

真空低温烹调技术对肉制品品质的影响研究进展

张 慢, 熊晓筱, 刘 俊, 阚 娟, 千春录, 金昌海

Recent Process on the Effect of Sous Vide Cooking Technology on the Quality of Meat Product

ZHANG Man, XIONG Xiaoxiao, LIU Jun, KAN Juan, QIAN Chunlu, and JIN Changhai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030298>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

真空低温烹饪技术在水产品加工中的应用及展望

Application and Prospect of Sous-vide Cooking Technique in Aquatic Product Processing

食品工业科技. 2019, 40(22): 353-357,363 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.22.061>

超声波技术在肉制品腌制加工中的应用研究进展

Recent Advances in the Application of Ultrasonic Technology in the Curing of Meat Products

食品工业科技. 2021, 42(24): 445-453 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120001>

脱水处理和冰温贮藏对真空低温烹调虾仁品质的影响

Effects of Dehydration and Ice Temperature Storage on the Quality of Sous Vide Cooked *Penaeus vannamei*

食品工业科技. 2019, 40(13): 231-235,241 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.13.038>

养殖中华鲟肉质、营养成分及风味分析

Meat Quality, Nutritional Components and Flavor of Cultured Chinese Sturgeon

食品工业科技. 2018, 39(16): 213-219 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.16.038>

肉制品加工中有害物减控技术研究进展

Research Progress in the Reduction and Control Technology of Hazardous Substances in Meat Product Processing

食品工业科技. 2020, 41(19): 369-373,379 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.19.057>

包装技术在肉制品保鲜中的研究进展

Research Progress of Packaging Technology in the Preservation of Meat Products

食品工业科技. 2021, 42(16): 367-373 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080047>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张慢,熊晓筱,刘俊,等.真空低温烹调技术对肉制品品质的影响研究进展[J].食品工业科技,2024,45(11):333-340. doi:10.13386/j.issn1002-0306.2023030298

ZHANG Man, XIONG Xiaoxiao, LIU Jun, et al. Recent Process on the Effect of Sous Vide Cooking Technology on the Quality of Meat Product[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 333-340. (in Chinese with English abstract). doi:10.13386/j.issn1002-0306.2023030298

· 专题综述 ·

真空低温烹调技术对肉制品品质的影响研究进展

张慢,熊晓筱,刘俊,阚娟,千春录,金昌海*
(扬州大学食品科学与工程学院,江苏扬州 225127)

摘要:真空低温烹调(Sous vide)是在真空条件下进行的一种经严格控制温度和时间烹调技术。与传统的烹调方法相比,真空低温烹调能有效减少产品中营养成分的损失,保留食品的原有风味,改善肉制品嫩度等优势而受到大众关注,近几年被广泛研究并应用于肉制品加工。本文主要综述了真空低温烹调技术加工条件和方式的改变对肉制品食用品质的影响,指出适宜的加热温度和时间能提高肉制品风味和嫩度、促进营养物质的保留,且低温长时间加热有助于提高肉类的安全性。同时本文还阐述了真空低温烹调与其他技术联用对产品嫩度和安全性的显著影响,为更好地促进真空低温烹调技术在肉制品精深加工中的应用和实现真空低温烹饪肉制品的工业化生产提供了理论依据。

关键词:真空低温烹调,肉制品加工,风味,营养成分,嫩度,安全性

中图分类号:TS251.5

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2024)11-0333-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030298



本文网刊:

Recent Process on the Effect of Sous Vide Cooking Technology on the Quality of Meat Product

ZHANG Man, XIONG Xiaoxiao, LIU Jun, KAN Juan, QIAN Chunlu, JIN Changhai*

(College of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Sous vide is a cooking technique under vacuum condition with precisely controlled temperature and time. Compared with traditional cooking methods, sous vide cooking has been widely studied and applied in meat product processing in recent years because it can effectively reduce the loss of nutrients in products, retain the original flavor of food and improve the tenderness of meat products and other advantages. This paper mainly summarizes the effects of different cooking conditions and modes in sous vide cooking technique on the eating quality of meat products. It is pointed out that the appropriate cooking temperature and time can improve the flavor and tenderness, promote nutrient retention, and long periods of heating at low temperature contribute to the safety of meat. Moreover, the significant influence of sous vide cooking combined with other technologies on tenderness and safety of meat products is also summarized. This study provides a theoretical basis for better promoting the application of sous vide cooking technology in the deep processing of meat products and realizing the industrial production of meat products.

Key words: sous vide cooking method; meat product processing; flavor; nutrient substances; tenderness; safety

随着科技的发展,人们生活和工作的日渐繁忙,消费者不再满足于传统、繁琐、费时的烹饪方式,更

多地是对高品质、方便快捷和营养安全的即食食品的需求。真空低温烹调(Sous vide)最早是由法国厨

收稿日期:2023-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(32001820);中国博士后科学基金面上项目(2022M710176);安徽省博士后基金资助项目(2022B595)。

作者简介:张慢(1986-),女,博士,副教授,研究方向:食品加工和食品风味化学,E-mail:mzhang100@yzu.edu.cn。

*通信作者:金昌海(1963-),男,博士,教授,研究方向:食品功能与营养,E-mail:chjin@yzu.edu.cn。

师 Georges Pralus 提出的一种在真空条件下进行的低温长时间烹调技术。该技术是将食品原料置于热稳定的真空袋中,利用水作为介质进行热量传导,在精确的温度和时间条件下进行烹调,然后迅速冷却到 0~3 ℃ 的热加工方式^[1]。真空低温烹调加工条件较为温和(<100 ℃),可用于烹制不同种类的肉制品。一般情况下,牛肉、猪肉、羊肉等的加工温度为 65~95 ℃,加工时间为 10~48 h^[1]。多数研究结果表明真空低温烹调技术可以有效地防止食品中水分和营养物质的流失,保留食品原有的感官和风味特性,降低产品的脂质氧化程度,还可以抑制好氧菌的生长繁殖,防止冷冻食品再污染,延长产品的保质期^[2-3]。真空低温烹调过程中,产品的品质主要受加热温度和时间的影响,不同种类的肉制品,加工条件各不相同。

