

# 基于体外模拟消化模型评价刺参中 3 种拟除虫菊酯的生物可给性

朱绍彰, 殷海琪, 齐逸璇, 刘春娥\*

(中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670)

**摘要: 目的** 利用体外模拟消化模型评估刺参(*Stichopus japonicus*)中 3 种拟除虫菊酯的生物可给性。**方法** 基于胃相动态 pH 和静态肠相的体外模拟消化模型, 采用气相色谱法分析加工前后刺参中 3 种拟除虫菊酯(甲氰菊酯、氯氰菊酯和溴氰菊酯)的含量。**结果** 加工组与原料组相比, 经过胃相消化后, 3 种菊酯类含量均显著降低( $P<0.05$ ); 无论原料组还是加工组, 甲氰菊酯和溴氰菊酯的浓度在肠道模拟消化后均显著低于消化前( $P<0.05$ ); 原料组中甲氰菊酯、氯氰菊酯和溴氰菊酯的生物可给性分别为 63.09%、86.67%和 71.83%, 除了溴氰菊酯, 加工后另外两种菊酯类生物可给性均低于原料组。**结论** 刺参中 3 种拟除虫菊酯经模拟消化后均不能从食物基质中完全释放, 此外加热处理可以在一定程度上降低刺参中拟除虫菊酯的生物可给性。

**关键词:** 拟除虫菊酯; 生物可给性; 刺参; 体外模拟消化

## Evaluation of bioavailabilities of 3 kinds of pyrethroids in *Stichopus japonicus* based on *in vitro* simulated digestion models

ZHU Shao-Zhang, YIN Hai-Qi, QI Yi-Xuan, LIU Chun-E\*

(Yantai Institute of China Agricultural University, Yantai 264670, China)

**ABSTRACT: Objective** To evaluate the bioavailabilities of 3 kinds of pyrethroids in *Stichopus japonicus* by an *in vitro* simulated digestion model. **Methods** Based on an *in vitro* simulated digestion model with dynamic pH in the gastric phase and static intestinal phase, the content of 3 kinds of pyrethroids (fenpropathrin, cypermethrin and deltamethrin) in *Stichopus japonicus* was analyzed by gas chromatography before and after processing. **Results** Compared with the raw material group, the content of 3 kinds of pyrethroids in the processed group was all significantly decreased after gastric digestion ( $P<0.05$ ). No matter in the raw material group or the processing group, the concentrations of fenpropathrin and deltamethrin were significantly decreased after intestinal simulated digestion compared with those before digestion ( $P<0.05$ ). The bioavailabilities of fenpropathrin, cypermethrin and deltamethrin in the raw materials group were 63.09%, 86.67% and 71.83%, respectively. Except deltamethrin, the bioavailabilities of the other 2 kinds of pyrethroids after processing were lower than that of the raw material group. **Conclusion** None of the 3 kinds of pyrethroids in *Stichopus japonicus* can be completely released from the food matrix after simulated digestion, and in addition, heating treatment can reduce the bioavailabilities of pyrethroids in *Stichopus japonicus* to some extent.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901704)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFD0901704)

\*通信作者: 刘春娥, 副教授, 主要研究方向为水产品加工及安全。E-mail: lchune@126.com

\*Corresponding author: LIU Chun-E, Associate Professor, Yantai Institute of China Agricultural University, Yantai 264670, China. E-mail: lchune@126.com

**KEY WORDS:** pyrethroid; bioavailability; *Stichopus japonicus*; *in vitro* simulated digestion

## 0 引言

拟除虫菊酯(pyrethroid)是以天然成分除虫菊酯合成的一类仿生农药, 由于其高效低毒的特点, 目前在淡水养殖及农业中广泛使用<sup>[1-2]</sup>。尽管在海水养殖中几乎不用拟除虫菊酯类药物, 但由于地表径流、雨水冲刷等途径, 此类药物极易进入海洋环境, 作为一种亲酯疏水的非离子型农药, 虽极难溶于水, 然而极易在沉积物中积累, 通过食物链在近海生物体内富集, 进而对人体健康构成威胁<sup>[3-4]</sup>。调查发现, 温州海域水产品中菊酯类农药残留含量为 0.01~6.78  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[5]</sup>; 上海市售水产品中溴氰菊酯的检出率在 2007 年已达到 6.90%<sup>[6]</sup>, 因此有必要对海产品中拟除虫菊酯的安全性进行调查研究。

