



真空低温蒸煮技术在动物源性食品中的应用进展

张凯华, 臧明伍*, 李 丹, 张哲奇, 李笑曼, 陈文华
(中国肉类食品综合研究中心, 北京食品科学研究院, 北京 100068)

摘要: 真空低温蒸煮技术在保持产品风味、质构、营养品质, 延长产品保质期方面优势突出, 在欧美国家掀起应用热潮, 我国在相关领域开展研究较少。本文综述了真空低温蒸煮技术的起源, 及其在动物源性食品品质、微生物安全性和保质期以及营养健康等方面的应用研究进展, 以期为中华传统食品 and 中式菜肴工业化、标准化加工提供新的技术思路。

关键词: 真空低温蒸煮技术; 动物源性食品; 进展; 中华传统食品

A Review of Recent Advances in the Application of Sous Vide Cooking Technique in Animal-Derived Food Processing

ZHANG Kaihua, ZANG Mingwu*, LI Dan, ZHANG Zheqi, LI Xiaoman, CHEN Wenhua
(China Meat Research Center, Beijing Academy of Food Sciences, Beijing 100068, China)

Abstract: Sous vide cooking has outstanding advantages in maintaining the flavor, texture, nutritional quality and extending the shelf life of foods. There has been an upsurge in the application of sous vide cooking in European and American countries, but few research efforts in this field have been reported in China. This paper reviews the origin of sous-vide cooking, and summarizes the recent progress in sous-vide cooking for improving the quality, microbial safety, shelf life, and nutritional and health benefits of animal-derived foods, aiming to provide new ideas for the industrialization and standardization of Chinese traditional meat products and Chinese meat dishes.

Key words: sous vide cooking; animal-derived food; progress; Chinese traditional meat products

DOI:10.15922/j.cnki.rlyj.2016.12.007

中图分类号: TS251.51

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2016) 12-0035-06

引文格式:

张凯华, 臧明伍, 李丹, 等. 真空低温蒸煮技术在动物源性食品中的应用进展[J]. 肉类研究, 2016, 30(12): 35-40.

DOI:10.15922/j.cnki.rlyj.2016.12.007. <http://rlyj.cbpt.cnki.net>

ZHANG Kaihua, ZANG Mingwu, LI Dan, et al. A review of recent advances in the application of sous vide cooking technique in animal-derived food processing[J]. Meat Research, 2016, 30(12): 35-40. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.15922/j.cnki.rlyj.2016.12.007. <http://rlyj.cbpt.cnki.net>

动物源性食品是指全部可食用的动物组织以及蛋和乳, 包括畜禽肉及其制品、水产品及其制品等。动物源性食品是消费者摄取优质蛋白质的重要来源。高温蒸煮、高温炖煮、油炸、烘烤等传统加工方式不仅带来动物源性食品食用品质的下降和营养成分的损失, 还可能产生杂环胺、苯并芘等有毒有害物质。真空低温蒸煮技术能够较好地保留动物源性食品的品质和营养、降低加工中有害物的产生。本文概述了真空低温蒸煮技术的起源, 及其在动物源性食品品质、微生物安全性和保质期以及营养健康性等方面的研究进展, 以期为我国传统食品 and 中式菜肴工业化提供新的技术思路。

收稿日期: 2016-06-27

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFD0400403)

作者简介: 张凯华 (1990—), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为食品科学和食品安全。E-mail: zhkh.happy@163.com

*通信作者: 臧明伍 (1981—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为肉品科学与食品安全。E-mail: cmrcfood@126.com

1 真空低温蒸煮技术概述

真空低温蒸煮 (sous-vide cooking, SVC) 技术, 指食物原材料或原材料与媒介食品在热稳定真空装置中以可控温度和时间进行蒸煮加热的过程^[1]。SVC技术最早起源于法国, 用于减少鹅肝烹制过程中的水分损失和收缩率。

区别于先熟制再包装灭菌的传统加工工艺, SVC技术加工食品的一般流程为: 原辅料预处理→定量真空包装→加热蒸煮熟制→冰浴冷却至10℃以下→低温贮存。SVC具有低温长时间 (low temperature long time, LT-LT)



的特点^[2], 温度一般在50~90℃之间, 时间在几分钟到数小时不等。SVC技术具有如下优点: 真空包装避免了食品加工中的再污染, 降低食品中好氧微生物的生长, 消除因氧化产生的异味和加工过程中挥发性风味成分、水分和营养物质的流失^[3]; 温度和时间精准控制使SVC加工的食品具有完美的复制性^[4-5]。