肉制品的品质与其风味、营养物质、嫩度和安全性息息相关。真空低温烹调技术可以通过调控烹饪温度和时间来提高肉制品的食用品质^[4],现该技术已普遍应用于国外的高级餐厅,而在国内的肉类加工应用中尚处于初级阶段,相关研究较少。本文主要综述了真空低温烹调技术在肉制品加工中的应用进展,以及不同加工条件和方式对肉制品风味、营养物质、嫩度和安全性的影响,阐述了真空低温烹调与其他技术联用对肉类品质的影响,为真空低温烹调技术在肉制品中的精深加工和工业化生产提供理论依据。

1 真空低温烹调对肉制品风味的影响

风味由香气和滋味两部分组成,是影响肉制品品质的重要因素之一。香气主要来源于肉类在加工烹调时风味前体物质经一系列化学反应形成的挥发性风味成分^[5]。真空低温烹调加工条件温和,肉制品形成的香味主要来源于脂质降解和美拉德反应,在较低温度下进行真空低温烹调处理已被证明可以提高肉制品的风味^[2]。Karpinska-tymoszczyk 等^[6]发现,在 55 ℃ 等低温下,由于糖和氨基酸之间的相互作用,诱导了禽肉中的脂质氧化和硫胺素热降解,导致风味化合物释放。真空低温烹调中,加热温度和加热时间是影响肉类风味形成和组成差异的重要因子,低温或温和加工条件下,肉类的风味成分主要来源于脂质降解,较高的烹饪温度及延长加热时间会促进 Strecker 降解产生风味成分^[7-8]。不同的加热温度和时间组合对肉制品风味物质的含量和肉香味有重要影响,适宜的加工条件可以提高样品肉香味,增强产品的风味特征^[4]。多项研究发现温和或中等的真空加热温度有助于肉香味的形成;同时在较温和、变化较窄的温度范围内,延长一定的加热时间有助于理想香气强度的增加。Zhang 等^[9]分析了不同加热温度-时间组合(60、70、80 ℃, 2、6、12、24 h)对鸭肉风味的影响,70 ℃ 加热 6 h 或 12 h 样品产生的挥发性风味物质总含量较高,己醛、庚醛、壬醛等特征风味成分的香气活性值(OAV)较高,在此条件下鸭肉的肉香味和脂香味明显。Park 等^[5]研究了真空低温烹调

不同加热温度(60、70 ℃)和时间(1、2、3 h)对鸡胸肉感官属性风味强度的影响,结果发现 70 ℃ 加热 3 h 样品的风味强度最高。Christensen 等^[10]分析低温长时间不同条件加热(53、58 ℃, 6~30 h)对猪肉、牛肉、鸡肉感官属性肉香味的影响,发现升温和延长加热时间会提高样品的肉香味。因此,真空低温烹调加工肉类时,需调控加热温度和加热时间以获得高风味品质的产品。

另外,与烧烤、油炸和蒸煮等传统热加工方式相比,真空低温烹调是获得较高香气物质含量的热加工方法^[11]。Rasinska 等^[12]比较分析了蒸制、烤制和真空低温烹调三种加工方法对兔肉挥发性风味物质含量的影响,研究发现与生肉相比,烤制、蒸制和真空低温烹调兔肉的醛类物质总量分别提高了 13、9、7 倍,真空低温烹调兔肉中含硫化合物含量较高。真空低温烹调肉类产生香味的主要来源是脂质降解和美拉德反应,其中,美拉德反应产生肉香味的反应温度一般在 120 ℃ 及以上^[13]。因此,与传统高温烹饪肉类的方式相比,真空低温烹调的美拉德反应程度较低,但产生的挥发性物质总含量较高,主要是醛类、醇类、酮类和烃类等脂质降解产物,且真空包装处理可以减少香气成分的损失,能较好地控制风味的变化。

滋味特性来源于非挥发性风味物质,肉制品滋味呈味成分主要包含氨基酸、核苷酸、肽、无机盐、有机酸等。在真空低温烹调技术中,鲜味是肉制品的重要滋味特性,主要的鲜味成分是核苷酸(IMP、GMP、AMP)和游离氨基酸(谷氨酸和天冬氨酸)^[14]。真空低温烹调加热温度和时间也会引起肉类中核苷酸含量发生变化,研究发现加热温度对核苷酸含量变化影响较大,较高的加热温度有助于鲜味核苷酸含量的提高^[14-16]。Ismail 等^[15]研究了真空低温烹调单段加热温度-时间组合(60 ℃-6 h, 60 ℃-12 h, 70 ℃-6 h, 70 ℃-12 h)和两段式加热温度-时间组合(45 ℃-3 h+60 ℃-3 h, 45 ℃-3 h+60 ℃-9 h)对牛肉滋味特性的影响,发现 70 ℃ 加热 12 h 的牛肉中 AMP 和 GMP 含量最高,鲜味最高。Rotola-pukkila 等^[14]分析了真空低温烹调不同加热温度(60~80 ℃)和时间(0~120 min)对猪大排 AMP 和 IMP 含量的影响,发现 80 ℃ 烹饪的猪大排中 AMP 的含量高于 60 和 70 ℃ 烹饪的样品。

随着加热温度或加热时间的改变,真空低温烹调肉制品的鲜味氨基酸的含量变化不如核苷酸变化那样明显^[4]。游离氨基酸含量的变化主要是由蛋白质降解、氨基酸降解、氨基酸与还原糖的美拉德反应引起的^[17]。Hwang 等^[16]分析了不同加热温度(60 和 70 ℃)和时间(6 和 12 h)对牛肉鲜味物质含量的影响,发现加热处理对牛肉中核苷酸的含量有显著影响,对谷氨酸和天冬氨酸的含量变化无显著影响。Ismail 等^[15]也发现不同的加热条件对牛肉的谷氨酸和天冬氨酸含量无显著性影响。而 Rotola-

Pukkila 等^[14]则发现加热温度和加热时间的变化(60~80 °C, 0~120 min)对猪大排中谷氨酸的含量有显著影响。产生这一结果的主要原因是不同种类的肉原料化学组成不同,采用的加工条件也不同。鲜味氨基酸与鲜味核苷酸之间存在协同相互作用,能显著改善肉类鲜味^[4]。综上所述,可以通过调控真空低温烹调的加热条件来提高肉制品鲜味。

2 真空低温烹调对肉制品营养物质的影响

肉类含有丰富的营养物质,有优质蛋白质、脂肪、维生素和矿物质,如维生素 B、硒、磷、锌、血红素铁等。肉制品经过不同的热加工处理会发生不同的化学组分的变化,表 1 列举了不同真空低温烹调处理条件对肉制品营养物质的影响。

