

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240711004

江汉平原克氏原螯虾虾壳中虾青素含量分布特征

孙丹陵¹, 刘祖新², 刘 骞³, 刘亚琴⁴, 孙继成⁴, 彭西甜³, 胡西洲^{3*}

[1. 湖北中医药大学检验学院, 武汉 430065; 2. 宜昌市夷陵区公共检验检测中心, 宜昌 443100;
3. 湖北省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所/农产品营养品质与安全湖北省重点实验室/
农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(武汉), 武汉 430064;
4. 潜江市农产品质量安全监督管理局, 潜江 433100]

摘要: **目的** 进一步挖掘江汉平原不同规格、不同部位克氏原螯虾虾壳中虾青素特征及差异。**方法** 采用高效液相色谱法分别测定不同规格以及不同部位江汉平原克氏原螯虾虾壳中的虾青素含量。**结果** 江汉平原克氏原螯虾虾壳中虾青素含量十分丰富, 其中, 库虾的尾肢壳含量最高, 达到了 601.19 mg/kg, 中青虾的钳壳含量最低, 仅为 129.38 mg/kg, 平均含量为 335.99 mg/kg。不同规格克氏原螯虾虾青素含量高低排序依次为: 库虾>小青虾>大青虾>中青虾; 不同部位克氏原螯虾虾青素含量高低依次为: 尾肢壳>头甲壳>足壳>钳壳。**结论** 江汉平原克氏原螯虾虾壳中的虾青素含量十分丰富, 且不同规格、不同部位中虾青素含量差异较大。本研究结合虾青素产业的发展现状, 探究江汉平原克氏原螯虾虾壳中虾青素含量分布特征, 为其综合加工利用研究等提供数据支撑。

关键词: 克氏原螯虾; 虾青素; 高效液相色谱法

Characteristics and distribution of astaxanthin in shells of *Procambarus clarkia* in Jiangnan Plain

SUN Dan-Ling¹, LIU Zu-Xin², LIU Qian³, LIU Ya-Qin⁴, SUN Ji-Cheng⁴,
PENG Xi-Tian³, HU Xi-Zhou^{3*}

[1. College of Laboratory Medicine, Hubei University of Chinese Medicine, Wuhan 430065, China; 2. Yiling Public Inspection and Testing Center, Yichang 443100, China; 3. Institute of Quality Standards and Testing Technology for Agro-Products, Hubei Academy of Agricultural Sciences/Hubei Key Laboratory of Nutritional Quality and Safety of Agro-products/Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Agro-products (Wuhan), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430064, China; 4. Qianjiang Supervision and Administration Bureau of Agro-product Quality and Safety, Qianjiang 433100, China]

ABSTRACT: Objective To further explore the characteristics and difference of astaxanthin in the shells of different body types and parts of *Procambarus clarkia* in Jiangnan Plain. **Methods** Using high performance liquid chromatography to determine the astaxanthin content in the shells of different body types and different parts of *Procambarus clarkii* in the Jiangnan Plain. **Results** The content of astaxanthin in the shells of *Procambarus clarkii* in the Jiangnan Plain was very rich. Among them, the tail shell of *Procambarus clarkii* was the highest, reaching

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2023CFC058)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Hubei Province (2023CFC058)

*通信作者: 胡西洲, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全及营养品质评价。E-mail: huxizhou@163.com

*Corresponding author: HU Xi-Zhou, Ph.D, Associate Professor, Institute of Quality Standards and Testing Technology for Agro-products, Hubei Academy of Agricultural Science, No.3, Nanhu Road, Hongshan District, Wuhan 430064, China. E-mail: huxizhou@163.com

601.19 mg/kg, while the clamp shell of *Procambarus clarkii* was the lowest, only 129.38 mg/kg, with an average content of 335.99 mg/kg. The order of astaxanthin content in different body types of *Procambarus clarkii* was as follows: Cushrimp>small green shrimp>large green shrimp>medium green shrimp, and the content of anthocyanins in different parts of the crayfish was as the following: Tail shell>head shell>foot shell>clamp shell. **Conclusion** The astaxanthin content in the shell of *Procambarus clarkii* in the Jiangnan Plain is very rich, and there are significant differences in astaxanthin content among different body types and parts. This study combines the current development status of the shell industry of crayfish to explore the characteristics and distribution of astaxanthin in shells of *Procambarus clarkia* in Jiangnan Plain, providing data support for its comprehensive processing and utilization research.

