

真空低温加热制品的品质及安全性研究进展

陈美玉, 周雅琪, 黄佳茵, 李苑, 葛雨珺, 胡亚芹*

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 馥莉食品研究院, 智能食品加工技术与装备国家(地方)联合实验室, 农业部农产品产后处理重点实验室, 农业部农产品营养功能评价实验室, 浙江省农产品加工技术研究重点实验室, 浙江大学宁波研究院, 杭州 310058)

摘要: 真空低温加热技术是指将原料或半成品食物经过真空密封包装后在较低温度(动物源制品 50~70 °C, 植物源制品 80~100 °C)下长时加热, 提高产品品质和安全性, 减少营养流失的方法。本文综述了真空低温加热技术对动物和植物源制品中的品质及安全性影响的研究进展, 总结了真空低温加热技术对动物源制品微生物安全性、物理性质、挥发性化合物以及杂环胺含量的影响, 并对真空低温加热前后植物源制品的质构特性以及热敏性化合物的结构和含量变化进行介绍。本文总结了该技术目前的应用现状及未来发展方向, 以为真空低温加热技术在我国广泛应用提供理论指导。

关键词: 真空低温加热技术; 动物源制品; 植物源制品; 微生物安全性; 杂环胺; 植物色素

Research progress on quality and safety of sous vide cooking food

CHEN Mei-Yu, ZHOU Ya-Qi, HUANG Jia-Yin, LI Yuan, GE Yu-Jun, HU Ya-Qin*

(National Engineering Laboratory of Intelligent Food Technology and Equipment, Key Laboratory for Agro-Products Postharvest Handling of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory for Agro-Products Nutritional Evaluation of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhejiang Key Laboratory for Agro-Food Processing, Fuli Institute of Food Science, Ningbo Research Institute of Zhejiang University, College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

ABSTRACT: Sous vide cooking is defined as the process of raw materials or semi-cooked food under controlled conditions of relatively low temperature and long time, which food packaged in a hermetically sealed vacuum pouch or tray. Temperatures around 50–70 °C and 80–100 °C are used for animal and plant products, respectively. This technology can improve food physicochemical and safety properties, while reducing nutrients loss. This paper summarized the recent progress of the effect of sous vide cooking on the animal and plant food quality. The review started with a summary of the effects of sous vide cooking technology on microbial safety and physical properties, as well as changes on the content of volatile compounds and heterocyclic amine in animal food, and further discussed the changes in plant food, especially focusing on color, texture and heat-sensitive substances. This paper summarized the current application status and future trends, in order to provide theoretical guidance for the industrial application of sous vide cooking technology in China.

KEY WORDS: sous vide cooking technology; animal product; plant product; microbial safety; heterocyclic amine;

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31871868)、宁波市公益计划重点项目(2019C10083)

Fund: Supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (31871868), and Key Public Projects of Ningbo, Zhejiang Province (2019C10083)

*通讯作者: 胡亚芹, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail: yqhu@zju.edu.cn

*Corresponding author: HU Ya-Qin, Ph.D, Professor, Aquatic Product Processing and Storage, College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China. E-mail: yqhu@zju.edu.cn

plant pigment

1 引言

热处理是一种悠久而重要的食品加工技术,通过控制加热温度、时间和速率,食品中蛋白质、多糖和脂肪等成分会发生变化,可以改善产品的质地、颜色和风味等品质;此外,加热熟化有助于提高食品的安全性和消化率。Carmody 等^[1]对淀粉食品进行研究,证实了相较于非热加工技术,热加工能显著提高淀粉食品的微生物安全性和体内消化率。对消费者而言,食品的安全性、感官品质和营养成分是决定选择的主要因素。因此,通过探究不同加热技术对食品的影响,确保生产出的产品安全可食用外,同时维持和提高优良感官品质,是全食品行业的共识。

真空低温加热技术是一种袋装烹饪技术,通过将食品原料或半成品密封包装在真空袋中,使用较低的温度对食品进行长时间稳定加热,以期得到具有高感官品质和低营养流失的产品^[2]。在肉类加工中,肉的中心温度控制在55~75℃左右,加热时间长达数小时,产品结束加热后应立即贮藏于冷藏环境中;而在植物源制品加工中,温度控制在80~100℃,加热时间较肉制品短,根据实际情况决定是否需要冷藏处理。