蛋白质和脂肪是机体代谢过程中重要的能量物质,也是食品重要的风味前体物质,是影响肉制品营养价值和风味的因素之一^[18]。在烹调肉类时,温度和时间会影响样品的水分损失、脂质氧化和蛋白质降解,从而导致脂肪和蛋白质含量发生变化。有研究表明,真空低温烹调对肉类蛋白、脂肪等基本营养物质的保留与生肉类类似^[2]。刘芳圆等^[19]研究发现真空低温烹调 65 °C 加热 45 min 制备的牛里脊和生牛里脊脂肪含量接近。Gluchowski 等^[20]也发现,真空低温烹调 64 °C 加热 60 min 的鸡胸肉与生鸡胸肉的蛋白质含量无明显差异。除此之外,与传统加工方式相比,真空低温烹调能更好地保留肉类中的基本营养成分。传统加工方法一般采用高温加热,会促进肉类的水分流失、蛋白质变性和脂肪溶解,易造成营养成分的损失^[21-22]。而真空低温烹调采用温和的加热温度,包装密闭、不直接与加热介质接触,能减少烹饪对蛋白质和脂肪等营养成分的影响。潘冬梅等^[22]研究发现,与油炒、水煮、蒸制、微波加工相比,真空低温烹调猪肝的蛋白质和脂肪含量损失最低。徐迅等^[23]也发现真空低温烹调样品的蛋白质和脂肪含量比水煮

和油煎样品高。真空低温烹调过程中,不同的加热条件会导致肉制品基本营养物质的含量产生差异,适宜的加工条件有助于肉制品蛋白质和脂肪含量的提高。Gluchowski 等^[20]发现鸡胸肉在 66 °C 真空加热 80 min 时,蛋白质含量最高;75 °C 真空加热 35 min 时,脂肪含量最高。Biyikli 等^[24]研究结果显示改变加热温度(65、70、75 °C)对火鸡鸡胸肉蛋白质和脂肪含量无显著性影响,而加热时间的增加(70 °C, 20~40 min)会导致鸡胸肉蛋白质含量增加 17.67%,脂肪含量提高 1.61 倍。

肉类中含有丰富的矿物质和微量元素,以铁、磷、钾、镁、钠等含量较多。真空低温烹调过程中,由于食物和水之间没有直接接触,且肉类汁液流失较少,从而有效减少了矿物质的流失,增加了矿物质的生物可及性。Da-silva 等^[25]比较评估了传统水煮和真空低温烹调(65 °C, 2 h)牛肝样品矿物质(钙、铜、铁、镁、锌)的生物可及性差异,发现与未加工和水煮牛肝相比,真空低温烹调样品矿物质的生物可及性较高,其中微量元素铜、铁和锌更为明显。Macharakova 等^[26]研究发现真空低温烹调在加热温度为 70 °C 时猪排的多种矿物质元素(锌、铜、钙)含量要比烤制猪排高。

此外,真空低温烹调在防止维生素的流失方面比传统的蒸制和煮制具有优势,特别是易受高温和氧气影响的水溶性维生素^[27]。Rinaldi 等^[28]比较了真空低温烹调(75 °C, 36 h)和煮制(100 °C, 2 h)两种热加工处理后牛肉的维生素 B₃ 和 B₁₂ 的含量,结果发现真空低温烹调后的样品维生素 B₃ 和 B₁₂ 保留率都显著高于煮制样品。

3 真空低温烹调对肉制品嫩度的影响

嫩度是评价肉制品质量和影响大众偏好的重要因素之一,与肌肉组织中胶原蛋白和肌原纤维蛋白的降解有关。由于真空包装和低温长时间加热,真空低

表 1 真空低温烹调对肉制品营养物质的影响

Table 1 Effect of sous vide cooking on nutrients of meat products

样品	加工处理方式	主要结论	参考文献
牛里脊	真空低温烹调: 65 °C 加热 45 min	真空低温烹调牛里脊和生牛里脊脂肪含量接近,粗蛋白含量保留最高	刘芳圆等 ^[19]
鸡胸肉	真空低温烹调(64 °C 加热 60 min、66 °C 加热 80 min、75 °C 加热 35 min)、煮制、蒸制	真空烹调产品的营养价值取决于工艺参数; 66 °C 真空加热 80 min 时,蛋白质含量最高; 75 °C 真空加热 35 min 时,脂肪含量最高; 随着热处理参数强度的增加,水分含量降低,蛋白质和脂肪含量增加	Gluchowski 等 ^[20]
猪肝	油炒、真空低温烹调(75 °C 加热 2 h)、水煮、蒸制、微波	真空低温烹调处理的猪肝蛋白质和脂肪损失含量最低,营养成分保存较好	潘冬梅等 ^[22]
牛里脊	真空低温烹调(65 °C 加热 45 min)、水煮、油煎	真空低温烹调样品的蛋白质、脂肪和灰分含量比水煮和油煎样品高,能很好地保留牛肉的营养成分	徐迅等 ^[23]
火鸡鸡胸肉	真空低温烹调: 65、70、75 °C 加热 20、40、60 min	加热温度对样品蛋白质和脂肪含量无显著性影响; 加热时间的增加(70 °C, 20~40 min)会导致鸡胸肉蛋白质含量增加 17.67%,脂肪含量提高 1.61 倍	Biyikli 等 ^[24]
牛肝	传统水煮: 180 °C 加热 20 min 真空低温烹调: 65 °C 加热 2 h	真空低温烹调的样品比未加工和水煮的样品具有更高的矿物质生物可及性(钙、铜、铁、钾、镁、锌); 在微量元素(铜、铁和锌)中更为明显	Da-silva 等 ^[25]
猪排	真空低温烹调(70 °C 加热 2、3、4 h)、烤制	在加热温度为 70 °C 时猪排的多种矿物质元素(锌、铜、钙)含量要比烤制猪排高	Macharakova 等 ^[26]
牛肉	煮制: 100 °C 加热 2 h 真空低温烹调: 75 °C 加热 36 h	真空低温烹调牛肉的维生素 B ₁₂ 和 B ₃ 保留率都高于煮制牛肉	Rinaldi 等 ^[28]

