

# $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ 辐照对克氏原螯虾副产物溶解度及结构的影响

邹朝晖<sup>1,4</sup> 张勇<sup>1,4</sup> 李先<sup>1,4</sup> 李金龙<sup>2</sup> 邹梁锋<sup>3</sup> 周毅吉<sup>1</sup> 徐远芳<sup>1</sup>

张祺玲<sup>1</sup> 邓超<sup>1</sup> 邓钢桥<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(湖南省核农学与航天育种研究所 长沙 410125)

<sup>2</sup>(湖南省水产科学研究所 长沙 410153)

<sup>3</sup>(怀化学院 怀化 418000)

<sup>4</sup>(湖南省农业生物辐照工程技术研究中心 长沙 410125)

**摘要** 采用 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线(吸收剂量为0 kGy、5 kGy、15 kGy、20 kGy、30 kGy和50 kGy)对不同含水量的克氏原螯虾副产物进行辐照,研究了辐照对克氏原螯虾副产物的pH、溶解度、游离氨基酸含量及结构特性的影响。结果表明:辐照降低克氏原螯虾副产物的pH,即pH从7.93降低到7.22;随着吸收剂量及含水量的增加,克氏原螯虾副产物的溶解度升高,各处理样品中溶解度最高达35.71%,最低为16.23%;辐照能提高克氏原螯虾副产物中游离氨基酸含量,当吸收剂量为50 kGy时,游离氨基酸含量达到34.66%;通过紫外和红外扫描观察,克氏原螯虾副产物在辐照前后的吸收特征峰没有太大的变化,但吸收强度发生变化。

**关键词** 克氏原螯虾,副产物,辐照,降解

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0039

引用该文:

邹朝晖,张勇,李先,等. $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照对克氏原螯虾副产物溶解度及结构的影响[J].辐射研究与辐射工艺学报,2023,41(5):050401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0039.

ZOU Zhaohui, ZHANG Yong, LI Xian, *et al.* Effect of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray irradiation on solubility and structure of byproducts of *Procambarus clarkii*[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(5): 050401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0039.



## Effect of $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ -ray irradiation on solubility and structure of byproducts of *Procambarus clarkii*

ZOU Zhaohui<sup>1,4</sup> ZHANG Yong<sup>1,4</sup> LI Xian<sup>1,4</sup> LI Jinlong<sup>2</sup> ZOU Liangfeng<sup>3</sup> ZHOU Yiji<sup>1</sup>

XU Yuanfang<sup>1</sup> ZHANG Qiling<sup>1</sup> DENG Chao<sup>1</sup> DENG Gangqiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Hunan Institute of Nuclear Agronomy and Aerospace Breeding, Changsha 410125, China)

<sup>2</sup>(Hunan Fisheries Science Institute, Changsha 410153, China)

<sup>3</sup>(Huaihua University, Huaihua 418000, China)

<sup>4</sup>(Hunan Province Engineering Technology Research Center of Agricultural Biological Irradiation, Changsha 410125, China)

基金资助: 湖南省农业创新资金重点项目(2022CX96)资助

第一作者: 邹朝晖,男,1976年7月出生,2007年于湖南农业大学获理学硕士学位,现从事辐照食品加工技术应用研究,研究员, E-mail: 383763081@qq.com

收稿日期: 初稿 2023-05-05; 修回 2023-06-09

Supported by the Agricultural Science and Technology Innovation Fund of Hunan Province (2022CX96)

First author: ZOU Zhaohui (male) was born in July 1976, and obtained his master's degree in biophysics from Hunan Agricultural University in 2007. Now he is a professor engaging in the application of irradiation food processing technology. E-mail: 383763081@qq.com

Received 05 May 2023; accepted 09 June 2023

**ABSTRACT** The effects of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray irradiation (absorbed dose: 0 kGy, 5 kGy, 15 kGy, 20 kGy, 30 kGy, and 50 kGy) on the pH, solubility, free amino acid content, and structural characteristics of *Procambarus clarkii* byproducts were studied. The results showed that irradiation reduced the pH value of the byproducts of the *Procambarus clarkii*, namely, the pH value decreased from 7.93 to 7.22. With increasing absorbed dose and water content, the solubility of the byproducts of *Procambarus clarkii* increased, with the highest solubility reaching 35.71% and the lowest being 16.23% in each treated sample. Irradiation could increase the content of free amino acids in the byproducts of *Procambarus clarkii*, and when the absorbed dose was 50 kGy, the content of free amino acids reached 34.66%. Through UV and infrared scanning revealed that the absorption characteristic absorption peaks of the byproducts did not show significant changes before and after irradiation, but the absorption intensity changed.