尽管SVC技术早在上世纪70年代被部分国家顶级餐厅的厨师所应用, 但直到2000年以后该技术才真正被大家所熟知, 并开始在研究院校、餐厅和家庭中掀起研究和应用热潮。10余年来, 不少研究学者从微生物安全性、食品品质和营养健康等方向, 探究SVC技术在鸡肉^[6]、调味牛肉^[7]、鲭鱼^[8]、鲑鱼^[9]、鱼糕^[10]、青豆^[11]、紫甘蓝^[12]、胡萝卜^[13-14]、菊苣^[15]、果泥^[16]等动物源性和植物源性食品加工中应用的可能性。美国Nomiku公司还开发出可用于餐厅或家庭烹制食物的SVC装置, 该装置基于无线保真(wireless fidelity, Wi-Fi)功能实现食物蒸煮的远程控制, 降低操作者被蒸汽烫伤的风险^[17]。

SVC技术在我国仍处于起步阶段。2002年, SVC概念首次在我国提出^[18]。尽管当时已经有企业引进SVC产品生产线, 但该技术在我国并未兴盛起来。2010年前后, 我国学者开始关注SVC技术, 综述SVC技术的技术要点及特点^[19-21], 应用研究以水产品为主。

2 SVC技术在动物源性食品加工中的应用

2.1 SVC技术参数对动物源性食品品质的影响

蒸煮温度和时间是应用SVC技术加工动物源性食品的2个重要因素^[22]。不同种类动物源性食品运用SVC技术时, 需要不同的蒸煮温度-时间组合。对于水产品而言, 70℃蒸煮60 min可以得到硬度适中、口感脆滑、有一定弹性和咀嚼性的SVC海参^[23]; 扇贝丁则需65℃蒸煮20 min来获得较佳口感、饱满外观以及较高含量的牛磺酸、胶原蛋白, 温度过低, 扇贝丁海腥味较大, 蒸煮温度过高、时间过长, 扇贝丁口感变差, 外观因失水而出现褶皱^[24]。90℃蒸煮15 min会使SVC鲑鱼片因蛋白质凝聚导致肉色变差和蛋白质沉淀^[25]。与水产品不同, 畜禽肉采用SVC技术需要相对较高的温度和更长的蒸煮时间。以蒜泥白肉为例, 82.2℃(或85.2℃)蒸煮10 h可获得嫩度、香味、色泽和刀工成型较好的肉方(7 cm×7 cm×4.5 cm)^[26]。

不同温度与时间的组合影响SVC产品的质构、色泽、风味、滋味等品质特性。对羔羊肉而言, 在70℃和80℃产生的蒸煮损失高于60℃, 60℃蒸煮较70℃和80℃有更高的亮度值(L^*)和红度值(a^*), 升温、延长蒸煮时间增加羊肉的黄度值(b^*), 不同温度-时间组合下羊肉结缔组织均产生一定程度的颗粒化, 70℃

蒸煮6 h呈现明显的凝胶化^[27]。Li等^[28]研究发现牛肉在70~90℃加热时, 肌束膜和肌内膜结缔组织发生颗粒化而无凝胶化, 可能与加热时间较短(低于30 min)有关。温度对SVC猪肉产品色泽、质构影响显著, L^* 、 a^* 、 b^* 、硬度、弹性、咀嚼性均随温度升高而降低, 温度-时间的交互作用对脂质氧化影响显著($P<0.01$), 60℃蒸煮12 h样品其硫代巴比妥酸值(2-thiobarbituric acid reactive substances, TBARs)高于在80℃蒸煮12 h^[29]。