刺参(*Stichopus japonicus*)体壁含有丰富的氨基酸、脂肪酸和微量元素等营养物质, 具有极高的营养价值<sup>[7]</sup>。作为我国水产养殖产值较高的种类, 2019 年年产量达到 17.17 万 t, 经济产值超 300 亿元<sup>[8]</sup>。刺参是滤食性动物, 摄食过程会导致环境污染物在体内的积累<sup>[9]</sup>, 因此不管是近岸底播养殖还是池塘养殖模式, 刺参都极易受到陆源污染物的影响。在本课题组前期的调研中发现, 近岸养殖刺参体内的拟除虫菊酯类含量可达到 0.01 mg/kg。GB 31650—2019《食品安全国家标准 食品中兽药最大残留限量》中对鱼体内氯氰菊酯和溴氰菊酯残留限量标准分别为 0.05 和 0.03 mg/kg, 对其他类水产品没有规定。

食品中污染物的总浓度并不能准确反映出存在的安全风险, 因为在消化过程中污染物并不能全部从食物基质中释放进而被机体吸收。生物可给性(bioavailability)是指能够被机体吸收进入血液循环并能在机体重分布的污染物的量, 这一概念可以更为准确地评价食品中污染物的危害。生物可给性的分析通常有动物实验和体外模拟消化模型两种方式。体外模拟模型具有简单、快速、成本低、条件容易控制等优点, 已广泛用于水产品包括重金属<sup>[10]</sup>、农药残留<sup>[11]</sup>等有害物质生物可给性的研究中<sup>[12-13]</sup>。影响生物可给性的因素很多, 其中加工处理过程不可避免对其浓度产生影响。目前研究发现, 加工过程对不同危害物生物可给性的影响并不相同<sup>[14]</sup>。GARCÍA 等<sup>[15]</sup>对比了加工对 4 种海藻中的砷(As)、铁(Fe)和锌(Zn)生物可给性的影响, 发现水煮之后, 海藻中的 Fe 和 Zn 几乎不被机体吸收, 而 As 的生物可给性为 9.7%~21.0%。

刺参的生长周期长, 养殖模式又极易受到陆源污染物残留的影响, 尽管拟除虫菊酯类农药在刺参养殖过程中几乎不使用, 但其对刺参的安全性研究方面应引起重视。而且目前国内外对刺参中拟除虫菊酯类农药的生物可给性的报道较少, 因此本研究以刺参为研究对象, 通过人工染

毒的方式, 采取体外模拟消化模型, 分析加工对刺参中 3 种拟除虫菊酯类(溴氰菊酯、甲氰菊酯和氯氰菊酯)生物可给性的影响, 以期对刺参的食用风险评价提供数据支持。

## 1 材料与仪器

### 1.1 材料与试剂

刺参, 体长(21±2.27) cm, 体重(67±4.55) g, 购自当地水产养殖企业, 带水活运至实验室暂养。

正己烷、乙腈(色谱纯)、胃蛋白酶(2500 U/mg)、脂肪酶(500 U/g)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 牛胆盐(胆酸含量≥70%, 北京索莱宝科技有限公司); 猪胰酶(1000 U/mg, 美国 Sigma-Aldrich 公司); 溴氰菊酯、甲氰菊酯、氯氰菊酯标准品(纯度≥98%, 农业部环境保护科研检测所); MQ3-3 QuEChERS 试剂盒(山东青云实验耗材有限公司); 冰醋酸、KCl、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、NaHCO<sub>3</sub>、NaCl、MgCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、CaCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

### 1.2 仪器设备

5804R 高速离心机(德国 Eppendorf 公司); VORTEX 2 S025 单管旋涡混匀器(德国 IKA-Werke 公司); L-129P 氮吹仪(北京来亨科技有限公司); THZ-82 水浴恒温振荡器(江苏杰瑞尔电器有限公司); Agilent 789 气相色谱仪、HP-5ms 色谱柱(30 m×320  $\mu\text{m}$ , 0.25  $\mu\text{m}$ )(美国 Agilent Technologies 公司); JY-200B 组织捣碎机(中山市九远电器有限公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品制备

刺参暂养 24 h 后, 加入菊酯标准品溶液(100 mg/L)染毒, 染毒后继续暂养 48 h。取刺参, 腹部注射 KCl, 将内脏排空, 从腹面剖开, 4°C 冷藏备用。将处理好的刺参随机分为两组: 原料组和加工组(沸水煮 10 min), 组织捣碎机绞成糜状备用。