温烹调技术能有效防止肉类水分流失,使肉质保持柔嫩多汁,因此受到了众多消费者的喜爱。Djekic等^[29]、Lee等^[30]将真空低温烹调与其他加工技术如烤制和煮制、烤箱烹制进行比较,感官分析、质构检测发现真空低温烹调的猪火腿肉和鸡胸肉产品硬度最低,肉嫩度更好。真空低温烹调中不同的加热方式(单段式和多段式)和烹调过程中加热时间和时间的变化,是引起肉类产品嫩度特性差异的主要原因。表2列举了真空低温烹调不同加热方式和加热处理条件对肉类嫩度的影响。

许多研究发现适宜的真空低温烹调条件(加热温度-时间组合)可以使肉类获得较好的嫩度和食用品质;而且当加热温度处于60~65℃时,肉制品的剪切力和硬度值较低,嫩度较好。Jeong等^[31]采用真空低温烹调分别在61℃和71℃条件下加热猪肉火腿,发现其剪切力、硬度和咀嚼性随温度上升而增加。Biyikli等^[24]也发现随着温度从65℃升高到75℃,火鸡肉的硬度和咀嚼性增加,嫩度下降。这主要是因为肉制品在60~65℃的加热范围内,胶原蛋白总溶解度增加,肉制品嫩度增加;而加热温度在70~75℃时,由于结缔组织收缩、组成肌原纤维的肌球蛋白和肌动蛋白发生热变性凝固,导致肉的韧性增加、嫩度降低^[32]。但若选用日龄较长的老年动物作为原料加工时,因其硬度较大则需要更高的加热温度和更长的加热时间^[33]。

分段式真空低温烹调加热有利于改善肉制品的嫩度^[28]。这可能是由于早期的加热温度(40~50℃)能更好地激活组织蛋白酶B和L的活性,从而使肌肉中的肌原纤维和胶原蛋白降解^[28]。Ismail等^[34]采用单段式(60、65、70、75℃加热6和12h)和两段式(45+60、45+65、45+70、45+75;49+60、49+65、49+70、49+75℃加热3h+3h或9h)真空低温烹调处理牛肉,结果表明随着温度的升高或时间的延长蒸煮损失增加,在60℃加热温度下两段式烹调的蒸煮损失低于单段式(蒸煮损失是指肉类在热处理过程中所损失的总液体和可溶性物质^[35],和肉的剪切力值呈正相关^[36];蒸煮损失值越小,肉样剪切力值越小,嫩度越高^[37])。Uttaro等^[38]发现多段式真空低温烹调(39℃-1h+49℃-1h+59℃-4h)比单段式真空低温烹调(59℃-4h)和水浴蒸煮更能降低牛肉的剪切力,提高嫩度。Ismail等^[39]采用三种不同的烹饪法加工牛肉,发现与单段式真空低温烹调(45℃-3h,65℃-3h)和传统烹饪法(75℃加热30min)相比,两段式真空低温烹调(45℃-3h+65℃-3h)更具有提高熟牛肉嫩度的潜力。

4 真空低温烹调对肉制品微生物安全性的影响

真空低温烹调包括真空密封、巴氏杀菌和快速冷却或冷冻过程。近年来,虽然真空低温烹饪食品开始逐渐流行,但人们对其安全性依然充满担忧,认为真空包装为厌氧菌的生长繁殖提供了条件,真空低温

表2 真空低温烹调对肉制品嫩度的影响

Table 2 Effect of sous vide cooking on tenderness of meat products

样品	加工处理方式	主要结论	参考文献
猪肉火腿	加热温度(61℃或71℃)、时间(45或90 min)、真空度(98.81%或96.58%)	61℃烹饪的样品比71℃烹饪的样品更嫩;高真空度处理(98.81%)的样品比低真空度处理(96.58%)的样品嫩度更好	Jeong等 ^[31]
火鸡鸡胸肉	真空低温烹调:65、70、75℃加热20、40、60 min	温度从65℃升高到75℃时,硬度和咀嚼性均有所增加,嫩度降低;相同温度下,加热时间从20 min增加到60 min时,硬度和咀嚼性上升,嫩度降低;较高的加热温度和较长的加热时间降低了样品的嫩度	Biyikli等 ^[24]
牛肉半腱肌(母牛和小公牛)	真空低温烹调:53、55、58、63℃加热2.5、7.5、19.5 h	加热小公牛的半腱肌时,当温度从53℃升高到55℃,或当温度为53℃、加热时间从2.5 h到7.5 h时,剪切力显著下降;与小公牛相比,母牛牛肉需要更高的加热温度和更长的加热时间使其剪切力降低	Christensen等 ^[33]
牛肉半腱肌	单段式真空低温烹调:60、65、70、75℃分别烹调6 h和12 h 两段式真空低温烹调:45+60、45+65、45+70、45+75、49+60、49+65、49+70、49+75℃分别烹调6 h和12 h(第一段温度加热3 h,第二段温度加热3 h或9 h)	在60℃条件下加热的牛肉蒸煮损失低,两段式烹饪蒸煮损失低于单段式;加热温度比加热时间对嫩度的影响大;肌束膜厚度、蒸煮损失、肌节长度和弹性模量是影响剪切力的主要因素	Ismail等 ^[34]
牛肉网上肌和股直肌	单段式真空低温烹调:59℃-4 h 多段式真空低温烹调:39℃-1 h+49℃-1 h+59℃-4 h	多段式真空低温烹调能更好地降解肌原纤维和胶原蛋白;多段式真空低温烹调比单段式烹调剪切力值低5%~7%	Uttaro等 ^[38]
牛肉半腱肌	单段式真空低温烹调:45、65℃分别加热3 h 传统烹饪:75℃加热30 min 两段式真空低温烹调:45℃-3 h+65℃-3 h	两段式真空低温烹调的样品比65℃加热3 h的样品硬度低,可能是烹调时间(6 h)或双重热作用(45℃和65℃)所导致;两段式烹调具有提高牛肉嫩度的潜力	Ismail等 ^[39]
猪肉背长肌和半腱肌	真空低温烹调:48、53、58、63℃加热0、5、17 h	温度从53℃升高到58℃时,猪肉的剪切力下降,硬度降低	Christensen等 ^[40]
山羊臀中肌和股二头肌	单段式真空低温烹调:60、65、70℃分别加热6 h和12 h 两段式真空低温烹调:45+60℃、45+65℃、45+70℃烹调6 h(3+3 h)和12 h(3+9 h)	两段式真空低温烹调能有效降低肌肉硬度,45+60℃烹调6 h的样品剪切力值最小;胶原含量和胶原蛋白溶解度对真空低温烹调6 h的羊肉嫩度影响较小,但对烹调12 h后的羊肉影响较大	Ismail等 ^[41]