KEY WORDS: *Procambarus clarkia*; astaxanthin; high performance liquid chromatography

0 引言

虾青素(astaxanthin), 又名虾黄质、虾黄素, 化学名 3,3'-二羟基-4,4'-二酮基- β,β' -胡萝卜素, 是一种具有极强抗氧化性的类胡萝卜素, 广泛存在于生物界中, 特别是水生动物如虾、蟹、鱼和鸟类的羽毛中。研究表明, 虾青素的分子结构中共含有 13 个共轭双键, 具有很强的抗氧化能力, 能抵抗肿瘤^[1]、炎症^[2], 治疗糖尿病^[3], 提高机体的免疫功能^[4], 预防心脑血管疾病的发生^[5]等功效, 深受国内外食品、医药、化妆品等行业的青睐。

克氏原螯虾(*Procambarus clarkia*)又称小龙虾, 其肉质鲜美, 富含大量蛋白质以及营养元素, 深受大众喜爱^[6]。在小龙虾生产加工过程中会产生大量的下脚料, 约占到虾总重的 48%~56%^[7]。这些固体废弃物含大量蛋白质、甲壳素、虾青素等成分。目前生产虾青素有两种方法, 即化学合成法和天然提取法。化学合成虾青素同天然虾青素在结构、功能、应用及安全性等方面差别显著^[8-9], 其稳定性、抗氧化活性与着色性也明显低于天然虾青素, 进行规模化生产一般倾向于天然虾青素的提取^[10-13]。总体而言, 小龙虾虾壳可以作为提取虾青素的理想原料, 有广阔的应用前景^[14-15]。

江汉平原位于湖北省中南部, 境内湖泊星罗棋布、沟渠纵横交错, 具有小龙虾养殖的优越条件。小龙虾产业已经成为该地区优势和支柱产业。2023 年养殖面积 980 万亩, 产量突破 124 万 t, 综合产值达 1678 亿元^[16]。小龙虾产业发达, 虾壳类资源丰富, 但目前综合利用率较低。目前, 小龙虾的加工主要分为两种, 包括初级加工和加工附属产品利用(包括虾头、虾壳等), 其中以初加工为主, 副产物精深加工所占比例很低。不仅造成了资源浪费, 还会对环境造成污染。初加工所产生的副产物超过占原料重量的 70%, 且含有丰富的油脂、虾青素、多功能肽类等^[17-21]。

本研究结合江汉平原克氏原螯虾产业的发展现状, 通过测定不同规格以及不同部位克氏原螯虾壳中的虾青素含量, 旨在为探究克氏原螯虾营养价值, 为其综合加工

利用研究等提供数据支撑, 也为其分等分级、品质提升和品牌推广等奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

试验用克氏原螯虾于 2023 年 4 月—5 月采自湖北监利、洪湖、潜江等核心养殖区域, 包括 12 个乡镇、街道和管理区。样品全部来源虾稻共作养殖模式(稻田四周开挖 3~4 m、深 1~1.5 m 的围沟, 坡比 1:1; 虾、稻共生共长)。捕获试验用虾按规格大小分为库虾(10~14 g)、小青虾(15~19 g)、中青虾(20~29 g)、大青虾(30 g 以上)4 种, 每种 10 批次, 共 40 批次样品。

全反式虾青素标准品(纯度 $\geq 95\%$, 上海 Aladdin 公司); 丙酮(CH_3COCH_3)、二氯甲烷(CH_2Cl_2)、甲醇(CH_3OH)、磷酸(H_3PO_4)、氢氧化钠(NaOH)、碘(I_2)、硫代硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、无水硫酸镁(MgSO_4)、无水碳酸钠(Na_2CO_3)(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 乙二胺-N-丙基硅胶键合填料(primary secondary amine, PSA)(天津艾杰尔科技有限公司)。