**KEYWORDS** *Procambarus clarkii*, Byproducts, Irradiation, Depolymerization

**CLC** TL99

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)俗称小龙虾,属于节肢动物门甲壳纲,原产于北美洲<sup>[1]</sup>,经过70多年的发展,我国已是克氏原螯虾副产物生产和消费大国<sup>[2-3]</sup>。在克氏原螯虾食用或加工过程中会产生大量的虾壳、虾头等副产物,长期以来这些副产物未得到很好的利用,不仅造成资源浪费,还会引起严重的环境污染,充分挖掘克氏原螯虾副产物的潜在价值,对于实现克氏原螯虾副产物充分利用和减缓环境污染问题有着重要意义。研究发现,克氏原螯虾副产物中含有丰富的蛋白质、虾青素、甲壳素、维生素、矿物质等多种营养成分<sup>[4]</sup>,如何深度开发和利用这些有用成分已成为制约克氏原螯虾产业化的技术瓶颈之一。近年来,克氏原螯虾副产物高值化利用已成为研究的热点,但是许多研究集中在甲壳素<sup>[5-7]</sup>、壳聚糖<sup>[8-9]</sup>、蛋白肽<sup>[10-11]</sup>、虾青素<sup>[12-13]</sup>、钙与金属螯合肽<sup>[14-15]</sup>等活性物质的提取与应用方面,虽然探索出一系列提取工艺,但是离产业化还有一定距离。目前,克氏原螯虾副产物的主要利用方式是制成虾壳粉,作为动物饲料进行利用<sup>[16-17]</sup>,而虾壳粉比较难溶于水,许多营养成分不能被动物所利用而被浪费掉。然而,虾壳粉营养成分分析方面的研究仍相对较少,杨琦等<sup>[18]</sup>主要从概略养分和矿物质元素方面做了报道;程小飞等<sup>[19]</sup>从氨基酸和脂肪酸营养成分分析方面做了研究。关于如何降解虾壳粉中蛋白质、脂类、糖类有机高分子提高其营养价值却鲜有报道。

克氏原螯虾副产物中含有多种高分子的有机物,为了提高其营养价值,需要降解成可消化和吸收的低分子有机物,国内外目前主要的降解方法有化学法、酶解法以及微波、超声、辐照等物理方法<sup>[20-22]</sup>,而辐照降解法是一种绿色、环保、

高效的方法,被广泛应用到壳聚糖、透明质酸、魔芋聚糖、蛋白质等高分子降解中<sup>[23-25]</sup>。本研究以克氏原螯虾副产物为原料,采用辐照降解技术对其降解,研究 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线对克氏原螯虾副产物结构特性的影响,以期为克氏原螯虾资源的深度开发和利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

本研究所采用的虾壳粉是由克氏原螯虾副产物经过烘干粉碎而制成,由湖南顺祥水产食品有限公司提供;溴化钾、浓盐酸(优级纯)、苯酚、柠檬酸钠、氢氧化锂、冰乙酸、二甲基亚砷、水合茛三酮、还原茛三酮、氢氧化钠均购自国药集团上海化学试剂有限公司;实验用水为去离子水。

### 1.2 仪器与设备

R-550型可见分光光度计,巩义予华仪器有限责任公司;ENSOR37红外光谱仪,布鲁克光谱仪器公司;AP-01P VACUUMPUMP抽滤仪,北京哈纳纳科技有限公司;101型电热鼓风干燥箱,上海雷磁公司;P211HANNA酸度计,北京哈纳纳科技有限公司;CF-16RX离心机,日本Hitachi公司;WGZ-1色度计,上海昕瑞仪器仪表有限公司;L-8900氨基酸自动分析仪,日本IHI公司;SB-5200型超声波清洗器,上海新芝生物技术研究所。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品处理与样品辐照

克氏原螯虾副产物通过粉碎机粉碎后,烘干,磨碎,过420  $\mu\text{m}$ 筛,备用。试验设5组,每组

1 200 g, 含水量分别为 4.86%、16.20%、25.23% 和 37.56%, 每组平均分成 6 份, 每份 200 g, 装入保鲜袋中, 待辐照。

辐照在湖南省农业科学院核农学与航天育种研究所进行, 采用<sup>60</sup>Co γ辐照装置, 吸收剂量分别为 0 kGy、5 kGy、15 kGy、20 kGy、30 kGy 和 50 kGy, 剂量率为 300 Gy/h, 每处理重复 3 次, 处理后的样品立即置于 4 °C 冰箱保存, 待测。