这种“低温长时”加热模式具有以下优点:(1)从加热介质到食品上的热量传递高效,加热均匀,防止受热过度或不足的现象发生;(2)抑制好氧微生物的生长,同时避免贮藏中二次污染,延长食品货架期;(3)防止加工过程中挥发性物质和热敏性营养成分的流失;(4)加工后食品具有较高的持水力,感官品质得以提高^[3-5]。

目前,在国内外的研究主要关注真空低温加热后的动物源制品的微生物安全性、感官特性(持水性、质构、色差和挥发性物质)和杂环胺等致癌物质。而对植物源制品,则主要关注温和加热条件对原有色泽和热敏性物质(如酚类和维生素类)的维持和保留情况。本文在国内外报道基础上,综述了真空低温加热技术在动物源制品和植物源制品中的应用概况以期得到感官品质更好、安全性更高的热加工产品。

2 真空低温加热技术的品质及安全性研究进展

2.1 动物源制品中微生物安全性的影响

真空低温加热技术应用在动物源食品中的温度(<70℃)低于植物源制品(>80℃),温和的加热温度通常只能杀灭食品中微生物营养体,而对耐热性极强的孢子没有作用,因此对真空低温加热处理后的动物源制品进行微生物研究大有必要。

影响真空加热产品微生物安全性的主要因素是:

热处理的强度;冷却的速度和终点温度;冷藏的控制温度和时间^[6]。英国食品微生物安全咨询委员会提出以单核细胞增生性李斯特菌(*Listeria monocytogenes*)为例,需要将食品中心温度加热至70℃并维持2min或等效的热处理后,才达到充分消除微生物营养体的要求^[7]。

2.1.1 鱼类中微生物安全性的影响

鱼类是一种水分含量高、结缔组织含量低的食品,因此肉质细腻,不适宜高强度热处理。真空低温加热能较好的维持水产品营养成分和感官品质。Li 等^[8]对不同加热处理后的真空白鲢鱼片(*Hypophthalmichthys molitrix*)进行微生物多样性的研究,发现当加热鱼片中心温度达到72℃和90℃后,菌落总数减少至2.0 log₁₀ CFU/g,符合安全食用标准。将加热后的鱼片于20℃下贮藏,发现加热终点温度为72℃的白鲢鱼片在第2d检出乳酸菌,并在第5d时菌落总数超过可食用标准范围(>7.0 log₁₀ CFU/g);而90℃处理后鱼片的货架期可延长至25d。这一实验结果验证了加热温度越高,对微生物抑制作用越明显。González-Fando 等^[9]也对70℃和90℃下真空加热的虹鳟鱼进行研究,发现在2℃冷藏时,以上2个温度均能有效控制鳟鱼片中金黄色葡萄球菌、蜡样芽孢杆菌、产气荚膜梭菌和单核增生李斯特菌的生长。在90℃下加热3.3min后(相当于在70℃下加热331.64min),虹鳟鱼片货架期延长至45d,在冷藏中均未检测到好氧和厌氧孢子繁殖,这可能与2℃下孢子生长迟缓有关^[9]。

2.1.2 畜肉中微生物安全性的影响

猪肉和牛肉是全球范围内食用最为广泛的2种畜肉。Jeong 等^[10]对不同温度(65℃, 71℃)、不同时间(45min, 90min)和不同真空度(98.81%, 96.58%)处理后猪肉火腿中的微生物特性进行研究,发现加热至65℃以上维持45min,可将原火腿中菌落总数(84.67 log₁₀ CFU/g)和大肠杆菌(3.67 log₁₀CFU/g)降低至不可检出水平,满足消费者对猪肉火腿微生物安全的要求。Becker 等^[11]发现将猪肉最长肌在53℃下维持10min后,各种病原微生物(肠炎沙门氏菌,单核增生李斯特菌和大肠杆菌 0157:H7)含量减低5 log₁₀ CFU/g。Christensen 等^[12]在53℃和58℃对猪肉半腱肌(*Semitendinosus*)中沙门氏菌的实验结果也证实了长时温和热处理能有效控制食品中的微生物,在53℃下长时间加热可使牛肉中的单增李斯特菌含量降低5~6.7D。Smith 等^[13]还发现在牛肉不同肌肉中(半膜肌,半腱肌,股二头肌,股四头肌和长肌),随着加热至60℃的速率提高,微生物营养体的杀菌能力得以提高,同时对微生物起杀灭作用的温度降低,最低到48.9℃时开始对肌肉中的微生物起杀菌作用。

