



薛长湖。教授, 博士生导师。现任中国海洋大学食品科学与工程学院院长, 兼任中国水产学会水产品加工和综合利用分会主任委员、山东省食品科学技术学会副理事长等。研究方向为大宗海洋水产品资源高效利用。作为项目负责人, 先后承担国家自然科学基金重点项目、国家“863”计划、国家科技支撑计划等纵向科研项目以及横向科研项目40余项。在海洋水产品营养与功效成分的高效利用以及南极磷虾等远洋渔业资源与养殖海珍品精深加工方面取得了一系列创新性成果, 并产生了显著的经济和社会效益。以第一完成人获国家科学技术进步奖二等奖2项, 省部级科技进步一等奖2项; 发表学术论文700余篇, 入选爱思唯尔“中国高被引学者”; 出版学术著作5部, 获授权发明专利89项。

· 综述 ·

海参在加工过程中的组分与食品结构变化

常耀光^{1,2}, 刘艳艳¹, 石菲菲¹, 刘开梦¹, 姜晓明¹,
王彦超¹, 薛勇¹, 薛长湖^{1,2*}

(1. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东 青岛 266003;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋药物与生物制品功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 海参是我国传统的滋补海洋食品与重要的经济水产品。海参极易自溶的食品原料学特性决定了绝大部分海参原料需要经过加工才能进入市场流通与消费, 使得加工成为海参产业链的关键环节。明确海参在加工过程中的组分与食品结构变化, 是阐释海参产品品质形成机理的核心, 对设计开发海参高品质加工新技术具有重要的理论指导意义, 是关乎海参产业发展的关键科学问题。本文概述了海参的组分及食品结构特征, 归纳了海参的关键加工环节, 以此为背景着重梳理了海参在水煮、干燥、复水、酶解、即食海参加工等过程中组分及食品结构变化的相关研究进展, 提出了深入研究的建议, 以期加速上述科学问题的解答、推动海参产业的高质量发展。

关键词: 海参; 加工; 组分; 食品结构; 变化

中图分类号: S 917.4; TS 254.4

文献标志码: A

海参是我国传统滋补海洋食品, 被誉为“海产八珍”之一。除古代典籍中记载的丰富功效, 现代营养学研究也充分证实海参具有增强免疫力、调节血脂与血糖水平、抗氧化等多种生理功能^[1]。随着人们营养意识的逐步提高及对健康膳食需求的日益增强, 海参受到市场青睐, 消费量不断提升。消费需求的增长拉动了海参育种、养殖、加

工全产业链的快速兴起, 2020年我国刺参 (*Apostichopus japonicus*) 的养殖量达 19.7 万 t^[2], 海参尤其是刺参成为我国重要的经济水产品, 年产值达千亿元人民币。

海参的食品原料学特性独特: 其含有丰富的自溶酶, 极易发生自溶, 导致海参难以以鲜活形式进行流通与销售。因此, 绝大多数海参均经适

收稿日期: 2022-05-08 修回日期: 2022-05-28

资助项目: 教育部霍英东基金会青年教师基金 (171024); 国家重点研发计划 (2018YFC0311201)

第一作者: 常耀光 (照片), 从事水产食品化学研究, E-mail: changyig@ouc.edu.cn

通信作者: 薛长湖, 从事海洋水产品资源高效利用研究, E-mail: xuech@ouc.edu.cn



当方式加工后,以加工产品的形式进入市场流通与消费。明确海参加工过程中的组分与食品结构变化,是阐释海参产品品质形成机理的核心,对进一步设计开发海参高品质加工新技术具有重要的理论指导意义,是关乎海参产业高质量发展最为关键的科学问题之一。

本文拟以海参在加工过程中的组分与食品结构变化为主题,介绍相关研究背景,在此基础上针对各关键加工环节综述研究报道、归纳研究进展,并提出展望与发展建议,以期加速相关研究,进而推动海参产业的高质量发展。

1 海参的组分特征

海参的主要可食部位为海参体壁。依据组织的观点,海参体壁由结缔组织(主要)及肌肉组织(次要)组成。以食品原料学的观点分类,海参体壁是一种高蛋白低脂肪的动物性食品原料,蛋白是海参体壁干物质中含量最高的一类组分,占干物质的60%左右^[3];但相较其他动物性食品原料,海参还富含硫酸多糖、皂苷等独特的成分。鉴于海参的食用品质主要包括营养品质与质构品质两方面,因此在海参加工过程的研究中,可从营养组分及结构组分两个视角对海参的组分展开研究。

海参因其滋补功能而受到消费者青睐,独特的营养品质是其区别于其他水产品原料乃至其他食品原料的关键特征,是海参产业实现特色发展的根基所在。研究表明,海参的营养品质主要由胶原蛋白、海参多糖、海参皂苷、海参活性脂质、钒蛋白等所贡献。胶原蛋白占海参体壁总蛋白的70%左右^[4],是海参中含量最高的组分。海参多糖分为岩藻聚糖及岩藻糖基化硫酸软骨素两种,具有高度的天然硫酸酯化,含量均可达到海参体壁的5%~10%^[5]。皂苷是海参的次生代谢产物,能够发挥显著的调节脂质代谢、抗肿瘤等功能^[6]。海参含有多种独特而新颖的复合脂质,如神经节苷脂、脑苷脂和缩醛磷脂等^[7-8]。海参富含钒,且相当一部分是以与蛋白结合的有机钒形态存在,钒蛋白被证实具有抑制脂肪生成等功能^[9]。近二十年来,海参的营养功能及其机理受到了研究者的广泛关注,目前已有多篇综述论文关注了海参营养品质及其营养功效成分的研究进展^[10-12],鉴于本文主题不再做过多表述。

口感等质构品质亦是海参的关键品质,而食

品的质构主要是由结构性生物大分子(蛋白、多糖、脂质)贡献形成。目前海参质构品质相关研究普遍关注到了胶原蛋白分子及其聚集体即胶原纤维对海参食品结构与质构的重要作用。自刺参高质量基因组报道以来^[13],海参中除胶原蛋白以外的结构蛋白也逐渐进入研究者的视野,作者研究团队利用生物信息学预测出刺参中潜在的结构蛋白分子2 018种,包括1 254种胞外基质蛋白、253种肌肉蛋白及511种蛋白酶,其中胞外基质蛋白包括胶原蛋白分子37种、蛋白聚糖9种、糖蛋白1 208种^[14]。进一步的差异蛋白组学分析表明,海参体壁中结构蛋白表现出空间分布差异^[14],预示了海参结构与质构形成机理的复杂性。同时,海参多糖在海参中具有相对显著的含量及巨大的分子量(岩藻聚糖分子量超过1 000 ku^[15-17]、岩藻糖基化硫酸软骨素分子量约20~100 ku^[18-20]),提示其高度参与了海参结构的形成。

2 海参的多层级结构

食品质构与食品结构直接相关,同时食品结构在消化过程中的崩解决定着食品营养组分的释放及其生物利用度,因此食品结构也深刻影响着食品的营养品质。从组分到食品,要经历从单个组分到多组分超分子构造(即食品的超微结构)、食品的微观结构、食品的宏观结构等多个层级“自下而上”的递进,分别对应着食品的纳米观、微米观和宏观尺度的组织形式^[21]。