### 1.3.2 指标测定

(1) 克氏原螯虾副产物 pH 及水溶性组分含量测定。称取 2.0 g (精确至 0.000 1 g) 样品, 按固液比 1:25 (m/V) 加入 50 mL 蒸馏水于三角瓶中, 在 50 °C、130 r/min 条件下提取 2 h, 抽滤, 滤液测 pH, 滤渣采用 90 mL 蒸馏水分 3 次冲洗后, 于 105 °C 烘干至恒重, 即为  $m_2$ , 见式 (1)。

$$A(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $A$  为水溶性组分含量;  $m_1$  为样品绝干质量, g;  $m_2$  为水洗后残渣质量, g。

(2) 克氏原螯虾副产物基团结构测定。采用紫外分光光度计(UV)进行全波长光谱扫描和特征吸收峰的测定, 采用傅里叶变换红外谱仪(FTIR)进行测定基团变化情况; 液体样品冷冻干燥后, 与溴化钾(KBr)粉末混合研磨、压片, 纯 KBr 片作参比, 1  $\text{cm}^{-1}$  分辨率, 多次扫描积累。

(3) 克氏原螯虾副产物水分含量的测定。(105±2) °C 常压烘干法(国标 GB/T5009.3—2010)<sup>[26]</sup>。

(4) 氨基酸测定。参考 GB/T5009.124—2003 《食品中氨基酸的测定》方法<sup>[27]</sup>。

## 1.4 数据处理

数据采用 Excel 2016 软件进行数据统计、SPSS 23.0 软件进行显著性差异分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 辐照对克氏原螯虾副产物 pH 的影响

不同含水量的克氏原螯虾副产物经过不同吸收剂量处理后, 溶于水, 过滤后, 测得其 pH, 结果见图 1。由图 1 可知, 各处理样品都呈碱性, pH 最高达 7.93, 最低值为 7.22; 同一含水量, 随着吸收剂量增大, 克氏原螯虾副产物 pH 逐渐降低, 这

可能是辐照对克氏原螯虾副产物中蛋白质的影响, 在辐照的作用下蛋白质的氢键和二硫键容易断裂, 形成多肽、寡肽、氨基酸、基团等<sup>[28-29]</sup>, 吸收剂量越高, 降解效果越好, 酸性化合物的含量将会显著上升, 从而降低了 pH; 同一吸收剂量处理, 随着含水量的增加, 克氏原螯虾副产物 pH 也随之降低, 这可能是含水量越高, 辐照激发水合电子和羟基自由基的量产生就越多, 导致肽链断裂或者使自由基迁移到易激发的氨基酸侧链上, 诸如胱氨酸、半胱氨酸、酪氨酸、甲硫氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、色氨酸和赖氨酸, 对克氏原螯虾副产物降解就越强。

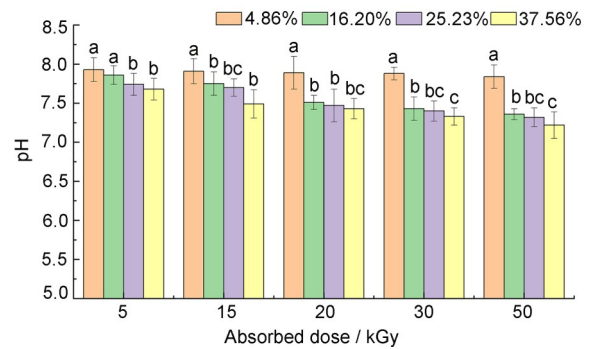


图 1 辐照对克氏原螯虾副产物 pH 的影响; a、b、c 表示同一剂量不同含水量存在显著差异 ( $p < 0.05$ ) (彩色见网络版)

Fig.1 Effects of irradiation on pH of byproducts of *Procambarus clarkii*: a, b, and c indicated that there was significant difference in water content of the sample with same absorbed dose ( $p < 0.05$ ) (color online)

### 2.2 辐照对克氏原螯虾副产物水溶性组分含量的影响

克氏原螯虾副产物中主要含有甲壳素、虾青素、壳聚糖、粗蛋白、脂类、糖类等物质, 不易溶于水, 对不同含水量克氏原螯虾副产物进行辐照处理后, 干燥, 研磨, 加入蒸馏水, 测得其溶解度, 结果见图 2。由图 2 可知, 各处理样品中溶解度最高达 35.71%, 最低为 16.23%, 同一剂量处理下, 随着含水量的升高, 溶解度逐渐增加, 含水量由 4.86% 升高到 37.56%, 吸收剂量为 15 kGy 时, 其溶解度从 17.81% 增加到 26.32%, 增加了 47.78%。同一含水量, 随着吸收剂量的增加, 克氏原螯虾副产物的溶解度也随之升高, 当含水量为 16.20%, 吸收剂量从 5 kGy 增加到 50 kGy 时, 其溶解度从 18.89% 升高到 28.67%, 增加了 51.77%。