烹调无法完全杀死食物中的耐热菌和芽孢杆菌。因此,许多研究关注于真空低温烹调产品在储存过程中这些病原菌的存在情况,其中值得注意的细菌有肉毒杆菌、乳酸菌、李斯特菌、大肠杆菌和蜡样芽孢杆菌等。有研究表明肉类在经过真空低温烹调处理后,即使在较温和的温度和时间组合情况下,微生物数量也能大幅减少。表 3 列举了不同的真空低温烹调处理条件对肉制品微生物安全性的影响。Roldan 等^[42]发现真空低温烹调羊里脊在较低温的加工条件下(60 °C 加热 6 h)可以将微生物(嗜冷菌、乳酸菌、肠杆菌科、大肠菌群、革兰氏阳性球菌、梭菌属和芽孢杆菌属)数量减少至小于 1 log CFU/g。Yang 等^[43]比较了牛排在多段式真空低温烹调(39 °C-1 h+49 °C-1 h+59 °C-4 h)和单段式真空低温烹调(59 °C-4 h)两种加工方法后冷藏储存 28 d 后的微生物情况。发现在低温加热中(39 °C 或 49 °C)指示菌(总好氧菌、乳酸菌、假单胞菌、肠杆菌科、大肠菌群)均未增殖,两种真空低温烹调条件都能将细菌总数降低到 5 lg CFU/g 以下,且所有牛排在第 28 d 的气味仍可接受,由此认为真空低温烹调不会导致细菌增殖。

杀菌的效果受烹调温度、时间和食物本身等因素的影响,为了探讨不同烹调温度-时间组合对产品品质的影响,Biyikli 等^[24]选用不同的加热温度-时间组合(65、70、75 °C×20、40、60 min)真空烹调火鸡肉并检测其微生物数量,结果表明在所有制备的样品中,中温好氧菌总数减少了约 2 log CFU/g,只有在 65 °C 加热 20 min 的样品中才发现李斯特菌的存在,而其余样品均未检出其他微生物或低于 1 log CFU/g。因此建议低温下要有足够的加热时间,以有效保证肉制品的安全性。Haghighi 等^[44]研究了真空低温烹调鸡胸肉经不同温度(60、70 和 80 °C)和时间(60、90、120 和 150 min)组合加热并在 4 °C 下储存 21 d 后的微生物情况,结果未检测到中温好氧菌、嗜冷菌

和肠杆菌科的微生物菌群。由此可见,使用适宜的温度和时间真空低温烹调肉制品决定了产品最终的安全性,低温长时间加热有助于提高其安全性。

在使用真空低温烹调技术加工肉制品时,加入一些调味品腌制或添加抗氧化成分能够进一步提高产品的质量和安全性。Karyotis 等^[45]在真空低温烹调(55、57.5 和 60 °C)之前用照烧酱腌制鸡胸肉,发现腌制后的鸡胸肉中单核细胞增生李斯特菌和沙门氏菌的 D 值(杀死 90% 微生物数量所需的时间)均低于对照样品,腌制使病原体对热更加敏感。Kim 等^[46]研究发现凤尾鱼酱料在一定程度上提高了真空低温猪肉产品的货架期,且增加了令人愉快的风味化合物的数量。这说明腌制不仅可以延长产品的货架期,而且经腌制后的产品在感官评价方面比未腌制产品得分更高^[47]。Naveena 等^[48]研究发现相对于变质时间为 20 d 的对照组鸡肉香肠(100 °C, 30 min, 未真空包装),真空烹调(100 °C, 30、60、120 min, 真空包装)能有效降低鸡肉香肠的微生物数量,且将贮藏时间延长至 120 d。而与真空烹调组的香肠相比,添加了迷迭香二萜酚的真空烹调组鸡肉香肠的细菌平板计数相对较低,明显保持了更高的风味和整体可接受性。

5 真空低温烹调与其他技术联用对肉制品嫩度和安全性的影响

一些研究学者将真空低温烹调与超高压、脉冲电场、辐照等技术和应用抗菌剂、烤箱烤制等方法联合使用以改善和提高产品的食用品质和安全性^[51-54]。高静水压或超高压是一种新型的非热加工技术,在加工过程中不会造成共价键的破坏,对食品中的风味物质、维生素、色素等小分子物质无影响,但会促进肌肉纤维结构的改变,导致肉质嫩化。真空低温烹调也能够改善肉制品的嫩度。研究发现超高压与真空低温烹调两种技术结合使用能显著提高肉类嫩度。

表 3 真空低温烹调对肉制品微生物安全性的影响

Table 3 Effect of sous vide cooking on microbiological safety of meat products

样品	加工处理方式	主要结论	参考文献
羊里脊	60、70、80 °C 加热 6、12、24 h, 2 °C 冷藏过夜	真空低温烹调即使在 60 °C-6 h 也能显著减少微生物(嗜冷菌、乳酸菌、肠杆菌科、大肠菌群、革兰氏阳性球菌、梭菌属和芽孢杆菌属)数量至小于 1 log CFU/g	Roldan 等 ^[42]
牛排	单段式真空低温烹调: 59 °C-4 h 多段式真空低温烹调: 39 °C-1 h+ 49 °C-1 h+59 °C-4 h -1.5 °C 和 2 °C 储存 28 d	两种方法均可将细菌总数降低到 5 lg CFU/g 以下; 总好氧菌、乳酸菌、假单胞菌、肠杆菌科、大肠菌群未显示增殖; 储存过程中,真空低温烹调样品中的微生物主要是假单胞菌,而不是 乳酸菌; 所有样品在储存 28 d 后的气味仍可接受	Yang 等 ^[43]
火鸡肉	65、70、75 °C 加热 20、40、60 min 储存温度: 4±1 °C	中温好氧菌总数减少了约 2 log CFU/g, 肠杆菌科和大肠杆菌小于 1 log CFU/g, 未检测到沙门氏菌; 65 °C-20 min 的样品中发现李斯特菌的存在	Biyikli 等 ^[24]
鸡胸肉	60、70 和 80 °C 加热 60、90、 120 和 150 min 4 °C 储存 21 d	未检测到中温好氧菌、嗜冷菌和肠杆菌科等微生物菌群	Haghighi 等 ^[44]
猪肉馅饼	75 °C 加热 2 h 4 °C 储存 49 d	在冷藏 0~49 d 期间,所有熟制肉饼均未检出好氧菌和大肠菌群	Cho 等 ^[49]
猪肉前腿	45、60 和 70 °C 加热 0.5、4 和 8 h	未在任何样品中观察到大肠菌群	Chang 等 ^[50]