#### 1.3.2 体外消化实验

参考 BRODKORB 等<sup>[16]</sup>的方法配制模拟消化液如表 1 所示, 其中电解质溶液按照表 2 配制, 分别模拟口腔、胃和肠道 3 个消化阶段。模拟消化方案: 口腔相[5 g 刺参糜用模拟唾液 1:1 (m:V)稀释, pH 为 7±0.2, 2 min]; 胃相[口腔消化物用模拟胃液 1:1 (m:V)稀释; 动态调节 pH<sup>[17]</sup>, 盐酸的添加总量为 2 mL, 在胃的开始阶段添加 0.4 mL, 然后每 15 min 添加 0.2 mL, 150 min]; 肠相[胃食糜用模拟肠液 1:1 (m:V)稀释, pH 为 7±0.2, 120 min]。模拟消化结束后, 将胃相 pH 调至 8.0±0.2, 将肠相液置于 95°C 水浴中加热 10 min, 停止消化过程。不同消化阶段的样品分别在 4°C、2930×g 离心 5 min, 取上清液进行菊酯类含量检测, 具体的体外模拟消化实验流程图见图 1。

表 1 模拟消化液配制表  
Table 1 Configuration table of simulated digestive solution

消化相	口腔(SSF)	胃(SGF)	小肠(SIF)		
食物	5 g 食糜	口腔相食糜 10 mL	胃相食糜 20 mL		
电解质溶液/mL	5	10	20		
0.15 mol/L CaCl <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub> /mL	0.01	0.01	0.08		
质量浓度/(mg/mL) + 体积/mL	-	16(胃蛋白酶)+1	10(胃脂肪酶)+1	55.55(猪胰酶)+12	50(胆汁盐)+12
H <sub>2</sub> O/mL	4	2.5	0		
5 mol/L HCL/mL	-	3.5	-		
5 mol/L NaOH/mL	-	-	4		
最终体积/mL	10	20	40		

注: SSF 为模拟唾液, SGF 为模拟胃液, SIF 为模拟肠液; -表示无。

表 2 电解质浓缩液配制表(mmol/L)  
Table 2 Electrolyte concentrate configuration table (mmol/L)

试剂	eSSF	eSGF	eSIF
	(pH 7)	(pH 1~5)	(pH 7)
KCl	15.1	6.9	6.8
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	3.7	0.9	0.8
NaHCO <sub>3</sub>	13.6	25.0	85.0
NaCl	1.08	47.20	38.40
MgCl <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	0.15	0.12	0.33
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.06	0.50	-
CaCl <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>	1.50	0.15	0.60

注: eSSF 为模拟唾液的电解质溶液; eSGF 为模拟胃液的电解质溶液; eSIF 为模拟肠液的电解质溶液。

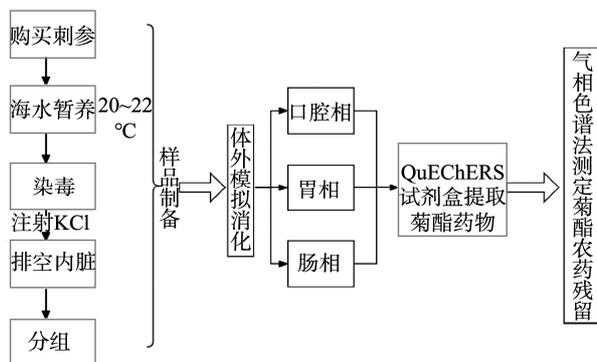


图 1 体外模拟消化实验流程图

Fig.1 Flow chart of *in vitro* simulated digestion experiment

### 1.3.3 拟除虫菊酯的提取

用 QuEChERS 试剂盒提取菊酯药物。将 10 g 刺参样品放入提取管中, 与超纯水混合, 均质, 加入 15 mL 乙腈 (含 1%冰醋酸), 摇动 1 min, 加入盐袋, 摇动 3 min, 在 2930×g 下离心 5 min (4°C)。将 5 mL 等量的上清液转移到 QuEChERS 纯化管中。摇匀浓缩 1 min 后, 取 3 mL 用氮气冲洗至干燥, 正己烷复溶。模拟消化后, 取胃相/肠相消化液 10 mL, 加入 15 mL 的 1% 的醋酸乙腈进行提取, 净化,

取 3 mL 氮吹后用正己烷复溶<sup>[18]</sup>。

### 1.3.4 拟除虫菊酯含量的测定

采用气相色谱法测定 3 种菊酯含量。色谱条件为: HP-5 ms 色谱柱(30 m×320 μm, 0.25 μm), 进样口温度 250°C, 电子捕获检测器温度 300°C, 程序升温 100°C 保持 2 min, 之后以 6°C/min 升到 270°C 保持 10 min。

### 1.3.5 生物可给性的计算

生物可给性按照公式(1)进行计算:

$$\text{生物可给性}/\% = \frac{\text{BIO}}{\text{BD}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, BIO: 模拟消化后菊酯浓度, mg/kg;

BD: 模拟消化前菊酯浓度, mg/kg。

## 1.4 数据统计与分析

所有实验均重复 4 次, 实验数据分析结果以“平均值±标准偏差”的形式表示。通过 Excel 2019 分析数据的显著性差异, 采用 Duncan 法分析数据间显著性差异的大小,  $P < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果与分析