海参的微观结构通常以光学显微镜结合经典的组织染色方法(如苏木精-伊红、阿利新蓝、过碘酸-雪夫、Masson染色等)进行观察。鲜活海参体壁由体表至体腔可分为角质层、表皮层、真皮层、肌肉层及体腔内皮层。真皮层是海参体壁中最主要的组织结构,属于结缔组织,其中分布着纵横交错以及无固定方向的胶原纤维网络结构;肌肉组织中分布着肌纤维与胶原纤维共存的网络结构^[22]。

海参的超微结构常以扫描电子显微镜及(或)透射电子显微镜结合乙酸双氧铀及柠檬酸铅等染色方法进行观察。目前报道中关于海参的超微结构主要关注于海参中的主要“骨架”结构即胶原纤维,胶原纤维是由胶原蛋白分子组成的超分子聚集体,在海参体壁中可观察到成束的胶原纤维及其典型的明暗带交替的横纹状形态。以往针对胃蛋白酶促溶性胶原蛋白(pepsin-solubilized collagen,

PSC) 的研究结论指出, 其中的胶原蛋白分子主要为 I 型或类 I 型^[4, 23-29], 近期作者研究团队利用蛋白组学分析, 表明海参胶原纤维是由多种类型的胶原蛋白分子组成, 包括 2 种 Clade A 纤维胶原分子, 1 种 Clade B 纤维胶原分子, 2 种不连续三螺旋结构的纤维相关胶原 (fibril associated collagens with interrupted triple helices, FACIT) 分子^[30]; 另一方面, 通过化学分析验证了岩藻糖基化硫酸软骨素通过 O-糖苷键与胶原纤维共价结合, 进一步经酞菁染料染色, 发现岩藻糖基化硫酸软骨素在透射电子显微镜下呈现球状或椭球状, 其位于胶原纤维间隙区, 在胶原纤维上大致呈同轴环状周期分布, 重复周期 (约 70 nm) 与胶原纤维重复周期一致, 据此提出了岩藻糖基化硫酸软骨素与海参胶原纤维超分子构造的“珍珠手镯”模型^[31]。上述关于胶原纤维组成与超分子构造的研究进展揭示出海参胶原纤维的异质性, 而多样的组成与复杂的构造能够赋予胶原纤维更为丰富的功能特性。

除了胶原纤维外, 海参中还存在多种次要的“骨架”结构。Thurmond 等^[32] 研究指出北大西洋瓜参 (*Cucumaria frondosa*) 中存在由原纤蛋白组成的微纤维 (microfibril), 其外观呈管状, 直径约为 10~14 nm, 具有呈周期性的串珠状结构, 疑似对海参体壁的胶原纤维网络结构起弹性作用。近年来,

微纤维在海参自溶过程中的变化受到关注, 其被认为与海参自溶初期的发生及发展密切相关。同时, 海参体壁的真皮层中被报道存在散在的肌原纤维。

多糖对海参结构的贡献长期处于模糊状态, 近期相关状况有所改观。上述提及, 岩藻糖基化硫酸软骨素在海参体壁中的分布以及与胶原纤维的超分子构造已解明。此外, 作者研究团队通过基因挖掘发现了特异性识别海参岩藻聚糖的结合蛋白, 并将该蛋白与荧光蛋白进行融合表达制备出荧光探针, 从而实现了对手参体壁中岩藻聚糖的原位可视化观察, 发现岩藻聚糖在海参体壁中呈无定型状, 作为基底物质存在于胞外基质中^[33], 考虑到岩藻聚糖中丰富的硫酸酯基及其高度的负电性, 岩藻聚糖为海参体壁中的各种骨架结构塑造了负电环境, 推测其可能对海参的结构与质构起着重要作用, 具体贡献有待进一步探究。

3 海参的关键加工环节

目前海参加工产品主要分为干海参、即食海参和海参深加工产品三类, 涉及的关键加工环节包括水煮、干燥、复水、酶解、调味和杀菌等 (图 1)。

干海参是目前海参产品最主要的形式, 包括淡干、盐干与冻干海参, 其加工包括水煮与干燥

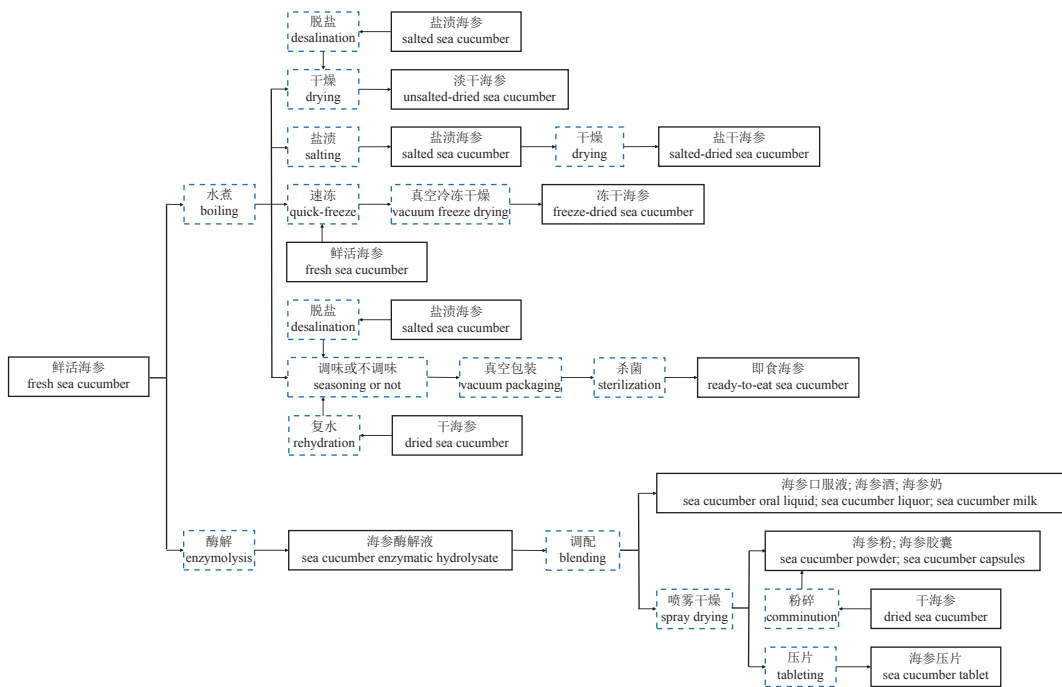


图 1 海参产品加工流程图

Fig. 1 Processing flow of sea cucumber products

两个共性关键环节(图1),水煮的作用在于使海参熟化、灭活自溶酶并使海参定型,进而通过干燥使水分降至15%以下^[34],以实现长期储藏、便于流通的目的。海参在水煮后经过盐渍制得盐渍海参(拉缸盐海参),盐渍海参可直接作为产品销售,也可干燥后制成盐干海参,或作为淡干海参与即食海参的加工原料。干海参在烹饪及制备即食海参前,需要经过复水以达到可食用状态,因此复水也是干海参相关的关键加工环节之一。这三个环节分别发展出了多样的工艺条件:常规的水煮普遍采用常压100℃水煮20~40 min,通过调控水煮压力可实现低压水煮与高压水煮^[35],也有盐水水煮、蒸制^[36-37]等的研究报道与生产实践。传统的干燥工艺主要有日光晒干与冷热风干,随着干燥技术的进步,出现了热泵-热风组合干燥^[38]、冷冻干燥^[39]、微波干燥^[40]、远红外辐射干燥^[41]等新型干燥方式。现阶段典型的复水工艺为水发法,即将干海参先浸泡1~2 d,然后在80~100℃水煮10~30 min,最后再采用温水或冷水浸泡至海参完全涨发。也有通过碱水泡发^[42]以及使用超声^[43]、微波^[44]等技术来改进复水工艺的研究。