Janardhanan 等^[55]研究了高静水压技术(HPP)与真空低温烹调技术结合对牛肉肉饼理化特性的影响,结果发现 350 MPa 高压处理 10 min 与真空低温烹调 55 ℃ 加热结合处理能够降低牛肉肉饼的硬度,在此条件下牛肉饼嫩度达到最佳。除此之外,超高压技术还能通过高压使细菌等微生物的细胞破坏,起到灭菌的作用,提高食品的安全性和延长保质期。Sun 等^[51]发现经超高压技术(HPP)450 MPa 处理 15 min 的牛排,大肠杆菌菌落总数减少 4.74 log CFU/g; 600 MPa 处理 10 min 的牛排,大肠杆菌菌落总数减少 6.13 log CFU/g。由此可见,超高压预处理可以实现大肠杆菌数量的减少,从而降低真空低温烹调食品的风险。

脉冲电场(PEF)是近几年发展的新型冷杀菌技术,能够改变细胞膜的结构和增强传质,可以在保持新鲜食品质量的同时,改变食品的质地特性,改善肉类嫩度。脉冲电场与真空低温烹调技术联用能够显著改善肉类嫩度。Jeong 等^[53]将未经预处理的对照样品和经脉冲电场(PEF)预处理的牛肉样品分别在 60 ℃ 下真空低温烹调 1~24 h,结果发现 PEF 预处理对真空低温烹调牛肉的剪切力有一定影响,特别是在 2.0 kV/cm 条件下,肉的嫩化效果达到最大,且 PEF 预处理后肉的嫩度与电场强度的增加成正比。Alahakoon 等^[56]也分析了脉冲电场和真空低温烹调结合处理对牛腩品质的影响,结果显示,当脉冲电场强度在 0.7、1.5 kV/cm 时和真空低温烹调加工时间在 12~20.2、20.8~23.7 h 时,牛腩的硬度和剪切力最小,发现脉冲电场预处理能够缩短真空低温烹调加工时间,改善肉类嫩度。Karki 等^[57]研究表明脉冲电场预处理能够改善牛肋骨固有的生物电化学变异性,脉冲电场处理可能是缩短牛肋骨真空低温烹调处理时间和增强嫩度的潜在方法。

辐照技术可以利用射线的强穿透性和辐射能量,有效地消除食品中的病原微生物,提高食品的安全质量。为了减少或消除真空低温烹调产品由于巴氏杀菌不充分而可能产生的相关风险,可以采用辐照技术提高其微生物安全性。Farkas 等^[58]以蜡芽孢杆菌接种的豆豉烟熏猪肉为研究对象,采用伽马辐射(5 kGy)和/或添加乳酸链球菌处理真空低温烹调猪肉样品,发现真空低温烹调结合中剂量伽马射线照射和/或添加乳酸链球菌能明显提高样品的微生物安全性和质量。

另外,真空低温烹调肉类由于加热的温度低,肉类发生美拉德反应或焦糖化反应程度低,导致产品的色泽较浅,烤肉味缺失。为了弥补真空低温烹调的缺点,Ruiz-carrascal 等^[59]提出可以通过在真空低温烹调前后增加烤箱烤制等烹饪步骤,使羊肉制品美拉德反应程度增加,褐色加深、肉香味增加。以上这些结果表明,可以通过创新联用恰当的技术方法,改善肉类嫩度,控制肉制品微生物数量,保证感官和风味品

质及食用安全,促进肉制品工业发展。

6 结论与展望

真空低温烹调是一种方便可靠的加工技术,与传统加工方法相比,具有多项优点,能使肉质保持原有的感官和风味品质、提高嫩度、减少营养成分流失、安全健康,因此近年来在食品工业、餐饮业(如食品厂、餐馆、快餐业和超市)中受到了越来越多的关注。然而,虽然真空低温烹调技术烹饪肉制品在物理化学和感官方面有优势,但真空低温烹调过程需要精确控制温度和时间,所需的设备用具成本较高,且真空烹调食品需要严格遵守生产安全规范的要求、操作繁琐等都给使用者造成了一定阻碍。目前,该技术在我国仍处于开始发展阶段,随着我国科技和经济水平的不断发展,该技术将越来越成熟。对于生活节奏越来越快的人群,快餐和方便食品的需求势必会增大,真空低温烹调既可以提供冷藏链中的中间食品,也可以提供即食食品,适用于餐厅、家庭、医院等场所,具有良好的发展应用前景。除此之外,真空低温烹调还可以与非热加工技术和其他加工方法相结合,提高肉制品的安全性和质量。因此在未来,真空低温烹调技术的应用需要进一步优化真空低温烹调产品的感官质量,提高产品的安全性,推进相关配套设备的国产化、智能化和平民化,开发适宜烹饪的相关产品,使其与市场多样性需求相匹配。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] AYUB H, AHMAD A. Physicochemical changes in sous-vide and conventionally cooked meat[J]. *International Journal of Gastronomy & Food Science*, 2019, 17: 100145.
- [2] KATHURIA D, DHIMAN A K, ATTRI S. Sous vide, a culinary technique for improving quality of food products: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 119: 57-68.
- [3] STRINGER S C, METRIS A. Predicting bacterial behaviour in sous vide food[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2017, 13: 117-128.
- [4] ISMAIL I, HWANG Y, BAKHSH A, et al. Control of sous-vide physicochemical, sensory, and microbial properties through the manipulation of cooking temperatures and times[J]. *Meat Science*, 2022, 188: 108787.
- [5] PARK C H, LEE B, OH E, et al. Combined effects of sous-vide cooking conditions on meat and sensory quality characteristics of chicken breast meat[J]. *Poultry Science*, 2020, 99(6): 3286-3291.
- [6] KARPINSKA-TYMOSZCZYK M, DRASZANOWSKA A, DANOWSKA-OZIEWICZ M, et al. The effect of low-temperature thermal processing on the quality of chicken breast fillets[J]. *Food Science and Technology International*, 2020, 26(7): 563-573.
- [7] PULGAR J S D, ROLDÁN 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(10): 12538-12547.