2.2 动物源制品品质的影响

2.2.1 持水性和蒸煮损失率变化

持水力和蒸煮损失率的变化主要与加热过程中肌原纤维蛋白变性和结缔组织的降解有关。随着温度的升高,肌原纤维和肌束膜发生收缩,纤维束之间间隙扩大,细胞外膜出现破裂,导致细胞间水分和细胞内容的流失^[16]。肌原纤维的横向收缩是加热过程中水分流失的主要原因。随着温度升高至 60 °C 以上,结缔组织的变性降解和肌纤维的纵向收缩进一步促使蒸煮损失率增加,这也是真空低温加热食品的持水力优于传统加热的产品的原因之一^[14]。

Janna 等^[15]对大西洋鲑鱼在 60 °C、75 °C 下分别加热 10、15 和 20 min 的水分含量和持水力进行探究,发现加热后样品持水力较新鲜肉下降 7.4%~44%,冷藏期间持水力没有显著变化。在对猪肉火腿进行真空低温加热处理后发现,真空低温加热的肉制品含水量明显高于传统炖煮方式(未包装、100 °C 加热 45 min)获得的产品^[10]。Zielbauer 等^[16,17]对猪腰肌(*Musculus psoas major*)研究发现,蒸煮损失主要发生在加热的前 240 min 和 60 °C 以上,从 60 °C 升高到 74 °C 之间蒸煮损失率增加尤为显著,这可能与肌动蛋白在该温度区间发生变性和收缩有关。密封而不完全真空的袋子比完全真空的袋子对原料失水率的影响更小,这可能是因为在较大的压力下食品会发生压缩变性而造成额外的水分流失。而 Kristensen 和 Purslow^[18]则从组织蛋白酶活性对牛肉细胞骨架蛋白的降解作用,解释低温长时加热对维持高水分产品的影响,Zeng 等^[19]将 Z 盘肌间线蛋白和 α -肌动蛋白与蛋白酶进行孵化,发现肌原纤维晶格溶胀增强,这与持水力的提高显著相关。

2.2.2 质构变化

目前有关真空低温加热对质构的影响,主要是通过研究结缔组织在 50~70 °C 之间的变化而展开^[20-22]。李敬等^[22]认为当温度在 50~60 °C 之间时,肌肉纤维的显著收缩是引起质构变化的因素。而当温度超过 60 °C 以后,肌节收缩现象在横轴和纵轴中均显著增加。结缔组织受热后有序的右手三螺旋结构被破坏,降解生成水溶性的多肽混合物,降低肌肉剪切力,而肌原纤维的收缩则可能增大肌肉硬度^[23]。

Botinestean 等^[24]对 60 °C 和 70 °C 下加热 4.5 h 后的牛半腱肌(*Semitendinosus*)进行剪切力和质地剖面分析,发现低温长时加热能显著降低牛肉的剪切力,硬度和咀嚼性也有所下降。Christensen 等^[25]对猪肉的韧性研究时发现,延长加热时间,可以有效地促进结缔组织的溶解,从而使猪肉具有高持水性的同时韧性下降,便于食用。高年龄的肌肉,如来自母猪中的肌肉由于结缔组织的含量高,需要在相同温度下维持更长时间以达到理想的嫩度^[20]。这一观点与之前 Doniardo 等^[26]发现牛肉的背最长肌嫩化时间少于半腱肌、半膜肌、肱二头肌等结缔组织含量高肌肉相一

致。总的来说,加热温度和加热时长对肉类产品质构的影响是多元因素共同作用的结果^[28]。

2.2.3 色差变化

Kiyoung Jeong 等^[10]发现加热温度越低,猪肉火腿中的 L 值越低, a^* 值越高,而加热时长和真空度对颜色影响较小。这一实验结果与 Sanchez del Pulgar 等^[29]在猪肉中的发现相一致。