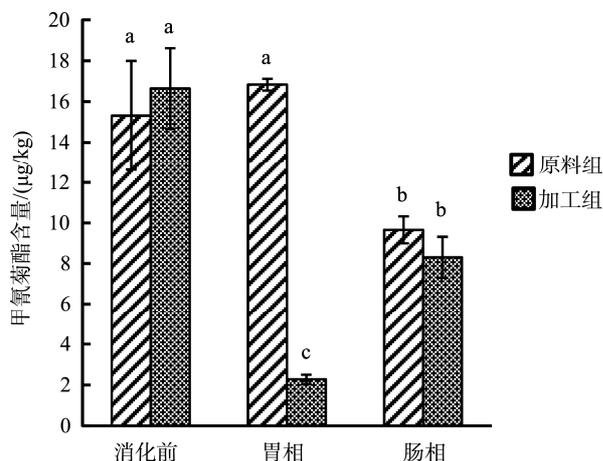
### 2.1 不同消化阶段刺参中 3 种拟除虫菊酯的含量变化

#### 2.1.1 不同消化阶段刺参中甲氰菊酯的含量变化

体外模拟不同消化阶段刺参中甲氰菊酯的浓度变化如图 2 所示。加工组中, 各阶段浓度变化显著( $P < 0.05$ ), 胃相的残留浓度最低, 消化前的浓度最高; 不管是原料组还是加工组, 经过肠相模拟消化后, 甲氰菊酯的浓度均显著低于消化前( $P < 0.05$ )。

#### 2.1.2 不同消化阶段刺参中氯氰菊酯的含量变化

不同模拟消化阶段氯氰菊酯的浓度变化与甲氰菊酯有相似之处, 即加工组胃相中氯氰菊酯浓度显著低于原料组( $P < 0.05$ )(图 3), 而原料组胃相中氯氰菊酯浓度最大, 显著高于消化前和肠相中的含量( $P < 0.05$ ), 不管是原料组还是加工组, 肠相中氯氰菊酯的浓度均低于消化前。



注: 不同字母表示在  $P < 0.05$  水平上差异显著, 下同。

图 2 不同消化阶段刺参中甲氧菊酯的浓度( $n=4$ )

Fig.2 Concentrations of fenprothrin in *Stichopus japonicus* at different digestive stages ( $n=4$ )

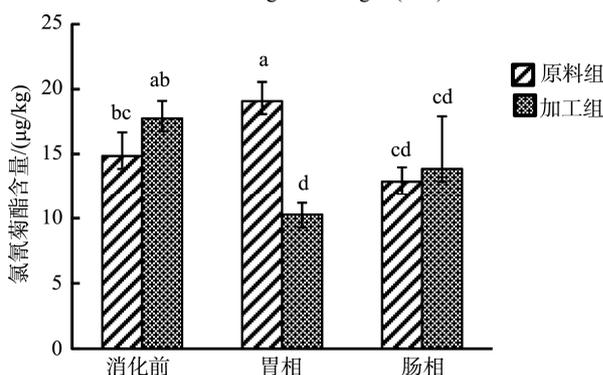


图 3 不同消化阶段刺参中氯氰菊酯的浓度( $n=4$ )

Fig.3 Concentrations of cypermethrin in *Stichopus japonicus* at different digestion stages ( $n=4$ )

### 2.1.3 不同消化阶段刺参中溴氰菊酯的含量变化

图 4 为溴氰菊酯在不同消化阶段的含量分析。加工组中, 各阶段菊酯浓度变化趋势与甲氧菊酯相似, 即消化前>肠相>胃相( $P < 0.05$ ), 经过肠相模拟消化后, 不管是原料组还是加工组, 其溴氰菊酯浓度均显著低于消化前( $P < 0.05$ )。

### 2.1.4 不同消化阶段刺参中 3 种拟除虫菊酯的含量变化结果分析

经过水煮加工后, 未经过模拟消化处理的刺参中 3 种拟除虫菊酯浓度均升高, 且加工后肠相溴氰菊酯的含量显著高于原料组( $P < 0.05$ )。前处理及烹饪方式对水产品中污染物的含量影响是复杂的, 一般认为经过热处理后, 基质中的危害物可能发生流失、转移或者水解等, 导致其含量降低。本研究结果也表明, 经过水煮处理后, 水中残留的 3 种拟除虫菊酯类含量在 5.31~6.00  $\mu\text{g/L}$  之间, 均较高, 这说明经过水煮热处理后, 刺参中有部分的菊酯类农药进入了加工用水中。但也有实验表明, 加工能提高污染物含量。ALMELA 等<sup>[19]</sup>发现紫菜烘烤后, 砷的含量显著上升。牡蛎经过蒸煮后

