

液态蛋的新兴杀菌效果与功能特性 调控技术研究进展

王晓拓^{1,2}, 李述刚³, 陈宇航², 张敬守², 肖红伟^{2,*}

(1.苏州农业职业技术学院智慧农业学院, 江苏 苏州 215008; 2.中国农业大学工学院, 北京 100083;

3.合肥工业大学食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 鸡蛋富含营养及多种功能特性, 但因带壳蛋易碎、运输和贮藏困难, 且携带食源性微生物等安全性问题, 液态蛋逐渐成为带壳蛋的替代品。目前, 主要采用巴氏杀菌的热加工方法提高液态蛋整体安全性及延长保存期。然而, 鸡蛋蛋白的热敏性导致传统热处理的杀菌效果不足, 如经杀菌后的鸡蛋蛋白在4℃条件下仅能保存14~21 d, 同时还可能对液态蛋的功能特性产生负面影响, 如乳化性、起泡性或凝胶性降低, 这严重制约着液态蛋产业的发展。鉴于此, 本文系统探讨相关新兴热加工技术, 物理、生物化学的非热加工技术, 贮藏及其复配技术对液态蛋的杀菌增效及功能特性保持和提升的最新研究进展, 重点阐明相关技术的调控机制及其复配技术的协同增效机理, 并分析技术的产业化应用前景, 以期为液态蛋深加工技术革新、产品品质升级以及工业化生产及应用提供一定的理论指导。

关键词: 液态蛋; 新兴杀菌; 杀菌机理; 品质调控

Recent Advances in Emerging Sterilization and Quality Control Techniques for Liquid Eggs

WANG Xiaotuo^{1,2}, LI Shugang³, CHEN Yuhang², ZHANG Jingshou², XIAO Hongwei^{2,*}

(1. College of Intelligent Agriculture, Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Suzhou 215008, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: While Hen's egg is nutritious and has versatile functional properties, liquid eggs are gradually becoming an alternative to shelled eggs due to the fragility of shelled eggs, its difficulty of transportation and storage, and safety problems such as foodborne microorganisms vectored by shelled eggs. Currently, thermal pasteurization is mainly used to enhance the overall safety and extend the shelf life of liquid eggs. However, the thermal susceptibility of egg proteins leads to inadequate sterilization using traditional thermal treatments; for instance, sterilized egg proteins can be stored for only 14–21 days at 4℃. Additionally, the functional properties of liquid eggs can be negatively impacted, which is manifested by reduced emulsifying, foaming and gelation properties. This significantly hinders the advancement of the liquid egg industry. In view of the current situation, this article systematically examines recent advances in the effects of emerging thermal processing techniques, physical and biochemical non-thermal processing techniques and storage methods, singly and in combination, on enhancing the sterilization of liquid eggs and on maintaining and enhancing its functional properties, with a focus on the underlying mechanisms. Moreover, the potential of these techniques for industrial application is discussed. It is hoped that this review will provide theoretical guidance for processing technology innovation, product quality improvement and industrial production and application of liquid eggs.

Keywords: liquid eggs; emerging sterilization techniques; sterilization mechanism; quality control

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240531-266

中图分类号: TS253.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2024)21-0081-13

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 中国农业大学2115人才培育发展支持计划项目; 苏州农业职业技术学院博士提升计划项目(BS[2022]17)

第一作者简介: 王晓拓(1985—)(ORCID: 0009-0009-0097-1812), 女, 讲师, 博士, 研究方向为农产品加工与贮藏。

E-mail: wxt_912@126.com

*通信作者简介: 肖红伟(1982—)(ORCID: 0000-0001-6035-4677), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工技术与装备。

E-mail: xhwcaugxy@163.com

引文格式:

王晓拓, 李述刚, 陈宇航, 等. 液态蛋的新兴杀菌效果与功能特性调控技术研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(21): 81-93.
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240531-266. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Xiaotuo, LI Shugang, CHEN Yuhang, et al. Recent advances in emerging sterilization and quality control techniques for liquid eggs[J]. Food Science, 2024, 45(21): 81-93. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240531-266. <http://www.spkx.net.cn>

鸡蛋是最重要的营养食物来源之一^[1], 全球年消费量约为10 000亿枚^[2]。鸡蛋的凝胶、乳化、起泡等功能特性赋予产品独特的质地和外观, 在食品工业中应用广泛。然而, 鸡蛋作为变质食源性病原体的极好基质, 即使冷藏也极易腐烂变质。液态蛋因其运输和贮藏方便, 并能保留鸡蛋的营养和功能特性, 有效解决了带壳蛋壳污染、易碎等问题, 市场潜力巨大^[3]。2023年中国液态蛋产量为37.15万t, 需求量为36.19万t, 销售均价为11.08元/kg, 行业市场规模同比增长5%, 市场需求呈逐年增长趋势(共研产业咨询: 共研网)。

液态蛋是通过清洗、去除蛋壳、巴氏杀菌、均质、包装、冷藏等步骤制得的^[4]。它包括液态蛋清(liquid egg white, LEW)、液态蛋黄(liquid egg yolk, LEY)和液态全蛋(whole egg liquid, WEL)。沙门氏菌、单核细胞增生李斯特菌(以下简称单增李斯特菌)、大肠杆菌等是主要存在于WEL中的食源性微生物病原体, 目前采用巴氏杀菌以避免微生物风险。然而, 在传统的巴氏杀菌中, 过度的热处理不能完全杀灭微生物尤其是耐热微生物, 并会产生不良的风味, 导致营养成分降解以及功能特性下降, 影响产品品质^[5]。此外, 传统的低温巴氏杀菌, 可能导致沙门氏菌等尤其是耐热细菌无法有效灭活, 甚至会在温和的热环境中进入“复活”状态, 增加其进一步污染的可能性, 大大缩短其保质期, 并对公共卫生构成重大威胁^[5-6]。因此, 确保液态蛋的安全性就显得尤为必要, 在此基础上进一步提高液态蛋产品品质也是研究重点^[6]。

为了最大程度减少传统加热对液态蛋的负面影响, 越来越多的新兴加工技术得到了广泛关注, 如超高温巴氏灭菌、连续流动微波加热^[7]、射频加热及欧姆加热等热加工技术^[8-9], 以及高静压^[10-11]、脉冲电场^[12-13]、高压CO₂^[14]、紫外线杀菌^[15-16]、辐照^[17-18]、超声波^[18]等物理非热加工技术或其组合技术等被广泛应用于液态蛋的杀菌, 旨在提高杀菌效果、保持和提升产品品质、延长保质期。对于大多数致病菌, 适当的复合技术由于技术间的协同增效作用可能会比单一处理在杀菌效果和品质保持上更具优势^[19]。然而, 由于装备技术、装备生产及维

护成本高等问题, 这些技术目前尚未得到大规模地工业上的推广应用。此外, 还有通过添加噬菌体混合物^[20]、蛋清蛋白酶解物^[21]、乳酸链球菌肽与乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)复配^[22]、磷脂酶(phospholipase, PL) A₂^[23-24]等生物化学手段来提升杀菌效果, 提高乳化性能和热稳定性, 并通过上述新兴加工技术间的复合以及与冷藏、冷冻^[25]、高静压^[26]等贮藏方式形成的复合新技术以最大限度地杀灭微生物, 保持和提升液态蛋品质尤其是功能特性。

为此, 本文系统探讨相关新兴热处理及非热处理技术(包括物理、生物化学技术及其复合技术)、贮藏技术及其复配技术对液态蛋的杀菌效果以及对其品质尤其是功能特性影响(图1), 并对相关技术的作用机理、复配技术的协同增效机理及其技术优缺点、技术应用前景进行重点阐述, 以期对液态蛋深加工技术革新、产品品质升级以及工业化生产及应用提供一定的理论指导。

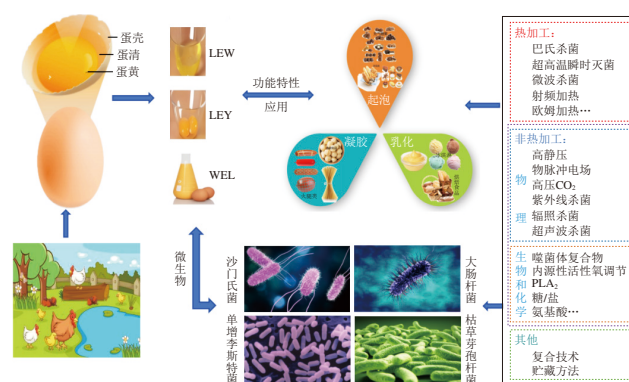


图1 蛋液加工的主要技术及作用

Fig. 1 Major processing and storage techniques for liquid eggs

1 液态蛋的特征功能特性

WEL富含营养, 其主要组成LEW和LEY的成分及占比如表1所示。LEW富含球蛋白, 具有紧凑的蛋白质三级结构, 而LEY因其独特的脂质和蛋白质结构及组成, 分别赋予多种食品配方出色的起泡、凝胶和乳化特性, 其形成机理见表2。

表 1 LEW和LEY的组成				
Table 1 Chemical composition of LEW and LEY				
WEL组成	主要成分	相对含量/%	细分组分	参考文献
LEW (60%)	水	88		
	蛋白质	10.5	卵白蛋白54% 卵转铁蛋白13% 卵黏蛋白11% 卵黏蛋白-溶菌酶6.7%	[7,27]
	灰分	0.8		
	碳水化合物	0.5		
	脂质	0.2		
	水分	50		
LEY (36%)	脂质	30	低密度脂蛋白68% 高密度脂蛋白16% 磷脂酰丝氨酸4% 卵磷脂10%	[25,28]
	蛋白质	16		
	其他	≤4		