L^* 值作为食品明度的指标,受蛋白沉淀的影响较大。随着温度的升高,蛋白变性聚集增多,表面发白,明度升高;另一方面,组织中水分含量减少,光线穿透能力下降,更多的光线不被物料吸收,这也会造成 L^* 升高^[30]。红色 a^* 值的变化则主要取决于肌红蛋白的浓度和肌红蛋白的变性程度^[31,32]。紫红色的肌红蛋白(myobemoglobin, Mb)会结合氧气生成鲜红色的氧合肌红蛋白(oxy myoglobin, MbO₂),随着加工强度的进一步提高,Fe²⁺被氧化,生成褐色的高铁肌红蛋白(metmyoglobin, Met)。肌肉所呈现的色泽是这 3 种不同状态的色素不断转化的动态可逆循环过程^[33,34]。

2.3 对挥发性风味物质的影响

热加工是肉制品产生风味物质的重要途径。熟肉中大多数挥发性化合物是美拉德反应和脂肪受热氧化降解的产物^[35,36]。其中,氨基酸和游离羰基之间的美拉德反应主要形成典型的肉类风味,而不同的脂质降解产生的化合物则提供不同物种特有的香味^[37]。一般认为,大部分挥发性芳香化合物需要在高于 70 °C 的条件下才能产生,因此在真空低温加热过程中形成的风味物质主要来自于脂肪酸的降解和非挥发性化合物^[38]。

Mar 等^[39]对真空包装的羊腰在 60、80 °C 下加热 6 h 和 24 h 后的挥发性成分进行研究,发现主要成分是脂肪烃类和醛类物质。在较低温度和较短加热时间时,挥发性物质成分主要由脂质氧化产生;而当加热温度提高至 80 °C 时,氨基酸 Strecker 降解产物,如 2-甲基丙醛和 3-甲基丁醛等,成为主要的挥发性物质。这揭示了在较低温度下,羰基化合物与其他化合物(如蛋白质、氨基酸等)会发生进一步反应^[40]。除了加热温度,加热时间的延长也会增加 Strecker 降解程度,生成二硫化碳、二甲基二硫、2-甲基噻吩等,通常这些化合物具有较低的气味阈值,能提供与熟肉相关的肉味、咸味、烤炙味和水煮味^[41]。

2.4 对杂环胺的影响

热加工可显著提高肉类的品质,但是另一方面,由于动物源食品蛋白质含量丰富,容易受热后产生具有致癌、致突变作用的多环芳香族化合物,这些化合物也被称为杂环胺(heterocyclic aromatic amines, HCAs)。迄今为止,已有超过 25 种的杂环胺在各类熟食中被检出^[42]。其中,2-氨基-3-甲基咪唑并[4,5-f]喹啉(2-amino-3-methylimidazo[4,5-f]quinoline, IQ)被国际癌症研究机构(International Agency for

Research on Cancer, IARC) 认定为 2A 级致癌物质, 而 2-氨基-3,4-二甲基咪唑并[4,5-f]喹啉(2-amino-3,4-dimethylimidazo[4,5-f]quinoline, MeIQ) 和 2-氨基-3,8-二甲基咪唑并[4,5-f]喹啉(2-amino-3,8-dimethylimidazo[4,5-f]quinoline, MeIQx) 等被认定为 2B 级致癌物质^[31]。此外, 2-氨基-3,4,8-三甲咪唑并[4,5-f]喹啉(2-amino-3,4,8-trimethylimidazo[4,5-f]quinoline, 4,8-DiMeIQx) 和 2-氨基-3,7,8-三甲咪唑并[4,5-f]喹啉(2-amino-3,7,8-trimethylimidazo[4,5-f]quinoline, 7,8-DiMeIQx) 均属于极性杂环胺, 也是研究重点关注的杂环胺种类^[43,44]。

