

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2015.03.016

## 食用方式对近江牡蛎和波纹巴非蛤中铁、铜生物可接受性的影响

王许诺, 柯常亮, 王增焕

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部水产品加工重点实验室,  
广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300)

**摘要:**应用全仿生消化模型评价了近江牡蛎(*Crassostrea rivulari*)和波纹巴非蛤(*Paphia undulate*)的铁(Fe)、铜(Cu)在仿生胃肠提取液中的变化与生物可接受性。结果表明:1)煮熟后的2种贝类中的Fe和Cu在胃消化阶段的提取量有所增加,但在肠消化阶段近江牡蛎中Cu和波纹巴非蛤中Fe、Cu提取量均有所降低;2)熟近江牡蛎中的Fe生物可接受性比生的提高了7.3%,Cu生物可接受性提高了4.6%;熟波纹巴非蛤中Fe生物可接受性比生的提高了11.5%,而Cu则降低了11.5%;3)食用近江牡蛎最高可为沿海居民提供人体每日所需15.5%的Fe和25.9%的Cu,而食用波纹巴非蛤对沿海居民每日Fe、Cu摄入量的贡献分别大于6.4%和3.1%。日常食用熟的近江牡蛎比波纹巴非蛤能提供更多Fe摄入量。总体而言,熟食比生食能摄入更多的Fe。

**关键词:**近江牡蛎;波纹巴非蛤;铁;铜;生物可接受性

中图分类号: S 986.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2015)03-0103-06

## Effect of edible way on bioaccessibility of Fe, Cu in *Crassostrea rivulari* and *Paphia undulate*

WANG Xunuo, KE Changliang, WANG Zenghuan

(Key Lab. of Aquatic Product Processing, Ministry of Agriculture; Key Lab. of Fishery Ecology Environment, Guangdong Province; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** We evaluated the solubility and bioaccessibility of Fe and Cu in *Crassostrea rivulari* and *Paphia undulate* by *in vitro* whole-bionic digestion model. The results show that: 1) At the stomach digestive stage, the solubilities of Fe and Cu in cooked *C. rivulari* and *P. undulate* were higher than those in raw ones, which was contrary to the case at intestinal digestion stage; 2) The bioaccessibility of Fe and Cu in cooked *C. rivulari* increased by 7.3% and 4.6%, respectively, and the bioaccessibility of Fe in cooked *P. undulata* increased by 11.5% while that of Cu decreased by 11.5%; 3) Eating *C. rivulari* could provide coastal residents at most with 15.5% and 25.9% of the daily intake of Fe and Cu, respectively, while eating *P. undulata* could provide with over 6.4% and 3.1% of Fe and Cu, respectively. In general, eating *C. rivulari* provides human body with more daily intake of Fe than eating *Paphia undulate*, and even more when they are cooked.

**Key words:** *Crassostrea rivulari*; *Paphia undulate*; Fe; Cu; bioaccessibility

近江牡蛎(*Crassostrea rivulari*)和波纹巴非蛤(*Paphia undulate*)是2种主要的养殖经济贝类,因其具有营养丰富、味道鲜美和食用方便等特点,深

受消费者欢迎。它们能为人体提供丰富的蛋白质和氨基酸,尤其牡蛎还享有“海中牛奶”的美称<sup>[1]</sup>,作为高灰分、低脂肪的食物<sup>[2]</sup>,对不同年龄段的

收稿日期: 2014-08-22; 修回日期: 2014-12-11

资助项目: 国家农产品质量安全风险评估重大专项(GJFP2014009); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国水产科学研究院南海水产研究所)资助项目(2009TS20, 2013YD08)

作者简介: 王许诺(1983-), 女, 助理研究员, 从事渔业环境与水产品质量安全研究。E-mail: sanqianli-1983@163.com

人、特别是老年人具有营养与保健功能<sup>[3]</sup>。同时近江牡蛎和波纹巴非蛤还富含人体必需的微量元素铁(Fe)、铜(Cu)等,常作为治疗缺乏微量元素(如Fe)辅助治疗的食疗材料<sup>[4]</sup>。