表 2 WEL、LEW和LEY的功能特性形成机理及其应用领域				
Table 2 Formation mechanism of functional characteristics of WEL, LEW and LEY and their application fields				
功能特性	成分	形成机理	应用领域	
起泡	LEW	卵转铁蛋白与球蛋白、卵黏蛋白及其与溶菌酶复合物在高速搅拌过程中结合,产生丰富而稳定的气泡结构 ^[29]	烹饪、烘焙、充气糖果	
	WEL	空气-水界面可吸附卵白蛋白、溶菌酶和卵黏蛋白从而形成坚固的界面膜来稳定泡沫,但蛋黄中低密度脂蛋白在界面上展开后导致中性脂质流出会使蛋白质从界面脱落,破坏了网络结构,最终导致泡沫塌陷 ^[30]	烹饪、烘焙 ^[9]	
凝胶	LEW	部分折叠的蛋白质通过氢键或疏水相互作用介质会形成有序的三维结构或蛋清蛋白间随机的相互作用导致凝胶的形成 ^[31] ,略微透明或浑浊凝胶的硬度最大 ^[32] 卵白蛋白中的自由-SH基团的差异可能会影响热诱导蛋白质凝胶化 ^[33]	肉制品、面制品、鱼糜制品	
	LEY	通过增加黏度和持水能力,显著改善功能性食品的形状和质地,从而保持其胶黏性 ^[34]	肉制品、海产品	
乳化	LEY	亲水亲油的特性使其可以吸附在油水两相界面,形成乳化液从而改善分散体系的理化性质与流变性质	蛋糕、冰淇淋、蛋黄酱	

WEL及LEW的起泡性能及其稳定性主要取决于温度、贮藏时间等^[35-36]。WEL及LEW组分不同,起泡能力及形成机理也有所不同。LEW因其优异的发泡性能,可在烹饪和烘焙过程中用来增加产品附加值和风味。值得关注的是,蛋清由于其表面疏水性而具有改善起泡性能的作用,但在加工过程中其功能会有所降低^[37-39]。WEL富含蛋白质和脂质,导致其泡沫稳定性较LEW有所降低。可见,泡沫稳定性与界面组分变化之间存在一定的相关关系,这为设计合适的杀菌和贮藏方法以最大限度地保持和提升液态蛋起泡特性奠定了理论基础。

凝胶化是蛋清蛋白的一种关键功能特性,而蛋黄中丰富的蛋白质则赋予其独特的凝胶特性。此外,蛋黄中含有的大量天然乳化剂可改善食品的外观及口感。然而,由于蛋白质的热敏性,热处理会导致蛋清蛋白质变性、聚集,最终导致功能性蛋白质性质的劣变,从而影响凝胶形成能力和起泡性能,进而影响产品的流变性和质地特性^[40]。而作为蛋黄中主要组成成分的低密度脂蛋白也极易受到热处理等外部条件的影响,从而容易聚集并增加黏度产生热聚集现象,导致其热稳定性及乳化性

能降低。但蛋黄蛋白的热敏性高于蛋清蛋白^[41],即理论上在热加工过程中LEY的灭菌温度可略高于LEW。

此外,研究液态蛋在加工过程中的流变学性质变化,对其应用体系的加工工艺、质量控制及食品的质构和风味有着很重要的作用,也为液态蛋的管道运输、搅拌混合、均质杀菌等工艺条件的确定提供关键的数据基础^[42]。蛋白溶解度是鸡蛋蛋白质能够发挥其他功能性质的关键因素,与蛋白质的表面疏水性及离子化有关,同时还与外界环境如温度、压力等有关。

总之,液态蛋因其卓越的功能特性而广泛应用于食品加工中。然而,液态蛋中复杂的组成和结构决定了其对食品加工品质影响的复杂性。此外,在巴氏灭菌过程中,蛋白质发生变性,从而影响液态蛋的理化性质,进而影响凝胶化、乳化和起泡等功能特性。同时,不同功能特性之间存在增效或劣化的不同影响^[8]。因此,在液态蛋类产品的生产及潜在应用中,研究LEW、LEY和WEL杀菌效果以及如何保持和提升其功能特性具有重要指导意义和借鉴价值。

2 液态蛋的新兴热杀菌效果与功能特性调控技术

2.1 传统巴氏杀菌技术

巴氏杀菌由于其操作简单、快速且成本较低,已成为液态蛋生产中普遍选用的热杀菌方式。57~64.5℃保持一段时间可有效杀灭食品中存在的病原体、细菌和其他微生物等,从而提高食品整体安全性及延长保存期,但各国对巴氏杀菌条件的要求也不尽相同(表3)。此外,由于蛋清蛋白质的高度热敏性,巴氏杀菌60~75℃不可避免地会对LEW的质量产生负面影响,如溶解度降低、蛋清蛋白质颗粒变大、黏度降低、表面疏水性提高、凝胶强度增加等,尤其是起泡性能及泡沫稳定性的降低^[43]。加工过程中46%~78%蛋清功能特性损失是由高温引起的蛋清中卵转铁蛋白和卵白蛋白-溶菌酶的不可逆变性所致^[44-45],泡沫稳定性的降低可能与热处理导致的蛋清蛋白质不溶性聚集体的形成有关^[46-47]。然而经巴氏杀菌的液态蛋液仅能在4℃贮藏14~21 d。这可能与巴氏杀菌温度与时间协同条件下仍存活的蛋液中的嗜热菌、耐热细菌和孢子有关^[48],大大限制了液态蛋产业的发展。

表 3 不同国家对巴氏杀菌条件的要求及杀菌效果				
Table 3 Requirements of pasteurization conditions and sterilization effects in different countries				
国家/地区	杀菌温度/℃	杀菌时间/min	杀菌效果	4 ℃贮藏时间/d
美国	56.7	1.75	可杀灭大部分沙门氏菌、单增李斯特菌及大肠杆菌 ^[8]	14~21
英国	57.2	2.5		
澳大利亚	55.6	1		
北爱尔兰	63.3	≥2	彻底消除液态蛋中的初始微生物菌落 ^[49]	
中国	64.5	3		

2.2 新兴热杀菌技术

鉴于传统低温巴氏杀菌法杀菌效果不完全而导致的杀菌后保质期短以及存在的食品安全方面的隐患，开发具有更强的杀菌效果、改善产品品质、降低能源消耗和成本的方法对于加工易腐和热敏的低水分食品产品至关重要，如超高温巴氏灭菌、连续流动微波加热、射频加热、欧姆加热等，具体杀菌原理、杀菌条件、杀菌效果以及品质保持与提升效果详见表4。

从表4可以看出，与传统巴氏杀菌技术相比，在合适的各技术参数条件下，射频加热表现出更为优异的杀菌效果，但在功能特性及其稳定性方面与传统巴氏杀菌无显著差异^[61]。在品质保持和提升方面，经超高温巴氏灭菌技术的液态蛋在贮藏期间表现出较优的乳化和起泡稳定性^[50]，黏度、凝胶强度和可溶性蛋白质含量也均有所提高^[62]。连续流动微波加热技术因其能够实现大面积加热，无需中间热传递介质^[63]，可确保产品品质的均匀性^[64]。此外，微波辅助磷酸化修饰是提高蛋清蛋白发泡能力的一种可行方法^[57]，其引发的卵白蛋白与葡萄糖的美拉德反应可以显著提高卵白蛋白的抗氧化和乳化性能^[58]。近年来，微波与热空气、水浴^[53]以及与超声波的

结合^[54]，可在较短的时间内有效降低病原体的数量而不影响蛋品品质^[55-56]。而欧姆加热因其更快速均匀加热和杀菌^[65]，可提高WEL的表现黏度、起泡性能、凝胶强度及4℃条件下贮藏稳定性^[59]，有效提高了蛋液抗氧化、抗糖尿病和抗高血压活性^[60]。综上，新兴的热杀菌技术不仅在杀灭微生物以保障食品安全层面有所发展外，更是在保持食品功能特性方面有所突破，极大地满足了消费者对品质和食品安全的需求，促进了液态蛋在食品加工工业领域的发展深度和可能性。但杀菌的均匀性问题依然普遍存在于连续流动微波加热、射频加热及欧姆加热过程中^[66]。对相关技术参数与温度间的交互效应，仍有进一步探讨的空间，以提高热加工技术在液态蛋加工中的应用效果^[67]。

3 新兴非热杀菌技术对其杀菌效果及其功能特性的影响

相比蛋液的热敏性对热加工技术在蛋液杀菌应用领域的局限性，非热加工技术则显现出明显的优势，如非热物理加工技术（表5）、生物化学加工技术及其他相关技术与复配技术。探索和掌握其作用机理、应用前景对液态蛋产业的发展至关重要。