Fatih 等^[45]将 75、85 和 95 °C 分别加热 2 h 和 4 h 后的牛排与传统的炖煮、烤炙产品对比, 发现真空低温处理后的牛排中没有检出 MeIQ 和 MeIQx, 在 85 °C 和 95 °C 加热 240 min 后分别检出 IQ 为 0.029 和 0.037 ng/g, 但含量远低于 95 °C 下烤炙 13 min (0.072 ng/g)。此外 Fatih^[46]还对 65~85 °C 加热的真空鳟鱼片中的杂环胺进行研究, 发现在该温度加热下的鱼片中检测不到 IQ、MeIQ、7,8-DiMeIQx、4,8-DiMeIQx 等物质, 但 MeIQx 检出为 5.66 ng/g。因此可认为, 与传统加热方式相比, 温和的真空低温加热处理能有效抑制肉类熟制过程中杂环胺等致癌物质的产生。

3 真空低温加热技术对植物源制品的品质及安全性研究进展

适当的热处理对植物源制品的品质改善和营养物质保留十分重要。一方面, 较高的温度可使植物中的酶失活, 防止蔬菜色泽、质地、气味可能发生的劣变^[51]。同时也使植物源的抗营养因子变性失活, 提高植物蛋白的营养价值^[52]; 另一方面, 高温也会破坏维生素、酚类物质等对热敏感的活性物质, 降低其在蔬菜中含量^[53]。同时, 高强度热处理对蔬菜的色泽、质构等也有较大影响。

为了减少植物源制品在高温下的水分流失和营养损失, 真空低温技术被应用到植物源制品的加工过程中。不同于对动物源制品的处理温度, 在处理植物源制品中通常使用接近 100 °C 的温度。因为在该温度下, 植物细胞壁不受破坏的同时, 细胞与细胞之间的连接蛋白发生降解, 原有质构软化^[47]。保持细胞壁的完整性对减少色素(如叶绿素和类胡萝卜素)的氧化降解十分关键。在传统的高温加热过程中, 细胞壁被破坏, 细胞内容物流出, 这将导致以叶绿素为代表的植物性卟啉类色素的中心离子 Mg^{2+} 丢失, 植物的鲜绿色变为橄榄色甚至是暗黄色^[48]。真空包装还减少蔬菜在加热过程中与氧气的接触, 避免氧化现象的发生, 提升色素的保留率, 保持原有色泽。

Sofia^[49]研究洋蓍、青豆、西蓝花和胡萝卜这 4 种蔬菜在不同加热方式下的颜色、色素含量、总酚含量和抗氧化成分影响, 发现相较于炖煮 ($T=100$ °C) 和低温加热

($T<100$ °C) 真空加热处理后 ($T=85/90$ °C, 20/30 min) 的蔬菜中叶绿素降解减少、类胡萝卜素稳定性提高, 西蓝花的酚类保留率为 75.5% (炖煮为 42.0%)、洋蓍和胡萝卜的抗氧化能力从炖煮的 17.0%、9.2% 分别提高到 53.5% 和 34.6%。而 Tomá 等^[50]对芸薹属植物的叶片、花序和茎等部位分别在 100 °C 和 80 °C 下加热 15 min 后, 发现不同加热方式对茎的颜色无显著性影响, 但真空低温对花序和叶的护色作用优于传统蒸煮。热处理后芸薹类植物的颜色变化, 不仅与叶绿素的降解程度有关, 而且还与热处理后蔬菜表面反射率和光穿透的深度变化有关。这也解释了厚度较薄的花序和叶片加热前后颜色变化比厚度更大的茎更为明显的现象。

4 结论

真空低温加热技术具有方便易操作、经济附加值高、营养保留率大等诸多优点, 因此近年来在全球范围内被越来越广泛地使用。通过优化加热时间和加热温度, 可以使消费者得到品质提高、安全卫生的动物或植物源制品。目前, 真空低温加热技术在肉制品中主要集中在提高产品嫩度、增大持水力、减少营养物质流失和降低高温加热过程中杂环胺等有毒化合物的生成等; 而在植物源制品中主要用于维持叶绿素和多酚类化合物在加工过程中的含量。