贝类作为食物进入人体消化道后,只有部分营养物质会被消化吸收,同时贝类不同的食用方式也会对其消化吸收<sup>[5]</sup>有影响,为更好地评估摄入量,体外仿生模型被引入到贝类中微量金属的分析研究中,通过模拟人体胃肠消化过程,考察贝类中微量金属在人体消化过程中的生物可接受性<sup>[6-9]</sup>。目前采用体外仿生模型研究食品、药品的生物可接受性已被广泛应用和认可<sup>[10-12]</sup>。近江牡蛎和波纹巴非蛤微量金属元素分析主要集中在总量<sup>[13-17]</sup>,关于生物可接受性研究、特别是食用方式影响的研究甚少。该研究采用体外全仿生消化方法对近江牡蛎和波纹巴非蛤进行处理,模拟2种贝类在人体消化道环境中的消化过程,对胃、肠消化过程中转运至仿生消化液中的微量金属进行测定,考察生、熟2种状态下贝类微量金属在提取液中提取量、生物可接受性的变化规律及特征,并进行微量元素摄入评估,以期在近江牡蛎和波纹巴非蛤的食用药用价值提供基础数据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

1.1.1 样品制备 2013年在广东省石栏洲海域、博贺湾、独湾海域、桂山岛海域4个主要贝类养殖区采集近江牡蛎106个,在柘林湾青屿、浮屿海域采集波纹巴非蛤贝类样品40个,采集的样品在现场用海水将外壳洗净后,冰冻保存带回实验室。在实验室取出贝类样品的软组织和体液,冻干至恒质量,用玛瑙研钵研磨后装于食品塑料袋内待用。

1.1.2 试验试剂 牛血清白蛋白(分析纯,广州威佳科技有限公司出品),黏液素(分析纯,广州鼎国公司出品),氯化钾、硫氰化钾、磷酸二氢钠、磷酸钠、氯化钠、氢氧化钠、尿素、 $\alpha$ -淀粉酶、尿酸、氯化钙、氯化铵、氯化镁、碳酸氢钠、磷酸二氢钾、葡萄糖、葡萄糖醛酸、氨基葡萄糖盐酸盐、胃蛋白酶、胰液素、脂肪酶、胆汁(分析纯,上海晶纯生化科技股份有限公司出品)。

### 1.2 仪器与设备

试验过程使用的仪器设备主要有 Milestone 微波消解萃取系统(Ethos1)、智诚气浴恒温振荡器

(ZHWHY-2000)、Crist 真空冷冻干燥机(ALPHA 1-4/Ldplue)、HITCH 原子吸收分光光度计 Z-2000。

### 1.3 方法

1.3.1 全仿生消化液的制备方法 试验所用唾液、胃液、肠液、胆汁等消化液的组成见表1。参照 LAIRD 和 CHAN<sup>[18]</sup>的方法,分别加入相应的无机物、有机物、消化酶,调节 pH 与 4 °C 下保存备用。

1.3.2 贝类全仿生消化方法 样品仿生消化具体步骤<sup>[18]</sup>为:称取贝类样品(生食样品)1.00 g,加入 10 mL 仿生唾液,在 37 °C 恒温振荡 5 min 后加入 150 mL 仿生胃液,再于 37 °C 恒温振荡 2 h 后取 100 mL 胃仿生消化食糜离心,得胃提取液待测;余下部分加入 200 mL 仿生十二指肠和 80 mL 仿生胆汁,恒温振荡 8 h 后取 100 mL 肠道仿生食糜离心,得肠提取液待测。熟食样品为制备好的贝类样品(生食样品)加入 15 mL 高纯水加热,沸腾 10 min 所得,仿生消化步骤同上。

### 1.3.3 贝类样品和提取液中重金属测定方法

取 0.5 g 贝类样品或 30 mL 仿生提取液(1.3.1 制得),加入 8 mL 浓硝酸、1 mL 双氧水微波消解后转移至烧杯加热,最终定容到 10 mL 的容量瓶,用原子吸收分光光度计分别测定贝类样品和仿生提取液中的 Fe、Cu。样品平行双份,测定结果以平均值表示。

### 1.3.4 数据处理

生物可接受性(%) =

$$\frac{\text{贝类消化液中金属质量分数}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})}{\text{贝类样品中金属质量分数}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})} \times 100$$

居民日微量元素摄入量( $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$ ) = 每日膳食贝类摄入量(g) × 贝类金属元素质量分数( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) × 生物可接受性;式中每日膳食贝类摄入量:男为 19.4 g、女为 17.7 g<sup>[19]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 贝类样品 Fe、Cu 总量