LC-40D 高效液相色谱仪(配二极管阵列检测器)、Inertsil ODS-3 (4.6 mm $\times$ 250 mm, 5 μm)(日本岛津公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 虾青素标准溶液的配制

全反式虾青素标准储备液: 称取一定量全反式虾青素标准品, 用丙酮溶解并定容, 得到质量浓度为 0.5 mg/mL 虾青素标准储备液。

虾青素几何异构体溶液: 吸取适量上述全反式虾青素标准储备液, 用丙酮将其稀释成 10 $\mu\text{g/mL}$, 再吸取 2 mL 于 15 mL 离心管中, 再加入 3 mL 二氯甲烷、50 μL 碘-二氯甲烷溶液(0.01 g/mL), 涡旋 2 min, 密封后置于自然光下 15 min, 再加入 1 mL 硫代硫酸钠溶液(0.1 mol/L), 涡旋 2 min, 静置后取出下层溶液, 氮吹至干后加入 1 mL 丙酮, 摇匀, 现用现配。

1.2.2 样品制备方法

取其钳壳、头甲壳、尾肢壳以及足壳,将剥好的虾壳用清水冲洗去除表面杂质,然后放入玻璃杯中,用 1 mol/L 的盐酸浸泡 30 min,再用清水冲洗至 pH 为中性,然后在 30 °C 下通风干燥 13 h,取出后高速粉碎机粉碎,−20 °C 下保存备用。

1.2.3 样品前处理方法

样品前处理方法参照 SC/T 3053—2019《水产品及其制品中虾青素含量的测定 高效液相色谱法》:称取 2.00 g 经处理后的虾壳样品,加入 10 mL 丙酮、4 g 无水硫酸镁,涡旋 1 min 后超声提取 15 min,再以 5000 r/min 离心 10 min,收集上清液,再在残渣中加入 10 mL 丙酮,重复上述操作,合并提取液;移取 2 mL 提取液于具塞试管中,加入 2.9 mL 0.02 mol/L 氢氧化钠甲醇溶液,涡旋 3 min,抽真空后密封,在 0~4 °C 冰箱中反应 14 h;再向试液中加入 0.6 mol/L 磷酸甲醇溶液;再加入 100 mg PSA,混匀,静置 5 min,过 0.2 μm 微孔滤膜,吸取 1.0 mL 滤液注入进样瓶,待测。

1.2.4 色谱条件

色谱条件参照文献[22–25],略有改动。色谱柱:Inertsil ODS-3 (4.6 mm×250 mm, 5 μm);流动相:甲醇:水(95:5, V/V),等度洗脱;流速:1.0 mL/min;柱温:30 °C;紫外检测波长:474 nm;进样量:10 μL。

1.2.5 标准曲线绘制

移取适量的全反式虾青素标准储备液,用丙酮溶液稀释成系列标准工作液,质量浓度梯度设置为 0.1、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 μg/mL,现用现配。依据样品溶液中的虾青素含量,选取物质峰面积较接近的浓度的全反式虾青素的标准溶液进行多点校准定量,所测样品中的虾青素含量以 3 种虾青素异构体的含量总和计算,外标法定量。

1.2.6 计算公式

样品提取液中的青素总量(X),以式(1)计算,结果保留两位小数。

$$X = \frac{(1.3 \times A_{13-cis} + A_{trans} + 1.1 \times A_{9-cis}) \times C_s \times V \times f}{A_s \times m} \quad (1)$$

式中: X —试样中虾青素总量, mg/kg; 1.3—13-顺式虾青素相对于全反式的校正系数; A_{13-cis} —试样溶液中 13-顺式虾青素峰面积; A_{trans} —试样溶液中全反式虾青素峰面积; 1.1—9-顺式虾青素相对于全反式的校正系数; A_{9-cis} —试样溶液中 9-顺式虾青素的峰面积; C_s —标准溶液中的全反式虾青素浓度, mg/kg; V —试样液体积, mL; A_s —全反式虾青素标准溶液的峰面积; m —样品的质量, g; f —稀释倍数。