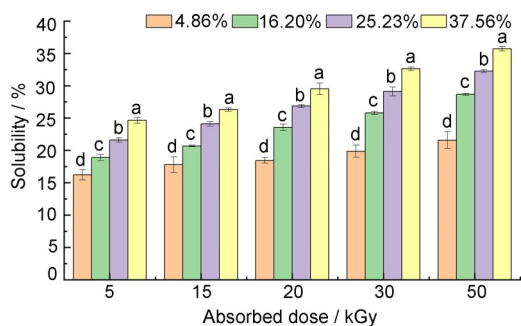


图2 辐照对克氏原螯虾副产物溶解度的影响;a,b,c,d表示同一吸收剂量不同含水量存在显著差异( $p < 0.05$ ) (彩色见网络版)

Fig.2 Effects of irradiation on solubility of byproducts of *Procamburus clarkii*; a, b, c, and d indicated that there was significant difference in water content of the sample with same absorbed dose ( $p < 0.05$ ) (color online)

### 2.3 辐照对克氏原螯虾副产物游离氨基酸含量变化的影响

游离氨基酸含量是影响饲料品质的重要因素之一,克氏原螯虾副产物中粗蛋白质含量高于米

糠粕、玉米胚芽粕、苜蓿草粉,是良好的蛋白质饲料,其游离氨基酸含量在30%左右<sup>[30]</sup>。采用不同剂量辐照含水量为4.86%克氏原螯虾副产物,检测其游离氨基酸含量,结果如表1所示。从表1可知,随吸收剂量增加,游离氨基酸的含量缓慢上升。剂量为5 kGy、15 kGy、20 kGy时,各处理与对照差异不显著,剂量为30 kGy、50 kGy时,各处理与对照有显著差异( $0.01 < p < 0.05$ );游离氨基酸最高含量为34.66%,高于对照样20.22%;辐照对克氏原螯虾副产物中必需氨基酸及非必需氨基酸都有影响,必需氨基酸增加了21.93%,非必需氨基酸增加了16.24%,影响最大的是赖氨酸,增加了37.39%,影响最小的是谷氨酸,增加了10.16%。因此,辐照对克氏原螯虾副产物中游离氨基酸含量有影响,但是当吸收剂量较小时,影响不显著,这可能与其含水量有关,含水量越高,其降解效果就越好,游离氨基酸含量就越高<sup>[31-32]</sup>。

表1 辐照对克氏原螯虾副产物游离氨基酸含量的影响  
Table 1 Effects of irradiation on the content of free amino acids in byproducts of *Procamburus clarkii* (%)