表4 新兴热杀菌技术对液态蛋的杀菌及品质影响

Table 4 Effects of emerging thermal processing technologies on the sterilization and quality of liquid eggs				
热杀菌技术	杀菌原理	杀菌条件	杀菌效果	品质保持与提升
超高温巴氏灭菌	较高温与较短时间的温度梯度引发的热效应可有效杀灭潜在的致病微生物，从而确保更长的产品保质期	温度：74℃ 时间：60 s	杀菌效果最佳	品质与传统巴氏杀菌无异，但在贮藏期间表现出较优的乳化和起泡稳定性 ^[50]
		温度：64、68、72℃ 时间：30、60、95 s	确保安全性	最大程度地保持和提高WEL的品质和功能特性 ^[51] 触发蛋白的结构转变，改善功能特性 ^[52] 辅助磷酸化修饰，提高蛋清蛋白发泡能力 ^[53] 提高卵白蛋白的抗氧化和乳化性能 ^[54]
连续流动微波加热	电磁场的热效应和生物效应共同作用，触发蛋白的结构转变从而改善功能特性 ^[55]	与热空气或水浴结合：1 h 水浴：57℃、20 min 微波：2 min	微波-热空气或微波-水浴组合加热，与单独水浴或热空气加热相比，显著缩短了杀菌时间，沙门氏菌减少量由3 (lg (CFU/g)) 提高至5 (lg (CFU/g))	与传统巴氏杀菌无差异 ^[55]
		与超声波结合：57℃、4 min、700 W	有效杀灭大肠杆菌5.18 (lg (CFU/g))	LEW的乳化性能、乳化稳定性和凝胶强度分别提高了6.83%、7.41%和77g ^[56]
		定向微波 微波加热、水浴保持 温度：56、60、64℃ 流速：8 W/mL和16 W/mL	有效杀灭沙门氏菌2 (lg (CFU/g)) 有效杀灭大肠杆菌（60℃）、金黄色葡萄球菌和沙门氏菌（64℃），降低病原体的数量5 (lg (CFU/g))	对品质和营养价值的影响未明确 ^[57] 蛋白品质未劣变；乳化和起泡性能提升 ^[758]
射频加热	300 kHz~300 GHz的高频电磁波穿透食物并灭活微生物	时间：220、285、180 s	WEL、LEW和LEY沙门氏菌的数量分别减少了5.62、4.36 (lg (CFU/g)) 和5.31 (lg (CFU/g))	与传统巴氏杀菌的功能特性及其稳定性方面无显著差异 ^[4]
欧姆加热	50~60 Hz低频交流电引入食品，食品本身的介电特性会使电能转化为食品内部的热能	65.5℃、3 min；70℃、1 min； 67℃、4.5 min 电压：70~110 V 温度：57、60℃和63℃		提高WEL的表现黏度达190%、起泡性能达28%和凝胶强度达15%，在4℃贮藏30 d仍稳定 ^[59] 与传统杀菌技术相比，70 V处理的液态蛋凝固能力略有差异，而110 V的较高电压可有效减少之间的差异 ^[60]

表5 新兴非热物理杀菌技术对液态蛋的杀菌效果

Table 5 Sterilization effects of emerging non-thermal processing technologies on liquid eggs					
技术	技术可控参数	蛋液类型	参数条件	杀菌效果	品质保持与提升
高静压	压力：100~1 000 MPa (最佳为400~600 MPa) 温度：室温~60℃ 时间：数分钟	WEL	200~400 MPa 3~17 min	总活细胞数降低了2 (lg (CFU/g)) ； 200 MPa: 沙门氏菌降低了5 (lg (CFU/g)) 以上； ≥350 MPa: 完全杀灭单增李斯特菌	≥350 MPa: 未发现明显蛋白质变性 & 颜色变化 ^[68-71]
			100 MPa ≥200 MPa		100 MPa: 蛋黄乳化稳定性升高； ≥200 MPa: 乳化稳定性降低 ^[72]
		LEW、LEY、WEL	300 MPa, ≥7.5 min		蛋清二级结构变化，发生蛋白质聚集现象影响蛋清起泡性 ^[73]
			200、250、300、350 MPa, 5 min	中温好氧菌的数量降低了3 (lg (CFU/g))	未见蛋白变性和颜色变化；高静压敏感性：LEW>WEL>LEY ^[74]
			150 MPa, 协同均质	沙门氏菌降低了3.5 (lg (CFU/g)) 以上	修饰蛋白，诱导展开和聚集；降低凝胶强度，增加表现黏度；发泡性和稳定性没有变化 ^[75]
		LEW	525~600 MPa, 2 min, 10、25、40℃		压力-温度间存在拮抗作用；蛋白质变性，焓值、溶解度和游离巯基含量降低；浑浊度和表面疏水性增加 ^[72]

续表5					
技术	技术可控参数	蛋液类型	参数条件	杀菌效果	品质保持与提升
脉冲电场	电场强度：10~50 kV/cm 脉冲宽度：0~100 μs 脉冲频率：0~2 000 Hz	WEL	300 MPa, 3 min结合巴氏杀菌 52 ℃/3.5 min或者55 ℃/2 min结合 2%乙基柠檬酸	缩短巴氏杀菌时间； 液态蛋中大肠杆菌K ₁₂ 和单增李斯特菌 BGA3532的数量降低了5 (lg (CFU/g)) 以上	理化性质无影响，乳化性能升高 ^[76]
		LEY	温合压力条件作为辅助预处理 技术与巴氏杀菌结合	缩短巴氏杀菌时间；沙门氏菌和单增李斯特菌 数量降低了6 (lg (CFU/g)) 以上	乳化性能升高 ^[76]
		WEL	25 kV/cm、2.12 μs	沙门氏菌降低了1 (lg (CFU/g))	黏度、电导率、颜色、pH值无明显变化；保质期延长 ^[13]
		WEL	25 kV/cm、2.12 μs、 55 ℃、3.5 min	沙门氏菌降低了4.3 (lg (CFU/g))	
		LEW	30 kV/cm、40 ℃、800 μs	沙门氏菌肠炎亚种、大肠杆菌和金黄色 葡萄球菌的数量分别降低了6.3、5 (lg (CFU/g)) 和3.8 (lg (CFU/g))	LEW的发泡性能没有改变，乳化性能和乳化 稳定性升高，分别为6.4%和11.3% ^[77]
		LEW	20~35 kV/cm、4~30 ℃	沙门氏菌降低了3.5 (lg (CFU/g)) 以上	产品特性无明显变化 ^[78]
		WEL	13.0 MPa; 45 ℃、400 r/min、 10 min; 50%工作容积比 温度、压力、加工时间增加	有效灭活天然微生物 效果变得更加明显 ^[80]	4 ℃条件下货架期延长至5 周；在贮藏7 d后，pH值与热处理WEL之间无差异 ^[79]
高压CO ₂	压力 (<50 MPa) 温度 (<50 ℃)	LEW、LEY、WEL	13.7 MPa、35 ℃、2 h	单增李斯特菌减少了1.25 (lg (CFU/g)) ； 沙门氏菌降至0；LEW细菌降低了 2 (lg (CFU/g)) ；WEL鼠伤寒沙门菌 降低了0.4 (lg (CFU/g))	颜色变为淡黄色 ^[81]
紫外线杀菌	波长：20~280 nm (253.7 nm 杀菌效果最强)	WEL	30 MPa、40 ℃、0~75 min		溶解度、游离巯基含量和表面疏水性升高；在60 min时发泡能力 (186%) 和 发泡稳定性最高 (72%) ；表观黏度降低 ^[4]
		WEL、LEY、LEW	9.22 J/cm ² 、21 ℃、39 min	肠炎沙门氏菌分别降低了3.8、5.3 (lg (CFU/g)) 和3.3 (lg (CFU/g))	低剂量的紫外线、美拉德反应带来的褐变程度低于巴氏杀菌； 黏度和pH值无变化 ^[82]
		LEW、LEY	750 J/m ² ； 5、15、25、37 ℃； 35、10、15 min		蛋白质的起泡特性及其稳定性得到改善，最佳杀菌时间分别为 10 min和5 min；蛋白和蛋黄中的蛋白质氧化劣变 ^[83]
		LEW	45.6 J/m ² 、40 min	大肠杆菌、肠炎沙门氏菌分别降低了 1.28 (lg (CFU/g)) 和1.98 (lg (CFU/g))	脉冲紫外光处理保持LEW发泡能力和稳定性；蛋清的pH值、 脂质氧化、浊度和颜色变化与处理强度有关 ^[84]
		LEW	Co-60γ: 0、2.5、5 kGy		发泡能力升高；泡沫稳定性降低；随着剂量的增加，蛋清浊度增加；蛋白质氧化明显 ^[84]
		LEW	33 kGy; 结合超声波300 W、6 min		LEW发泡能力峰值为92.6%；溶解度、粒径和pH值降低，泡沫稳定性升高 ^[19]
		LEW	3.4 kGy/h; 0、1、3、5 kGy		蛋清蛋白的乳化性升高和乳化稳定性降低；乳液的弹性和黏度降低 ^[17]
辐照	γ射线: Co-60 电子束: 10 MeV的 电子加速器	WEL	1.5 kGy	沙门氏菌的数量降低了约4 (lg (CFU/g))	色泽和热性能不受影响 ^[85]
		LEW、LEY	3.0 kGy		LEY和LEW的氨基酸组成以及LEY的脂肪酸组成也保持不变 ^[86]
		LEW	Co-60γ: 0~5 kGy		蛋清的起泡能力升高；蛋清黏度降低 ^[87]
		WEL	968 W/cm ² ； 35 ℃、20 min	有效杀灭沙门氏菌	全蛋液的黏度和凝固温度升高；耐热性升高；起泡能力和泡沫稳定性降低 ^[88]
		LEW	220 W、15 min; 180 W、25 min		与巴氏杀菌相比，蛋清发泡能力升高；泡沫稳定性降低 ^[18]
		LEW	频率: 20 kHz; 20 min		表面疏水性及乳化稳定性升高；表观黏度降低，起泡能力及稳定性降低 ^[80]
		LEW	20 kHz; 90、120、240、360、 480 W; 10 min		起泡能力升高显著；泡沫稳定性降低；黏度和表面张力降低；溶解度增加， 游离巯基和表面疏水性增加；经360 W超声处理后起泡率最高，为260.00% ^[89]
超声波	频率： 2×10 ³ ~1×10 ⁸ Hz	LEY	0、75、150、225、300 W； 10 min		蛋黄液的乳化性、起泡性和凝胶性升高；泡沫稳定性降低 ^[90]
		WEL	与溶菌酶联合处理 与微波联合处理		黏度和凝固温度升高，热稳定性升高；起泡能力和泡沫稳定性降低 ^[87] 乳化性能、乳化稳定性和凝胶强度分别提高了6.83%、7.41%和77 g

3.1 新兴非热物理杀菌效果与功能特性调控技术

3.1.1 高静压

压力会使细胞膜磷脂层变薄，通透性增加，导致物质流失和细胞死亡。同时，压力还会影响蛋黄乳化稳定性^[72]，改变蛋清二级结构并影响起泡性能^[73-74]。因此，高静压协同均质化处理^[75]、高静压结合低温巴氏杀菌^[72,76]组合技术可有效减少蛋液中的细菌含量，并在一定程度上改善乳化性能。此外，由于压力不会对共价键产生影响，因此较好地避免了液态蛋的维生素、风味化合物和颜色的损失。然而，在贮藏过程中，由于压力可能引起细胞亚损伤并促进细菌修复和恢复活力^[91]，从而导致液态蛋的迅速变质。在突发的压力变化下可能会造成食品