肉风味物质的形成来源于脂质的氧化降解以及还原糖和氨基酸发生美拉德反应。较高温度长时间蒸煮有利于肉香味和烧烤味的形成。60℃加热6 h、60℃加热24 h以及80℃加热6 h羊肉挥发性风味物质以脂质氧化产物(醛类、酮类和醇类)为主, 80℃加热24 h以氨基酸Strecker降解为主^[30]。del Pulgar等^[31]以己醛与3-甲基丁醛含量比值来评价脂质氧化与美拉德反应在猪肉风味物质形成中的作用, 真空包装对该比值影响显著($P<0.05$), 60℃加热5 h、充气包装组比值最高, 且显著高于真空包装组, 可见真空包装对因脂质氧化降解产生的挥发性风味物质有一定的抑制。电子鼻是开展风味研究的重要技术手段, 运用偏最小二乘法对SVC牛肉电子鼻数据分析发现, 乳清浓缩蛋白(whey protein concentrate, WPC)的浓度与SVC牛肉风味具有相关性, 相关系数为-0.967, 而氯化钠对风味影响不显著^[32]。添加风味前体物质(如葡萄糖、核糖、半胱氨酸和硫胺素)显著提升SVC羔羊肉的韧性、咀嚼性和风味得分^[33]。滋味来源于肉中游离氨基酸和小分子肽含量的提升, 肌苷酸分解产生的谷氨酸是重要的呈味物质。温度和时间影响呈鲜物质肌苷酸(inosine monophosphate, IMP)的热分解, 牛肉中IMP含量在60℃以下随蒸煮时间延长而减少, 温度超过60℃后, IMP分解酶受热失活导致IMP含量变化不明显, 结合热动力学方程推测40℃时IMP分解酶活力最高^[34]。SVC技术可用于肌肉预处理以提升肌肉组织嫩度。牛肉56℃预煮24 h可降低牛肉剪切力、提升牛肉嫩度, 避免菠萝蛋白酶嫩化带来的肉质糊状、肉质干等问题^[35]。将鸡翅与调味汁一同装入真空袋抽真空腌制3 h后烤制, 烤翅的嫩度、入味效果要好于传统腌制24 h^[26]。

SVC技术将动物源性食品原辅料真空包装后进行热处理, 蒸煮产生的水分留存在包装袋内, 过多的汁液在一定程度上影响产品品质。添加氯化钠、碱式磷酸盐、大豆蛋白、乳清蛋白等物质可以增加产品持水力、减少汁液产生。注射三聚磷酸盐(sodium tripolyphosphate, STPP)和焦磷酸盐(tetrasodium pyrophosphate, TSPP)的混合溶液能增加SVC羊肉分割肉的硬度、剪切力和多汁性^[36]。但盐类的添加可能引起肉制品变色和酸败, 还可能引起高血压等症状, 磷酸盐过量摄入还会导致机体



钙、镁失衡,增加患骨病和肾病的风险^[37]。因此,不少人开始尝试以蛋白质来部分替代盐类。Szerman等^[38]研究发现,注射3.5% WPC+0.7%氯化钠溶液能够降低SVC牛肉的蒸煮损失和剪切力,注射前滚揉不影响产品品质,注射后滚揉10 h增加羊肉的剪切力和色泽均一度,但产品失重明显。随后,又借助响应面实验设计得到SVC羊肉最佳蒸煮温度为70℃,WPC和氯化钠添加量分别为2.6%和1.9%^[39]。但WPC在增加产品出品率、改善感官特性方面不如STPP+氯化钠效果明显,1.88% WPC+1.25%氯化钠、1.88%变性乳清浓缩蛋白+1.25%氯化钠在改善SVC牛肉理化和感官特性方面具有相似性,且优于1.25%氯化钠^[40]。因此,寻找替代或部分替代STPP的蛋白质、多糖等天然产物仍将是研究热点。

2.2 SVC产品微生物安全性与保质期

SVC技术凭借较为温和的热处理和真空包装实现产品风味、质构和营养的高品质,但温热处理对微生物,尤其是芽孢抑制作用较弱,因此,在保证产品品质的基础上,最大程度延长产品保质期、提高微生物安全性是SVC食品研究的重点。

影响SVC食品微生物安全性的3个关键因素是热处理的程度、冷却速率及冷却后的温度、冷藏温度与时间^[41]。快速降温可以抑制芽孢的萌发,煮制的碎牛肉在21 h内从54.4℃降至7℃,蜡状芽孢杆菌和肉毒梭状芽孢杆菌的芽孢没有萌发^[42],因此,为保证SVC产品的安全性,SVC产品蒸煮后普遍采用冰浴使产品温度骤降至10℃以下。也有研究表明,90℃加热至少10 min能够杀死非蛋白降解、嗜冷性肉毒梭状芽孢杆菌,其他梭状芽孢杆菌可以存活,但在10℃以下不生长。Nissen等^[43]研究了2 168种SVC食品的微生物安全性,结果表明,所有SVC食品中致病微生物存活和生长繁殖的概率非常低,蜡状芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌能够产生致人腹泻、催吐的毒素,但引起食物中毒的数量级需达到10⁵ CFU/g。加热温度和时间、冷藏温度和时间成为研究SVC产品保质期的重要因素。不同加热温度与时间的组合及贮藏温度对微生物生长繁殖影响较大。SVC产品中嗜温菌和嗜冷菌数量随加热温度和时间延长而降低,冷藏环境(0~4℃)下金黄色葡萄球菌、蜡样芽孢杆菌、梭状产气荚膜杆菌和单增李斯特菌不生长,且嗜温菌和嗜冷菌生长较缓慢。90℃蒸煮15 min得到的SVC鲑鱼在2℃环境中贮存时,保质期为45 d,而65℃蒸煮5 min,其保质期仅为21 d^[9]。鳟鱼90℃蒸煮3.3 min,其保质期与90℃蒸煮15 min的鲑鱼保质期相同^[8]。也有研究发现,70℃蒸煮10 min得到的SVC鳕鱼在4℃贮藏条件下保质期为28 d,12℃则为15 d^[44]。SVC鱼糕在3℃贮藏条件下,其保质期可达16周,远高于热封包装和真空包装的2周和热封煮制的4周^[10]。SVC畜禽肉产品保质期要短于鱼肉,可能与