其稀土含量比原料牡蛎增加了 0.24  $\text{mg/kg}$ , 而炸牡蛎比原料牡蛎稀土含量降低了 0.25  $\text{mg/kg}$ <sup>[20]</sup>。加工后食品中污染物浓度反而升高, 原因可能为加热导致的挥发性物质的损失, 以及食品中其他主要成分包括蛋白质、脂质、碳水化合物等在热处理过程中的流失, 降低了样品的实际干重, 从而导致单位重量的样品中污染物浓度升高<sup>[20]</sup>。总的来看, 加工组中 3 种拟除虫菊酯在不同消化阶段的浓度变化趋势相同, 消化前含量最高, 加工组与原料组相比, 经过胃相消化后, 3 种拟除虫菊酯类农药残留含量均显著降低( $P < 0.05$ )。这也与 JIAO 等<sup>[21]</sup>的实验结果相类似, 生牡蛎经过胃相模拟消化后溴氰菊酯的含量均显著高于蒸牡蛎和烤牡蛎模拟消化组( $P < 0.05$ )。对于甲氧菊酯和氯氰菊酯, 经过肠道模拟消化后, 是否经过加工处理对其含量影响不大; 而溴氰菊酯在肠相的含量, 加工组显著高于原料组( $P < 0.05$ )。对于加工组, 甲氧菊酯和溴氰菊酯经过肠相模拟消化后的含量显著高于胃相( $P < 0.05$ ), 氯氰菊酯在肠相中含量高于胃相。吕艳<sup>[22]</sup>发现在模拟胃环境的条件下, 食物中六六六的释放率小于 8%, 滴滴涕释放率小于 2%; 而在肠环境中, 前者的释放率达到 60%, 后者也可达到 58%, 即污染物主要在肠道阶段释放。肠液配方中丰富的有机碳提高了污染物从基质到消化液的释放<sup>[23]</sup>。

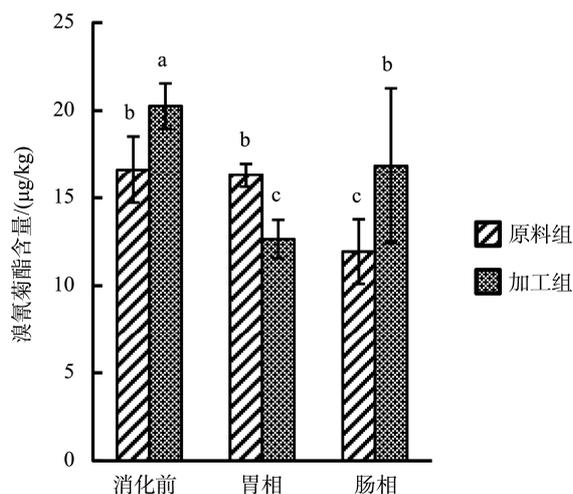


图 4 不同消化阶段刺参中溴氰菊酯的浓度( $n=4$ )

Fig.4 Concentrations of deltamethrin in *Stichopus japonicus* at different digestion stages ( $n=4$ )

原料组氯氰菊酯的肠相浓度略低于消化前, 此外, 不管是原料组还是加工组, 与消化前相比, 经过肠道模拟消化后, 甲氧菊酯和溴氰菊酯残留浓度均显著降低( $P < 0.05$ )。这可能是由于肠消化液中胰酶和胆汁盐的存在使得菊酯类农药发生了水解或降解。VAN 等<sup>[24]</sup>的研究报道也认为, 胆汁盐的乳化作用能够在系统中形成细小胶体, 促进污染物释放并进一步被人体吸收。3 种拟除虫菊酯类农药经过不同阶段的模拟消化后, 其含量变化并不一致, 这与不同药物在体内的代谢方式有关。CROW 等<sup>[25]</sup>实验结果表明了羧酸酯酶和拟除虫菊酯之

间的相关性,发现反式氯氰菊酯可以被水解,而溴氰菊酯和生物吡啶菊酯没有发生水解。CORCELLAS 等<sup>[26]</sup>也发现反式异构体的降解速度比顺式异构体快,然而顺式异构体比反式异构体更容易在生物体中富集。拟除虫菊酯在人体消化液的作用下发生不同程度的水解,对于这些水解产物的生物活性有待于进一步的研究<sup>[27-28]</sup>。

