
	QJ	6
	SY	6
B 省	JH	5
C 省	HQ	6
D 省	HR	6
合计		47

注: 每个取样点取样量为 15 只, 每只在 27.00~33.00 g, 符合 SC/T 3016—2004 大于 10 只且大于 400 g 的要求。

称取 1.00 g 均质试样至消解罐中, 加入 7.00 mL 硝酸, 放入微波消解仪中进行消解, 赶酸, 用超纯水定容至 25.00 mL, 过 0.22 μm 滤膜后上机分析。

1.3 分析方法

本研究分析方法参考 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》。

1.3.1 电感耦合等离子体质谱分析条件

以铈(Rh)元素为内标, 采用动能歧视(kinetic energy discrimination, KED)碰撞模式检测目标元素铜。雾化器气流量为 0.92 L/min; 辅助气流量为 0.4 L/min; 等离子体气流量为 15 L/min; 射频功率为 1500 W; 载气为氩气, 载气流量为 0.8 L/min; 碰撞反应池气体为氦气, 碰撞反应池气体流量为 5 mL/min。

1.3.2 标准溶液的配制

硝酸溶液(2:98, V:V): 取 40.00 mL 硝酸加入 2 L 容量瓶中, 用超纯水定容。

铜标准工作液: 每次吸取铜标准储备液(1000 $\mu\text{g/mL}$) 0.50 mL 于 50 mL 容量瓶中, 加硝酸溶液(2:98, V:V)至刻度, 混匀后取 1.00 mL, 再次定容至 50 mL, 得到质量浓度为 200.00 $\mu\text{g/L}$ 的铜标准溶液, 将其等度稀释, 配制成 6.25、12.50、25.00、50.00、100.00、200.00 $\mu\text{g/L}$ 的标准系列溶液。

内标溶液: 取铈标准储备液(1000 $\mu\text{g/mL}$) 25.00 μL 于 500 mL 容量瓶中, 加硝酸溶液(2:98, V:V)定容, 混匀即可。

1.3.3 定量方法

将 6.25~200.00 $\mu\text{g/L}$ 的铜标准工作溶液在电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)上测定, 同时在线添加内标, 绘制以 Cu 的相对质量浓度为横坐标(X , $\mu\text{g/L}$), 响应值为纵坐标(Y , cps)的标准曲线, 线性回归方程为 $Y=0.0003X-0.0007$, 相关系数 $r^2=0.9999$, 内标回收率在 80.00%~120.00%之间, 说明该方法线性关系良好, 结果可靠。

1.3.4 方法验证

对大虾质控样品[Cu: (10.30 $\pm$ 0.70) mg/kg](每份取 0.20 g) 进行加标回收率实验, 加标量依照质控样品认定值的 1、2、3 倍, 设定低、中、高 3 个水平, 每个水平测定 3 个平行, 回收率在 90.81%~96.60%之间, 表明样品前处理方法能准确测定小龙虾中铜含量。未加标大虾质控样本测定结果在认定值范围内, 表明此检测方法准确度高。加标回收实验结果见表 2。

表 2 加标回收试验结果($n=3$)
Table 2 Results of standard recovery test ($n=3$)

未加标/ μg	加标量/ μg	加标后/ μg	回收率/%
2.09 $\pm$ 0.11	2.02	4.06 $\pm$ 0.31	96.60 $\pm$ 1.81
	4.14	6.17 $\pm$ 0.22	91.34 $\pm$ 2.17
	6.15	8.22 $\pm$ 0.57	90.81 $\pm$ 1.48

1.4 数据处理

使用 SPSS 25 和 Microsoft Office Excel 2016 软件对数据进行分析处理。统计分析结果用平均值 $\pm$ 标准偏差来表示, 采用 Pearson 相关分析方法研究小龙虾中铜含量及与之对应的环境样本中铜含量之间的相关性, 采用最小显著差别(least significant difference, LSD)法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同养殖产地小龙虾中铜的暴露水平