即食海参是一种预制菜,因其方便快捷而受到消费者的欢迎,生产过程中涉及到调味、包装与杀菌环节(图1),通过调味可形成适宜的口感,杀菌的作用在于稳定产品品质、延长货架期^[45-46]。即食海参在消费前通常要经历贮藏过程,贮藏条件会显著影响即食海参的货架期与品质,因此贮藏环节也是即食海参研究的重要关注点,目前即食海参的贮藏方式主要为冷冻贮藏与冷藏贮藏^[47]。

海参通过深加工可形成形式多样的产品,进一步拓展了其消费场景。酶解是多种海参深加工产品生产工艺的核心环节(图1),海参经酶解后形成海参酶解液,海参酶解液可调配至其他液体食品如牛奶、饮料、酒等中,制成海参奶、功能性饮料、海参酒等^[48-49];也可经喷雾干燥后,进一步生产出海参粉、海参胶囊、海参压片等产品^[50-51]。

4 鲜海参水煮过程中组分与食品结构的变化

水煮后的海参由于脱水与干物质的流失,失重率约为60%~80%^[35-36, 52-53]。海参组分尤其是蛋白、多糖、皂苷等营养组分在水煮过程的含量损失引起了研究者的广泛关注,部分研究结果列于表1。

学者也关注了水煮过程中矿物质的变化, Yin等^[54]研究表明海参在沸水煮制10 min后, Ca、Mg、Fe、P、K、Na与Zn均发生了流失,其中Ca与Zn的损失率达到32.53%及26.17%。由此可见,水煮是造成海参营养流失的主要环节。

随着水煮时间与温度的增加,海参组分的流失程度加重,影响着海参的营养品质。研究普遍表明,相比于常压水煮,高压水煮缩短了水煮时间,进而降低了营养成分的流失^[55];在相同水煮时间内,低压水煮的营养损失率较低^[55]。部分研究关注了添加物对水煮过程中组分流失的影响:相比清水,盐水水煮导致的营养成分流失更为严重^[36-37]。Liu等^[57]在海参水煮过程中添加乳酸与茶多酚,有效降低了羟脯氨酸、多糖、蛋白质、三氯乙酸可溶性肽的流失,作者认为其原因在于乳酸与茶多酚抑制了蛋白的氧化降解。上述研究表明,通过优化水煮方式、适当采用添加物等措施,能够一定程度上控制海参组分的流失。也应注意,不同研究报告中同一水煮条件下的海参组分流失率在数值上可能存在较大差异,推测由于检测方法及海参原料的差异所致,类似的情况也见于其他加工环节的研究,一定程度上反映出开发及使用海参组分定量标准方法的必要性。

在水煮过程中,海参从无定形逐渐收缩成坚挺、轮廓清晰的状态,体积明显缩小,重量显著下降。微观结构的变化表现为随着水煮过程的进行,胶原纤维首先出现聚集、收缩,造成纤维间形成孔隙,然后部分胶原纤维发生降解,最终胶原纤维出现断裂、呈现片段化^[58]。研究普遍表明,提高水煮温度将加速上述水煮过程中胶原纤维的变化过程^[59-60]。与常压水煮相比,低压水煮对海参体壁网络结构的破坏程度相对较轻,水煮后海参的硬度较高^[35, 53];高压水煮后的海参胶原纤维间孔隙较小、组织形态更为致密,但组织形态不规则且呈现出片段化,水煮后海参的硬度、弹性与柔嫩性较低^[35, 55, 61]。

在盐渍海参生产中,经过水煮后的海参进一步进入盐渍环节,随着盐渍时间的延长,海参体壁蛋白、多糖、水分和脂肪的含量逐渐降低,而灰分与盐分的含量上升^[62-63]。比较15%盐水盐渍、饱和盐水盐渍、干盐盐渍三种工艺,干盐盐渍导致的物质流失最为严重^[62]。有研究指出,在海参盐渍前后,多糖的单糖组成无明显差异^[64],不饱和脂肪酸含量下降^[62]。盐渍过程伴随着胶原纤维

表 1 海参水煮后组分流失情况

Tab. 1 Composition loss of sea cucumber after boiling

水煮工艺 boiling technology	多糖流失率/% loss rate of polysaccharide	蛋白质流失率/% loss rate of protein	总皂苷流失率/% loss rate of saponin	参考文献 reference
常压100 °C水煮5 min normal pressure boiling at 100 °C for 5 min	9.91	10.00	—	[55]
常压100 °C水煮30 min normal pressure boiling at 100 °C for 30 min	16.39	20.86	—	[55]
低压85 °C水煮60 min low pressure boiling at 85 °C for 60 min	2.74	9.42	—	[55]
低压85 °C水煮120 min low pressure boiling at 85 °C for 120 min	4.84	10.44	—	[55]
高压115 °C水煮10 min high pressure boiling at 115 °C for 10 min	5.66	10.98	—	[55]
高压121 °C水煮10 min high pressure boiling at 121 °C for 10 min	5.96	12.65	—	[55]
常压100 °C水煮60 min normal pressure boiling at 100 °C for 60 min	5.99	10.56	—	[35]
常压100 °C水煮10 min normal pressure boiling at 100 °C for 10 min	33.02	11.49	41.33	[54]
常压100 °C水煮5 min normal pressure boiling at 100 °C for 5 min	4.11	10.06	5.30	[56]
常压100 °C水煮10 min normal pressure boiling at 100 °C for 10 min	4.80	12.18	6.72	[56]
常压100 °C水煮30 min normal pressure boiling at 100 °C for 30 min	5.89	15.41	8.33	[56]
常压100 °C水煮60 min normal pressure boiling at 100 °C for 60 min	6.67	17.15	9.66	[56]
常压100 °C水煮90 min normal pressure boiling at 100 °C for 90 min	7.49	18.46	10.61	[56]

注: — 未报道
Notes: —. not reported

聚集及微观结构的坍塌。海参盐渍后相较盐渍前, 其硬度、黏聚性与咀嚼度呈上升趋势, 弹性与回复性降低^[62]。

5 海参干燥过程中组分与食品结构的变化

海参干燥过程本质上是海参中的水分蒸发的过程, 最终水分含量需达到海参干制品质量标准要求^[34]。Zang 等^[65]研究了海参在干燥过程中的水分变化情况, 随着干燥时间的延长, 海参自由水含量逐渐降低, 结合水的比例增加。干燥温度、干燥方式、干燥前盐渍处理等均会影响海参干燥的效率与效果(表 2)。干燥温度越高, 达到海参干燥终点所需的干燥时间越短^[66]。热风干燥是目前干海参生产中普遍采用的干燥工艺, 与晒干等传统工艺相比可缩短干燥时间, 但其干燥效率低于微波干燥^[40]、远红外辐射干燥^[41]等新工艺。李晓庆^[37]研究表明, 相比清水煮制, 盐水煮制或盐渍海参热风干燥的所需时间较短, 推测该现象的原因是盐的存在提高了海参中水分的渗透速率。