指标 Indicators	0 kGy	5 kGy	15 kGy	20 kGy	30 kGy	50 kGy
赖氨酸 Lysine	1.15±0.04	1.17±0.08	1.20±0.06	1.26±0.11	1.45±0.09	1.58±0.13
苏氨酸 Threonine	1.21±0.09	1.22±0.07	1.25±0.12	1.30±0.07	1.36±0.11	1.47±0.09
缬氨酸 Valine	1.37±0.12	1.41±0.10	1.45±0.09	1.51±0.13	1.59±0.09	1.69±0.07
蛋氨酸 Methionine	0.62±0.07	0.65±0.03	0.70±0.02	0.74±0.05	0.79±0.05	0.88±0.05
异亮氨酸 L-Isoleucine	1.09±0.06	1.12±0.07	1.16±0.07	1.22±0.09	1.28±0.13	1.42±0.07
亮氨酸 Leucine	1.95±0.18	1.98±0.24	2.07±0.13	2.13±0.14	2.19±0.16	2.31±0.15
苯丙氨酸 L-Phenylalanine	1.19±0.10	1.21±0.07	1.27±0.11	1.33±0.07	1.40±0.06	1.55±0.17
组氨酸 Histidine	5.01±0.21	5.10±0.23	5.15±0.21	5.23±0.14	5.31±0.18	5.62±0.14
精氨酸 Arginine	1.55±0.08	1.57±0.16	1.62±0.14	1.68±0.07	1.75±0.11	1.95±0.13
甘氨酸 Glycine	1.51±0.11	1.52±0.09	1.53±0.08	1.58±0.10	1.67±0.07	1.81±0.14
络氨酸 Lysine	1.38±0.07	1.41±0.05	1.46±0.06	1.51±0.12	1.59±0.12	1.69±0.12
胱氨酸 Cystine	0.21±0.02	0.21±0.02	0.22±0.02	0.23±0.03	0.25±0.03	0.27±0.02
必需氨基酸	18.24±1.15	18.57±0.56	19.08±1.67	19.72±0.35	20.63±1.12	22.24±1.34
Essential amino acid						
天冬氨酸 L-Aspartic acid	2.29±0.12	2.36±0.25	2.45±0.26	2.51±0.12	2.58±0.13	2.69±0.18
谷氨酸 Glutamate	3.64±0.13	3.75±0.24	3.70±0.17	3.76±0.13	3.84±0.21	4.01±0.24
丝氨酸 Serine	1.14±0.09	1.15±0.04	1.17±0.03	1.21±0.05	1.25±0.06	1.39±0.06
脯氨酸 Proline	2.01±0.10	2.05±0.10	2.11±0.05	2.15±0.08	2.26±0.07	2.37±0.14
丙氨酸 Alanine	1.51±0.08	1.54±0.07	1.59±0.07	1.64±0.07	1.72±0.09	1.85±0.09
非必需氨基酸	10.59±1.05	10.85±1.04	11.02±0.78	11.27±1.04	11.65±0.19	12.31±0.68
Essential amino acid						
氨基酸总量	28.83±1.26	29.42±1.31	30.10±1.04	30.99±1.46	32.28±1.89	34.55±2.46
Total amount of amino acids						

### 2.4 克氏原螯虾副产物紫外光谱分析

克氏原螯虾副产物水溶性组分浓度、结构及功能基团的变化对紫外光的吸收会产生变化，含水量为4.86%的样品经过0 kGy、5 kGy、15 kGy、20 kGy、30 kGy和50 kGy剂量辐照处理后紫外扫描，结果见图3。图3显示，克氏原螯虾副产物经紫外扫描出现两个峰，1个峰位于210 nm附近，这可能是克氏原螯虾副产物中糖类吸收峰，另一个在280 nm处，这可能是克氏原螯虾副产物中蛋白质的吸收峰，随着吸收剂量的增加，吸收峰的高度增高，这可能是克氏原螯虾副产物水溶性组分随着吸收剂量升高，其浓度增大的原因。

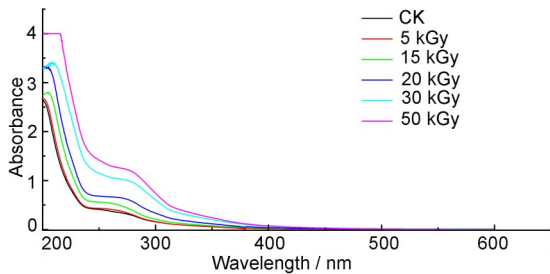


图3 克氏原螯虾副产物辐照前后紫外扫描谱  
(彩色见网络版)

Fig.3 UV scan spectra of byproducts of *Procambarus clarkii* before and after irradiation (color online)

### 2.5 克氏原螯虾副产物的红外光谱分析

为了更深入了解<sup>60</sup>Co γ射线对克氏原螯虾副产物降解作用，以含水量4.86%的克氏原螯虾副产物为样品，采用不同剂量辐照处理，通过红外光谱仪检测，结果见图4。由图4可知，剂量在0 kGy、5 kGy、15 kGy、20 kGy、30 kGy和50 kGy辐照下的克氏原螯虾副产物，红外光谱特征吸收峰位于4 000~500 cm<sup>-1</sup>区段，在750 cm<sup>-1</sup>出现了苯环的特征吸收峰，在1 200 cm<sup>-1</sup>出现了C-O官能团的特征吸收峰，在1 400 cm<sup>-1</sup>附近出现了-CO-NH<sub>2</sub>官能团的特征吸收峰，在1 600 cm<sup>-1</sup>附近出现了C=C官能团的特征吸收峰，在1 700 cm<sup>-1</sup>附近出现了C=O官能团的特征吸收峰，在2 900 cm<sup>-1</sup>附近出现了-COH官能团的特征吸收峰，在3 300 cm<sup>-1</sup>附近出现C-H官能团的特征吸收峰。从整体上看，虽然辐照对克氏原螯虾副产物有降解作用，但红外吸收光谱的波形没有发生明显的变化，表明<sup>60</sup>Co γ射线辐照对克氏原螯虾副产物中各种成分的结构没有明显的影响。但是随着吸收剂量的增加，其相应的吸收峰强度有所增加。