全国各主要养殖产地小龙虾铜含量分析结果见表 3。根据 NY 5073—2006 规定的水产品限量标准 Cu 小于等于 50 mg/kg, 可以发现各产地小龙虾中铜含量未有超标现象, 食用小龙虾造成的铜暴露风险较小。但本次调查得到的小龙虾中铜浓度均值为 10.22 mg/kg, 略高于 2015 年彭倩^[26]报道的含量 (9.2 mg/kg), 应重视小龙虾中铜含量的变化。各产地小龙虾中铜含量均值排序为: SS>QJ>JL>HH>HR>SY>JH>HQ, 其中排在前 4 的均为 A 省产地, 显著性分析结果(见表 4)显示, A 省小龙虾中铜含量显著高于其他省份($P<0.05$)。有研究表明, 甲壳类水产中铜含量与环境铜含量呈显著正相关^[3], 合理推测 A 省小龙虾养殖环境中铜含量可能高于其他省份。

表 3 不同养殖产地小龙虾体内铜的暴露水平($n=3$, mg/kg)
Table 3 Exposures to copper in *Procambarus clarkii* from different farms ($n=3$, mg/kg)

省份	县市	范围	均值	中位数
A 省	QJ	8.31~17.39	13.17±3.36	12.97
	JL	8.57~13.44	10.87±1.65	10.75
	HH	7.99~13.04	9.64±1.80	9.26
	SY	7.97~9.91	8.77±0.85	9.31
D 省	SS	11.60~16.33	14.49±1.68	14.39
C 省	HR	6.82~12.15	8.88±2.08	8.41
B 省	HQ	4.61~10.57	7.64±2.35	7.40
	JH	7.92~10.98	8.68±1.31	8.03
总体		4.61~17.39	10.22±3.33	8.07

表 4 不同养殖产地小龙虾体内铜含量水平显著性分析结果
Table 4 Significant analysis results of copper content in *Procambarus clarkii* from different farms

产地I	产地II	均值差	标准 偏差	显著性	95%置信区间	
					下限	上限
A 省	D 省	6.89*	1.06	0.00	4.68	9.11
	B 省	7.09*	1.11	0.00	4.77	9.42
	C 省	8.13*	1.06	0.00	5.91	10.34
D 省	A 省	-6.89*	1.06	0.00	-9.11	-4.68
	B 省	0.20	1.11	0.86	-2.12	2.52
	C 省	1.24	1.06	0.26	-0.98	3.45
B 省	A 省	-7.09*	1.06	0.00	-9.42	-4.77
	D 省	-0.20	1.11	0.86	-2.52	2.12
	C 省	1.04	1.06	0.36	-1.29	3.36
C 省	A 省	-8.13*	1.06	0.00	-10.34	-5.91
	D 省	-1.24	1.11	0.26	-3.45	0.98
	B 省	-1.04	1.06	0.36	-3.36	1.29

注: *代表均值差有显著性差异($P<0.05$)。

2.2 小龙虾体内不同部位的铜含量分布

将 47 份由各个养殖地采集的小龙虾进行解剖, 分为头壳、背壳、肌肉、肝胰腺 4 部分, 分别按照 1.2 和 1.3 所述进行前处理及铜含量分析, 测定结果见表 5。由表 5 可知, 小龙虾各部位铜含量均值排序为: 背壳>肝胰腺>头壳>肌肉, 此结果与其他研究结果一致^[27]。本研究结果表明, 小龙虾中可食用部分质量占个体的 24.62%, 而这部分中铜的积累量只占完整小龙虾总的铜积累量的 13.86%, 说明小龙虾中铜主要积累在不可食用部分。小龙虾消费各地差异

较大, 范围在每天 0.37~326.50 g/人^[26], 即使针对高消费人群, 通过食用小龙虾摄入的铜含量也远低于世界卫生组织所建议的成年人每天铜摄入量上限 2~3 mg^[8], 因此通过食用小龙虾而摄入的铜含量对人体的安全风险较低。