分析结果表明近江牡蛎和波纹巴非蛤均富含 Fe 元素,贝类样品近江牡蛎  $w(\text{Fe})$  变化范围为 0.97 ~ 1.83  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,波纹巴非蛤  $w(\text{Fe})$  的变化范围为 0.96 ~ 1.24  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,近江牡蛎  $w(\text{Fe})$  平均值略大于波纹巴非蛤;与  $w(\text{Fe})$  相比  $w(\text{Cu})$  较低,2种贝类  $w(\text{Cu})$  相差较大,近江牡蛎  $w(\text{Cu})$  平均值为 0.31  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,而波纹巴非蛤  $w(\text{Cu})$  平均值不及近江牡蛎的十分之一。

表1 唾液、胃液、十二指肠液、胆汁组成成分

Tab. 1 Main components of saliva, gastric juice, duodenal juice and bile

	无机物 inorganic matter	有机物 organic matter	消化酶 digestive enzyme	pH
唾液 saliva	10 mL 189.6 g·L <sup>-1</sup> KCl 10 mL 20 g·L <sup>-1</sup> KSCN 10 mL 88.80 g·L <sup>-1</sup> NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 10 mL 57 g·L <sup>-1</sup> Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 1.7 mL 175.3 g·L <sup>-1</sup> NaCl 1.8 mL 40 g·L <sup>-1</sup> NaOH	8 mL 25 g·L <sup>-1</sup> 尿素	145 mg α-淀粉酶 15 mg 尿酸 50 mg 粘液素	6.5 ± 0.2
胃液 gastric juice	15.7 mL 175.3 g·L <sup>-1</sup> NaCl 3.0 mL 88.8 g·L <sup>-1</sup> NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 9.2 mL 89.6 g·L <sup>-1</sup> KCl 18 mL 22.2 g·L <sup>-1</sup> CaCl <sub>2</sub> 8.3 mL 37% HCl	10 mL 65 g·L <sup>-1</sup> 葡萄糖 10 mL 2 g·L <sup>-1</sup> 葡萄糖醛酸 3.4 mL 25 g·L <sup>-1</sup> 尿素 10 mL 33 g·L <sup>-1</sup> 氨基葡萄糖盐酸盐	1 g 牛血清蛋白 1 g 胃蛋白酶 3 g 脂肪酶	1.07 ± 0.07
十二指肠液 duodenal juice	40 mL 175.3 g·L <sup>-1</sup> NaCl 40 mL 84.7 g·L <sup>-1</sup> NaHCO <sub>3</sub> 10 mL 8 g·L <sup>-1</sup> KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 6.3 mL 89.6 g·L <sup>-1</sup> KCl 10 mL 5 g·L <sup>-1</sup> MgCl <sub>2</sub> 9 mL 22.2 g·L <sup>-1</sup> CaCl <sub>2</sub> 0.18 mL 37% HCl	4 mL 25 g·L <sup>-1</sup> 尿素	1 g 牛血清蛋白 3 g 胰液素 0.5 g 脂肪酶	7.8 ± 0.2
胆汁 bile	30 mL 175.3 g·L <sup>-1</sup> NaCl 68.3 mL 4.7 g·L <sup>-1</sup> NaHCO <sub>3</sub> 4.2 mL 89.6 g·L <sup>-1</sup> KCl 0.2 mL 37% HCl 10 mL 2.2 g·L <sup>-1</sup> CaCl <sub>2</sub>		1 g 牛血清蛋白 6 g 胆汁	8.0 ± 0.2

注: 用盐酸或碳酸氢钠溶液调pH, 用超纯水定容至500 mL, 在4 °C下保存

Note: The pH values of all solutions were adjusted using HCl or NaHCO<sub>3</sub> and the total volume of each digestion solution was diluted to 500 mL with ultrapure water before storage at 4 °C.