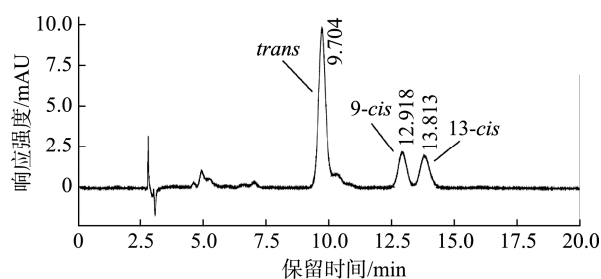
1.3 数据处理

试验中每个样品均重复测定 3 次,结果表示为平均值±标准偏差,并采用 SPSS 17.0 进行试验数据的显著性分析。

2 结果与分析

2.1 标准曲线

分别吸取虾青素几何异构体标准工作液以及样品液,按照给出的色谱条件进行测定,全反式虾青素、9-顺式虾青素及 13-顺式虾青素 3 种虾青素的同分异构体的色谱图见图 1,虾青素标准曲线方程为 $Y=37755X+544.47$, $r^2=0.9999$,如图 2 所示,该方法在 0.10~10.0 μg/mL 范围内线性关系良好,相关系数为 0.9999。



注: *trans*表示全反式虾青素; *9-cis*表示9-顺式虾青素; *13-cis*表示13-顺式虾青素。

图1 虾青素异构体标准溶液液相色谱图

Fig.1 Liquid chromatogram of astaxanthin isomer standard solution

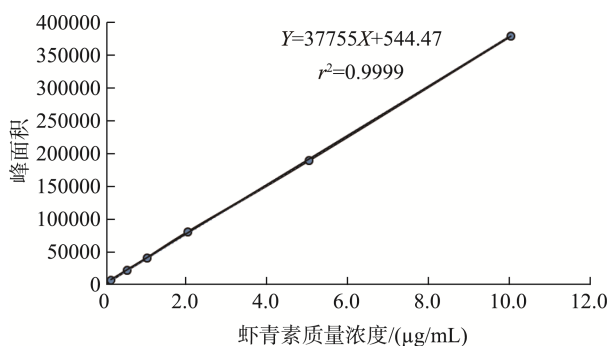


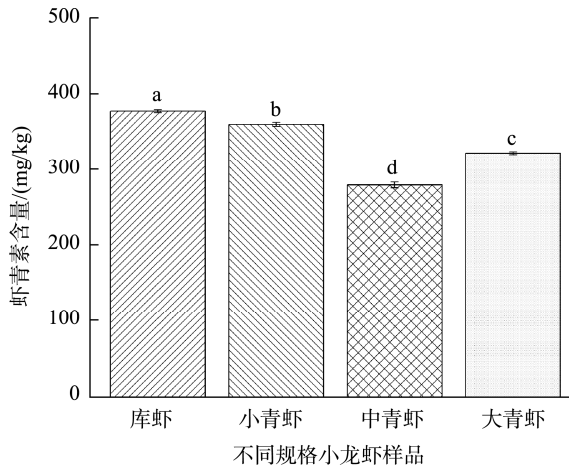
图2 虾青素的标准曲线

Fig.2 Standard curve of astaxanthin

2.2 不同规格小龙虾虾壳中虾青素含量差异

将 4 种规格小龙虾样品(库虾、小青虾、中青虾、大青虾),按照上述步骤进行处理,每组设置 3 次重复,取平均值,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,按照虾青素含量从高到低顺序依次为:库虾>小青虾>大青虾>中青虾。库虾中虾青素含量最高,达到了 378.75 mg/kg,且小青虾、大青虾较之含量稍低,中青虾含量最低,仅为 280.62 mg/kg,反映出小龙虾在生长过程中虾青素呈现先变小再变大的过程。4 种规格龙虾中虾青素的平均含量为 335.99 mg/kg,且相互呈显著性差异($P<0.05$)。