鱼肉组织结构松散、蒸煮过程中杀菌更为彻底有关。调味牛肉是韩国知名配菜,传统制作工艺复杂,产品保质期短。Jang等^[7]保留传统加工工艺核心环节,将预煮的牛肉切片,配以葱、姜、蒜和卤汁,真空包装后在90℃蒸煮10 min,得到的SVC调味牛肉在3℃和10℃贮藏条件下保质期在12 d左右。

传统SVC技术加工食品时,一般不添加防腐剂,保质期较短。考虑到SVC产品的商品化,添加一定量具有防腐效果的物质能使产品在低温或常温下更长时间内保障食用的安全性。醋和清酒的添加能够抑制调味牛肉中微生物的生长,但影响产品的滋味和整体接受度^[45],柠檬汁则可以使SVC鳕鱼保质期延长2周^[46]。乳酸钠和乳酸链球菌素能够抑制SVC产品中产气荚膜梭菌和蜡状芽孢杆菌的生长繁殖。Juneja^[6]研究发现,添加3.0 g/100 mL和4.8 g/100 mL的乳酸钠可以使SVC鸡肉产品在19℃放置648 h内未产生产气荚膜梭菌,对照组在288 h则产生产气荚膜梭菌。Paik等^[47]研究乳酸链球菌素对SVC调味牛肉贮藏过程中微生物变化的影响,发现4℃贮藏条件下,是否添加乳酸链球菌素对嗜温菌、嗜冷菌、厌氧微生物以及蜡状芽孢杆菌数量变化影响不明显,均低于10² CFU/g,而25℃贮藏条件下,添加100 IU/g和500 IU/g乳酸链球菌素能够抑制SVC调味牛肉中嗜温菌、嗜冷菌、厌氧微生物以及蜡状芽孢杆菌的生长,即使产品中接种了蜡状芽孢杆菌(10³ CFU/g),60 d内其数量仍低于10 CFU/g。

此外,也有学者探索超高压和辐照等冷杀菌技术对SVC产品保质期和微生物生长繁殖的影响。SVC鲑鱼蒸煮温度不超过40℃口感更为鲜嫩,但该温度抑制或杀死微生物的效果不明显。为此,Picouet等^[48]研究210、310、400 MPa条件下处理5 min对40℃蒸煮的SVC鲑鱼微生物及品质的影响,发现310 MPa及以上的超高压处理能够明显降低鲑鱼中微生物数量,并保持较好的质构和色泽,延长产品货架期至6 d,但仅400 MPa处理能显著抑制肠杆菌生长。但是,也有研究表明,不同高压处理对SVC即食鲷鱼微生物生长繁殖抑制效果不显著,但提高了其硬度^[49]。4~5 kGy的辐照强度可以使SVC熏猪肉具有较高的感官接受度和微生物安全性,但猪肉中VB₁损失较大^[50]。可见,寻找较好的冷杀菌技术仍是提升SVC产品品质的重要方向。

2.3 SVC技术对动物源性食品营养健康的影响

动物源性食品富含蛋白质、脂质、维生素、矿物质等,SVC技术在真空包装条件下对畜禽肉、水产品进行煮制,一定程度上降低营养物质的流失。研究表明,牛羊肉中水溶性维生素的保留率高于鲑鱼和鳕鱼等水产品^[51],还能最大程度保留鹅肝中的蛋白质^[52]。