## 2.2 消化阶段提取液中Fe、Cu的变化

胃、肠仿生消化过程中(图1-a, 图1-b), 熟近江牡蛎仿生消化液中Fe的提取量比生的大。在胃仿生消化阶段, 熟牡蛎提取液中Fe的提取量为547 mg·kg<sup>-1</sup>, 而生牡蛎的只有503.5 mg·kg<sup>-1</sup>。在肠仿生消化阶段, 熟牡蛎提取液中Fe的提取量也比生牡蛎略高, 是生牡蛎的1.05倍。熟牡蛎中Cu在胃肠消化阶段变化不一致, 在胃消化阶段Cu的提取量比生牡蛎高, 但是在肠消化阶段则比生牡蛎低, 纵观整个仿生消化过程, 熟牡蛎被仿生消化液提取出来的Cu比生牡蛎的高。

熟的波纹巴非蛤仿生消化过程中, Fe、Cu元素变化规律相同。胃仿生消化阶段(图1-a, 图1-c), 熟的波纹巴非蛤提取液中Fe、Cu提取量均比生波纹巴非蛤高; 而在肠仿生消化阶段, 熟波纹

巴非蛤Fe、Cu提取量均比生波纹巴非蛤低, 分别是生波纹巴非蛤提取量的88%和97%(图1-b, 图1-d), Fe提取量降低幅度大于Cu。

胃是人类消化系统中主要消化场所, 此试验也印证了这一点。不管是煮熟还是生食, 近江牡蛎和波纹巴非蛤中的Fe、Cu在胃仿生消化中释放的量比肠消化阶段多, 胃和肠提取液中Cu差别比较大。有研究表明生牡蛎中经胃消化阶段被提取的Cu可高达80%<sup>[20]</sup>。

## 2.3 生物可接受性

经过仿生消化后, 熟近江牡蛎中的Fe、Cu生物可接受性比生近江牡蛎高, 加热后近江牡蛎的Fe生物可接受性平均值增加7.3%, Cu生物可接受性平均值增加4.6%(表2), 消化液Fe、Cu提取量均比总量低, 近江牡蛎组织中有超过13.8%~74.6%的Fe和3.3%~22.3%的Cu留