但真空低温加热技术依然存在时间长、耗能大、对食品单一组分研究不充分等问题。随着真空低温技术的进一步发展, 可以就以下方面进行深入研究: 研究真空低温加热技术对肉制品中蛋白组分的影响, 尤其是对其中各种酶的活性影响; 研究多阶段的真空低温加热条件对食品品质的影响; 与新型食品加工技术结合使用, 提高真空加热技术的效率和产品品质。

参考文献

- [1] Carmody RN, Weintraub GS, Wrangham RW. Energetic consequences of thermal and nonthermal food processing [J]. *Proceed Nat Acad Sci United States Am (PNAS)*, 2011, 108(19), 199–203.
- [2] Schellekens M, Martens T. Sous vide state of the art. Commission of the European communities directorate general XII [J]. *Trends Food Sci Technol*, 1996, 7, 256–262.
- [3] Baldwin DE. Sous vide cooking: A review [J]. *Int J Gastron Food Sci*, 2012, 1: 15–30.
- [4] Do minguez HE, Salaseviciene A, Ertbjerg P. Low-temperature long-time cooking of meat: Eating quality and underlying mechanisms [J]. *Meat Sci*, 2018, 143: 104–113.
- [5] Garcia-Linares M C, Gonzalez-Fandos E, Garcia-Fernandez MC, *et al.* Microbiological and nutritional quality of sous vide or traditionally processed fish: Influence of fat content [J]. *J Food Qual*, 2004, 27, 371–387.
- [6] Svac. Code of practice for sous vide catering system [S].
- [7] Advisory committee on the microbiological safety of food. Report on