畜禽原料肉不同加工方式引起脂肪氧化的程度、氧化产物与蛋白质的结合情况有所不同,探究SVC产品

在不同温度和时间组合下的脂质氧化和蛋白质氧化情况对保障肉品营养和健康具有指导意义。TBARs、己醛等挥发性醛是评价脂质氧化程度的指标。蛋白羰基化合物含量是蛋白质氧化的产物，其在红肉消化过程中产生的氧化应激和炎症应激对机体具有一定的患病风险^[53]。2-硝基苯胍是公认的评价蛋白质氧化的指标， α -氨基己二酸半醛（ α -amino adipic semialdehyde, AAS）和 γ -谷氨酸半醛（ γ -glutamic semialdehyde, GGS）也可用来评价蛋白质氧化程度^[54]。升温、延长时间能够增加SVC羔羊腰肌肉中共轭二烯的含量、降低TBARs值和己醛含量，2-硝基苯胍含量随加热时间延长而增加，但AAS和GGS含量变化无规律^[55]。Nuora等^[56]对比了传统煎炸牛肉和SVC牛肉食用后，志愿者餐后血浆中白细胞介素6（interleukin-6, IL-6）、C-反应蛋白（C-creative protein, CRP）、肿瘤坏死因子- α （tumor necrosis factors- α , TNF- α ）、单核细胞趋化蛋白-1（monocyte chemotactic protein 1, MCP-1）等炎症响应情况。结果表明，SVC牛肉食用0~120 min后，志愿者血浆中IL-6和CRP含量变化不明显，而煎炸牛肉机体消化后血浆中TNF- α 和MCP-1含量明显高于SVC牛肉。可见SVC处理在降低红肉摄入的患病风险方面存在一定优势。

杂环胺（heterocyclic aromatic amines, HCAs）是一类具有致癌、致突变的加工有害物，蛋白质含量丰富的动物源性食品在高温加工过程中极易产生。常见的HCAs类物质主要有2-氨基-3-甲基咪唑并[4,5-*f*]喹啉（2-amino-3-methylimidazo[4,5-*f*]quinoline, IQ）、2-氨基-3-甲基咪唑并[4,5-*f*]喹啉（2-amino-3-methylimidazo[4,5-*f*]quinoxaline, IQx）、2-氨基-1-甲基-6-苯基咪唑并[4,5-*b*]吡啶（2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-*b*]pyridine, PhIP）、2-氨基-3,4,8-三甲基咪唑并[4,5-*f*]喹啉（2-amino-3,4,8-trimethylimidazo[4,5-*f*]quinoxaline, 4,8-DiMeIQx）、2-氨基-9H-吡啶并[2,3-*b*]咪唑（2-amino- α -carboline, A α C）等^[57]。长时间高温处理促进HCAs的产生，为减少HCAs的产生，建议烧烤牛肉内部温度应低于65℃^[58]，烧烤猪肉内部温度应低于70℃^[59]。SVC技术在降低杂环胺方面也有一定优势。牛排75℃油煎10 min产生的杂环胺含量在（0.252~0.940 ng/g）显著高于SVC处理组和普通蒸煮组（0.032~0.123 ng/g），SVC样品中HCAs以4,8-DiMeIQx为主，烧烤组以IQx、PhIP和A α C为主^[60]。

3 结 语

从“十二五”国家科技支撑计划项目“中式菜肴与预制调理食品工业化关键技术与产业化”、“十三五”重点研发计划“现代食品加工及粮食收储运技术与装

备”之“中华传统工业化食品加工关键技术研究与装备开发”的设立均印证了中华传统食品和菜肴的工业化、标准化加工的发展趋势和产业需求。

SVC技术精准的温度-时间控制、产品的可复制性都为中华传统食品和中式菜肴加工工艺参数的量化、质量标准体系的建设提供了绝佳的发展思路，在食品营养保持和加工有害物控制方面也具有明显的优势。但不可否认，其较长的蒸煮时间延长了产品生产时限，在节能降耗方面还有待改进。因此，寻找适合应用SVC技术的动物源性食品种类、对SVC技术进行转化应用及适应性改造将成为推动中华传统食品和中式菜肴不断走出家庭作坊，实现工业化加工、商品化行销的重要技术手段。