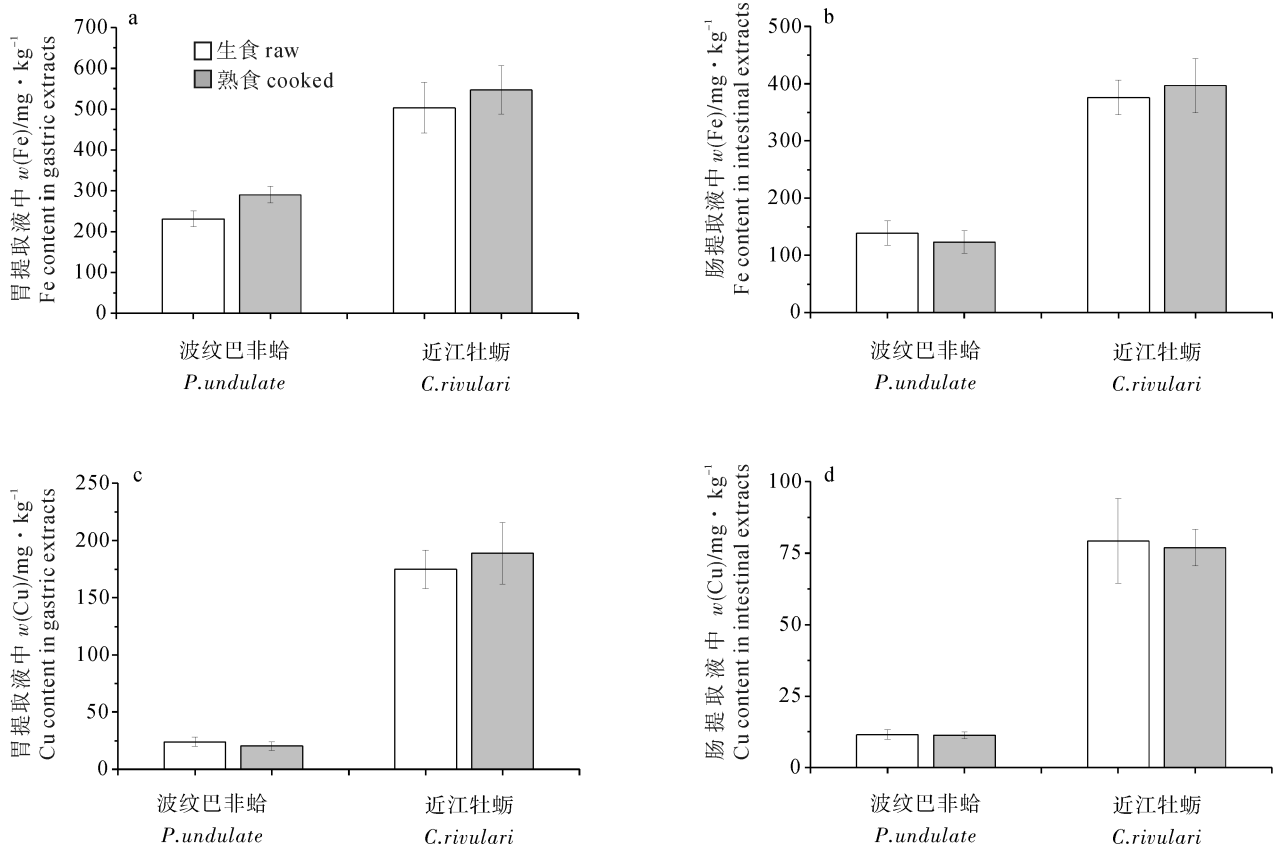


图1 食用方式对近江牡蛎和波纹巴非蛤消化过程铁、铜提取量的影响

Fig. 1 Influence of edible way of digestion process on solubility of Fe, Cu in *C. rivulari* and *P. undulate*

在食物残渣中未进入人体消化循环。AMIARD等<sup>[21]</sup>研究发现生牡蛎经过胃肠仿生消化后, 3%~39%的Cu留在食物残渣中。食用方式对波纹巴非蛤中2种元素的生物可接受性影响不一致, 熟波纹巴非蛤中Fe的生物可接受性平均比生的高11.5%, Cu则低了11.5%, 可见熟食方式提高了波纹巴非蛤Fe生物可接受性同时降低了Cu的生物可接受性。

无论是那种食用方式, 近江牡蛎和波纹巴非蛤Cu的生物可接受性都比Fe高, 但是2种贝类的Fe总量均比Cu高, 可见2种贝类中Fe、Cu生物可接受性与其总量高低并没有明显关系。JORGE等<sup>[22]</sup>对5种贝类的Fe、Cu生物可接受性进行测定, 结果显示Cu生物可接受性均比Fe高。

### 2.3 评价

食用方式变化会改变人体消化系统对贝类Fe、Cu的利用率, 文章采用近江牡蛎和波纹巴非蛤Fe、Cu仿生消化结果进行评价, 考察2种贝

类对人体Fe、Cu摄入量的贡献(表3)。参照唐洪磊等<sup>[19]</sup>估算贝类摄入量, 食用近江牡蛎和波纹巴非蛤所摄入的Fe和Cu均未超过中国居民DRIs委员会<sup>[23]</sup>推荐的每日适宜摄入量, 食用近江牡蛎每日可为人体提供1.97~2.32 mg的Fe, 占适宜摄入量的9.9%~15.5%, 同时提供人体所需Cu的22.6%~25.9%, 熟近江牡蛎提供Fe、Cu均比生牡蛎高。食用波纹巴非蛤摄入的Fe、Cu均比近江牡蛎少, 每日可为人体提供1.27~1.56 mg的Fe和0.06~0.08 mg的Cu, 最高可提供10.4% Fe(熟蛤)和3.9%(生蛤)摄入量。PAWELPOH等<sup>[24]</sup>研究多种蜂蜜对人体微量元素摄入贡献, 发现日食用100 g蜂蜜最高可为人体提供11.1%~19.2%的Fe和6.0%~7.5%的Cu[适宜摄入量(AI, mg · d<sup>-1</sup>)为Fe: 11~14、Cu: 2.0~2.5], 近江牡蛎和波纹巴非蛤为人体提供Fe、Cu元素摄入量不同, 食用方式不同也略有影响, 但总体而言所提供的Fe、Cu相对比较高。

表2 近江牡蛎和波纹巴非蛤中铁、铜的生物可接受性

Tab. 2 Bioaccessibility of Fe and Cu in *C. rivulari* and *P. undulate*

%

元素 element	近江牡蛎 <i>C. rivulari</i>		波纹巴非蛤 <i>P. undulate</i>	
	生牡蛎 raw	熟牡蛎 cooked	生蛤 raw	熟蛤 cooked
铁 Fe	52.0 ± 32.7	55.8 ± 30.4	40.7 ± 13.2	45.4 ± 11.2
铜 Cu	83.4 ± 11.6	87.2 ± 9.5	87.8 ± 10.3	77.7 ± 12.7