表 5 小龙虾体内不同部位的铜含量分布($n=3$)
Table 5 Distribution of copper content in different parts of *Procambarus clarkia* ($n=3$)

部位	含量均值 (mg/kg)	部位质量占比 /%	铜积累量占比 /%
头壳	7.92±5.54	22.78	17.74
背壳	13.28±8.75	12.23	15.97
肌肉	3.56±1.27	14.60	5.11
肝胰腺	8.89±5.00	10.02	8.75
其他	12.35±7.62	38.93	51.43
整虾	10.22±3.33		

2.3 小龙虾养殖环境中铜含量分析及相关性研究

本研究测定了小龙虾养殖用水和池塘底泥中铜的含量, 测定结果见表 6。由表 6 可知, 所有样本水中铜含量均在 GB 11607—1989《渔业水质标准》规定的 10 μg/L 范围内, 说明各地区小龙虾养殖用水安全。HR、SS、JL 及部分 QJ 的池塘底泥样本中的铜含量超过 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中规定的 Cu 小于等于 50 mg/kg, 说明以上地区需加强对小龙虾养殖环境的管控, 其他地区小龙虾养殖池塘底泥情况良好。

小龙虾中铜含量与养殖环境中铜含量之间的 Pearson 相关性分析结果如表 7 所示。由表 7 可知, 小龙虾与养殖池塘底泥中铜含量具有正相关性($P<0.01$), 而小龙虾中铜含量与水中铜含量无显著相关性, 此结果表明养殖产地小龙虾中铜的环境来源是池塘底泥, 与部分研究者结果一致^[28-29], 也有研究者认为, 小龙虾中的铜含量与养殖用水中的铜含量也具有正相关性^[23,30], 但不具有显著性。

表 6 小龙虾养殖用水、池塘底泥中铜含量分析($n=3$)
Table 6 Analysis of copper content in *Procambarus clarkii* aquaculture water and pond bottom mud ($n=3$)

样本	地区	范围	均值
水/(μg/L)	QJ	0.20~1.79	0.57±0.61
	JL	<LOD~1.39	0.38±0.80
	HH	0.14~6.43	1.41±2.49
	SY	0.54~0.91	0.74±0.14
	SS	0.81~3.26	1.30±0.96
	HR	<LOD~2.32	0.87±0.96
	HQ	0.07~0.27	0.17±0.08
	JH	0.23~0.51	0.34±0.11

表 6(续)

样本	地区	范围	均值
土/(mg/kg)	QJ	32.67~54.32	42.58±8.18
	JL	51.37~59.16	54.41±3.07
	HH	30.86~41.13	35.99±4.09
	SY	26.00~28.04	27.03±0.85
	SS	51.43~55.94	54.16±1.66
	HR	55.89~65.94	58.33±3.76
	HQ	26.49~33.82	29.57±2.63
	JH	28.30~30.25	28.90±0.80

注：检出限(limit of detection, LOD)。

表 7 小龙虾中铜含量与养殖环境中铜含量之间的 Pearson 相关性分析

Table 7 Pearson correlation analysis between copper content in *Procambarus clarkii* and copper content in cultured environment

样品	虾	土	水
虾	1	0.39**	0.22
土		1	0.22
水			1

注：**代表在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 结论与讨论

本研究发现,小龙虾中铜的含量分布依次为:头壳、背壳、肝胰腺、虾肉,其中 SS、QJ、JL 3 地小龙虾中铜含量高于其他产地小龙虾中铜含量,且这 3 地养殖池塘底泥中铜含量都存在超标情况。进一步研究发现小龙虾中铜含量与养殖池塘底泥中铜含量呈正相关关系,池塘底泥是小龙虾中铜的环境来源。因此,养殖小龙虾时应该首选无污染的养殖环境,并定期检测养殖地水体和底泥中重金属含量,从而确保小龙虾食用安全。

参考文献

[1] COELHO FC, SQUITTI R, VENTRIGLIA M, *et al.* Agricultural use of copper and its link to Alzheimer's disease [J]. *Biomolecules*, 2020, 10(6): 897.