注: 不同字母表示组间具有显著性差异($P < 0.05$)。

图3 不同规格小龙虾虾壳中虾青素含量

Fig.3 Astaxanthin content in *Procambarus clarkia* shells of different specifications

按类型上看, 库虾相对于其他规格小龙虾虾青素含量更高。根据 DB42T 1394—2018《活体小龙虾分级标准》, 库虾普遍体重不超过 14 g, 小型虾在 15~19 g 之间, 从商业角度来讲, 这两种规格虾用于虾青素提取收益相对较低, 会造成一定资源浪费。从图 3 可以得到, 大青虾中虾青素含量(323.15 mg/kg)较高, 接近库虾(378.75 mg/kg), 而且体重较大, 其虾壳适用于虾青素的提取利用, 对于捕捉到库虾和小青虾可继续养殖, 即在捕捞网网口的大小上设置一定限制, 这样既节省了人力, 也不会造成资源浪费。

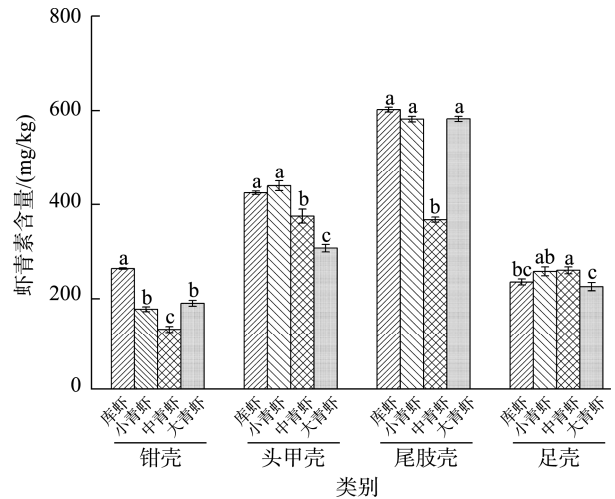
2.3 不同部位虾壳中虾青素含量比较

将 4 种规格的小龙虾按壳体部位分为: 头甲壳、尾肢壳、钳壳、足壳, 按上述方法进行测定, 结果如图 4 所示: 各部位虾青素含量从高到低排列: 尾肢壳>头甲壳>足壳>钳壳, 4 个部位的平均含量分别为: 532.04、383.93、240.91 和 187.09 mg/kg, 除中青虾头甲壳与尾肢壳虾青素含量接近外, 其余皆以尾肢壳含量最高。其中, 库虾的尾肢壳中含量最高, 达到了 601.19 mg/kg, 而中青虾的钳壳中含量最低, 仅为 129.38 mg/kg。尾肢壳中虾青素含量约为钳壳的 3 倍。在不同部位, 规格的大小仍呈现出一定差异显著性($P < 0.05$)。

总体看来, 江汉平原克氏原螯虾虾壳中虾青素含量十分丰富, 平均含量达到了 335.99 mg/kg, 相较于常见的虹鳟鱼虾青素含量 90.21~156.3 mg/kg^[26], 南极磷虾和虾粉中虾青素含量分别为 48.21 mg/kg^[27-28]和 0.12~110.6 mg/kg^[29-30], 凡纳滨对虾中虾青素含量为 12.69~117.31 mg/kg^[31]等, 仍存在较大的优势。

在处理相同重量的不同部位虾时发现, 尾肢壳和头甲壳所耗费的时间要低于足壳和钳壳。在节约成本的角度,

可优先将含量较高的头甲壳和尾肢壳的虾青素提取利用, 而含量偏低、难度大的钳壳和足壳则可以用于天然调味料、饲料等方面的开发利用。



注: 不同字母表示同一部位不同规格小龙虾中虾青素含量之间具有显著性差异($P < 0.05$)。

图4 不同规格小龙虾各部位中虾青素含量

Fig.4 Astaxanthin content in different parts of *Procambarus clarkia* of different specifications