表3 居民日微量元素摄入量

Tab. 3 Daily consumption of Fe and Cu in shellfish

mg·d<sup>-1</sup>

元素 element	适宜摄入量 AI		可耐受摄入量 UI		近江牡蛎 <i>C. rivulari</i>				波纹巴非蛤 <i>P. undulate</i>			
					生牡蛎 raw		熟牡蛎 cooked		生蛤 raw		熟蛤 cooked	
	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女
铁 Fe	15	20	50	50	2.16	1.97	2.32	2.12	1.39	1.27	1.56	1.47
铜 Cu	2.0	2.0	8.0	8.0	0.50	0.45	0.52	0.47	0.08	0.07	0.07	0.06

注: 适宜摄入量和可耐受摄入量采用成年居民(≥18岁)推荐值

Note: Values of AI and UI using adult (age ≥ 18) recommended values of DRIs.

### 3 讨论

此试验模拟人体胃肠消化过程, 加入全仿生消化液对样品进行处理, 考察近江牡蛎和波纹巴非蛤中金属元素 Fe、Cu 转移进入消化液的情况。结果表明, 近江牡蛎和波纹巴非蛤样品中 Fe、Cu 进入到消化液中的量均小于其总量, 其中 Fe 仅约 50% 转运到消化液中。FANNY 等<sup>[25]</sup> 研究智利贻贝 (*Mytilus chilensis*) 表明, 无论是生贝还是熟贝, 仿生消化液中镉 (Cd) 的提取量都比样品本身 Cd 总量低, 同为金属元素的 Fe、Cu 也有相同表现。食物在消化道中的消化方式影响其金属元素被人体吸收利用的程度, 消化是金属元素伴随营养物质进入人体、被吸收利用的重要途径, 选用适宜、科学的消化方法是合理评估的基础。

煮熟的近江牡蛎中 Fe、Cu 的生物可接受性均有提高, 而煮熟的波纹巴非蛤中 Fe 的生物可接受性提高的同时, Cu 的生物可接受性却降低。METIAN 等<sup>[26]</sup> 研究紫贻贝 (*M. galloprovincialis*) 仿生消化也发现, 煮熟后紫贻贝锰 (Mn)、镉 (Am) 的生物可接受性提高, 但 Cd、钴 (Co)、锌 (Zn) 等的生物可接受性却降低。贝类的不同食用方式可能引起其食糜在人体消化环境中消化过程的改变, 不同元素受到的影响不一致, Fe、Cu 生物可利用性发生不同程度改变, 这种改变可能影响到近江牡蛎和波纹巴非蛤中 Fe、Cu 在人体中的吸收和利用, 改变可能进入人体循环系统 Fe、Cu 的量。总体看 2 种

试验贝类熟食比生食能为人体提供更多的 Fe 摄入量。

贝类品种的差异影响金属配合物的配体组成, 近江牡蛎和波纹巴非蛤经过仿生消化后, 形成了不同的仿生食糜成分, 且仿生食糜基体成分复杂, 食糜提取液中金属元素结合态、形态、结构态等存在差异, 相同金属元素的不同形态分布可能影响其生物可接受性, 而不同金属元素也可能由配位能力的因素, 导致生物可接受性的不同。

近江牡蛎和波纹巴非蛤中 Fe、Cu 生物可接受性大小与其总量高低并没有明显的关系, 且消化液提取量均比总量低。以往评估贝类样品为人体提供的微量元素摄入时, 多数采用总量进行评估, 结果可能导致摄入量被高估或是低估, 考虑到实际食物进入人体消化系统并不是完全被消化吸收, 此试验选择更加符合人体消化方式的全仿生消化方法处理样品, 在进行评估的时候加入生物可接受性参数, 结果可能更为科学有效。

### 参考文献:

- [1] 苏键. 广西北部湾主要贝类食用品质及其冻藏变化的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2011.
- [2] 李闯兵, 孙立春, 刘承初, 等. 几种海水和淡水贝类的大宗营养成分比较研究 [J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(2): 297-302.
- [3] 迟淑艳, 周歧存, 周健斌, 等. 华南沿海 5 种养殖贝类营养成分的比较分析 [J]. 水产科学, 2007, 26(2): 79-83.
- [4] 孙长峰, 郭娜. 微量元素铁对人体健康的影响 [J]. 微量元素