变形或损伤问题^[92]，且设备成本及维护费用较高（平均每公斤加工成本约为传统热处理方法的6 倍）^[93]。

3.1.2 脉冲电场

脉冲电场技术主要是通过脉冲产生的交替电场和磁场使细胞膜产生细小孔隙，增加膜的通透性，削弱膜的强度并破坏细胞膜，导致膜内物质流出，膜外物质渗入，从而杀死微生物^[94]。适当的脉冲处理能有效灭活液态蛋常见的腐败和致病微生物，延长货架期^[13,78-79]，并显著改善液态蛋的乳化性能及其稳定性。协同温度处理可以更进一步提高杀菌效率，保持产品品质。然而，脉冲电场与高静压类似，具有微生物亚致死细胞复活机制，高强度处理可能会对液态蛋的品质产生不利影响^[95-96]。此外，脉冲电场装置设计的复杂性增加了其成本。

3.1.3 高压CO₂

高压CO₂处理技术通过压力和温度的协同效应改变CO₂的分子特性^[97],达到超临界状态时,可潜在降低细胞内外的pH值,增加细胞膜的流动性和通透性,导致微生物功能紊乱,以干扰细胞代谢过程,并调节微生物的活动^[98-99]。该技术可有效杀灭LEY和LEW中的沙门氏菌和单增李斯特菌,适当延长贮藏期,并随着温度、压力和加工时间的增加,效果更显著^[100]。然而,对于WEL中沙门氏菌的灭活效果不佳,并导致单增李斯特菌数量增加了1倍,具体原因仍需进一步研究。此外,该技术可有效提高LEW的起泡能力和稳定性,这可能与蛋清蛋白质的溶解度、游离巯基和表面疏水性的增加有关,但对品质影响的全面评价以及相关机理的研究报道不多,还需要更加系统全面的评价。

3.1.4 紫外线杀菌

紫外线杀菌技术主要是由于DNA链上相邻的嘧啶碱基吸收大量200~280 nm波长范围的紫外光后会形成二聚体,从而阻止微生物进一步繁殖直至死亡。对液态蛋中沙门氏菌、单增李斯特菌和大肠杆菌有很好的灭活效果,但会导致明显的颜色和感官品质劣变。此外,紫外线杀菌技术可降低贮藏期间LEW蛋白质的细菌活性,并在一定程度上改善LEW的起泡性能及其稳定性,但会引发蛋白质的氧化^[101],可通过脉冲紫外线杀菌技术来改善,但较长的杀菌时间依然会加速蛋白质氧化,导致蛋白质变性。可见,紫外线杀菌时间是品质控制的关键^[16]。此外,与上述技术类似,紫外线杀菌同样会使受损的DNA分子修复,导致细菌再生。因此,有必要深入研究微生物的光激活机制,以确定避免光激活的最佳紫外线杀菌条件。

3.1.5 辐照

辐照技术利用X射线、γ射线和电子束使细胞内的物质发生电离和化学反应,从而产生离子、激发态或分子片段^[102],并通过与细胞中的其他物质相互作用,共同阻碍细胞内的各种活动,最终导致微生物死亡。该技术的灭菌效果主要受到pH值和温度的影响^[103],且不会对颜色、风味和热力学性能产生影响。随着辐照剂量逐渐增加,辐照后蛋清蛋白质分解促使起泡能力明显提高,蛋清黏度下降^[87]。此外,在改善液态蛋的乳化方面,辐照也展现出良好的发展潜力^[17]。超声-辐照联合预处理方法可提高蛋清起泡能力达92.6%。热辐射可有效提高杀菌效果,减少细胞存活数,效果均优于单独的热处理或辐照处理^[19]。然而,辐照处理不当,会使蛋液产生难闻的气味;此外还存在消费者对辐照食品安全性的误解和担忧问题,严重制约着辐照技术在蛋制品乃至更多领域的推广。

3.1.6 超声波

超声波技术可通过热、机械、空化等效应对食品的物理、化学、生物、结构等方面产生积极的影响。高强度的超声波会导致微生物细胞的细胞壁和细胞膜被破

坏,细胞质溶解,从而被杀灭^[104],并可有效提高LEW的起泡性能,且强度越高起泡性越好,但泡沫稳定性略有下降^[18],这可能与游离巯基含量的增加和表面疏水性的提高使蛋清蛋白更容易吸附在空气-水界面上有关,使其结构更加灵活^[80]。而用高强度超声波处理LEY,其乳化、起泡和凝胶能力显著提高,但起泡稳定性却有所降低^[90],具体的影响机理还需要进一步探究。联合超声波-溶菌酶、联合超声波-微波杀菌均可提高液态蛋的乳化性能及其稳定性和凝胶强度^[54],改善其贮藏期间的稳定性^[41]。此外,水浴超声波技术的工业化应用,为批量化生产高起泡性能、长保质期的LEW产品提供了可能,但具体的影响机理还需要深入地探究。

3.2 新兴生物化学杀菌效果与功能特性调控技术

3.2.1 噬菌体复合物

由于噬菌体具有高特异性和自我复制能力,已获得美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)批准,可安全用于家禽、红肉、鸡蛋、鱼类、贝类和采后水果蔬菜中控制沙门氏菌(2015年)。因此,噬菌体是确保食品安全的传统抗菌剂的可行替代品。有研究表明,在WEL中使用噬菌体可有效减少沙门氏菌的生长,在4℃的WEL中,24 h内细菌生长被降低至检测限以下^[105]。在噬菌体混合物对LEW和LEY的抑菌效果研究中也得到了类似的结论^[20]。与LEW相比,LEY需要更长的处理时间且细菌减幅有限,但在8℃时都能有效减少沙门氏菌数量,且未观察到再生现象^[20]。因此,噬菌体可能更适合于液态蛋的灭菌,因为在液态环境中,由于液体流动和活性细菌的移动^[106],噬菌体与宿主细菌相遇的可能性更高,增加噬菌体浓度可以产生更好的灭菌效果^[107],但对液态蛋品质影响的研究还需要深入探讨。

3.2.2 蛋清水解物

添加1%~5%的蛋清水解物有助于提高液态蛋的泡沫性和稳定性。1%蛋清水解物的添加量可使液态蛋产生更为丰富的泡沫,且具有更好的稳定性(较低的排水性)及黏度,气泡大小和分布均匀。在贮藏7 d内未发现沙门氏菌感染,将其用于饼干的大批量生产,消费者的整体可接受度最高^[21],具有一定的市场应用潜力。

3.2.3 内源性活性氧

内源性活性氧(reactive oxygen species, ROS)在调节蛋白质氧化方面起重要作用,可用于LEW的乳化和起泡性能调节方面^[108]。然而,蛋清蛋白质易受ROS氧化作用影响导致功能特性变化^[109]。若引发的氧化反应适度,可增强蛋清蛋白质的发泡和乳化性能,而过度氧化则降低其功能特性。有研究表明,在氧化初期,蛋清蛋白质分子之间存在稳定的交联,持续的ROS攻击加速了蛋清蛋白质的降解,且在有氧贮藏环境下该反应对起泡性能

的影响更为显著;此外,乳化性能呈先增加后减少的趋势^[110]。该研究为贮藏期间LEW功能特性的调节提供了新的思路,为LEW的氧化控制及其在食品工业中的应用提供理论指导,但相关深入的调控机理还未理清。

3.2.4 PL或中性、碱性蛋白酶

利用PLA₂对磷脂进行酶修饰,催化蛋黄卵磷脂中磷脂酰胆碱甘油主链sn-2位置的烷基醚键水解^[111],以提高LEY的乳化性能。一般在LEY中添加0.2%~1% (m/m)的PLA₂,于热灭菌前进行50℃/4 h、20℃/15 h或4℃/72 h的处理,可提高蛋黄蛋白的热稳定性^[112],并可显著提高处理后蛋黄的乳化性能、乳化稳定性和蛋白质溶解度^[113]。有研究表明,PLA₂处理可有效抑制液态蛋中的最耐热的枯草芽孢杆菌,将温度保持在55℃或低于15℃可以有效防止枯草芽孢杆菌在蛋黄中的生长^[23-24]。此外,经PLA₁处理的LEY具有更高的耐极端温度的能力,但PL修饰过程会产生大量游离脂肪酸,进而破坏LEY中的脂蛋白与溶菌磷脂酰胆碱和低密度脂蛋白形成的稳定的游离脂肪酸复合物,对进一步的贮藏不利^[113-114]。因此,有研究用中性及碱性蛋白酶对LEY的水解作用可提高LEY的热稳定性和乳化性能,其中碱性蛋白酶的作用效果更为显著^[115]。

3.2.5 糖、盐或多元醇

通过添加10%的糖或盐,LEY中蛋白质的热变性温度可分别提高3℃和6℃。这可能是因为NaCl影响LEY中的氢键形成,抑制水分子与蛋白质的亲水基团之间的相互作用,有利于保持蛋白质的天然状态,并且NaCl对蛋白质相互间的排斥作用具有保护作用,使得蛋白质难以聚集,从而提高了热变性温度。而蔗糖则是提高了球形蛋白质对化学变性和温度的构象稳定性^[116]。此外,糖和多元醇可提高乳球蛋白和其他球形蛋白的热变性温度^[117]。这可能是因为糖醇、氨基酸(脯氨酸、甘氨酸等)和甲基胺(甜菜碱、三甲胺氧化物等)在维持蛋白质结构和代谢的稳定性方面起到积极作用,并可延缓LEY的热聚集。添加3%的甜菜碱或脯氨酸可提高LEY的流变学热变性温度,并降低其黏弹性,这可能与甜菜碱LEY较强的表面疏水性和脯氨酸LEY良好的溶解性相关,同时两者均保持了LEY的乳化性能。也有研究表明蔗糖、阿拉伯糖、海藻糖和糖醇也可提高LEY的热稳定性,保持或提升其功能特性^[118]。但过高浓度的糖、盐或多元醇,不仅影响产品的风味,也会对人类健康造成潜在威胁^[119]。