3 结 论

江汉平原克氏原螯虾虾壳中虾青素含量丰富。4 种规格克氏原螯虾虾壳虾青素高低顺序为: 库虾>小青虾>大青虾>中青虾。4 种部位中虾青素含量高低依次为: 尾肢壳>头甲壳>足壳>钳壳。库虾的尾肢壳含量最高, 达到了 601.19 mg/kg, 中青虾的钳壳含量最低, 仅为 129.38 mg/kg, 平均含量为 335.99 mg/kg。

在虾青素市场调研中发现, 天然虾青素仅占整个市场份额的 30%左右, 但是整个虾青素市场的需求十分巨大, 这也就导致不得不使用价格更加昂贵的合成虾青素, 由此看来, 天然虾青素有着很大的发展前景^[32]。目前, 江汉平原克氏原螯虾产业链庞大, 有着丰富的可利用资源, 本研究结合江汉平原克氏原螯虾产业的发展现状, 对不同规格不同部位克氏原螯虾虾壳中虾青素进行全面分析, 以期为其资源综合利用与开发提供参考。

参考文献

- [1] 裴凌鹏. 虾青素体内抗肿瘤及其免疫调节作用的实验研究[J]. 上海中医药杂志, 2009, 43(6): 68-69.
PEI LP. Experimental study on the anti-tumor and immune regulatory effects of astaxanthin *in vivo* [J]. Shanghai J Tradit Chin Med, 2009, 43(6): 68-69.
- [2] CHEW W, MATHISON BD, KIMBLE LL, *et al*. Astaxanthin decreases inflammatory biomarkers associated with cardiovascular disease in human