## 2.2 刺参中 3 种拟除虫菊酯类的生物可给性

加工对刺参中 3 种拟除虫菊酯类的生物可给性如图 5 所示。由图 5 可知,原料组中甲氰菊酯、氯氰菊酯和溴氰菊酯的生物可给性分别为 63.09%、86.67%和 71.83%,加工组中溴氰菊酯的生物可给性最高为 83.18%,甲氰菊酯类的最低为 49.88%。3 种拟除虫菊酯中,甲氰菊酯的生物可给性不管在原料组还是加工组均为最低。除了溴氰菊酯,加工后另外两种菊酯类其生物可给性均低于原料组。JIAO 等<sup>[21]</sup>的实验结果表明,加工后的牡蛎中溴氰菊酯的生物可给性低于生牡蛎肉,这与本研究结果并不一致,这可能与不同食品基质的蛋白质结构性质有关。加工导致食品中污染物生物可给性降低的原因可能是热处理后,肌肉纤维中的蛋白质变性,组织收缩,随着加热的进行,蛋白质发生凝固,形成大的不溶性聚集体,在凝固过程中亲脂性的危害物与蛋白质结合进而被保存在组织中<sup>[29]</sup>。KILCOYNE 等<sup>[30]</sup>对烹饪后贻贝中氮杂丝氨酸(azisserrine, AZAs)生物可给性的分析也证实了这一点。这说明对于某些种类的食品危害物,可以通过清洗、加工等处理手段降低其机体摄入量。

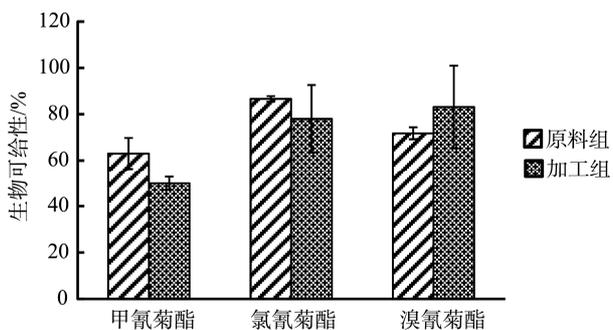


图 5 刺参中 3 种菊酯类的生物可给性(n=4)

Fig.5 Bioavailabilities of 3 kinds of pyrethroids in *Stichopus japonicus* (n=4)

然而食品中危害物的生物可给性受很多因素的影响,不仅与危害物的种类、食品的种类,也和食品的物理化学特性、热处理方式及污染物进入食品的途径等有关。经过热处理后,食品中水分及一些易溶、易被消化的成分消失,可能是生物可给性提高的原因之一<sup>[31]</sup>。目前对海洋生物中砷的生物可给性研究较为广泛,鱼类和软体动物中砷的生物可给性分别为 83%和 99%<sup>[32]</sup>,这说明危害物的生物可给性与食品基质关系很大。吕艳<sup>[22]</sup>也认为基质中的脂含量是影响消化吸收的重要方面,基质中脂含量高对化合物的锁定强,不易释放,消化率低。本研究中刺参加工后溴氰菊酯的生物

可给性升高,可能是因为加热改变了溴氰菊酯的构型,发生了异构体转化。溴氰菊酯含有 3 个手性碳,具有 8 个异构体,在检测过程中发现了两种同分异构体,且加热后异构体发生了转化。加工对食品中拟除虫菊酯类农药异构体的转化以及毒理学影响需进一步研究。

体外模拟消化模型主要包括静态模拟模型和动态模拟模型两大类,每一类中根据消化阶段、酶及有机物等的组成不同,又分为多种方法,目前并没有一种标准方法。本研究采用的标准化体外模拟消化模型是目前较为公认的方法之一,方法中使用的消化参数如电解质、胃肠道消化酶、pH 及消化时间等都是依据当前掌握的人体生理数据设定<sup>[17]</sup>。此外,众所周知,胃相消化过程中,其 pH 是不断变化的,有研究者指出了体外模拟消化过程中 pH 的变化对生物可给性的重要影响<sup>[33]</sup>。为更好地模拟消化过程,在课题组前期工作的基础上,根据 SAMS 等<sup>[17]</sup>阐述的胃排空过程胃相中 pH 的变化规律,本研究在 INFOGEST 体外模型的基础上采用胃相动态 pH 调控,以期能更好地还原人体胃相中真实的生理环境。