3.3 液态蛋的其他杀菌效果与功能特性调控技术

3.3.1 杀菌与贮藏结合的杀菌效果与功能特性调控技术

结合时间-温度对WEL的杀菌效果非常有限^[120],而液态蛋置于冷链中的4~10℃温度波动^[121],均可能引起多种沙门氏菌的复苏和再生^[122],严重影响液态蛋的销

售。而蛋黄由于其独特的蛋白质结构和组成,如卵黄高磷蛋白、脂蛋白等,贮藏过程中极易腐烂变质,在商业化过程中,除进行适当杀菌外,选择正常的贮藏方式也至关重要。

3.3.1.1 温和灭菌-冷冻-糖类的复合技术

仅采用温和灭菌方法后进行冷藏无法有效杀灭细菌^[118]。低温冷冻(-18℃)可延长LEY保质期长达1 a。但也有报道称冷冻会导致蛋黄品质下降,如蛋黄颜色加深、质地变硬。经冷冻-解冻后,蛋黄液化呈现流动性,并形成凝胶状^[123],不利于蛋制品加工业的发展,这可能是由于冰晶化引起的脂蛋白(主要是低密度脂蛋白)变性和聚集^[124-125]。有研究将糖类用于调节LEY在冷冻-解冻过程中的凝胶化,包括蔗糖、L-阿拉伯糖、木糖醇、海藻糖、D-纤维二糖和木糖低聚糖。结果表明,L-阿拉伯糖和木糖醇是有效的凝胶化调节剂,其次是木糖醇,可较好地保持产品品质,这可能与分子质量低有关。冷冻-解冻后,加糖蛋黄蛋白聚集体和颗粒尺寸较小,聚集程度较弱,凝胶度较低,高效实现了对凝胶化的调控。此外,糖类缓解了冷冻过程中蛋黄蛋白 α -螺旋向 β -折叠的转换,导致暴露出的色氨酸残基数目较少^[25]。

3.3.1.2 乳酸链球菌素和EDTA复配

乳酸链球菌素(一种天然抗菌剂,唯一被FDA批准作为食品防腐剂的细菌素)含有34种氨基酸,在化学结构中的第27位是组氨酸^[126],可被革兰氏阳性微生物的细胞膜吸附,并促进膜的破裂,同时会破坏-SH基团^[127]。而对于革兰氏阴性细菌,如沙门氏菌或大肠杆菌,可以结合冷冻、热处理、脉冲电场、辐照或螯合剂来抑制其生长^[128]。EDTA作为一种被批准用于食品的添加剂,在颜色和风味稳定方面发挥着重要作用(FDA, 2023年),虽单独使用时对沙门氏菌没有杀菌作用,但与乳酸链球菌素复配,EDTA则会降低革兰氏阴性微生物外层脂多糖膜的屏障特性,增强抗菌剂效果^[127]。在7℃和10℃冷藏条件下,1 000 IU/mL乳酸链球菌素与20 mmol EDTA复配使用对巴氏杀菌全蛋液贮藏31 d的蛋液pH值和颜色影响不大,然而贮藏温度对微生物生长影响更为显著,并显示出协同作用。此外,威布尔模型可很好地描述10℃条件下货架期内单增李斯特菌在WEL中的生长^[22]。可见,该类添加剂结合适宜的巴氏杀菌温度和冷链温度,可以最小化与单增李斯特菌有关的食物安全风险。

3.3.2 非热预处理结合巴氏杀菌技术

高静压、脉冲电场或超声波等非热技术作为预处理技术与温度较低的传统巴氏杀菌(52℃/3.5 min和55℃/2 min)相结合,引起了越来越多的关注^[129-130]。然而,与传统巴氏杀菌在60℃/3.5 min和64℃/2.5 min的处理效果相比,这些复合技术的效果相对较差^[131]。因此,提出了一种先进行压力预处理(50~250 MPa/5 min),

之后在60℃条件下进行短时间(3 min)的巴氏杀菌,可使*Salmonella* Senftenberg 775/W菌株减少3.35~6.09(lg(CFU/g)),在压力 ≥ 200 MPa时达到了与传统巴氏杀菌相当或更好的灭活效果,可溶性蛋白和乳化活性有所降低,但整体上具备更高的黏度和更好的起泡能力,并有效改善了单独使用巴氏杀菌对品质的负面影响。在较短的巴氏杀菌之前采用中等压力处理的WEL显示出更高的可溶性蛋白(7%)和黏度(49%)、更好的乳化性能(27%~67%)和更低的总类胡萝卜素(9%),且感官方面未见明显差异^[132]。

3.3.3 曼诺热声

曼诺热声是一种将超声波、温和加热(40~70℃)和高压处理(200~500 kPa)相结合的技术,可导致气泡的快速剧烈塌陷,主要通过超声波处理来实现微生物的快速灭活^[133],并尽可能减少对食品品质的影响^[134]。因此,在曼诺热声的最佳温度下处理WEL所需的时间仅为传统热处理工艺的一半^[135],可有效灭活最耐热的沙门氏菌,其减少量是相同条件下热处理的3倍之多^[136]。而由于静态曼诺热声处理食品产品的温度分布随时间而发生变化,从而影响了对微生物灭活参数的精准评估^[137]。因此,需要对非静态(动态)条件下曼诺热声进行研究,以估计可靠的灭活参数并最大限度获取与参数估计相关的信息量^[133]。此外,动态曼诺热声处理((5.56 \pm 0.23) min)可达到与传统热处理巴氏杀菌相当的沙门氏菌灭活安全性^[9],但对WEL功能特性的影响还需要进一步探究。

4 结 语

新兴的液态蛋杀菌技术,在杀菌效果和功能特性调控方面具有一定的发展潜力。然而,将技术进行工业化生产应用和推广仍面临挑战,需要进一步研究来克服其局限性,主要体现在如下方面:1)新兴热杀菌技术如射频、欧姆加热技术存在温度分布不均的问题,尤其是对热敏性低水活性食品的连续流动。微波加热技术仍需进一步研究技术参数与热敏性低水活性食品之间的作用机理。2)新兴非热物理杀菌技术如高静压和脉冲电场装置复杂、设备成本和维护成本高昂,在加工与贮藏过程中可能会遇到微生物亚致死细胞复活(高静压、脉冲电场和紫外线杀菌)、促蛋白变性和脂肪氧化(高静压和紫外线杀菌)、杀菌不完全(高压CO₂和超声波)等问题。因此,有必要开展装备的研发,并全面评价其对品质影响,探究相关机理。3)新兴的生物化学杀菌技术为液态蛋杀菌效果及品质调控提供了新思路,但对品质影响的机理还需要深入地探讨,同时可注入更多的安全杀菌剂,以实现更加精准全面地调控。4)通过将不同方式

的杀菌与贮藏方式、非热预处理技术与传统热杀菌技术相结合,为杀菌效果和功能特性调控技术的开发提出了更多地可能性,但对复配技术的作用机理及作用效果还需要更多地关注。根据现有复合技术的作用效果,下一步可考虑合理引入更多有潜力的技术进行复配,以促进杀菌效果和品质间的协同增效,为批量化生产高品质、长保质期的液态蛋产品以及液态蛋加工技术装备革新提供可能,但具体的影响机理还需要深入地研究。5)由于LEW、LEY、WEL在组成成分和相关功能特性上存在差异,它们对相关技术耐受程度和效果也各不相同。这为精准地杀菌效果和功能特性调控提出了更高的要求,未来需要更多地研究以实现最小、最少处理条件以精准杀灭微生物。此外,与液态蛋相关的技术安全标准和限制还需要进一步完善。

对液态蛋的新兴加工技术的探索旨在应对传统巴氏杀菌方法在杀菌效果和功能特性保持方面所带来的挑战。特别是有针对性对LEW、LEY及WEL杀菌效果和对特征功能特性的保持与提升。此外,有限的贮藏方式和货架期也对新技术的探索提出了更高的要求,即延长保质期的同时保持并提升产品功能特性。

本文全面综述了各种热加工、非热加工方法,包括物理加工、生物化学加工方法以及复合加工方法对液态蛋杀菌效果和品质保持效果的影响,探索了更多更广泛的液态蛋贮藏方法,以最大限度地杀灭细菌、改善功能特性并延长液态蛋保质期。同时,评估了各类技术的优缺点。值得注意的是,尽管这些技术对液态蛋的杀菌效果和/或功能特性产生了积极影响,但目前大多数研究仅限于评估加工技术对液态蛋中单一或几种细菌菌株的杀菌效果。在未来的研究中,还需要更全面地对新型加工技术在液态蛋杀菌效果和品质提升方面的探索,理清每种微生物生长阶段的变化以及对微生物灭活的可变性和受损微生物恢复等问题。这对最小、最少处理条件以及精准杀灭微生物有十分重要的现实意义,为液态蛋深加工技术革新以及工业化生产应用提供一定的理论指导。

参考文献:

- [1] SARATALE R G, SUN Q Z, MUNAGAPATI V S, et al. The use of eggshell membrane for the treatment of dye-containing wastewater: batch, kinetics and reusability studies[J]. *Chemosphere*, 2021, 281: 130777. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.130777.
- [2] FRANCO D, ROIS D, ARIAS A, et al. Effect of breed and diet type on the freshness and quality of the eggs: a comparison between mos (indigenous Galician breed) and Isa brown hens[J]. *Foods*, 2020, 9(3): 342. DOI:10.3390/foods9030342.
- [3] JIN H B, PAN J J, ZENG Q, et al. Competitive adsorption of binary negatively charged proteins in egg white during foam evolution: from bulk solution to air-water interface[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 140: 108680. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.108680.