在热风干燥过程中, 海参体积在水煮的基础上进一步收缩, 海参表面出现细微裂纹^[41]。温度升高使海参的干燥收缩加剧^[38]。研究表明, 特定的新工艺可降低干燥过程中海参食品结构的破坏, 并提高干海参的品质(表 3)。张凡伟^[67]研究了热风干燥、微波干燥、微波冷冻干燥以及冷冻干燥对海参品质的影响, 与其他干燥工艺相比, 冷冻干燥后的干海参收缩率低, 经扫描电镜观察, 冷冻干燥所得干海参的超微结构呈均匀、多孔且细密的海绵状结构。Moon 等^[41]采用扫描电镜观察发现, 远红外辐射干燥生产的干海参其表面裂纹程度低于热风干燥生产的干海参。

6 干海参复水过程中组分与食品结构的变化

海参复水一般包括水煮与泡发两个步骤, 复水后海参最明显的组分变化是水分含量的升高, 一般恢复至 90% 以上^[43, 52], 以使海参达到可食用状态。Geng 等^[68]研究表明, 泡发前期干海参吸收

表 2 干燥工艺对海参干燥效率的影响

Tab. 2 Effect of drying technology on drying efficiency of sea cucumber

干燥工艺 drying technology	干燥时间 drying time	水分含量/% moisture content	参考文献 reference
热风干燥 (30 °C) hot air drying (30 °C)	36 h	<15	[66]
热风干燥 (40 °C) hot air drying (40 °C)	28 h	<15	[66]
热风干燥 (50 °C) hot air drying (50 °C)	20 h	<15	[66]
热风干燥 (60 °C) hot air drying (60 °C)	15 h	<15	[66]
热风干燥 (60 °C) hot air drying (60 °C)	14 h	6.86	[40]
微波干燥 (200 W) microwave drying (200 W)	4 min	6.04	[40]
真空冷冻干燥 (-80 °C) vacuum freeze drying (-80 °C)	24 h	6.00	[40]
鲜活水煮后热风干燥 (30~40 °C) pure water boiling and hot air drying (30~40 °C)	10 d	11.70	[37]
饱和食盐水水煮后烘干 (30~40 °C) saturated salt water boiling and drying (30~40 °C)	8 d	9.64	[37]
拉缸盐海参烘干 (30~40 °C) salted sea cucumber drying (30~40 °C)	8 d	8.35	[37]
拉缸盐海参脱盐、煮制、烘干 (30~40 °C) salted sea cucumber desalting, boiling and drying (30~40 °C)	8 d	15.1	[37]
热风干燥 (60 °C) hot air drying (60 °C)	48 h	约5.30*	[39]
真空冷冻干燥 (-85 °C) vacuum freeze drying (-85 °C)	48~72 h	约3.80%*	[39]
日光干燥 (18~25 °C) sun drying (18~25 °C)	72~96 h	约5.30%*	[39]
蒸馏水煮后晒干 (18~25 °C) double-distilled water boiling and sun drying (18~25 °C)	72~96 h	约6.30%*	[39]
3.5% NaCl水煮后晒干 (18~25 °C) 3.5% sodium chloride solution boiling and sun drying (18~25 °C)	72~96 h	约5.80%*	[39]

注: *.报道中未明确给出数值, 为估计值

Notes: *. the numerical value is estimated, since it is not given explicitly in the report

表 3 不同干燥工艺的效果差异

Tab. 3 Difference in effect of different drying technologies

干燥工艺 drying technology	干燥收缩率/% drying shrinkage ratio	干海参复水倍数 rehydration ratio of dried sea cucumber	参考文献 reference
热风干燥 (30 °C) hot air drying (30 °C)	16.96	6.64	[38]
热风干燥 (45 °C) hot air drying (45 °C)	18.82	8.35	[38]
热风干燥 (60 °C) hot air drying (60 °C)	19.97	8.71	[38]
热泵-热风组合干燥 heat pump and hot air combination drying	16.64	10.18	[38]
热风干燥 (70 °C) hot air drying (70 °C)	37.00	5.58	[67]
微波干燥 microwave drying	31.60	5.87	[67]
微波真空冷冻干燥 microwave vacuum freeze drying	14.61	9.12	[67]
真空冷冻干燥 vacuum freeze drying	7.99	10.13	[67]

的水主要作为结合水, 泡发约 8 h 后吸收的水多作为自由水, 24 h 后水分相对均匀地分布在整个海参中。在复水过程中, 多糖、蛋白质、脂肪、

灰分等组分均有不同程度的流失, Fukunaga 等^[42]研究表明, 其中灰分流失最快、多糖次之、胶原蛋白流失相对缓慢^[42]。组分流失情况受复水时间、

温度以及其他辅助工艺的影响。复水时间越长、温度越高, 海参的组分流失越多^[52, 55]。在泡发液中加入添加物或可抑制组分流失, 研究者用蒸馏水、洗米水、茶水及 0.2% K_2CO_3 溶液泡发干海参, 发现经茶水泡发后的海参中多糖、蛋白质及灰分含量最高^[42]。利用超声波^[43, 69]、微波-真空^[44]等技术辅助复水可有效减少海参组分的流失。

随着复水时间的延长, 海参胶原纤维宽度增加、纤维间空隙变大, 海参体壁变软, 其硬度、回复性、内聚性与咀嚼性降低^[69-70]。研究表明, 更高的复水温度将会使复水后的海参形成更加均匀且高度交联的网状结构^[71]。另有研究发现, 超声波辅助复水能够促进海参胶原蛋白曝露出更多的亲水基团, 使海参吸水速率与膨胀速率加快, 形成孔隙率更高的空间网络结构, 提高复水后海参的持水能力^[43, 69-70]。

7 即食海参加工过程中组分与食品结构的变化

海参调味需将海参浸泡于调味液中, 此过程中风味成分进入海参, 而海参中的多糖、水溶性蛋白质等发生溶出^[72]。当前多采用高温高压杀菌的方式对即食海参进行杀菌, 在高温高压的作用下胶原纤维束结构遭到破坏, 胶原蛋白的三股螺旋结构发生解旋与降解, 游离羟脯氨酸与游离氨基氮增加, 多糖发生降解^[73-75]。

即食海参一般采用冷藏或冷冻贮藏, 在即食海参贮藏的研究中, 亦常见 37 °C 等条件下的加速贮藏实验。随着贮藏时间的延长, 即食海参体壁明显软化, 游离水增加、结合水降低, 海参胶原蛋白降解程度增加, 海参的硬度、弹性与咀嚼性下降^[76-77]。Sun 等^[77]利用蛋白组学技术研究发现, 即食海参在贮藏过程中其蛋白质易在甘氨酸、谷氨酰胺、天冬酰胺、天冬氨酸及亮氨酸处降解。部分学者关注了反复冻融对即食海参的影响, 发现随着冻融次数增加, 即食海参中的自由水与胶原蛋白发生流失, 胶原纤维断裂形成空洞, 造成海参持水能力明显下降^[47, 78]。以适当的添加物改善即食海参的贮藏品质也是当前的研究热点, Qi 等^[79]发现绿茶提取物与没食子酸可以通过交联蛋白延缓即食海参的降解, 作者研究团队也发现诃子与五倍子这两种植物的提取物可以提高海参体壁胶原纤维的结构稳定性, 使胶原纤维结构更加致密, 从而提高即食海参的弹性、延长货架期^[80]。