- [8] ROLDAN M, RUIZ J, PULGAR J S D, et al. Volatile compound profile of sous-vide cooked lamb loins at different temperature-time combinations[J]. *Meat Science*, 2015, 100: 52–57.
- [9] ZHANG M, CHEN M, FANG F, et al. Effect of sous vide cooking treatment on the quality, structural properties and flavor profile of duck meat[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2022, 29: 100565.
- [10] CHRISTENSEN L, GUNVIG A, TORNGREN M A, et al. Sensory characteristics of meat cooked for prolonged times at low temperature[J]. *Meat Science*, 2012, 90(2): 485–489.
- [11] SILVA F A, FERREIRA V C, MADRUGA M S, et al. Effect of the cooking method (grilling, roasting, frying and sous-vide) on the oxidation of thiols, tryptophan, alkaline amino acids and protein cross-linking in jerky chicken[J]. *Food Science Technology*, 2016, 53(8): 3137–3146.
- [12] RASINSKA E, RUTKOWSKA J, CZARNIECKA-SKUBINA E, et al. Effects of cooking methods on changes in fatty acids contents, lipid oxidation and volatile compounds of rabbit meat[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 110: 64–70.
- [13] 刘慧,张苗,孙红男,等.超声波与美拉德反应改善食源性肽风味研究进展[J].*食品科技*, 2022, 27(8): 207–213. [LIU Hui, ZHANG Miao, SUN Hongnan, et al. Research progress on improving the flavor of food-derived peptides by ultrasound and Maillard reaction[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 27(8): 207–213.]
- [14] ROTOLA-PUKKILA M K, PIHLAJAVIITA S T, KAIMAINEN M T, et al. Concentration of umami compounds in pork meat and cooking juice with different cooking times and temperatures[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(12): C2711–C2716.
- [15] ISMAIL I, HWANG Y H, JOO S T. Low-temperature and long-time heating regimes on non-volatile compound and taste traits of beef assessed by the electronic tongue system[J]. *Food Chemistry*, 2020, 320: 126656.
- [16] HWANG Y H, ISMAIL I, JOO S T. Identification of umami taste in sous-vide beef by chemical analyses, equivalent umami concentration, and electronic tongue system[J]. *Foods*, 2020, 9(3): 251.
- [17] 崔伟,孟祥忍,高子武,等.牛肉低温蒸煮过程中挥发性风味成分及其前体物动态变化[J].*食品与机械*, 2022, 38(4): 20–28, 244. [CUI Wei, MENG Xiangren, GAO Ziwu, et al. Dynamic changes of volatile flavor components and their precursors during low temperature cooking of beef[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(4): 20–28, 244.]
- [18] 于继英,许小军,张继,等.脂肪和蛋白质代谢对肉品风味的影响[J].*饲料研究*, 2018(1): 17–21. [YU Jiyang, XU Xiaojun, ZHANG Ji, et al. Effect of fat and protein metabolism on meat flavor[J]. *Feed Research*, 2018(1): 17–21.]
- [19] 刘芳圆,周文达,李晓.不同烹饪方式的牛里脊肉质品质比较[J].*现代食品科技*, 2021, 37(3): 220–226. [LIU Fangyuan, ZHOU Wenda, LI Xiao. Comparison of ridge texture quality in cattle with different cooking methods[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(3): 220–226.]
- [20] GLUCHOWSKI A, CZARNIECKA-SKUBINA E, BULA M. The use of the sous-vide method in the preparation of poultry at home and in catering protection of nutrition value whether high energy consumption[J]. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7606.
- [21] 李梦琪.真空低温烹饪工艺对鸡腿肉品质及安全性的影响研究[D].烟台:烟台大学, 2019. [LI Mengqi. The effect of sous vide cooking on the quality and safety of chicken legs[D]. Yantai: Yantai University, 2019.]
- [22] 潘冬梅,汪丽娟,张献颖.不同烹饪方法对猪肝品质的影响研究[J].*兰州文理学院学报(自然科学版)*, 2020, 34(3): 39–42. [PAN Dongmei, WANG Lijuan, ZHANG Xianling. Study on the effect of different cooking methods on the quality of pig liver[J]. *Journal of Lanzhou University of Arts and Science (Natural Sciences)*, 2020, 34(3): 39–42.]
- [23] 徐迅,卜俊芝.不同烹调方法对牛里脊营养和感官品质的影响[J].*食品工业科技*, 2016, 37(22): 144–149. [XU Xun, BU Junzhi. Influence of different cooking methods on nutritional and sensory quality of beef tenderloin[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(22): 144–149.]
- [24] BIYIKLI M, AKOGLU A, KURHAN S, et al. Effect of different sous vide cooking temperature-time combinations on the physicochemical, microbiological, and sensory properties of turkey cutlet[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2020, 20: 100204.
- [25] DA-SILVA F L F, DE LIMA J P S, MELO L S, et al. Comparison between boiling and vacuum cooking (sous-vide) in the bioaccessibility of minerals in bovine liver samples[J]. *Food Research International*, 2017, 100(1): 566–571.
- [26] MACHARAKOVA B, SALAKOVA A, BOGDANOVIOVA K, et al. Changes in the concentrations of selected mineral elements in pork meat after sous-vide cooking[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 96: 103752.
- [27] KILIBARDA N, BRDAR I, BALTIC B, et al. The safety and quality of sous vide food[J]. *Meat Technology*, 2018, 59(1): 38–45.
- [28] RINALDI M, DALLASTA C, PACIULLI M, et al. A novel time/temperature approach to sous vide cooking of beef muscle[J]. *Food Bioprocess Technology*, 2014, 7(10): 2969–2977.
- [29] DJEKIC I, ILIC J, LORENZO J M, et al. How do culinary methods affect quality and oral processing characteristics of pork ham?[J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 52(1): 36–44.
- [30] LEE B, PARK C H, KONG C, et al. Muscle fiber and fresh meat characteristics of white-stripping chicken breasts, and its effects on palatability of sous-vide cooked meat[J]. *Poultry Science*, 2021, 100: 101177.
- [31] JEONG K, HYEONBIN O, SHIN S Y, 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 Science*, 2018, 143: 1–7.
- [32] 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. [BU Junzhi, XU Xun, WANG Qi. The research status of effect of time and temperature on properties in sous vide cooking products[J]. *The Food Industry*, 2015, 36(5): 251–255.]
- [33] CHRISTENSEN L, ERTBJERG P, LOJE H, et al. Relationship between meat toughness and properties of connective tissue from cows and young bulls heat treated at low temperatures for prolonged times[J]. *Meat Science*, 2013, 93: 787–795.
- [34] ISMAIL I, HWANG Y H, JOO S T. Interventions of two-stage thermal sous-vide cooking on the toughness of beef semitendinosus[J]. *Meat Science*, 2019, 157: 107882.
- [35] NAQVI Z B, THOMSON P C, HA M, et al. Effect of sous vide cooking and ageing on tenderness and water-holding capacity of low-value beef muscles from young and older animals[J]. *Meat Science*, 2021, 175(1): 108435.
- [36] LAWRENCE T E, WHATLEY J D, MONTGOMERY T H, et al. Influence of dental carcass maturity classification on carcass traits and tenderness of longissimus steaks from commercially fed

- cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 2001, 79: 2092–2096.
- [37] 魏心如, 韩敏义, 王鹏, 等. 热处理对鸡胸肉剪切力与蒸煮损失的影响[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(3): 629–633. [WEI Xinru, HAN Minyi, WANG Peng, et al. Effect of pretreatment conditions on warmer-bratzler shear force and cooking loss of chicken breast [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 30(3): 629–633.]
- [38] UTTARO B, ZAWADSKI S, MCLEOD B. Efficacy of multi-stage sous-vide cooking on tenderness of low value beef muscles [J]. *Meat Science*, 2019, 149: 40–46.
- [39] ISMAIL I, HWANG Y H, BAKSH A, et al. The alternative approach of low temperature-long time cooking on bovine semitendinosus meat quality[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2019, 32(2): 282–289.
- [40] CHRISTENSEN L, ERTBJERG P, AASLYNG MD, et al. Effect of prolonged heat treatment from 48 °C to 63 °C on toughness, cooking loss and color of pork[J]. *Meat Science*, 2011, 88: 280–285.
- [41] ISMAIL I, HWANG Y H, JOO S T. Effect of different temperature and time combinations on quality characteristics of sous-vide cooked goat *Gluteus medius* and *Biceps femoris*[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(6): 1000–1009.
- [42] ROLDAN M, ANTEQUERA T, MARTIN 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.
- [43] YANG X, WANG H, BADONI M, et al. Effects of a novel three-step sous-vide cooking and subsequent chilled storage on the microbiota of beef steaks[J]. *Meat Science*, 2019, 159: 107938.
- [44] HAGHIGHI H, BELMONTE A M, MASINO F, et al. Effect of time and temperature on physicochemical and microbiological properties of sous vide chicken breast fillets[J]. *Applied Science*, 2021, 11: 3189.
- [45] KARYOTIS D, SKANDAMIS P N, JUNEJA V K. Thermal inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* spp. in sous-vide processed marinated chicken breast[J]. *Food Research International*, 2017, 100(Pt 1): 894–898.
- [46] KIM Y A, BA H V, HWANG I. Effects of traditional sauce type and storage time on quality characteristics, shelf-life and flavor compounds of marinated pork cooked by sous vide method[J]. *Food Science of Animal Resources*, 2019, 39(3): 355–370.
- [47] 卜俊芝, 徐迅, 严利强, 等. 真空低温烹调技术在半成品食品加工中的应用及展望[J]. *四川旅游学院学报*, 2020(5): 14–17. [BU Junzhi, XU Xun, YAN Liqiang, et al. Application and prospect of sous vide cooking techniques in the processing of half-finished foods[J]. *Journal of Sichuan Tourism University*, 2020(5): 14–17.]
- [48] NAVEENA B M, KHANSOLE P S, KUMAR M S, et al. Effect of sous vide processing on physicochemical, ultrastructural, microbial and sensory changes in vacuum packaged chicken sausages [J]. *Food Science and Technology International*, 2017, 23(1): 75–85.
- [49] CHO D K, LEE B, OH H, et al. Effect of searing process on quality characteristics and storage stability of sous-vide cooked pork patties[J]. *Foods*, 2020, 9(8): 1011.
- [50] CHANG J H, HAN J A. Synergistic effect of sous-vide and fruit-extracted enzymes on pork tenderization[J]. *Food science and biotechnology*, 2020(9): 1213–1222.
- [51] SUN S, SULLIVAN G, STRATTON J, et al. Effect of HPP treatment on the safety and quality of beef steak intended for sous vide cooking[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 86: 185–192.
- [52] 杨爽, 杨萍, 徐琳, 等. 超高压处理协同低温贮藏对卤牛肉品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 334–343. [YANG Shuang, YANG Ping, XU Lin, et al. Effect of ultra-high pressure combined with low temperature storage on quality of marinated beef[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(21): 334–343.]
- [53] JEONG S H, KIM E C, LEE D U. The impact of a consecutive process of pulsed electric field, sous-vide cooking, and reheating on the properties of beef semitendinosus muscle[J]. *Foods*, 2020, 9(11): 1674.
- [54] CLAYTON J S, MAGDALENA A O, FRANCISCO D G. Selection and application of natural antimicrobials to control *Clostridium perfringens* in sous-vide chicken breasts[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2021, 347: 109193.
- [55] JANARDHANAN R, VIRSEDA P, HUERTA-LEIDENZ N, et al. Effect of high-hydrostatic pressure processing and sous-vide cooking on physicochemical traits of *Biceps femoris* veal patties[J]. *Meat Science*, 2022, 188: 108772.
- [56] ALAHAKOON A U, OEY I, BREMER P, et al. Process optimisation of pulsed electric fields pre-treatment to reduce the sous vide processing time of beef briskets[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2019, 54: 823–834.
- [57] KARKI R, OEY I, BREMER P, et al. Understanding the effect of meat electrical conductivity on pulsed electric field (PEF) process parameters and the ability of PEF to enhance the quality and shorten sous vide processing for beef short ribs[J]. *Food Research International*, 2023, 163: 112251.
- [58] FARKAS J, POLYAK-FEHER K, ANDRASSY E, et al. Improvement of microbiological safety of sous-vide meals by gamma radiation[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2002, 63: 345–348.
- [59] RUIZ-CARRASCAL J, ROLDAN M, REFOLIO F, et al. Sous-vide cooking of meat: A Maillardized approach[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2019, 16: 100138.