- [4] ZHU J Y, ZHANG D F, ZHOU X J, et al. Development of a pasteurization method based on radio frequency heating to ensure microbiological safety of liquid egg[J]. Food Control, 2021, 123: 107035. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.107035.
- [5] PYCARELLE S C, DELCOUR J A. The role and impact on quality of exogenous and endogenous lipids during sponge cake making[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 158-166. DOI:10.1016/j.tifs.2021.05.015.
- [6] JIN H B, SUN Y, PAN J J, et al. Adsorption kinetics of ovalbumin and lysozyme at the air-water interface and foam properties at neutral pH[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107352. DOI:10.1016/j.foodhyd.2021.107352.
- [7] YANG H Y, SUN M Q, YAN B W, et al. Continuous flow microwave processing of liquid whole egg: pasteurization and functional characteristics evaluation[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 90: 103495. DOI:10.1016/j.ifset.2023.103495.
- [8] WANG Q, YANG Y Q, LI Z, et al. Research advances on the effects of thermal and non-thermal processing techniques on the physicochemical properties and microbiological control of liquid eggs[J]. Food Control, 2024, 155: 110106. DOI:10.1016/j.foodcont.2023.110106.
- [9] BEITIA E, EBERT E, PLANK M, et al. Modelling of *Salmonella* Enteritidis inactivation in liquid whole egg under dynamic manothermosonication treatments[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 92: 103597. DOI:10.1016/j.ifset.2024.103597.
- [10] HUANG E, MITTAL G S, GRIFFITHS M W. Inactivation of *Salmonella enteritidis* in liquid whole egg using combination treatments of pulsed electric field, high pressure and ultrasound[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(3): 403-413. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2006.03.008.
- [11] BUZRUL S. High hydrostatic pressure applications on liquid whole egg[J]. World's Poultry Science Journal, 2021, 77(1): 71-90. DOI:10.1080/00439339.2020.1866963.
- [12] MARTÍN-BELLOSO O, VEGA-MERCADO H, QIN B L, et al. Inactivation of *Escherichia coli* suspended in liquid egg using pulsed electric fields[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1997, 21(3): 193-208. DOI:10.1111/j.1745-4549.1997.tb00776.x.
- [13] HERMAWAN N, EVRENDILEK G A, DANTZER W R, et al. Pulsed electric field treatment of liquid whole egg inoculated with *Salmonella enteritidis*[J]. Journal of Food Safety, 2004, 24(1): 71-85. DOI:10.1111/j.1745-4565.2004.tb00376.x.
- [14] SHENG L, ZU L L, MA M H. Study of high pressure carbon dioxide on the physicochemical, interfacial and rheological properties of liquid whole egg[J]. Food Chemistry, 2021, 337: 127989. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127989.
- [15] DE SOUZA P M, FERNÁNDEZ A. Rheological properties and protein quality of UV-C processed liquid egg products[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(1): 127-134. DOI:10.1016/j.foodhyd.2012.05.013.
- [16] OUYANG B N, DEMIRCI A, PATTERSON P H. Inactivation of *Escherichia coli* and *Salmonella* in liquid egg white by pulsed UV light and its effects on quality[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(5): e13243. DOI:10.1111/jfpe.13243.
- [17] LIU X J, HE L C, ZHANG M, et al. Effect of different doses of Co-60 gamma-ray irradiation treatment on the micro-rheological and emulsifying properties of liquid egg white[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 589: 124461. DOI:10.1016/j.colsurfa.2020.124461.
- [18] 高帮君, 张志鹏, 吴彬彬, 等. 起泡性专用蛋清液超声波杀菌工艺优化[J]. 食品科技, 2020, 45(7): 33-37.
- [19] YU Y L, ZHANG H, ZHU J, et al. Effect of ultrasound-irradiation combined pretreatment on the foamability of liquid egg white[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(12): 4312-4318. DOI:10.1111/1750-3841.15530.
- [20] HE J N, WONG C W Y, SCHULTZE D M, et al. Inactivation of *Salmonella* Enteritidis in liquid egg yolk and egg white using bacteriophage cocktails[J]. Current Research in Food Science, 2024, 8: 100703. DOI:10.1016/j.crfs.2024.100703.
- [21] HUANG P H, HAZEENA S H, QIU Y T, et al. Application of egg white hydrolysate (EWH) to improve frothing functionality of pasteurized liquid egg in large quantity production[J]. Heliyon, 2023, 9(1): e12697. DOI:10.1016/j.heliyon.2022.e12697.
- [22] BERMUDEZ-AGUIRRE D, NIEMIRA B A. Effect of nisin, EDTA, and abuse temperature on the growth of *Salmonella* Typhimurium in liquid whole egg during refrigerated storage[J]. Food Research International, 2023, 174: 113568. DOI:10.1016/j.foodres.2023.113568.
- [23] AHMAD N H, HUANG L H, JUNEJA V. One-step analysis of growth kinetics of mesophilic *Bacillus cereus* in liquid egg yolk during treatment with phospholipase A₂: model development and validation[J]. Food Research International, 2024, 176: 113786. DOI:10.1016/j.foodres.2023.113786.
- [24] HUANG L H, AHMAD N H, JUNEJA V, et al. Growth kinetics of *Bacillus cytotoxicus* in liquid egg yolk during treatment with phospholipase A₂—A one-step global dynamic analysis[J]. Food Microbiology, 2024, 118: 104420. DOI:10.1016/j.fm.2023.104420.
- [25] MA Z H, QING M M, ZANG J N, et al. Effects of freezing on the gelation behaviors of liquid egg yolks affected by saccharides: thermal behaviors and rheological and structural changes[J]. Poultry Science, 2024, 103(6): 103657. DOI:10.1016/j.psj.2024.103657.
- [26] BASSO F, MANZOCCO L, MAIFRENI M, et al. Changes in microbial, chemical, physical and techno-functional properties of liquid egg yolk during hyperbaric storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 187: 115380. DOI:10.1016/j.lwt.2023.115380.
- [27] SUN Y, JIN H B, SUN H H, et al. A comprehensive identification of chicken egg white phosphoproteomics based on a novel digestion approach[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(34): 9213-9222. DOI:10.1021/acs.jafc.0c03174.
- [28] GUERREROLEGARRETA I. Handbook of Poultry Science & Technology[M]. Hoboken: Wiley, 2010: 579-630.
- [29] DUAN X, LI M, SHAO J, et al. Effect of oxidative modification on structural and foaming properties of egg white protein[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 75: 223-228. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.08.008.
- [30] BATOOL Z, HU G, HUANG X Y, et al. A comprehensive review on functional properties of preserved eggs as an excellent food ingredient with anti-inflammatory and anti-cancer aspects[J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101347. DOI:10.1016/j.fbio.2021.101347.
- [31] CAMPBELL L, RAIKOS V, EUSTON S R. Modification of functional properties of egg-white proteins[J]. Die Nahrung, 2003, 47(6): 369-376. DOI:10.1002/food.200390084.
- [32] PHILLIPS G O, WILLIAMS P A. Egg proteins[M]//STRIXNER T, KULOZIK U, eds. Handbook of food proteins. Oxford: Woodhead Publishing Ltd., 2011: 150-209.
- [33] SUN Y X, HAYAKAWA S. Heat-induced gels of egg white/ovalbumins from five avian species: thermal aggregation, molecular forces involved, and rheological properties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(6): 1636-1642. DOI:10.1021/jf0109975.
- [34] MARTIN A H, BAKHUIZEN E, ERSCH C, et al. Gelatin increases the coarseness of whey protein gels and impairs water exudation from