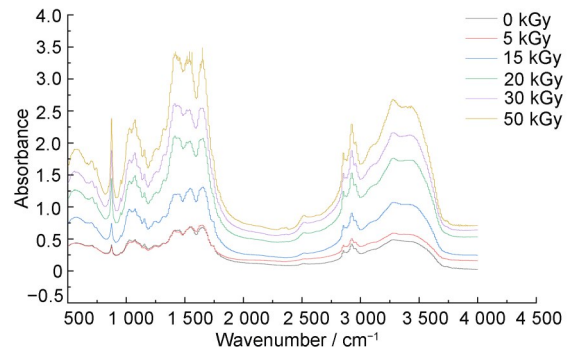


图4 克氏原螯虾副产物辐照前后红外光谱扫描  
(彩色见网络版)

Fig.4 FTIR spectra of byproducts of *Procambarus clarkii* before and after irradiation (color online)

## 3 结论

不同含水量的克氏原螯虾副产物经过0 kGy、5 kGy、15 kGy、20 kGy、30 kGy和50 kGy剂量辐照后，同一含水量处理的pH随吸收剂量增加而降低，同一吸收剂量处理的pH随含水量升高而降低，但未辐照与辐照样品都呈碱性，最高值为7.93，最低值为7.22；溶解度随吸收剂量和含水量增加而升高，最低为16.23%，最高达35.71%；辐照能提高克氏原螯虾副产物游离氨基酸的含量，当吸收剂量达到50 kGy时，游离氨基酸含量比对照增加20.22%，必需氨基酸增加量高于非必需氨基酸，增量为5.69%；通过紫外光谱及红外光谱的分析，不同剂量辐照克氏原螯虾副产物，其吸收特征峰没有发生太大变化，但峰的高度发生了变化，随着吸收剂量增加，其峰强越来越大。

**作者贡献声明** 邹朝晖完成论文的研究思路和实验设计，克氏原螯虾副产物中游离氨基酸含量实验研究，论文的撰写和修改，提供论文研究的经费；张勇完成了样品的辐照处理；李先完成了样品的pH测定；李金龙及邓钢桥对论文进行了修改；邹梁锋及周毅吉完成了样品的前处理及样品溶解度的测定；徐远芳及张祺玲完成了样品紫外及红外光谱测定；邓超完成了实验数据处理和分析。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

### 参考文献

- 1 王晨宇, 黄鸿兵, 尹思慧, 等. 克氏原螯虾副产物的综合利用研究进展[J]. 天津农业科学, 2021, 27(10): 83-86. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6500.2021.10.018.