- umbilical vein endothelial cells [J]. *Ame J Adv Food Sci Technol*, 2013, 1(7): 1–17.
- [3] UCHIYAMA K, NAITO Y, HASEGAWA G, *et al.* Astaxanthin protects β -cells against glucose toxicity in diabetic db/db mice [J]. *Redox Rep*, 2002, 7(5): 290–293.
- [4] PARK JS, CHYUN JH, KIM YK, *et al.* Astaxanthin decreased oxidative stress and inflammation and enhanced immune response in humans [J]. *Nutr Metab*, 2010, 7(1): 18–27.
- [5] PASHKOW FJ, WATUMULL DG, CAMPBELL CL. Astaxanthin: A novel potential treatment for oxidative stress and inflammation in cardiovascular disease [J]. *Ame J Card*, 2008, 101(10): 58–68.
- [6] 徐文思, 杨祺福, 秦佳伟, 等. 小龙虾即食休闲食品的研制及品质分析[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(2): 36–44.
- XU WS, YANG QF, QIN JW, *et al.* Development and quality analysis of ready-to-eat crayfish snack [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2023, 39(2): 36–44.
- [7] 朱继国. 小龙虾壳的资源化及在休闲食品中的应用研发[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- ZHU JG. Resource utilization of crawfish shell and its application in leisure food [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.
- [8] 周强, 周大伟, 孙敬翔, 等. 微生物发酵法合成虾青素的研究进展[J]. *合成生物学*, 2024, 5(1): 126–143.
- ZHOU Q, ZHOU DW, SUN JX, *et al.* Research progress in synthesis of astaxanthin by microbial fermentation [J]. *Synth Biol J*, 2024, 5(1): 126–143.
- [9] 舒钰洁, 王颖, 姚明东, 等. 酵母合成虾青素的研究进展[J]. *中国生物工程杂志*, 2024, 44(6): 116–128.
- SHU YJ, WANG Y, YAO MD, *et al.* Research progress in the synthesis of astaxanthin by yeast [J]. *Chin Biotech*, 2024, 44(6): 116–128.
- [10] 梁强. 高产虾青素的红法夫酵母菌代谢工程育种[D]. 保定: 河北大学, 2021.
- LIANG Q. Metabolic engineering breeding of high-yielding astaxanthin-producing *Xanthophyllomyces dendrorhous* yeast [D]. Baoding: Hebei University, 2021.
- [11] 高红. 虾青素的提取、纯化及其纳米脂质载体制备研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2022.
- GAO H. Study on extraction and purification of astaxanthin and preparation of nanostructured lipid carrier [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2022.
- [12] 王世云, 冯金华, 黄思玉, 等. 乙醇-硫酸铵双水相体系萃取虾青素的研究[J]. *河北渔业*, 2023(10): 1–7.
- WANG SY, FENG JH, HUANG SY, *et al.* Study on the extraction of astaxanthin by ethanol/(NH₄)₂SO₄ aqueous two-phase system [J]. *Hebei Fish*, 2023(10): 1–7.
- [13] 李亮, 白易灵, 刘荣利, 等. 响应面法优化有机溶剂提取虾青素的工艺研究[J]. *化学工程师*, 2024, 38(8): 94–98.
- LI L, BAI YL, LIU RL, *et al.* Optimization of astaxanthin extraction with organic solvent by response surface method [J]. *Chem Eng*, 2024, 38(8): 94–98.
- [14] 窦茜茜, 许有瑞. 天然虾青素的提取、纯化研究进展[J]. *中国海洋药物*, 2023, 42(2): 69–76.
- DOU QQ, XU YR. Research progress on extraction, purification of natural astaxanthin [J]. *Chin J Mar Drugs*, 2023, 42(2): 69–76.
- [15] 孔凡华, 霍然, 王禹涵, 等. 虾青素提取方法的研究进展[J/OL]. *中国食物与营养*, 1–4. [2024-09-08]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20240301.003>
- KONG FH, HUO R, WANG YH, *et al.* Research progress on extraction methods of astaxanthin [J/OL]. *Food Nutri Chin*, 1–4. [2024-09-08]. <https://doi.org/10.19870/j.cnki.11-3716/ts.20240301.003>
- [16] 于秀娟, 郝向举, 杨霖坤, 等. 中国小龙虾产业发展报告(2023)[J]. *中国水产*, 2023(7): 26–31.
- YU XJ, HAO XJ, YANG LK, *et al.* Report on the development of China's crayfish industry (2023) [J]. *Chin Fish*, 2023(7): 26–31.
- [17] 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 YN. Research on the combined extracting technology of several bioactive substances from crayfish by-products [D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2013.
- [18] 舒钰洁, 王颖, 姚明东, 等. 酵母合成虾青素的研究进展[J]. *中国生物工程杂志*, 2024, 44(6): 116–128.
- SHU YJ, WANG Y, YAO MD, *et al.* Research progress of synthesis of astaxanthin by yeast [J]. *Chin Biotech*, 2024, 44(6): 116–128.
- [19] 顾鹏程, 马栋, 郭爱琴, 等. 小龙虾废弃物的利用与工艺创新[J]. *粮食与饲料工业*, 2021(3): 37–40.
- GU PC, MA L, GUO AIQ, *et al.* Application and technological innovation of crayfish waste exploitation feed resources [J]. *Cere Feed Ind*, 2021(3): 37–40.
- [20] 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(6): 47–54.
- YU XJ, HAO XJ, DANG ZQ, *et al.* Report on the development of China's crayfish industry (2022) [J]. *Chin Fish*, 2022(6): 47–54.
- [21] 赵黎博, 廖杰. 化妆品中虾青素相关专利技术综述[J]. *科技风*, 2019(5): 200, 202.
- ZHAO LB, LIAO J. A review of astaxanthin-related patent technology in cosmetics [J]. *Tech Trends*, 2019(5): 200, 202.
- [22] 胡翠, 谢柏艳, 覃娟. 高效液相色谱法检测化妆品中虾青素含量[J]. *分析试验室*, 2022, 41(10): 1208–1213.
- HU C, XIE BY, QIN J. Determination of astaxanthin in cosmetics by high performance liquid chromatography [J]. *Chin J Anal Lab*, 2022, 41(10): 1208–1213.
- [23] 周凡, 屈云, 谭家声, 等. 一种快速测定虾青素含量的方法[J]. *云南化工*, 2024, 51(3): 91–93.
- ZHOU F, QU Y, TAN JS, *et al.* A rapid method for determining astaxanthin content [J]. *Yunnan Chem Technol*, 2024, 51(3): 91–93.
- [24] 高红, 张伟, 靳明坤. 优化法结合制备型高效液相色谱分离纯化虾青素[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(14): 119–126.
- GAO H, ZHANG W, JIN MK. Separation and purification of astaxanthin by optimization methodology combined with preparative high performance liquid chromatography [J]. *Food Res Dev*, 2024, 45(14): 119–126.
- [25] 赵唯雯, 高梦楠, 黄汉昌, 等. 高效液相色谱法测定保健食品中的虾青素含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(6): 2229–2234.
- ZHAO WW, GAO MN, HUANG HC, *et al.* Determination of astaxanthin in functional food by high performance liquid chromatography [J]. *J Food*