## 3 结论

本研究通过胃相动态 pH 和静态肠相的体外模拟消化模型来研究刺参中 3 种拟除虫菊酯类(甲氰菊酯、氯氰菊酯和溴氰菊酯)生物可给性的影响,探究发现加工后胃相中 3 种拟除虫菊酯类含量均显著降低,肠相中甲氰菊酯和溴氰菊酯含量较消化前浓度都均显著降低,原料组中甲氰菊酯、氯氰菊酯和溴氰菊酯的生物可给性分别为 63.09%、86.67%和 71.83%。在进行加热处理后,甲氰菊酯、氯氰菊酯的生物可给性均低于原料组。证明加热处理能在一定程度降低刺参中拟除虫菊酯类的生物可给性。然而污染物生物可给性的影响因素较多,且加工过程影响了菊酯类同分异构体的转化,使得生物可给性的分析更加复杂。今后对水产品中危害物的生物可给性研究,不仅需要选择合适的体外消化模型,同时应充分考虑其他因素,如小肠微生物群的多样性、成分之间的相互作用等,此外,不同加工方式的影响也有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] CH R, SINGH AK, PATHAK MK, *et al.* Saliva and urine metabolic profiling reveals altered amino acid and energy metabolism in male farmers exposed to pesticides in Madhya Pradesh State, India [J]. *Chemosphere*, 2019, 226: 636-644.
- [2] LU SM, LIAO MJ, XIE CX, *et al.* Seasonal dynamics of ammonia-oxidizing microorganisms in freshwater aquaculture ponds [J]. *Ann Microbiol*, 2015, 65(2): 651-657.
- [3] 提清清, 聂兆广, 杨凡昌, 等. 拟除虫菊酯农药暴露途径及对人体健康的影响[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(12): 240-248.
- [4] TI QQ, NIE ZG, YANG FC, *et al.* Study on exposure routes of pyrethroid insecticides and its effects on human health [J]. *Environ Sci Technol*, 2017, 40(12): 240-248.
- [4] 狄楠楠. 典型拟除虫菊酯在渤海海岸带环境中的迁移与转化[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
- [4] DI NN. The migration and transformation of typical pyrethroids in bohai