- 与健康研究, 2011, 28(2): 64-66.
- [5] HE M, KE C H, WANG W X. Effects of cooking and subcellular distribution on the bioaccessibility of trace elements in two marine fish species[J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(6): 3517-3523.
- [6] MARQUES A, LOURENCO H M, NUNES M L, et al. New tools to assess toxicity, bioaccessibility and uptake of chemical contaminants in meat and seafood[J]. *Food Res Int*, 2011, 44(2): 510-522.
- [7] LEUFROY A, NOEL L, BEAUCHEMIN D, et al. Use of a continuous leaching method to assess the oral bioaccessibility of trace elements in seafood[J]. *Food Chem*, 2012, 135(2): 623-633.
- [8] LAIRD B D, CHAN H M. Bioaccessibility of metals in fish, shellfish, wild game, and seaweed harvested in British Columbia, Canada[J]. *Food Chem Toxicol*, 2013, 58: 381-387.
- [9] CALATAYUD M, DEVESA V, VIRSEDA J R, et al. Mercury and selenium in fish and shellfish: occurrence, bioaccessibility and uptake by Caco-2 cells[J]. *Food Chem Toxicol*, 2012, 50(8): 2696-2702.
- [10] MAULVAULT A L, MACHADO R, AFONSO C, et al. Bioaccessibility of Hg, Cd and As in cooked black scabbard fish and edible crab[J]. *Food Chem Toxicol*, 2011, 49(11): 2808-2815.
- [11] YANG L S, ZHANG X W, LI Y H, et al. Bioaccessibility and risk assessment of cadmium from uncooked rice using an *in vitro* digestion model[J]. *Biol Trace Elem Res*, 2012, 145(1): 81-86.
- [12] 邱雅青, 李顺兴, 林路秀. 仿生消化——单层脂质体萃取在蕨类植物微量重金属形态分析和生物可给性评价中的应用[J]. *分析科学学报*, 2012, 28(2): 177-181.
- [13] 姚茹, 黎小正. 广西沿海主要贝类养殖区海水、表层沉积物及近江牡蛎体内重金属监测与评价[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(1): 318-322.
- [14] 庞艳华, 隋凯, 王艳秋, 等. 大连近岸海域双壳贝类重金属污染调查与评价[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(3): 410-413.
- [15] 王增焕, 林钦, 王许诺. 华南沿海贝类产品重金属元素含量特征及其安全性评价[J]. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(6): 923-929.
- [16] 母清林, 王晓华, 余运勇, 等. 浙江近岸海域贝类中重金属和贝毒污染状况研究[J]. *海洋科学*, 2013, 37(1): 87-91.
- [17] 杜克梅. 海南省近岸海域主要经济贝类重金属污染调查与评价[D]. 广州: 暨南大学, 2013.
- [18] 林路秀, 李顺兴, 郑凤英. 应用体外仿生模型分析海藻水煎液中微量金属的形态和生物可给性[J]. *分析化学*, 2010, 38(6): 823-827.
- [19] 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.
- [20] BRAGIGAND V, BERTHET B, AMIARD J C, et al. Estimates of trace metal bioavailability to humans ingesting contaminated oysters [J]. *Food Chem Toxicol*, 2004, 42(11): 1893-1902.
- [21] AMIARD J C, AMIARD TRIQUET C, CHARBONNIER L, et al. Bioaccessibility of essential and non-essential metals in commercial shellfish from Western Europe and Asia [J]. *Food Chem Toxicol*, 2008, 46(6): 2010-2022.
- [22] MOREDA PINEIRO J, MOREDA PINEIRO A, ROMARIS HORTA V, et al. Trace metals in marine foodstuff: bioavailability estimation and effect of major food constituents [J]. *Food Chem*, 2012, 134(1): 339-345.
- [23] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量简本[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 1-123.
- [24] POHL P, STECKA H, GREDA K, et al. Bioaccessibility of Ca, Cu, Fe, Mg, Mn and Zn from commercial bee honeys[J]. *Food Chem*, 2012, 134(1): 392-396.
- [25] HOULBREQUE F, HERVÉ-FEMÁNDEZ P, TEYSSIE J L, et al. Cooking makes cadmium contained in Chilean mussels less bioaccessible to humans[J]. *Food Chem*, 2011, 126(3): 917-921.
- [26] METIAN M, CHARBONNIER L, OBERHAENSLI F, et al. Assessment of metal, metalloid, and radionuclide bioaccessibility from mussels to human consumers, using centrifugation and simulated digestion methods coupled with radiotracer techniques[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2009, 72(5): 1499-1502.