[2] ALTARELLI M, BEN-HAMOUDA N, SCHNEIDER A, *et al.* Copper deficiency: Causes, manifestations, and treatment [J]. *Nutr Clin Pract*, 2019, 34(4): 504–513.

[3] ZHAO D, ZHANG X, LIU D, *et al.* Cu accumulation, detoxification and tolerance in the red swamp crayfish *Procambarus clarkii* [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 175: 201–207.

[4] RAJPUT V, MINKINA T, AHMED B, *et al.* Interaction of copper-based nanoparticles to soil, terrestrial, and aquatic systems: Critical review of the state of the science and future perspectives [J]. *Rev Environ Contam*

Toxicol, 2020, 252: 51–96.

[5] KOWALSKA-GORALSKA M, DZIEWULSKA K, KULASZA M. Effect of copper nanoparticles and ions on spermatozoa motility of sea trout (*Salmo trutta m. Trutta* L.) [J]. *Aquat Toxicol*, 2019, 211: 11–17.

[6] BARRETO DM, TONIETTO AE, LOMBARDI AT. Environmental concentrations of copper nanoparticles affect vital functions in *Ankistrodesmus densus* [J]. *Aquat Toxicol*, 2021, 231: 105–720.

[7] 寇红岩, 周萌, 黄燕华, 等. 矿物质铜元素对水产动物生长和免疫的影响[J]. *饲料研究*, 2020, 43(7): 155–158.

KOU HY, ZHOU M, HUANG YH, *et al.* The effect of copper on growth and immune of aquatic animal [J]. *Feed Res*, 2020, 43(7): 155–158.

[8] WANG P, YUAN Y, XU K, *et al.* Biological applications of copper-containing materials [J]. *Bioact Mater*, 2020, 6(4): 916–927.

[9] GROMADZKA G, TARNACKA B, FLAGA A, *et al.* Copper dyshomeostasis in neurodegenerative diseases-therapeutic implications [J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(23): 9259.

[10] MALHOTRA N, GER TR, UAPIPATANAKUL B, *et al.* Review of copper and copper nanoparticle toxicity in fish [J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2020, 10(6): 1126.

[11] TANG D, LIU R, SHI X, *et al.* Toxic effects of metal copper stress on immunity, metabolism and pathologic changes in Chinese mitten crab (*Eriocheir japonica sinensis*) [J]. *Ecotoxicology*, 2021, 30(4): 632–642.

[12] ZHAO D, ZHANG X, LI X, *et al.* Oxidative damage induced by copper in testis of the red swamp crayfish *Procambarus clarkii* and its underlying mechanisms [J]. *Aquat Toxicol*, 2019, 207: 120–131.

[13] QIAN D, XU C, CHEN C, *et al.* Toxic effect of chronic waterborne copper exposure on growth, immunity, anti-oxidative capacity and gut microbiota of pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. *Fish Shellfish Immunol*, 2020, 100: 445–455.

[14] CARVALHO JA, BOAVIDA L, FERREIRA R, *et al.* Copper-induced haemolyticaemia [J]. *Eur J Case Rep Intern Med*, 2021, 8(9): 002785.

[15] BISAGLIA M, BUBACCO L. Copper ions and Parkinson's disease: Why is homeostasis so relevant? [J]. *Biomolecules*, 2020, 10(2): 195.

[16] CHEN J, JIANG Y, SHI H, *et al.* The molecular mechanisms of copper metabolism and its roles in human diseases [J]. *Pflug Arch*, 2020, 472(10): 1415–1429.

[17] LAN Y, WU S, WANG Y, *et al.* Association between blood copper and nonalcoholic fatty liver disease according to sex [J]. *Clin Nutr*, 2021, 40(4): 2045–2052.