8 海参酶解过程中组分与食品结构的变化

目前的海参酶解工艺大多采用一种或几种蛋白酶对海参进行酶解, 海参蛋白在蛋白酶的水解作用下分子量逐步降低, 最终水解生成肽及游离氨基酸。如上所述, 蛋白构成了海参的“骨架”结构, 蛋白在蛋白酶的作用下降解进而引发海参各层级食品结构的崩解。海参多糖具有可溶性的特性, 随着海参食品结构的崩解, 多糖被释放并分散至酶解液中, 因此蛋白酶酶解也是当前普遍采用的海参多糖提取手段。多种蛋白酶(包括木瓜蛋白酶^[81]、胰蛋白酶^[82]、碱性蛋白酶^[83]、中性蛋白酶^[83]、胃蛋白酶^[84]、胰凝乳蛋白酶^[84]、弹性蛋白酶^[84]以及海参内源酶^[83]等)均见于海参酶解的研究报道中, 这些蛋白酶的作用方式具有差异, 采用不同蛋白酶及不同反应条件将会产生不同组成与功能的酶解产物, 酶解工艺优化是海参深加工长期以来的研究热点。作者研究团队近期研究了海参在蛋白酶酶解过程中蛋白肽与多糖的释放规律^[85]: 肽组学分析表明, 酶解液中的蛋白肽组成随酶解时间的变化呈现动态变化, 以木瓜蛋白酶为例, 酶解 30 min 时酶解液中可鉴定出的肽段数量为 738 条, 120 min 时增加至 838 条, 480 min 时降低至 731 条, 其中仅有 216 条肽段在各个时间点均存在。在蛋白肽分子组成的视角下, 不同蛋白酶作用下的蛋白肽释放规律差异巨大, 酶解 480 min 时, 木瓜蛋白酶、碱性蛋白酶、中性蛋白酶与风味蛋白酶的酶解液中可鉴定出的肽段数量依次为 731、544、630 与 1 324 条, 除 32 条肽段在四种蛋白酶酶解产物中共同存在外, 其余肽段的产生均表现出蛋白酶种类依赖性。岩藻聚糖与岩藻糖基化硫酸软骨素的释放规律表现出明显差别, 岩藻聚糖在酶解反应初始阶段(5 min)即有大量释放, 而岩藻糖基化硫酸软骨素呈现出稳步释放的趋势, 这一现象可被两种多糖在海参食品结构中的不同存在状态(岩藻聚糖为基底物质, 岩藻糖基化硫酸软骨素共价结合于胶原纤维)所解释。

9 讨论与展望

海参加工过程中组分及食品结构的变化作为海参开发利用中的关键科学问题, 引起了学者的广泛研究。蛋白、多糖等几大类营养功效成分的总量在加工中的变化(流失)规律得到了较好的阐明。在加工工艺研究中, 研究者也普遍关注到了

新老工艺所得产品的营养品质对比,有力支撑了以营养保持为目标的海参加工新技术、新工艺的开发。同时,针对加工过程中食品结构变化的研究,也从一定程度上建立了食品结构与产品品质之间的相关性,为海参加工产品品质调控技术的开发提供了有效的理论指导。现有研究充分体现了关键科学问题的研究成果在技术创新中的重要推动作用。

然而,本科学问题的研究中仍存在诸多亟待提升之处。海参加工过程中组分变化研究的精细程度尚不足。具体而言,大多数研究针对的是蛋白、多糖等一类分子,未细化到某一种分子,而不同种的分子其营养功能及对食品结构的贡献可能存在显著差异,在相同加工过程中也可能呈现出不同的变化规律。同时,当前研究更多关注于组分的含量变化,少量研究涉及对组分(主要是蛋白)在加工中降解的观察,但组分结构在加工过程中的变化较少被探讨,潜在的结构变化将可能影响该组分与海参产品的营养特性,并可能导致食品结构与食品品质的变化。蛋白组学(包括肽组学)及代谢组学的发展为蛋白及小分子的高通量分析提供了有力工具,为精细研究海参加工过程中各种蛋白、脂质、皂苷分子的变化创造了技术条件。多糖的通用分析方法相比蛋白及小分子物质较为落后,尤其是多糖结构解析繁琐耗时,导致研究海参加工过程中各种多糖的变化具有较大难度,针对海参岩藻聚糖及岩藻糖基化硫酸软骨素开发特异定量方法以及高效的结构解析策略,是攻克此瓶颈问题的关键。

目前,海参的食品结构研究尤其是超微结构的研究相对薄弱,导致海参结构特征的层级链条不完善、海参的多层级结构模型未建立,尚难以清晰描绘出“海参组分变化-海参食品结构变化-海参品质变化”这三者之间的相关性及其因果关系。针对海参各结构组分建立特异可视化分析方法,是解决上述问题的关键。海参食品结构研究中主要采用通用的组织染色观察方法,微观结构观察中通用染色方法能够分辨出胶原纤维、肌原纤维等主要骨架结构,但对于其他结构缺乏表征能力。超微结构观察中,借助通用观察方法能够得到的准确信息非常有限,亦主要局限于具有典型形貌的结构。因此,当前对海参加工过程食品结构变化的研究主要关注于整体形貌及上述提及的少数结构,难以清晰、完整地呈现出海参食品结构的

<https://www.china-fishery.cn>

变化规律。基于当前现状,建议针对海参中的关键结构组分,首要包括胶原蛋白、原纤蛋白、岩藻糖基化硫酸软骨素、岩藻聚糖等,系统掌握其特异性探针,结合多重免疫荧光观察、免疫电镜观察等策略,构建海参多层次结构可视化观察的方法体系,完善对鲜活海参食品结构的认识,构建起海参组分结构、超微结构、微观结构、宏观结构之间的联系,进而清晰阐明海参结构在加工过程中的变化,并建立结构变化导致品质变化的因果关系,从而为海参高品质加工技术的开发提供更为精准的指导。