- vacuum packaging and associated processes [S].
- [8] Li DP, Zhang JB, Song SJ, *et al.* Influence of heat processing on the volatile organic compounds and microbial diversity of salted and vacuum-packaged silver carp: *Hypophthalmichthys molitrix* fillets during storage [J]. *Food Microbiol*, 2018, 72: 73–81.
- [9] González-Fandos E, García-Linares MC, Villarino-Rodríguez A, *et al.* Evaluation of the microbiological safety and sensory quality of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* processed by the sous vide method [J]. *Food Microbiol*, 2004, 21: 193–201.
- [10] Jeong KY, Hyeonbin O, Shin SY, *et al.* Effects of sous-vide method at different temperatures, times and vacuum degrees on the quality, structural, and microbiological properties of pork ham [J]. *Meat Sci*, 2018, 143: 1–7.
- [11] Becker A, Boulaaba A, Pingin S, *et al.* Low temperature, long time treatment of porcine *M. longissimus* throughtiered in a combi steamer under commercial conditions [J]. *Meat Sci*, 2015, 110: 230–235.
- [12] Christensen L, Gunvig A, Tørngren MA, *et al.* Sensory characteristics of meat cooked for prolonged times at low temperature [J]. *Meat Sci*, 2012, 90: 485–489.
- [13] Smith AM, Evans DA, Buck EM. Growth and survival of *Clostridium perfringens* in rare beef prepared in a water bath [J]. *J Food Protect*, 1981, 44: 9–14.
- [14] 孙红霞, 黄峰, 丁振江, 等. 不同加热条件下牛肉嫩度和保水性的变化及机理[J]. *食品科学*, 2018, 39(1): 84–90.
Sun HX, Huang F, Ding ZJ, *et al.* Changes in tenderness and water-holding capacity and underlying mechanism during beef stewing [J]. *Food Sci*, 2018, 39(1): 84–90.
- [15] Crobotova J, Mozuraityte R, Standal IB, *et al.* A non-invasive approach to assess texture changes in sous-vide cooked Atlantic mackerel during chilled storage by fluorescence imaging [J]. *Food Control*, 2018, 92: 216–224.
- [16] Zielbauer BI, Franz J, Viezens B, *et al.* Physical aspects of meat cooking: time dependent thermal protein denaturation and water loss [J]. *Food Biophysics*, 2016, 11(1): 34–42.
- [17] Ofstad R, Kidman S, Myklebust R, *et al.* Liquid holding capacity and structural changes during heating of fish muscle: Cod (*Gadus morhua* L.) and salmon (*Salmo salar*) [J]. *Food Struct*, 1993, 12: 163–174.
- [18] Kristensen L, Purslow PP. The effect of ageing on the water-holding capacity of pork: Role of cytoskeletal proteins [J]. *Meat Sci*, 2001, 58: 17–23.
- [19] Zeng Z, Li C, Ertbjerg P. Relationship between proteolysis and water-holding of myofibrils [J]. *Meat Sci*, 2017, 131: 48–55.
- [20] 王君翠. 微波和水浴低温加热对牛肉品质的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
Wang JC. Study on the influence of low-temperature-heating methods by microwave and water-bath on beef properties [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [21] 李晓龙. 热诱导日本对虾(*Marsupenaeus japonicus*)虾肉蛋白质变性规律研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.
LI XL. Study of kuruma prawn (*Marsupenaeus japonicus*) protein denaturation induced by heat treatment [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean university, 2015.
- [22] 李敬, 韩冬娇, 刘红英. 不同加工方式对鱼肉组织质地影响的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(10): 3964–3969.
- Li J, Han DJ, Liu HY. Research progress of effects of different processing methods on texture of fish meat [J]. *J Food Saf Qual*, 2015, 6(10): 3964–3969.
- [23] 胡亚芹, 葛雨璐, 白妍, 等. 热处理对肉类蛋白质构的影响[J]. *渔业科学进展*, 2019, 40(5): 175–184.
Hu YQ, Ge YJ, Bai Y, *et al.* Effect of heat treatments on the protein structures and meat textural properties [J]. *Progress Fish Sci*, 2019, 40(5): 175–184.
- [24] Botinestean C, Keenan DF, Kerry JP, *et al.* The effect of thermal treatments including sous-vide, blast freezing and their combinations on beef tenderness of *M. semitendinosus* steaks targeted at elderly consumers [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2016, 74: 154–159.
- [25] Christensen P, Ertbjerg MD, Aaslyng M, *et al.* Effect of prolonged heat treatment from 48 °C to 63 °C on toughness, cooking loss and color of pork [J]. *Meat Sci*, 2011, 88: 280–285.
- [26] Dinardo M, Buck EM, Clydesdale FM. Effect of extended cook times on certain physical and chemical characteristics of beef prepared in a waterbath [J]. *J Food Sci*, 1984, 49: 844–848.
- [27] Hughes JM, Oiseth SK, Purslow PP, *et al.* A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness [J]. *Meat Sci*, 2014, 98: 520–532.
- [28] Christensen M, Purslow PP, Larsen LM. The effect of cooking temperature on mechanical properties of whole meat, single muscle fibres and perimysial connective tissue [J]. *Meat Sci*, 2000, 55: 301–307.
- [29] Sanchez PJ, Gazquez A, Ruiz-Carrascal J. Physico-chemical, textural and structural characteristics of sous-vide cooked pork cheeks as affected by vacuum, cooking temperature, and cooking time [J]. *Meat Sci*, 2012, 90: 828–835.
- [30] 梁荣蓉, 张一敏, 毛衍伟, 等. 熟制牛肉肉色问题和影响因素研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(15): 285–292.
Liang RR, Zhang YM, Mao YW, *et al.* Color problems in cooked beef and influencing factors: A review [J]. *Food Sci*, 2019, 40(15): 285–292.
- [31] Bojarska U, Batura J, Cierach M. The effect of measurement site on the evaluation of tom breast muscle color [J]. *Polish J Food Nutr Sci*, 2003, 53: 45–49.
- [32] Vaudagna SR, Pazos AA, Guidi SM, *et al.* Effect of salt addition on sous vide cooked whole beef muscles from Argentina [J]. *Meat Sci*, 2008, 79: 470–482.
- [33] Killinger KM, Hunt MC, Campbell RE, *et al.* Factors affecting premature browning during cooking of store purchased ground beef [J]. *J Food Sci*, 2000, 65(4): 585–588
- [34] Brewer MS, Novakofski J. Cooking rate, pH and final endpoint temperature effects on color and cook loss of a lean ground beef model system [J]. *Meat Sci*, 1999, 52(4): 443–451.
- [35] Do minguez R, Gomez M, Fonseca S, *et al.* Influence of thermal treatment on formation of volatile compounds, cooking loss and lipid oxidation in foal meat [J]. *Lwt-Food Sci Technol*, 2014, 58(2), 439–445.
- [36] Giri A, Osako K, Ohshima T. Identification and characterisation of headspace volatiles of fish miso, a Japanese fish meat based fermented paste, with special emphasis on effect of fish species and meat washing [J]. *Food Chem*, 2010, 120(2): 621–631.
- [37] Roldan M, Ruiz J, Del Pulgar, *et al.* Volatile compound profile of sous-vide cooked lamb loins at different temperature-time combinations