参考文献：

- [1] SCHELLEKENS M. New research issues in sous-vide cooking[J]. Trends in Food Science and Technology, 1996, 7(8): 256-262. DOI:10.1016/0924-2244(96)10027-3.
- [2] RUIZ J, CALVARRO J, del PULGAR J S, et al. Science and technology for new culinary techniques[J]. Journal of Culinary Science and Technology, 2013, 11: 66-79. DOI:10.1080/15428052.2013.755422.
- [3] BALDWIN D E. Sous vide cooking: a review[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2012, 1(1): 15-30. DOI:10.1016/j.ijgfs.2011.11.002.
- [4] BALDWIN D E. Sous vide for the home cook[M]. New York: Paradox Press, 2010.
- [5] MYHRVOLD N, YOUNG C, BILET M. Modernist cuisine: the art and science of cooking[M]. Washington: The Cooking Lab, 2011.
- [6] JUNEJA V J. Delayed *Clostridium perfringens* growth from a spore inocula by sodium lactate in sous-vide chicken products[J]. Food Microbiology, 2006, 23(2): 105-111. DOI:10.1016/j.fm.2005.03.002.
- [7] JANG J D, LEE D S. Development of a sous-vide packaging process for Korean seasoned beef[J]. Food Control, 2005, 16(3): 285-291. DOI:10.1016/j.foodcont.2004.03.008.
- [8] GONZÁLEZ-FANDOS E, GARCÍA-LINARES M C, 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 Microbiology, 2004, 21(2): 193-201. DOI:10.1016/S0740-0020(03)00053-4.
- [9] GONZÁLEZ-FANDOS E, VILLARINO-RODRÍGUEZ A, GARCÍA-LINARES M C, et al. Microbiological safety and sensory characteristic of salmon slices processed by the sous vide method[J]. Food Control, 2005, 16(1): 77-85. DOI:10.1016/j.foodcont.2003.11.011.
- [10] SHAKILA R J, JEYASEKARAN G, VIJAYAKUMAR A, et al. Microbiological quality of sous-vide cook chill fish cakes during chilled storage (3℃)[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2009, 44(11): 2120-2126. DOI:10.1111/j.1365-2621.2009.02047.x.
- [11] IBORRA-BERNAD C, PHILIPPON D, GARCIA-SEGOVIA P, et al. Optimizing the texture and color of sous-vide and cook-vide green bean pods[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(2): 507-513. DOI:10.1016/j.lwt.2012.12.001.
- [12] IBORRA-BERNAD C, TARREGA A, GARCIA-SEGOVIA P, et al. Advantages of sous-vide cooked red cabbage: structural, nutritional and sensory aspects[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 56(2): 451-460. DOI:10.1016/j.lwt.2013.12.027.