- Saf Qual, 2021, 12(6): 2229–2234.
- [26] 万清华, 宋涛. 虹鳟鱼虾青素提取纯化及对运动小鼠组织抗氧化能力的影响[J]. 食品工业, 2014, 35(12): 168–171.
- WAN QH, SONG T. Study on extraction and purification technology of astaxanthin from rainbow trout and its influence on tissue's antioxidant capacity of mice [J]. Food Ind, 2014, 35(12): 168–171.
- [27] 张晓娜, 惠伯棣, 裴凌鹏, 等. 功能因子虾青素研究概况[J]. 中国食品添加剂, 2017, 162(8): 208–214.
- ZHANG XN, HUI BD, PEI LP, *et al.* Research progress on functional factor of astaxanthin [J]. Chin Food Addit, 2017, 162(8): 208–214.
- [28] 张莉莉, 温淑媚, 高静. 超声辅助双连续型离子液体微乳液提取南极磷虾壳中的虾青素[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 130–141.
- ZHANG LL, WEN SM, GAO J. Extraction of astaxanthin in antarctic krill shell by ultrasonic-assisted bicontinuous ionic-liquid-based microemulsion [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(9): 130–141.
- [29] 张全通, 郑尧, 杨柳, 等. 计算机视觉结合卷积神经网络快速检测南极磷虾粉中的虾青素含量[J/OL]. 食品工业科技, 1-16. [2024-09-08]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030200>
- ZHANG QT, ZHENG Y, YANG L, *et al.* Rapid detection of astaxanthin in Antarctic Krill meal by computer vision combined with convolutional neural network [J/OL]. Sci Technol Food Ind, 1-16. [2024-09-08]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030200>
- [30] 欧阳杰, 赵昕源, 马田田. 南极磷虾粉加工过程中虾青素的含量、结构及抗氧化性[J]. 水产学报, 2022, 46(3): 420–429.
- OUYANG J, ZHAO XY, MA TT. Astaxanthin content, structure and antioxidant activity in the processing of Antarctic krill (*Euphausia superba*) meal [J]. J Fish Chin, 2022, 46(3): 420–429.
- [31] 张旭飞. 冻藏条件及加热方法对凡纳滨对虾色泽、虾青素含量及体外抗氧化活性研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2021.
- ZHANG XF. Study on frozen storage conditions and heating methods on the color, astaxanthin content and *in vitro* antioxidant activity of *Litopenaeus vannamei* [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2021.
- [32] 干昭波. 虾青素的性质、生产及发展前景[J]. 食品工业科技, 2014, 35(3): 38–40.
- GAN ZB. Properties, production and development prospect of astaxanthin [J]. Sci Technol Food Ind, 2014, 35(3): 38–40.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



孙丹陵, 硕士, 副教授, 主要研究方向为卫生检疫教学与研究。
E-mail: 1737722904@qq.com



胡西洲, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全及营养品质评价。
E-mail: huxizhou@163.com