- [J]. *Meat Sci*, 2015, 100: 52–57.
- [38] Zhang YQ, Ma XT, Dai ZY. Comparison of nonvolatile and volatile compounds in raw, cooked, and canned yellowfin tuna (*Thunnus albacores*) [J]. *J Food Process Preserv*, 2019, 43(10): 141–148.
- [39] Aaslyng MD, Meinert L. Meat flavour in pork and beef—from animal to meal [J]. *Meat Sci*, 2017, 132: 112–117.
- [40] Roldan M, Ruiz J, Pulgar, *et al.* Volatile compound profile of sous-vide cooked lamb loins at different temperature–time combinations [J]. *Meat Sci*, 2015, 100: 52–57.
- [41] Pegg RB, Shahidi F, Dikeman M, *et al.* Cooking of meat flavor development. *Encyclopedia of meat sciences second edition* [J]. Acad Press Oxford, 2014, 377–384.
- [42] Oz F, Kızıl M. Determination of heterocyclic amines in cooked commercial frozen meat products by ultra fast liquid chromatography [J]. *Food Anal Method*, 2013, 6: 1370–1378.
- [43] 徐琦. 水产品加热过程中 12 种杂环胺类化合物的变化规律研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Xu Q. Research of the change discipline of 12 heterocyclic aromatic amines in aquatic processing products [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [44] Oz F, Kaya M. Heterocyclic aromatic amines in meat [J]. *J Food Process Preserv*, 2011, 35: 739–753.
- [45] Oz F, Zikirov E. The effects of sous-vide cooking method on the formation of heterocyclic aromatic amines in beef chops [J]. *LWT—Food Sci Technol*, 2015, 64(1): 120–125
- [46] Oz F, Seyyari E. Formation of heterocyclic aromatic amines and migration level of bisphenol-a in sous-vide-cooked trout fillets at different cooking temperatures and cooking levels [J]. *J Agric Food Chem*, 2016, 64(15): 3070–3082.
- [47] Sila DN, Doungra E, Smout C, *et al.* Pectin fractions inter-conversions: Insight into understanding texture evolution of thermally processed carrot [J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54: 8471–8479.
- [48] Chiavaro E, Mazzeo T, Visconti A, *et al.* Nutritional quality of sous vide cooked carrots and Brussels Sprouts [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60: 6019–6025.
- [49] Guillen S, Mir BJ, Oria R, *et al.* Influence of cooking conditions on organoleptic and health-related properties of artichokes, green beans, broccoli and carrots [J]. *Food Chem*, 2017, 217: 209–216.
- [50] Lafarga T, Vinas I, Bobo G, *et al.* Effect of steaming and sous vide processing on the total phenolic content, vitamin C and antioxidant potential of the genus *Brassica* [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2018, 47: 412–42.
- [51] Jia L, Wen CR, Wang M, *et al.* Enhancing the hardness of potato slices after boiling by combined treatment with lactic acid and calcium chloride: Mechanism and optimization [J]. *Food Chem*, 2020, 308: 124832
- [52] Nidhina N, Muthukumar SP. Antinutritional factors and functionality of protein-rich fractions of industrial guar meal as affected by heat processing [J]. *Food Chem*, 2015, 173: 920–926.
- [53] Carvalho JO, Franca O, Jose F. Heat stability and effect of pH on enzyme activity of polyphenol oxidase in buriti (*Mauritia flexuosa* Linnaeus f.) fruit extract [J]. *Food Chem*, 2017, 233: 159–163.

(责任编辑: 王欣)

作者简介



陈美玉, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品加工。

E-mail: my_chen@zju.edu.cn



胡亚芹, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。

E-mail: yqhu@zju.edu.cn