- WANG Chenyu, HUANG Hongbing, YIN Sihui, *et al.* Research progress on comprehensive utilization of by-products of *Procambarus clarkii*[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2021, **27**(10): 83-86. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6500.2021.10.018.
- 2 黄鸿兵. 画说小龙虾养殖关键技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2019.
- HUANG Hongbing. The key technology of crayfish culture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2019.
- 3 于秀娟, 郝向举, 党子乔, 等. 中国小龙虾产业发展报告(2022)[J]. 中国水产, 2022, **559**(6): 47-54.
- YU Xiujuan, HAO Xiangju, DANG Ziqiao, *et al.* China crayfish industry development report (2022) [J]. China Fisheries, 2022, **559**(6): 47-54.
- 4 徐文思, 李柏花, 张梦媛, 等. 小龙虾及其副产物加工利用研究进展[J]. 农产品加工, 2021(1): 60-63. DOI: 10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2021.01.016.
- XU Wensi, LI Baihua, ZHANG Mengyuan, *et al.* Research progress on processing and utilization of crayfish and its by-products[J]. Farm Products Processing, 2021(1): 60-63. DOI: 10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2021.01.016.
- 5 孙翔宇, 魏琦峰, 任秀莲. 虾、蟹壳中甲壳素/壳聚糖提取工艺及应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, **39**(22): 214-219.
- SUN Xiangyu, WEI Qifeng, REN Xiulian. Extraction technology and application of chitin/chitosan from shrimp and crab shell[J]. Food Research and Development, 2018, **39**(22): 214-219.
- 6 王蒙, 李澜鹏, 张全, 等. 生物法制备甲壳素/壳聚糖的研究进展[J]. 生物技术通报, 2019, **35**(4): 213-222. DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2018-0633.
- WANG Meng, LI Lanpeng, ZHANG Quan, *et al.* Research progress on the bio-production of chitin and chitosan[J]. Biotechnology Bulletin, 2019, **35**(4): 213-222. DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2018-0633.
- 7 Boháčová I, Procházková S, Halko R. Separation and determination of amygdalin and unnatural neoamygdalin in natural food supplements by HPLC-DAD[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2019, **36**(10): 1445-1452. DOI: 10.1080/19440049.2019.1650962.
- 8 窦勇, 胡佩红. 超声协同CDA酶法制备龙虾壳聚糖[J]. 食品与发酵工业, 2014, **40**(11): 127-131. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201411022.
- DOU Yong, HU Peihong. Ultrasound-assisted CDA enzymatic method for preparation of freshwater crayfish shell chitosan[J]. Food and Fermentation Industries, 2014, **40**(11): 127-131. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201411022.
- 9 方建平, 郑毅, 王林, 等. 克氏原螯虾壳聚糖生产过程中废液处理工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(33): 18866-18867. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2010.33.031.
- FANG Jianping, ZHENG Yi, WANG Lin, *et al.* Study on wastewater treatment process during chitosan production with *procambarus clarkii*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, **38**(33): 18866-18867. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2010.33.031.
- 10 王燕, 邓放明, 刘焱, 等. 酶法提取克氏原螯虾头和虾壳的中蛋白质[J]. 食品科学, 2013, **34**(12): 1-5. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201312001.
- WANG Yan, DENG Fangming, LIU Yan, *et al.* Enzymatic extraction of protein from crayfish head and shell[J]. Food Science, 2013, **34**(12): 1-5. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201312001.
- 11 李松林. 克氏螯虾壳Protamex蛋白酶水解物的抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2012, **38**(12): 83-86. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2012.12.021.
- LI Songlin. Antioxidant activity of crayfish(*procambarus clarkia*) shell protein hydrolysate prepared with protamex [J]. Food and Fermentation Industries, 2012, **38**(12): 83-86. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2012.12.021.
- 12 侯会绒, 孙兆远, 贡汉坤. 超声波提取克氏原螯虾壳中虾青素[J]. 食品与发酵工业, 2015, **41**(9): 209-214. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201509040.
- HOU Huirong, SUN Zhaoyuan, GONG Hankun. Extraction of astaxanthin from *procambarus clarkia* shell by ultrasound[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, **41**(9): 209-214. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201509040.
- 13 宋庆洋, 米武娟, 王斌梁, 等. 克氏原螯虾壳虾青素提取条件的优化[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(6): 115-119. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.06.020.
- SONG Qingyang, MI Wujuan, WANG Binliang, *et al.* Optimization of astaxanthin extraction technology from *procambarus clarkii*[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(6): 115-119. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.06.020.
- 14 喻亚丽, 周运涛, 文平, 等. 响应面法优化克氏原螯虾壳中乙酸钙的提取工艺[J]. 食品工业科技, 2017, **38**(21): 167-173. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.