- the mixed gel at low temperatures[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 56: 236-244. DOI:10.1016/j.foodhyd.2015.12.019.
- [35] LOMAKINA K, MÍKOVÁ K. A study of the factors affecting the foaming properties of egg white: a review[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2006, 24(3): 110-118. DOI:10.17221/3305-cjfs.
- [36] HILL C, EASTOE J. Foams: from nature to industry[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, 247: 496-513. DOI:10.1016/j.cis.2017.05.013.
- [37] JIA J, JI B, TIAN L J, et al. Mechanism study on enhanced foaming properties of individual albumen proteins by *Lactobacillus* fermentation[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106218. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106218.
- [38] ZHAO H X, ZHAO R X, LIU X S, et al. Effect of high intensity ultrasonic treatment on structural, rheological, and gelling properties of potato protein isolate and its co-gelation properties with egg white protein[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(4): 1553-1565. DOI:10.1111/1750-3841.16495.
- [39] FAN X, WANG Q, JIN H B, et al. Protein aggregation caused by pasteurization processing affects the foam performance of liquid egg white[J]. Food Chemistry, 2024, 446: 138881. DOI:10.1016/j.foodchem.2024.138881.
- [40] REN Y, WU J P, RENEMA R. Nutritional and health attributes of eggs[M]//GUERRERO-LEGARRETA I. Handbook of poultry science and technology. Hoboken: Wiley. 2010: 533-578. DOI:10.1002/9780470504451.ch28.
- [41] ZHANG Y Y, JIN H B, YANG Y Q, et al. Investigating the influence mechanism of interfacial protein and lipid changes on the foam properties of whole egg liquid[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109759. DOI:10.1016/j.foodhyd.2024.109759.
- [42] UYSAL R S, BOYACI I H, SUMNU G. Determination of pasteurization treatment of liquid whole egg by measuring physical and rheological properties of cake cream[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(6): e13167. DOI:10.1111/jfpe.13167.
- [43] CHAIYASIT W, BRANNAN R G, CHAREONSUK D, et al. Comparison of physicochemical and functional properties of chicken and duck egg albumens[J]. Brazilian Journal of Poultry Science, 2019, 21(1): 0705. DOI:10.1590/1806-9061-2017-0705.
- [44] LECHEVALIER V, GUÉRIN-DUBIARD C, ANTON M, et al. Pasteurisation of liquid whole egg: optimal heat treatments in relation to its functional, nutritional and allergenic properties[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 195: 137-149. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.10.007.
- [45] IWASHITA K, HANDA A, SHIRAKI K. Co-aggregation of ovotransferrin and lysozyme[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 416-424. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.11.022.
- [46] NICORESCU I, VIAL C, TALANSIER E, et al. Comparative effect of thermal treatment on the physicochemical properties of whey and egg white protein foams[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(4): 797-808. DOI:10.1016/j.foodhyd.2010.09.020.
- [47] VAN DER PLANCKEN I, VAN LOEY A, HENDRICKX M E. Effect of heat-treatment on the physico-chemical properties of egg white proteins: a kinetic study[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3): 316-326. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.04.019.
- [48] WANG J, GU L P, SU Y J, et al. Changes in microbial, physiochemical, and functional properties of pasteurized liquid whole egg during refrigerated storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(7): 2873-2879. DOI:10.1002/jsfa.10311.
- [49] KNOWLES N R. Observations on the microbiology of raw and heat-treated liquid egg[J]. Proceedings of the Society for Applied Bacteriology, 1953, 16(1): 107-118. DOI:10.1111/j.1365-2672.1953.tb00033.x.
- [50] 马静, 宋雨齐, 马帅, 等. 超高温巴氏杀菌对全蛋液功能性质和理化性质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 83-89. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.07.014.
- [51] DAWSON P L, MARTINEZ-DAWSON R. Using response surface analysis to optimize the quality of ultrapasteurized liquid whole egg[J]. Poultry Science, 1998, 77(3): 468-474. DOI:10.1093/ps/77.3.468.
- [52] CHANG C H, SU Y J, GU L P, et al. Microwave induced glycosylation of egg white protein: study on physicochemical properties and baking performance[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106569. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106569.
- [53] LI Z, SUN Y, JIN H B, et al. Improvement and mechanism of emulsifying properties of liquid egg yolk by ozonation technology[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 156: 113038. DOI:10.1016/j.lwt.2021.113038.
- [55] STADELMAN W J, SINGH R K, MURIANA P M, et al. Pasteurization of eggs in the shell I[J]. Poultry Science, 1996, 75(9): 1122-1125. DOI:10.3382/ps.0751122.
- [56] LIU B W, JIN F R, LI Y, et al. Pasteurization of egg white by integrating ultrasound and microwave: effect on structure and functional properties[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 79: 103063. DOI:10.1016/j.ifset.2022.103063.
- [57] LAKINS D G, ALVARADO C Z, THOMPSON L D, et al. Reduction of *Salmonella* Enteritidis in shell eggs using directional microwave technology[J]. Poultry Science, 2008, 87(5): 985-991. DOI:10.3382/ps.2007-00393.
- [58] YANG H Y, YAN B W, CHEN W, et al. Prediction and innovation of sustainable continuous flow microwave processing based on numerical simulations: a systematic review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 175: 113183. DOI:10.1016/j.rser.2023.113183.
- [59] ALAMPRESE C, CIGARINI M, BRUTTI A. Effects of ohmic heating on technological properties of whole egg[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 58: 102244. DOI:10.1016/j.ifset.2019.102244.
- [60] ALMEIDA ROSA D, DE TOLEDO GUIMARÃES J, CABRAL L A, et al. Effect of ohmic heating temperature and voltage on liquid whole egg processing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 89: 103490. DOI:10.1016/j.ifset.2023.103490.
- [61] JIAO Y, TANG J M, WANG S J. A new strategy to improve heating uniformity of low moisture foods in radio frequency treatment for pathogen control[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 141: 128-138. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.05.022.
- [62] LIU T, LV B, ZHAO W X, et al. Effects of ultrahigh temperature pasteurization on the liquid components and functional properties of stored liquid whole eggs[J]. BioMed Research International, 2020, 2020: 3465465. DOI:10.1155/2020/3465465.
- [63] ESTEL L, POUX M, BENAMARA N, et al. Continuous flow-microwave reactor: where are we?[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2017, 113: 56-64. DOI:10.1016/j.ccep.2016.09.022.
- [64] SALVI D, ORTEGO J, ARAUZ C, et al. Experimental study of the effect of dielectric and physical properties on temperature distribution in fluids during continuous flow microwave heating[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(2): 149-157. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2009.01.009.
- [65] PARMAR P, SINGH A K, MEENA G S, et al. Application of ohmic heating for concentration of milk[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(12): 4956-4963. DOI:10.1007/s13197-018-3431-4.

- [66] CAPPATO L P, FERREIRA M V S, GUIMARAES J T, et al. Ohmic heating in dairy processing: relevant aspects for safety and quality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 62: 104-112. DOI:10.1016/j.tifs.2017.01.010.
- [67] WANG C S, LLAVE Y, SAKAI N, et al. Analysis of thermal processing of liquid eggs using a high frequency ohmic heating: experimental and computer simulation approaches[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 73: 102792. DOI:10.1016/j.ifset.2021.102792.
- [68] NEMETH C, DALMADI I, FRIEDRICH L, et al. Pasteurization of liquid egg by high hydrostatic pressure (HHP) treatment[J]. African Journal of Microbiology Research, 2012, 6(3): 660-664. DOI:10.5897/AJMR11.900.
- [69] MUKHOPADHYAY S, SOKORAI K, UKUKU D, et al. Effect of high hydrostatic pressure processing on the background microbial loads and quality of cantaloupe puree[J]. Food Research International, 2017, 91: 55-62. DOI:10.1016/j.foodres.2016.11.029.
- [70] LUNG H M, CHENG Y C, CHANG Y H, et al. Microbial decontamination of food by electron beam irradiation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 44(1): 66-78. DOI:10.1016/j.tifs.2015.03.005.
- [71] YAN W, QIAO L W, GU X H, et al. Effect of high pressure treatment on the physicochemical and functional properties of egg yolk[J]. European Food Research and Technology, 2010, 231(3): 371-377. DOI:10.1007/s00217-010-1286-7.
- [72] VAN DER PLANCKEN I, VAN LOEY A, HENDRICKX M E. Kinetic study on the combined effect of high pressure and temperature on the physico-chemical properties of egg white proteins[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(1): 206-216. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.09.018.
- [73] 张根生, 刘欣慈, 岳晓霞, 等. 超高压和巴氏杀菌对蛋清蛋白结构及起泡性能的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 119-126. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201130-307.
- [74] TÓTH A, NÉMETH C, PALOTÁS P, et al. HHP treatment of liquid egg at 200–350 MPa[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 950: 042008. DOI:10.1088/1742-6596/950/4/042008.
- [75] PANOZZO A, MANZOCCO L, CALLIGARIS S, et al. Effect of high pressure homogenisation on microbial inactivation, protein structure and functionality of egg white[J]. Food Research International, 2014, 62: 718-725. DOI:10.1016/j.foodres.2014.04.051.
- [76] RIBEIRO A C, CASAL S, DA SILVA J A L, et al. Improved egg yolk pasteurization using sublethal moderate pressure pre-treatments[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100166. DOI:10.1016/j.focha.2022.100166.
- [77] ZHAO W, YANG R J, TANG Y L, et al. Combined effects of heat and PEF on microbial inactivation and quality of liquid egg whites[J]. International Journal of Food Engineering, 2007, 3(4): 1256. DOI:10.2202/1556-3758.1256.
- [78] JEANTET R, BARON F, NAU F, et al. High intensity pulsed electric fields applied to egg white: effect on *Salmonella* Enteritidis inactivation and protein denaturation[J]. Journal of Food Protection, 1999, 62(12): 1381-1386. DOI:10.4315/0362-028X-62.12.1381.
- [79] GARCIA-GONZALEZ L, GEERAERD A H, ELST K, et al. Inactivation of naturally occurring microorganisms in liquid whole egg using high pressure carbon dioxide processing as an alternative to heat pasteurization[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2009, 51(1): 74-82. DOI:10.1016/j.supflu.2009.06.020.
- [80] ARZENI C, PÉREZ O E, PILOSOFF A M R. Functionality of egg white proteins as affected by high intensity ultrasound[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(2): 308-316. DOI:10.1016/j.foodhyd.2012.03.009.
- [81] WEI C I, BALABAN M O, FERNANDO S Y, et al. Bacterial effect of high pressure CO₂ treatment on foods spiked with *Listeria* or *Salmonella*[J]. Journal of Food Protection, 1991, 54(3): 189-193. DOI:10.4315/0362-028X-54.3.189.
- [82] DE SOUZA P M, FERNÁNDEZ A. Effects of UV-C on physicochemical quality attributes and *Salmonella enteritidis* inactivation in liquid egg products[J]. Food Control, 2011, 22(8): 1385-1392. DOI:10.1016/j.foodcont.2011.02.017.
- [83] ABDANAN MEHDIZADEH S, MINAEI S, KARIMI TORSHIZI M A, et al. Effect of UV irradiation, sample thickness and storage temperature on storability, bacterial activity and functional properties of liquid egg[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(7): 4414-4422. DOI:10.1007/s13197-014-1509-1.
- [84] LIU X D, HAN R X, YUN H, et al. Effect of irradiation on foaming properties of egg white proteins[J]. Poultry Science, 2009, 88(11): 2435-2441. DOI:10.3382/ps.2009-00063.
- [85] SERRANO L E, MURANO E A, SHENOY K, et al. D values of *Salmonella enteritidis* isolates and quality attributes of shell eggs and liquid whole eggs treated with irradiation[J]. Poultry Science, 1997, 76(1): 202-206. DOI:10.1093/ps/76.1.202.
- [86] BADR H M. Effect of gamma radiation and cold storage on chemical and organoleptic properties and microbiological status of liquid egg white and yolk[J]. Food Chemistry, 2006, 97(2): 285-293. DOI:10.1016/j.foodchem.2005.05.004.
- [87] SONG H P, KIM B, CHOE J H, et al. Improvement of foaming ability of egg white product by irradiation and its application[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2009, 78(3): 217-221. DOI:10.1016/j.radphyschem.2008.10.001.
- [88] BI X F, WANG X Q, CHEN Y, et al. Effects of combination treatments of lysozyme and high power ultrasound on the *Salmonella typhimurium* inactivation and quality of liquid whole egg[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 60: 104763. DOI:10.1016/j.ultsonch.2019.104763.
- [89] SHENG L, WANG Y B, CHEN J H, et al. Influence of high-intensity ultrasound on foaming and structural properties of egg white[J]. Food Research International, 2018, 108: 604-610. DOI:10.1016/j.foodres.2018.04.007.
- [90] XIE Y X, WANG J Q, WANG Y, et al. Effects of high-intensity ultrasonic (HIU) treatment on the functional properties and assemblage structure of egg yolk[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 60: 104767. DOI:10.1016/j.ultsonch.2019.104767.
- [91] MISIOU O, VAN NASSAU T J, LENZ C A, et al. The preservation of *Listeria*-critical foods by a combination of endolysin and high hydrostatic pressure[J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 266: 355-362. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2017.10.004.
- [92] ZACCONI C, GIOSUÈ S, MARUDELLI M, et al. Microbiological quality and safety of smoothies treated in different pressure-temperature domains: effects on indigenous fruit microbiota and *Listeria monocytogenes* and their survival during storage[J]. European Food Research and Technology, 2015, 241(3): 317-328. DOI:10.1007/s00217-015-2460-8.
- [93] KOUTCHMA T. Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods[J]. Food and Bioprocess Technology, 2009, 2(2): 138-155. DOI:10.1007/s11947-008-0178-3.
- [94] BARBOSA-CANOVAS G V, ZHANG Q H. Pulsed electric fields in food processing: fundamental aspects and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001: 17-28. DOI:10.1201/9781420015102.