10 结论

本文围绕组分与食品结构变化这一海参加工中的关键科学问题,针对海参水煮、干燥、复水、酶解以及即食海参的调味、杀菌与贮藏等多个关键加工环节,梳理归纳了相关研究进展。在此基础上,评述了该科学问题研究中的有待完善之处,发现了相关研究方法上存在的瓶颈问题,建议运用多组学技术并开发海参多糖的特异定量与结构高效解析方法,精细化加工过程中组分变化的研究;获取海参结构组分的特异探针、构建海参多层次结构可视化分析方法,系统化加工过程中食品结构变化的研究。本综述有助于海参加工领域研究者与技术人员快速形成对上述科学问题研究进展的认识,相关建议有望促进海参加工基础理论的进一步发展,对其他食品的相关研究亦有一定的参考意义。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Bordbar S, Anwar F, Saari N. High-value components and bioactives from sea cucumbers for functional foods—a review[J]. *Marine Drugs*, 2011, 9(10): 1761-1805.
- [2] 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. 中国渔业统计年鉴-2021[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2021.
中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- ture Press, 2021 (in Chinese).
- [3] Wen J, Hu C Q, Fan S G. Chemical composition and nutritional quality of sea cucumbers[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(14): 2469-2474.
- [4] Saito M, Kunisaki N, Urano N, *et al.* Collagen as the major edible component of sea cucumber (*Stichopus Japonicus*)[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(4): 1319-1322.
- [5] Bechtel P J, Oliveira A C M, Demir N, *et al.* Chemical composition of the giant red sea cucumber, *Parastichopus Californicus*, commercially harvested in Alaska[J]. *Food Science & Nutrition*, 2013, 1(1): 63-73.
- [6] Zhao Y C, Xue C H, Zhang T T, *et al.* Saponins from sea cucumber and their biological activities[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(28): 7222-7237.
- [7] Li Q, Che H X, Wang C C, *et al.* Cerebrosides from sea cucumber improved $A\beta_{1-42}$ -induced cognitive deficiency in a rat model of Alzheimer's disease[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2019, 63(5): 1800707.
- [8] Zhang T T, Xu J, Wang Y M, *et al.* Health benefits of dietary marine DHA/EPA-enriched glycerophospholipids[J]. *Progress in Lipid Research*, 2019, 75: 100997.
- [9] Liu Y J, Xu H, Xu J, *et al.* Vanadium-binding protein from vanadium-enriched sea cucumber *Apostichopus japonicus* inhibits adipocyte differentiation through activating WNT/ β -catenin pathway[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 17: 504-513.
- [10] Xu C, Zhang R, Wen Z Y. Bioactive compounds and biological functions of sea cucumbers as potential functional foods[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 49: 73-84.
- [11] Khotimchenko Y. Pharmacological potential of sea cucumbers[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(5): 1342.
- [12] Shi S J, Feng W J, Hu S, *et al.* Bioactive compounds of sea cucumbers and their therapeutic effects[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2016, 34(3): 549-558.
- [13] Zhang X J, Sun L N, Yuan J B, *et al.* The sea cucumber genome provides insights into morphological evolution and visceral regeneration[J]. *PLoS Biology*, 2017, 15(10): e2003790.
- [14] Wang Y C, Tian M, Chang Y G, *et al.* Investigation of structural proteins in sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) body wall[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 18744.
- [15] Yu L, Xue C H, Chang Y G, *et al.* Structure and rheological characteristics of fucoidan from sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *Food Chemistry*, 2015, 180: 71-76.
- [16] Yu L, Ge L, Xue C H, *et al.* Structural study of fucoidan from sea cucumber *Acaudina molpadioides*: a fucoidan containing novel tetrafucose repeating unit[J]. *Food Chemistry*, 2014, 142: 197-200.
- [17] Yu L, Xue C H, Chang Y G, *et al.* Structure elucidation of fucoidan composed of a novel tetrafucose repeating unit from sea cucumber *Thelethota ananas*[J]. *Food Chemistry*, 2014, 146: 113-119.
- [18] Ustyuzhanina N E, Bilan M I, Dmitrenok A S, *et al.* Fucosylated chondroitin sulfates from the sea cucumbers *Paracaudina chilensis* and *holothuria Hilla*: structures and anticoagulant activity[J]. *Marine Drugs*, 2020, 18(11): 540.
- [19] Ustyuzhanina N E, Bilan M I, Dmitrenok A S, *et al.* Fucosylated chondroitin sulfates from the sea cucumbers *Holothuria tubulosa* and *Holothuria stellati*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 200: 1-5.
- [20] Ustyuzhanina N E, Bilan M I, Dmitrenok A S, *et al.* A highly regular fucosylated chondroitin sulfate from the sea cucumber *Massinium magnum*: structure and effects on coagulation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 167: 20-26.
- [21] McClements D J. Understanding and controlling the microstructure of complex foods[M]. Cambridge: Woodhead Pub. Ltd. , 2007.
- [22] 李霞, 周海燕, 秦艳杰, 等. 仿刺参体壁的显微和亚显微结构[J]. *大连海洋大学学报*, 2010, 25(4): 289-292.
- Li X, Zhou H Y, Qin Y J, *et al.* Microstructure and ultrastructure of body wall in sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2010, 25(4): 289-292 (in Chinese).
- [23] Zhong M, Chen T, Hu C Q, *et al.* Isolation and characterization of collagen from the body wall of sea cucumber *Stichopus monotuberculatus*[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(4): 671-679.
- [24] Adibzadeh N, Aminzadeh S, Jamili S, *et al.* Purification

- and characterization of pepsin-solubilized collagen from skin of sea cucumber *Holothuria parva*[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2014, 173(1): 143-154.
- [25] Abedin M Z, Karim A A, Ahmed F, *et al.* Isolation and characterization of pepsin-solubilized collagen from the integument of sea cucumber (*Stichopus vastus*)[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(5): 1083-1088.
- [26] Dong X P, Zhu B W, Sun L M, *et al.* Changes of collagen in sea cucumber (*Stichopus japonicas*) during cooking[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2011, 20(4): 1137-1141.
- [27] Liu Z Y, Oliveira A C M, Su Y C. Purification and characterization of pepsin-solubilized collagen from skin and connective tissue of giant red sea cucumber (*Parastichopus californicus*)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(2): 1270-1274.
- [28] Cui F X, Xue C H, Li Z J, *et al.* Characterization and subunit composition of collagen from the body wall of sea cucumber *Stichopus japonicus*[J]. *Food Chemistry*, 2007, 100(3): 1120-1125.
- [29] Trotter J A, Lyons-Levy G, Thurmond F A, *et al.* Covalent composition of collagen fibrils from the dermis of the sea cucumber, *Cucumaria frondosa*, a tissue with mutable mechanical properties[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Physiology*, 1995, 112(3-4): 463-478.
- [30] Tian M, Xue C H, Chang Y G, *et al.* Collagen fibrils of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) are heterotypic[J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126272.
- [31] Wang J, Chang Y G, Wu F X, *et al.* Fucosylated chondroitin sulfate is covalently associated with collagen fibrils in sea cucumber *Apostichopus japonicus* body wall[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 186: 439-444.
- [32] Thurmond F A, Koob T J, Bowness J M, *et al.* Partial biochemical and immunologic characterization of fibrillin microfibrils from sea cucumber dermis[J]. *Connective Tissue Research*, 1997, 36(3): 211-222.
- [33] Mei X W, Chang Y G, Shen J J, *et al.* Characterization of a sulfated fucan-specific carbohydrate-binding module: a promising tool for investigating sulfated fucans[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 277: 118748.
- [34] 中华人民共和国农业部. 干海参: SC/T 3206-2009[S]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [35] 刘淇, 曹荣, 郭莹莹, 等. 海参加工过程中蒸煮工艺对产品品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(12): 313-317.
- Liu Q, Cao R, Guo Y Y, *et al.* Effects of sea cucumber processing on the quality of its products[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2015, 31(12): 313-317 (in Chinese).
- [36] 侯志刚. 仿刺参贮藏及预煮过程的品质变化研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- Hou Z G. The research in changes of quality during storage and pre-cooking about *Apostichopus japonicus*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015 (in Chinese).
- [37] 李晓庆. 几种刺参制品质量评价关键指标的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Li X Q. Research on crucial indexes in quality evaluation of several *Stichopus japonicus* products[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [38] 丛海花, 薛长湖, 孙妍, 等. 热泵-热风组合干燥方式对干制海参品质的改善[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 342-346.
- Cong H H, Xue C H, Sun Y, *et al.* Quality improvement of dried sea cucumber by combined heat pump and hot air method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(5): 342-346 (in Chinese).
- [39] Li C F, Li H, Guo S J, *et al.* Evaluation of processing methods on the nutritional quality of sea cucumber (*Apostichopus japonicus* Selenka)[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2018, 27(4): 406-417.
- [40] Öztürk F, Gündüz H. The effect of different drying methods on chemical composition, fatty acid, and amino acid profiles of sea cucumber (*Holothuria tubulosa* Gmelin, 1791)[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(9): e13723.
- [41] Moon J H, Kim M J, Chung D H, *et al.* Drying characteristics of sea cucumber (*Stichopus japonicas* Selenka) using far infrared radiation drying and hot air drying[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2014, 38(4): 1534-1546.
- [42] Fukunaga T, Matsumoto M, Murakami T, *et al.* Effects