- [13] TREJO ARAYA X I, SMALE N, ZABARAS D, et al. Sensory perception and quality attribute of high pressure processed carrots in comparison to raw, sous-vide and cooked carrot[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 10(4): 420-433. DOI:10.1016/j.ifset.2009.04.002.
- [14] HONG Y K, UHM J T, YOON W B. Using numerical analysis to develop and evaluate the method of high temperature sous-vide to soften carrot texture in different-sized packages[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(4): 546-561. DOI:10.1111/1750-3841.12427.
- [15] RENNA M, GONNELLA M, GIANNINO D, et al. Quality evaluation of cook-chilled chicory stems (*Cichoriu mintybus* L., Catalogna group) by conventional and sous vide cooking methods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(4): 656-665. DOI:10.1002/jsfa.6302.
- [16] KEENAN D F, BRUNTON N P, GORMLEY R, et al. Fundamental rheology and quality characteristics of sous-vide processed apple purees containing apple or blackcurrant pomace inclusions[J]. Journal of Food Quality, 2012, 35(2): 93-107. DOI:10.1111/j.1745-4557.2011.00431.x.
- [17] 中国经济信息. 酷科技[J]. 中国经济信息, 2014(17): 14. DOI:10.3969/j.issn.1003-5974.2014.17.008.
- [18] 王彩理, 腾瑜, 朱伯清. Sous-Vide概况及其展望[J]. 海洋水产研究, 2002, 23(3): 79-82. DOI:10.3969/j.issn.1000-7075.2002.03.016.
- [19] 陈龙, 乔兴. 真空恒温烹饪技术原理及应用[J]. 扬州大学烹饪学报, 2012, 29(2): 43-46. DOI:10.3969/j.issn.1009-4717.2012.02.010.
- [20] 卜俊芝, 徐迅. 法式真空低温烹调方法研究现状[J]. 美食研究, 2014, 31(2): 48-52. DOI:10.3969/j.issn.1009-4717.2014.04.011.
- [21] 卜俊芝, 徐迅, 王琪. 温度和时间对真空低温烹调产品品质影响的研究现状[J]. 食品工业, 2015, 36(5): 251-255.
- [22] THOMAS K. Under pressure: cooking sous-vide[M]. Muskogee: Artisan Publishers, 2007: 28-29.
- [23] 姚红红. 烹饪方式对海参品质特性影响的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2013.
- [24] 李运东. 低温真空烹饪对扇贝丁营养物质及口感影响的研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2013.
- [25] GONZÁLEZ-FANDOS E, VILLARINO-RODRÍGUEZ A, GARCÍA-LINARES M C, et al. Microbiological safety and sensory characteristic of salmon slices processed by the sous vide method[J]. Food Control, 2005, 16(1): 77-85. DOI:10.1016/j.foodcont.2003.11.011.
- [26] 乔兴, 陈龙. 真空恒温烹饪技术对肉类风味口感改善的研究[J]. 中国调味品, 2015, 40(12): 18-22. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2015.12.005.
- [27] ROLDÁN M, ANTEQUERA T, MARTÍN A, et al. Effect of different temperature-time combinations on physicochemical, microbiological, textural and structural features of sous-vide cooked lamb loins[J]. Meat Science, 2013, 93(3): 572-578. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.11.014.
- [28] LI C B, ZHOU G H, XU X L. Dynamical changes of beef intramuscular connective tissue and muscle fiber during heating and their effects on beef shear force[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3(4): 521-527. DOI:10.1007/s11947-008-0117-3.
- [29] del PULGAR J S, GÁZQUEZ 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 Science, 2012, 90(3): 828-835. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.11.024.
- [30] ROLDÁN M, RUIZ J, del PULGAR J S, et al. Volatile compound profile of sous-vide cooked lamb loins at different temperature-time combinations[J]. Meat Science, 2015, 100: 52-57. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.09.010.
- [31] del PULGAR J S, ROLDAN M, RUIZ-CARRASCAL J. Volatile compounds profile of sous-vide cooked pork cheeks as affected by cooking conditions (vacuum packaging, temperature and time)[J]. Molecules, 2013, 18: 12538-12547. DOI:10.3390/molecules181012538.
- [32] GRIGIONI G, LANGMAN L, SZERMAN N, et al. Effect of whey protein concentrate and sodium chloride concentrations on the odour profile of sous vide cooked whole-muscle beef from Argentina[J]. Meat Science, 2008, 79(3): 568-575. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.12.012.
- [33] ROLDAN M, LOEBNER J, DEGEN J, et al. Advanced glycation end products, physico-chemical and sensory characteristics of cooked lamb loins affected by cooking method and addition of flavor precursors[J]. Food Chemistry, 2015, 168: 487-495. DOI:10.1016/j.foodchem.214.07.100.
- [34] ISHIWATARI N, FUKUOKA M, HAMADA-SATO N, et al. Decomposition kinetics of umami component during meat cooking[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119: 324-331. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2013.05.040.
- [35] SURIAATMAJA D, LANIER T. Mechanism of meat tenderization by sous vide cooking[J]. Meat Science, 2014, 96(1): 457. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.07.073.
- [36] ROLDÁN M, ANTEQUERA T, PÉREZ-PALACIOS T, et al. Effect of added phosphate and type of cooking method on physico-chemical and sensory features of cooked lamb loins[J]. Meat Science, 2014, 97(1): 69-75. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.01.012.
- [37] RITZ E, HAHN K, KETTELER M, et al. Phosphate additives in food: a health risk[J]. Deutsches Arzteblatt International, 2012, 109(4): 49-55. DOI:10.3238/arztebl.2012.0049.
- [38] SZERMAN N, GONZALEZ C B, SANCHO A M, et al. Effect of whey protein concentrate and sodium chloride addition plus tumbling procedures on technological parameters, physical properties and visual appearance of sous vide cooked beef[J]. Meat Science, 2007, 76(3): 463-473. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.01.001.
- [39] SZERMAN N, GONZALEZ C B, SANCHO A M, et al. Optimization of whey protein concentrate and sodium chloride concentrations and cooking temperature of sous vide cooked whole-muscle beef from Argentina[J]. Meat Science, 2008, 79(3): 557-567. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.10.006.
- [40] SZERMAN N, GONZALEZ C B, SANCHO A M, et al. Effect of the addition of conventional additives and whey proteins concentrates on technological parameters, physicochemical properties, microstructure and sensory attributes of sous vide cooked beef muscles[J]. Meat Science, 2012, 90(3): 701-710. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.08.013.
- [41] SVCAC. Code of practice for sous vide catering system[S]. Tetbury: Sous Vide Advisory Committee(SVCAC), 1991.
- [42] JUNEJA V K, SNYDER O P, MARMER B S. Potential growth from spores of *Bacillus cereus* and *Clostridium botulinum* and vegetative cells of *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, and *Salmonella* serotypes in cooked ground beef during cooling[J]. Journal of Food Protection, 1997, 60(3): 272-275. DOI:10.1006/jfmic.1999.0270.
- [43] NISSEN H, ROSNES J T, BRENDENHAUG J, et al. Safety evaluation of sous vide-processed ready meals[J]. Applied Microbiology, 2002, 35(5): 433-438. DOI:10.1046/j.1472-765X.2002.01218.x.
- [44] MOL S, OZTURAN S, COSANSU S. Determination of the quality and shelf life of sous vide packaged Bonito (sardaSarda, Bloch, 1793) stored at 4 and 12 °C[J]. Journal of Food Quality, 2012, 35(2): 137-143. DOI:10.1111/j.1745-4557.2011.00430.x.