[18] 陈晨. 不同暴露条件下砷在小龙虾不同组织中的积累和转化[D]. 昆明: 云南大学, 2019.

CHEN C. Arsenic accumulation and transformation in different tissues of crayfish under different exposure conditions [D]. Kunming: Yunnan University, 2019.

[19] SHEN G, ZHANG X, GONG J, *et al.* Transcriptomic analysis of *Procambarus clarkii* affected by “Black May” disease [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 211225.

[20] QIAN X, ZHU F. Hesperetin protects crayfish *Procambarus clarkii* against white spot syndrome virus infection [J]. *Fish Shellfish Immunol*, 2019, 93: 116–123.

[21] ZHONG Y, TANG Z, HUANG L, *et al.* Genetic diversity of *Procambarus clarkii* populations based on mitochondrial DNA and microsatellite markers in different areas of Guangxi, China [J]. *Mitochondrial DNA A*

- DNA Mapp Seq Anal, 2020, 31(2): 48–56.
- [22] 燕志. 扬州市水产品质量安全风险监测及小龙虾重金属风险评估[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- YAN Z. Quality and safety risk monitoring of aquatic products and heavy metal risk assessment of crayfish in Yangzhou [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [23] 魏唯, 杨春艳, 王紫薇, 等. 养殖环境对小龙虾体内的重金属水平及其分布的影响[J]. 现代农业科技, 2020, (16): 179–181.
- WEI W, YANG CY, WANG ZW, *et al.* Effects of culture environment on the level and distribution of heavy metals in crayfish [J]. Mod Agric Sci Technol, 2020, (16): 179–181.
- [24] 梁正其, 旷慧七, 秦国兵, 等. 不同地区养殖的小龙虾的肌肉营养成分分析与评价[J]. 农业与技术, 2021, 41(20): 117–121.
- LIANG ZQ, KUANG HQ, QIN GB, *et al.* Analysis and evaluation of muscle nutrient composition of crayfish cultured in different areas [J]. Agric Technol, 2021, 41(20): 117–121.
- [25] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2020 中国小龙虾产业发展报告[J]. 中国水产, 2020, (7): 10.
- Fishery and Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Aquatic Technology Extension Station, Chinese Fisheries Society. 2020 China crayfish industry development report [J]. China Fish, 2020, (7): 10.
- [26] 彭倩. 小龙虾重金属污染及人体健康风险评估[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- PENG Q. Heavy metal pollution and human health risk assessment of crayfish [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [27] 郑卫红, 柏春美, 韩志萍, 等. 克氏原螯虾体主要部位对铅、镉、铜的富集比较[J]. 湖州师范学院学报, 2016, 38(4): 52–55.
- ZHENG WH, BAI CM, HAN ZP, *et al.* Comparison of enrichment of lead, cadmium and copper in main parts of *Procambarus clarkia* [J]. J Huzhou Univ, 2016, 38(4): 52–55.
- [28] 和庆. 长三角地区池塘养殖水产品重金属和多环芳烃污染评价及其生物有效性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- HE Q. Pollution assessment and bioavailability of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in pond aquaculture aquatic products in Yangtze River Delta [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [29] RADER KJ, CARBONARO RF, HULLEBUSCH ED, *et al.* The fate of copper added to surface water: field, laboratory, and modeling studies [J]. Environ Toxicol Chem, 2019, 38(7): 1386–1399.
- [30] 张振燕. 重金属在克氏原螯虾体内吸收与蓄积特性及蓄积过程重金属间相互作用的研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- ZHANG ZY. Study on absorption and accumulation characteristics of heavy metals in *Procambarus clarkii* and interaction of heavy metals during accumulation [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



曾小雨, 硕士研究生, 主要研究方向为食品科学。

E-mail: 2512891130@qq.com



王 桥, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品安全风险因子检测分析及评估。

E-mail: wangqiao8577@163.com