- of soaking conditions on the texture of dried sea cucumber[J]. *Fisheries Science*, 2004, 70(2): 319-325.
- [43] 黄旭辉. 超声波处理对海参复水品质的影响及机理研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- Huang X H. The effect of ultrasound on rehydration quality of sea cucumber and mechanism research[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016 (in Chinese).
- [44] 杜婕妤, 管娟, 汤海青, 等. 微波加热结合真空冷水浸泡对海参水发效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(17): 272-280.
- Du J Y, Guan J, Tang H Q, *et al.* Influence of microwave heating combined with vacuum cold water immersion on sea cucumber (*Stichopus japonicus*) soaking effects[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(17): 272-280 (in Chinese).
- [45] 周星璐, 李金慧, 张祥鑫, 等. 调味即食海参的研制[J]. *食品工业*, 2014, 35(6): 101-105.
- Zhou X L, Li J H, Zhang X X, *et al.* The research of ready-to-eat sea cucumber flavor[J]. *The Food Industry*, 2014, 35(6): 101-105 (in Chinese).
- [46] Chen T J, Peng Z, Lu J H, *et al.* Self-degradation of sea cucumber body wall under 4C storage condition[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2016, 40(4): 715-723.
- [47] 祖崧雪. 反复冻融对即食海参水分动力学的影响研究 [D]. 大连: 大连工业大学, 2017.
- Zu Y X. Research on water dynamics of instant sea cucumber in multiple freeze-thaw processes[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017 (in Chinese).
- [48] 李林格, 栗华华, 曲敏. 海参肽果汁复合饮料的研制[J]. *河北渔业*, 2014(2): 5-9,37.
- Li L G, Li H H, Qu M. Production of compound fruit juice beverage with sea cucumber peptides[J]. *Hebei Fisheries*, 2014(2): 5-9,37 (in Chinese).
- [49] 董慧明, 张月辉, 陈玉威, 等. 海参酒中海参多肽的提取工艺研究[J]. *山东化工*, 2014, 43(1): 20-21,24.
- Dong H M, Zhang Y H, Chen Y W, *et al.* Study on the extraction of sea cucumber polypeptide from sea cucumber wine[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2014, 43(1): 20-21,24 (in Chinese).
- [50] 孟朝阳. 海参胶囊的初步分析研究[J]. *中国酿造*, 2013, 32(2): 61-63.
- Meng Z Y. Preliminary analysis on sea cucumber capsules[J]. *China Brewing*, 2013, 32(2): 61-63 (in Chinese).
- [51] 朱文嘉, 王联珠, 郭莹莹, 等. 海参粉行业标准的制定内容解读[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(23): 6327-6333.
- Zhu W J, Wang L Z, Guo Y Y, *et al.* Interpretation for the formulation content of industrial standard of sea cucumber powder[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2018, 9(23): 6327-6333 (in Chinese).
- [52] 穆琳. 加工对海参营养和功能成分的研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2016.
- Mu L. Studies of processing method on nutritional and functional compositions of instant sea cucumber products[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [53] 姜晓明. 海参真空蒸煮技术及产品的开发 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Jiang X M. The sea cucumber vacuum cooking technology and product development[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [54] Yin P P, Jia A R, Heimann K, *et al.* Hot water pretreatment-induced significant metabolite changes in the sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *Food Chemistry*, 2020, 314: 126211.
- [55] 李志超. 海参质量评定方法与加工工艺对品质的影响研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2014.
- Li Z C. Studies on quality assessment methods and processing parameters optimization for sea cucumber[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2014 (in Chinese).
- [56] 焦健, 康海燕. 海刺参在传统加工过程中部分功能成分流失的实验研究[J]. *中国海洋药物*, 2010, 29(4): 46-49.
- Jiao J, Kang H Y. Studies on losses of some functional components during traditional processing trepang from *Apostichopus japonicus*[J]. *Chinese Journal of Marine Drugs*, 2010, 29(4): 46-49 (in Chinese).
- [57] Liu Z Q, Li D Y, Song L, *et al.* Effects of proteolysis and oxidation on mechanical properties of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) during thermal processing and storage and their control[J]. *Food Chemistry*, 2020, 330: 127248.
- [58] Dong X P, Liu W T, Song X, *et al.* Characterization of heat-induced water adsorption of sea cucumber body wall[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(1): 92-100.