- [45] JANG J D, SEO G H, LYU E S, et al. Hurdle effect of vinegar and sake on Korean seasoned beef preserved by sous vide packaging[J]. Food Control, 2006, 17(3): 171-175. DOI:10.1016/j.foodcont.2004.09.017.
- [46] COSANSU S, MOL S, ALAKAVUK D U, et al. The effect of lemon juice on bonito (Sarda sarda, Bloch, 1973) preserved by sous vide packaging[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2011, 46(2): 395-401. DOI:10.1111/j.1365-2621.2010.02507.x.
- [47] PAIK H D, KIM H J, NAM K J, et al. Effect of nisin on the storage of sous vide processed Korean seasoned beef[J]. Food Control, 2006, 17(12): 994-1000. DOI:10.1016/j.foodcont.2005.07.005.
- [48] PICOUET P A, COFAN-CARBO S, VILASECA H, et al. Stability of sous-vide cooked salmon loins processed by high pressure[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2011, 12(1): 26-31. DOI:10.1016/j.ifset.2010.12.002.
- [49] ESPINASA M C, DIAZ P, LINARES M B, et al. Quality characteristics of sous vide ready to eat seabream processed by high pressure[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 657-662. DOI:10.1016/j.lwt.2015.06.027.
- [50] FARKAS J, POLYAK-FEHER K, ANDRESSY E, et al. Improvement of microbiological safety of sous vide meals by gamma radiation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, 63(3/6): 345-348.
- [51] CREED P G. The sensory and nutritional quality of sous vide foods[J]. Food Control, 1995, 6(1): 45-52.
- [52] 鞠美玲, 周晓燕. 不同烹调方法对普通鹅肝中部分常量营养素的影响[J]. 扬州大学烹饪学报, 2012, 29(1): 37-39. DOI:10.3969/j.issn.1009-4717.2012.01.009.
- [53] LE N. Lipoprotein-associated oxidative stress: a new twist to the postprandial hypothesis[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2014, 16(1): 401-419. DOI:10.3390/ijms16010401.
- [54] ESTEVEZ M. Protein carbonyls in meat systems: a review[J]. Meat Science, 2011, 89(3): 259-279. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.04.025.
- [55] ROLDAN M, ANTEQUERA T, ARMENTEROS M, et al. Effect of different temperature-time combinations on lipid and protein oxidation of sous-vide cooked lamb loins[J]. Food Chemistry, 2014, 149: 129-136. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.10.079.
- [56] NUORA A, CHIANG V S C, MILAN A M, et al. The impact of beef steak thermal processing on lipid oxidation and postprandial inflammation related responses[J]. Food Chemistry, 2015, 184: 57-64. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.03.059.
- [57] PUANGSOMBAT K, JIRAPAKKUL W, SMITH J S. Inhibitory activity of Asian spices on heterocyclic amines formation in cooked beef patties[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(8): 174-180. DOI:10.1111/j.1750-3841.2011.02338.x.
- [58] POLAK T, ANDRENŠEK S, B. ŽLENDER B, et al. Effects of ageing and low internal temperature of grilling on the formation of heterocyclic amines in beef *longissimus dorsi* muscle[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(1): 256-264. DOI:10.1016/j.lwt.2008.03.001.
- [59] POLAK T, DOŠLER D, ŽLENDER B, et al. Heterocyclic amines in aged and thermally treated pork *longissimus dorsi* muscle of normal and PSE quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(2): 504-513. DOI:10.1016/j.lwt.2008.09.014.
- [60] OZ F, ZIKIROV E. The effects of sous-vide cooking method on the formation of heterocyclic aromatic amines in beef chops[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(1): 120-125. DOI:10.1016/j.lwt.2015.05.050.