- 21.034.  
YU Yali, ZHOU Yuntao, WEN Ping, *et al.* Optimization of calcium acetate extraction process from *procambarus clarkia* shell by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, **38**(21): 167-173. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2017. 21.034.
- 15 伍军, 毛宏辉. 从麻辣小龙虾虾壳中提取甲壳素的研究[J]. 粮油加工, 2008(10): 128-130.  
WU Jun, MAO Honghui. Study on extracting chitin from the shell of spicy crayfish[J]. Cereals and Oils Processing, 2008(10): 128-130.
- 16 李亚楠. 小龙虾副产物中几种生物活性物质联产工艺研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2013.  
LI Yanan. Research on the combined extracting technology of several bioactive substances from crayfish by-products[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2013.
- 17 Yan N, Chen X. Don't waste seafood waste: turning cast-off shells into nitrogen-rich chemicals would benefit economies and the environment[J]. Nature, 2015, **524** (7564): 155-157. DOI: 10.1038/524155a.
- 18 杨琦, 马士龙, 包学太, 等. 小龙虾下脚料营养成分分析与饲用价值评价[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2019, **31**(2): 30-33. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-6146. 2019.02.008.  
YANG Qi, MA Shilong, BAO Xuetai, *et al.* Analysis of nutrients and evaluation of feeding value for crayfish wastes[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Natural Science Edition), 2019, **31**(2): 30-33. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6146.2019.02.008.
- 19 程小飞, 宋锐, 洪波, 等. 虾壳粉氨基酸和脂肪酸营养成分分析[J]. 中国饲料, 2020(23): 66-70. DOI: 10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.20202315.  
CHENG Xiaofei, SONG Rui, HONG Bo, *et al.* Analysis of nutritional components of amino acids and fatty acids in *procrustus clarkii* crawfish shell meal[J]. China Feed, 2020(23): 66-70. DOI: 10.15906/j. cnki. cn11-2975/s.20202315.
- 20 Balazs E A, Leshchiner A. Crosslinked gels of hyaluronic acid and products containing these gels for cosmetics and pharmaceuticals: USO6/755976[P]. 1986-08-12.
- 21 张岐. 一种微波辅助降解制备窄分子量分布壳聚糖的方法: CN200510073699.5[P]. 2005-10-26.  
ZHANG Qi. The invention relates to a method for preparing chitosan with narrow molecular weight distribution by microwave-assisted degradation: CN200510073699.5[P]. 2005-10-26.
- 22 Callegaro L, Renier D. Process for preparing a hyaluronic acid fraction having a low polydispersion index: US6020484[P]. 2000-02-01.
- 23 赵军旗, 邓钢桥, 邵赛, 等. 辐照与化学相结合协同降解壳聚糖研究[J]. 核农学报, 2008, **22**(3): 310-313. DOI: 10.11869/hnxb.2008.03.0310.  
ZHAO Junqi, DENG Gangqiao, SHAO Sai, *et al.* Degradation of chitosan by synergetic treatment of irradiation and chemical[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2008, **22**(3): 310-313. DOI: 10.11869/hnxb.2008.03.0310.
- 24 Byun M W, Son J H, Yook H S, *et al.* Effect of gamma irradiation on the physiological activity of Korean soybean fermented foods, *Chungkookjang* and *Doenjang* [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, **64**(3): 245-248. DOI: 10.1016/S0969-806X(01)00492-3.
- 25 邹朝晖, 王强, 王志东, 等. 辐照对透明质酸化特性的影响[J]. 食品科学, 2011, **32**(3): 117-120.  
ZOU Zhaohui, WANG Qiang, WANG Zhidong, *et al.* Effect of irradiation on physico-chemical properties of hyaluronic acid[J]. Food Science, 2011, **32**(3): 117-120.
- 26 程小飞, 宋锐, 徐远琴, 等. 网箱养殖刺鲃肌肉营养成分分析及评价[J]. 现代食品科技, 2019, **35**(6): 245-250. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.6.032.  
CHENG Xiaofei, SONG Rui, XU Yuanqin, *et al.* Nutritional analysis and evaluation on muscle of *spinibarbus caldwelli*[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, **35**(6): 245-250. DOI: 10.13982/j.mfst. 1673-9078.2019.6.032.
- 27 李锐, 邹茜, 孙玉林, 等. 紫外诱导克氏原螯虾头自溶制备蛋白酶解液及其鲜味物质研究[J]. 食品与发酵工业, 2019, **45**(3): 153-160. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.018280.  
LI Rui, ZOU Qian, SUN Yulin, *et al.* Preparation of protein hydrolysates from crayfish(*procambarus clarkia*) head by ultraviolet-induced autolysis and study on their umami substances[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, **45**(3): 153-160. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts. 018280.
- 28 Kuan Y H, Bhat R, Patras A, *et al.* Radiation processing of food proteins - a review on the recent developments[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, **30**(2): 105-120. DOI: 10.1016/j.tifs.2012.12.002.
- 29 Molins R A. Food irradiation: principles and application [M]. New York: Wiley, 2001. DOI: 10.1016/0160-4120

- (92)90008-R.
- 30 中国饲料数据库. 中国饲料成分及营养价值表(2018年第29版)[J]. 中国饲料, 2018(21): 64-73.  
China feed database. China feed composition and nutritional value table (29th edition, 2018) [J]. China Feed, 2018(21): 64-73.
- 31 Lacroix M, Ouattara B. Combined industrial processes with irradiation to assure innocuity and preservation of food products—a review[J]. Food Research International, 2000, **33**(9): 719-724. DOI: 10.1016/S0963-9969(00)00085-5.
- 32 刘光宪, 王辉, 刘俊, 等. 辐照对蛋白质及过敏原的影响研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, **8**(4): 1110-1114. DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2017.04.007.  
LIU Guangxian, WANG Hui, LIU Jun, *et al.* Advances in effects of irradiation on proteins and allergens[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, **8**(4): 1110-1114. DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2017.04.007.