- [59] 高昕, 刘莲凤, 刘倩, 等. 不同加热温度下刺参肌肉组织与胶原纤维结构的变化[J]. *水产学报*, 2012, 36(9): 1465-1472.
Gao X, Liu L F, Liu Q, *et al.* Changes of muscle tissue and collagen fibers structure of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) during heated treatment[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(9): 1465-1472 (in Chinese).
- [60] 薛冬梅, 高昕, 崔凤霞, 等. 加热条件下刺参结构和流变学性质的变化[J]. *中国食品学报*, 2006, 6(1): 161-166.
Xue D M, Gao X, Cui F X, *et al.* Rheological and structure properties changes of *Stichopus japonicus* during heat treatment[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2006, 6(1): 161-166 (in Chinese).
- [61] 汤志旭, 薛冬梅, 徐凤香, 等. 即食海参质构及流变学特征的研究[J]. *食品工业科技*, 2007, 28(10): 57-60.
Tang Z X, Xue D M, Xu F X, *et al.* Study on textural and rheological properties of instant sea cucumber[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2007, 28(10): 57-60 (in Chinese).
- [62] 赵晶. 不同盐渍工艺对海参品质的影响 [D]. 大连: 大连工业大学, 2015.
Zhao J. Effects of different salted techniques on sea cucumber quality[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2015 (in Chinese).
- [63] 曹荣, 李志超, 刘淇, 等. 干海参加工过程中腌渍处理对品质的影响[J]. *中国渔业质量与标准*, 2015, 5(5): 9-13.
Cao R, Li Z C, Liu Q, *et al.* Effects of sousing process on the quality of dried sea cucumber products[J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2015, 5(5): 9-13 (in Chinese).
- [64] 陈燕. 盐渍海参物性学及相关标准研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Chen Y. Study on the rheological properties of salted sea cucumber and related standards[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009 (in Chinese).
- [65] Zhang M, Jiang H, Lim R X. Recent developments in microwave-assisted drying of vegetables, fruits, and aquatic products—drying kinetics and quality considerations[J]. *Drying Technology*, 2010, 28(11): 1307-1316.
- [66] 姜鹏飞. 刺参热风干燥模型及其复水后质构特性的研究 [D]. 大连: 大连工业大学, 2016.
Jiang P F. The study on the hot-air drying model of *Stichopus japonicus* and its textural properties after rehydration[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2016 (in Chinese).
- [67] 张凡伟. 刺参不同干燥工艺的研究 [D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2017.
Zhang F W. Study on different drying methods of *Stichopus japonicus*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2017 (in Chinese).
- [68] Geng S T, Wang H H, Wang X L, *et al.* A non-invasive NMR and MRI method to analyze the rehydration of dried sea cucumber[J]. *Analytical Methods*, 2015, 7(6): 2413-2419.
- [69] Zhang L T, Huang X H, Miao S, *et al.* Influence of ultrasound on the rehydration of dried sea cucumber (*Stichopus japonicus*)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 178: 203-211.
- [70] 员璐. 海参复水工艺优化及品质研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2016.
Yuan L. Research on rehydration process optimization and quality of sea cucumber[D]. Chongqing: Southwest University, 2016 (in Chinese).
- [71] 徐志斌, 陈青, 励建荣. 水发条件对海参(*Acaudina molpadioidea*)质构特性及微观结构的影响研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(7): 37-41.
Xu Z B, Chen Q, Li J R. Effect of water immersion conditions on textural properties and microstructure of dried sea cucumber[J]. *Food Science*, 2010, 31(7): 37-41 (in Chinese).
- [72] 李银塔, 李钰金, 陈英乡, 等. 即食鲜海参生产工艺研究[J]. *肉类研究*, 2010(6): 78-81.
Li Y T, Li Y J, Chen Y X, *et al.* Production process of instant fresh sea cucumber[J]. *Meat Research*, 2010(6): 78-81 (in Chinese).
- [73] Wang J, Lin L, Sun X, *et al.* Mechanism of sea cucumbers (*Apostichopus japonicus*) body wall changes under different thermal treatment at micro-scale[J]. *LWT*, 2020, 130: 109461.
- [74] 林琳, 孙霄, 侯虎. 贮藏温度对高温高压海参体壁组织结构变化的作用[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(19): 194-199.
Lin L, Sun X, Hou H. Effects of storage temperature on the structural changes of high temperature and high pressure sea cucumber body wall[J]. *Food and Fermentation*

- Industries, 2019, 45(19): 194-199 (in Chinese).
- [75] Zhang K, Hou H, Bu L, *et al.* Effects of heat treatment on the gel properties of the body wall of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*)[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(3): 707-717.
- [76] 赵园园, 薛勇, 李兆杰, 等. 即食仿刺参的制备与常温贮藏期间品质变化研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(11): 305-308.
- Zhao Y Y, Xue Y, Li Z J, *et al.* Preparation of fresh-eaten sea cucumber and changes in its quality during room temperature storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(11): 305-308 (in Chinese).
- [77] Sun X, Zhu L L, Qi X, *et al.* Cleavage sites and non-enzymatic self-degradation mechanism of ready-to-eat sea cucumber during storage[J]. *Food Chemistry*, 2022, 375: 131722.
- [78] Tan M Q, Lin Z Y, Zu Y X, *et al.* Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of instant sea cucumber: emphatically on water status of by LF-NMR and MRI[J]. *Food Research International*, 2018, 109: 65-71.
- [79] Qi X, Sun X, Zhu L L, *et al.* Intervention mechanism of self-degradation of ready-to-eat sea cucumber by adding green tea extract and gallic acid[J]. *Food Research International*, 2022, 156: 111282.
- [80] 赵园园. 即食海参贮藏稳定性研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- Zhao Y Y. Storage stability of ready-to-eat sea cucumber[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015 (in Chinese).
- [81] Bahari A N, Saari N, Salim N, *et al.* Response factorial design analysis on papain-generated hydrolysates from *Actinopyga lecanora* for determination of antioxidant and antityrosinase activities[J]. *Molecules*, 2020, 25(11): 2663.
- [82] 刘程惠, 董秀萍, 赵露露, 等. 胰蛋白酶酶解法制备海参肽的工艺条件[J]. *大连轻工业学院学报*, 2006, 25(2): 83-85.
- Liu C H, Dong X P, Zhao L L, *et al.* Technological conditions for the preparation of holothurian peptides by trypsinase[J]. *Journal of Dalian Institute of Light Industry*, 2006, 25(2): 83-85 (in Chinese).
- [83] 刘畅, 张慧艳, 常雨晴, 等. 内外源酶制备海参肽的组成及抗氧化性质研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(11): 136-143.
- Liu C, Zhang H Y, Chang Y Q, *et al.* Study on composition and antioxidant properties of sea cucumber peptides prepared by internal and external enzymes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(11): 136-143 (in Chinese).
- [84] 方园, 陈倩, 刘小玉, 等. 烟台刺参酶解工艺最佳用酶初筛及体外抗肿瘤研究[J]. *当代化工*, 2019, 48(5): 952-954,1024.
- Fang Y, Chen Q, Liu X Y, *et al.* Screening of optimal enzyme for Yantai sea cucumber enzymolysis process and anti-tumor research *in vitro*[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2019, 48(5): 952-954,1024 (in Chinese).
- [85] Wang Y C, Song Y, Chang Y G, *et al.* Dynamic changes of peptidome and release of polysaccharide in sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) hydrolysates depending on enzymatic hydrolysis approaches[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 11(5): 1331-1341.

Changes in composition and food structure of sea cucumber during processing

CHANG Yaoguang^{1,2}, LIU Yanyan¹, SHI Feifei¹, LIU Kaimeng¹, JIANG Xiaoming¹,
WANG Yanchao¹, XUE Yong¹, XUE Changhu^{1,2*}

(1. College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Laboratory for Marine Drugs and Bioproducts,

Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China))

Abstract: Sea cucumber is a traditional nutritious marine food and an important economic aquatic product in China. Sea cucumbers are vulnerable to autolysis, and most sea cucumbers require processing before distribution and consumption. Therefore, processing is a critical sector in the industry chain of sea cucumber. Clarifying the change in the composition and food structure of sea cucumber during processing is the key point for understanding the mechanism of sea cucumber product quality, and would direct the rational development of novel technology for the high-quality processing of sea cucumber. It is thus considered as a key scientific issue related to the development of the sea cucumber industry. In this review, the composition and food structure features of sea cucumbers were overviewed, and the major processing procedures of sea cucumbers were summarized. Based on this background, the changes in composition and food structure of sea cucumber during the processing, including boiling, drying, rehydration, enzymatic hydrolysis, and ready-to-eat sea cucumber processing were introduced, and the recommendations for further research were provided. It would be beneficial for accelerating the solution of the above scientific issue, and contribute to the high-quality development of the sea cucumber industry.

Key words: sea cucumber; processing; composition; food structure; change

Corresponding author: XUE Changhu. E-mail: xuech@ouc.edu.cn

Funding projects: Fok Ying-Tong Education Foundation (171024); National Key R & D Program of China (2018YFC0311201)