- coastal environment [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010.
- [5] 孙秀梅, 邵文, 金衍健, 等. 典型养殖环境及水产品中拟除虫菊酯类农药残留分析及食用风险评估[J]. 山东化工, 2020, 49(22): 78, 83. SUN XM, HAO W, JIN YJ, *et al.* Pollution characteristics and food risk assessment of pyrethrin pesticide residues in sediments, water and aquatic product [J]. Shandong Chem Ind, 2020, 49(22): 78, 83.
- [6] 徐捷, 蔡友琼, 黄冬梅, 等. 水产品中溴氰菊酯残留情况的调查[J]. 环境与健康杂志, 2008, (5): 384. XU J, CAI YL, HUANG DM, *et al.* Investigation of deltamethrin residues in aquatic products [J]. J Environ Health, 2008, (5): 384.
- [7] 汤奎, 刘小林, 张帅, 等. 3 种不同体色刺参体壁营养成分的比较研究[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(3): 155–162. TANG K, LIU XL, ZHANG S, *et al.* Comparative study on the nutrient composition in body walls of three body color variants of the sea cucumbers, *Apostichopus japonicus* (Selenka) [J]. Prog Fish Sci, 2021, 42(3): 155–162.
- [8] 廖梅杰, 王印庚, 李彬, 等. 我国海参养殖产业现状、存在问题及对策探讨(上)[J]. 科学养鱼, 2021, (2): 24–25. LIAO MJ, WANG YG, LI B, *et al.* Discussion on the present situation, existing problems and countermeasures of sea cucumber culture industry in China (part I) [J]. Sci Fish Farm, 2021, (2): 24–25.
- [9] 宋珊珊, 车如心, 刘仁沿, 等. 我国虾夷扇贝毒素的研究进展[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(5): 785–791. SONG SS, CHE RX, LIU RY, *et al.* Research progresses on yessotoxins in China [J]. Marin Environ Sci, 2018, 37(5): 785–791.
- [10] 李娜, 耿照梦, 郭莹莹, 等. 水产品中重金属生物可给性与生物有效性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(5): 1367–1373. LI N, GENG ZM, GUO YY, *et al.* Research progress of bio-accessibility and bioavailability of heavy metals in aquatic products [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(5): 1367–1373.
- [11] 付瑾, 崔岩山. 食物中营养物质及污染物的生物可给性研究进展[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(2): 113–120. FU J, CUI YS. Advances in bioaccessibility of nutrients and pollutants in food [J]. Asian J Ecotoxicol, 2011, 6(2): 113–120.
- [12] FREITAS M, AZEVEDO J, CARVALHO AP, *et al.* Bioaccessibility and changes on cylindrospermopsin concentration in edible mussels with storage and processing time [J]. Food Control, 2016, 59: 567–574.
- [13] MANYES L, RUIZ MJ, LUCIANO FB, *et al.* Bioaccessibility and bioavailability of fumonisin B<sub>2</sub> and its reaction products with isothiocyanates through a simulated gastrointestinal digestion system [J]. Food Control, 2014, 37: 326–335.
- [14] 汪光, 李开明, 吕永龙, 等. 食品烹调处理过程中砷的浓度、形态和生物可给性研究进展[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(2): 132–137. WANG G, LI KM, LV YL, *et al.* A review on arsenic concentration, speciation and bioaccessibility in food during cooking treatment [J]. Asian J Ecotoxicol, 2013, 8(2): 132–137.
- [15] GARCÍA SC, BARCIELA-ALONSO MC, MOREDA-PIÑEIRO A, *et al.* Study of cooking on the bioavailability of As, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Se and Zn from edible seaweed [J]. Microchem J, 2013, 108: 92–99.
- [16] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, *et al.* INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nat Protoc, 2019, 14(4): 991–1014.
- [17] SAMS L, PAUME J, GIALLO J, *et al.* Relevant pH and lipase for *in vitro* models of gastric digestion [J]. Food Funct, 2016, 7(1): 30–45.
- [18] 焦亚丹. 牡蛎各组织中溴氰菊酯富集程度分析及其生物可给性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2021. JIAO YD. Analysis the enrichment degree of deltamethrin in various tissues of oyster and study the bioaccessibility of deltamethrin [D]. Beijing: China Agricultural University College, 2021.
- [19] ALMELA C, LAPARRA JM, VÉLEZ D, *et al.* Arsenosugars in raw and cooked edible seaweed: Characterization and bioaccessibility [J]. J Agric Food Chem, 2005, 53: 7344–7351.
- [20] LIU CE, LIN H, MI NS, *et al.* Effect of thermal processing on the concentration and bioaccessibility of rare earth elements in seaweed and oyster [J]. J Food Process Pres, 2017, 41(6): 1–6.
- [21] JIAO YD, LIU CE, FENG CS, *et al.* Bioaccessibility and intestinal transport of deltamethrin in Pacific oyster (*Magallana gigas*) using simulated digestion/NCM460 cell models [J]. Front Nutr, 2021, 8: 726620.
- [22] 吕艳. 食物中有机氯农药在人体消化吸收的体外模拟研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2009. LV Y. Bioaccessibility and bioavailability of OCPs and PAHs in food using an *in-vitro* gastrointestinal model [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2019.
- [23] LU M, LI G, YANG Y, *et al.* A review on *in-vitro* oral bioaccessibility of organic pollutants and its application in human exposure assessment [J]. Sci Total Environ, 2020, 752(12): 142001.
- [24] VAN WTR, VERSTRAETE W, SICILIANO SD. Polycyclic aromatic hydrocarbon release from a soil matrix in the *in vitro* gastrointestinal tract [J]. J Environ Qual, 2004, 33: 1343–1353.
- [25] CROW J, BORAZJANI A, POTTER P, *et al.* Hydrolysis of pyrethroids by human and rat tissues: Examination of intestinal, liver and serum carboxylesterases [J]. Toxicol Appl Pharm, 2007, 221(1): 1–12.
- [26] CORCELLAS C, ELJARRAT E, BARCELÓ D. First report of pyrethroid bioaccumulation in wild river fish: A case study in Iberian river basins (Spain) [J]. Environ Int, 2015, 75: 110–116.
- [27] WANG J, LIN K, TAYLOR A, *et al.* *In vitro* assessment of pyrethroid bioaccessibility via particle ingestion [J]. Environ Int, 2018, 119: 125–132.
- [28] LU Q, SUN Y, ARES I, *et al.* Deltamethrin toxicity: A review of oxidative stress and metabolism [J]. Environ Res, 2019, 170: 260–281.
- [29] KULP KS, FORTSON SL, KNIZE MG, *et al.* An *in vitro* model system to predict the bioaccessibility of heterocyclic amines from a cooked meat matrix [J]. Food Chem Toxicol, 2003, 41(12): 1701–1710.
- [30] KILCOYNE J, TJM J, KROCK B, *et al.* Azaspiracids-toxicological evaluation, test methods and identification of the source organisms (ASTOX II) [Z].
- [31] HE M, KE CH, WANG WX. 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.
- [32] MOREDA-PINEIRO J, ELIA AR, VANESSA RH, *et al.* Assessment of the bioavailability of toxic and non-toxic arsenic in seafood samples [J]. Food Chem, 2012, 130(3): 552–560.
- [33] ALVES RN, RAMBLA-ALEGRE M, BRAGA AC, *et al.* Bioaccessibility of lipophilic and hydrophilic marine biotoxins in seafood: An *in vitro* digestion approach [J]. Food Chem Toxicol, 2019, 129: 153–161.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

## 作者简介



朱绍彰, 主要研究方向为水产养殖学。  
E-mail: zszywzq@163.com



刘春娥, 副教授, 主要研究方向为水产品加工及安全。  
E-mail: lchune@126.com