- [95] JAEGER H, SCHULZ A, KARAPETKOV N, et al. Protective effect of milk constituents and sublethal injuries limiting process effectiveness during PEF inactivation of *Lb. rhamnosus*[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 134(1/2): 154-161. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2009.06.007.
- [96] RIVAS A, PINA-PÉREZ M C, RODRIGUEZ-VARGAS S, et al. Sublethally damaged cells of *Escherichia coli* by pulsed electric fields: the chance of transformation and proteomic assays[J]. Food Research International, 2013, 54(1): 1120-1127. DOI:10.1016/j.foodres.2013.01.014.
- [97] ILLERA A E, SANZ M T, BELTRÁN S, et al. Effect of high pressure carbon dioxide on polyphenoloxidase from *litopenaeus vannamei*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 109: 359-365. DOI:10.1016/j.lwt.2019.03.091.
- [98] BENITO-ROMÁN Ó, SANZ M T, ILLERA A E, et al. Pectin methylesterase inactivation by high pressure carbon dioxide (HPCD)[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2019, 145: 111-121. DOI:10.1016/j.supflu.2018.11.009.
- [99] ERKMEN O. Effects of dense phase carbon dioxide on vegetative cells[M]//BALABAN M O, FERRENTINO G. Dense Phase Carbon Dioxide. Hoboken: Wiley, 2012: 67-97.
- [100] ILLERA A E, SANZ M T, BELTRÁN S, et al. High pressure CO₂ solubility in food model solutions and fruit juices[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2019, 143: 120-125. DOI:10.1016/j.supflu.2018.07.009.
- [101] GABRIEL A A, VERA D D, LAZO O M Y, et al. Ultraviolet-C inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Salmonella enterica* in liquid egg white[J]. Food Control, 2017, 73: 1303-1309. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.10.060.
- [102] FARKAS J, EHLERMANN D, MOHÁCSI-FARKAS C. Food technologies: food irradiation[M]//MOTARJEM Y. Encyclopedia of food safety. New York: Academic Press, 2014: 178-186. DOI:10.1016/B978-0-12-378612-8.00259-6.
- [103] SCHAFFNER D F, HAMDY M K, TOLEDO R T, et al. *Salmonella* inactivation in liquid whole egg by thermoradiation[J]. Journal of Food Science, 1989, 54(4): 902-905. DOI:10.1111/j.1365-2621.1989.tb07909.x.
- [104] PANIWNKY L. Applications of ultrasound in processing of liquid foods: a review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 794-806. DOI:10.1016/j.ultsonch.2016.12.025.
- [105] SPRICIGO D A, BARDINA C, CORTÉS P, et al. Use of a bacteriophage cocktail to control *Salmonella* in food and the food industry[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 165(2): 169-174. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2013.05.009.
- [106] MURRAY A G, JACKSON G A. Viral dynamics: a model of the effects of size shape, motion and abundance of single-celled planktonic organisms and other particles[J]. Marine Ecology Progress Series, 1992, 89: 103-116. DOI:10.3354/meps089103.
- [107] SEO J, SEO D J, OH H, et al. Inhibiting the growth of *Escherichia coli* O157:H7 in beef, pork, and chicken meat using a bacteriophage[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2016, 36(2): 186-193. DOI:10.5851/kosfa.2016.36.2.186.
- [108] KATERJI M, FILIPPOVA M, DUERKSEN-HUGHES P. Approaches and methods to measure oxidative stress in clinical samples: research applications in the cancer field[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2019, 2019: 1279250. DOI:10.1155/2019/1279250.
- [109] CHENG Y, CHI Y, GENG X H, et al. Effect of 2,2'-azobis(2-amidinopropane) dihydrochloride (AAPH) induced oxidation on the physicochemical properties, *in vitro* digestibility, and nutritional value of egg white protein[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 143: 111103. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111103.
- [110] LI J Y, WANG Z Y, XIAO N, et al. Endogenous reactive oxygen species (ROS)-driven protein oxidation regulates emulsifying and foaming properties of liquid egg white[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 268(Pt 1): 131843. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.131843.
- [111] DENNIS E A, CAO J, HSU Y H, et al. Phospholipase A₂ enzymes: physical structure, biological function, disease implication, chemical inhibition, and therapeutic intervention[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(10): 6130-6185. DOI:10.1021/cr200085w.
- [112] DAIMER K, KULOZIK U. Impact of a treatment with phospholipase A₂ on the physicochemical properties of hen egg yolk[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(11): 4172-4180. DOI:10.1021/jf703641e.
- [113] JIN Y G, HUANG D, DING T, et al. Effect of phospholipase A₁ on the physicochemical and functional properties of hen's egg yolk, plasma and granules[J]. Journal of Food Biochemistry, 2013, 37(1): 70-79. DOI:10.1111/j.1745-4514.2011.00608.x.
- [114] CASADO V, MARTÍN D, TORRES C, et al. Phospholipases in food industry: a review[J]. Methods in Molecular Biology, 2012, 861: 495-523. DOI:10.1007/978-1-61779-600-5_29.
- [115] GAO Y, LI J H, CHANG C H, et al. Effect of enzymatic hydrolysis on heat stability and emulsifying properties of egg yolk[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105224. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105224.
- [116] CAMPBELL L, RAIKOS V, EUSTON S R. Heat stability and emulsifying ability of whole egg and egg yolk as related to heat treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(3): 533-539. DOI:10.1016/j.foodhyd.2004.10.031.
- [117] ROMERO C M, LOZANO J M, SANCHO J, et al. Thermal stability of beta-lactoglobulin in the presence of aqueous solution of alcohols and polyols[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2007, 40(5): 423-428. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2006.10.003.
- [118] DIXON D K, COTTERILL O J. Electrophoretic and chromatographic changes in egg yolk proteins due to heat[J]. Journal of Food Science, 1981, 46(4): 981-983. DOI:10.1111/j.1365-2621.1981.tb02971.x.
- [119] ZHAO W F, CHI Y J, CHI Y. Saccharides alleviate the thermal instability behavior of liquid egg yolk: influence on rheology property, emulsifying property and protein conformation[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 143: 108853. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.108853.
- [120] PRIMACELLA M, WANG T, ACEVEDO N C. Use of reconstituted yolk systems to study the gelation mechanism of frozen-thawed hen egg yolk[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(2): 512-520. DOI:10.1021/acs.jafc.7b04370.
- [121] WHITING R C, BUCHANAN R L. Development of a quantitative risk assessment model for *Salmonella enteritidis* in pasteurized liquid eggs[J]. International Journal of Food Microbiology, 1997, 36(2/3): 111-125. DOI:10.1016/S0168-1605(97)01262-2.
- [122] MONGE BRENES A L, BROWN W, STEINMAUS S, et al. Temperature profiling of open- and closed-doored produce cases in retail grocery stores[J]. Food Control, 2020, 113: 107158. DOI:10.1016/j.foodcont.2020.107158.
- [123] SILVA F V M, GIBBS P A. Thermal pasteurization requirements for the inactivation of *Salmonella* in foods[J]. Food Research International, 2012, 45(2): 695-699. DOI:10.1016/j.foodres.2011.06.018.
- [124] MA Z H, MA Y Q, WANG R H, et al. Influence of anti-gelation agents on frozen egg yolk gelation[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 302: 110585. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2021.110585.

- [125] WANG R H, MA Y Q, ZHANG L Y, et al. Changes in egg yolk gelation behaviour and mechanisms during freezing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112223. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112223.
- [126] EGHBAL N, CHIHIB N E, GHARSALLAOUI A. Nisin[M]//DAVIDSON P M, SOFOS J N, BRANEN A L. Antimicrobials in food. Fourth ed. Boca Raton: CRC Press, 2020: 309-338. DOI:10.1201/9780429058196-8.
- [127] AND H C, HOOVER D G. Bacteriocins and their food applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2003, 2(3): 82-100. DOI:10.1111/j.1541-4337.2003.tb00016.x.
- [128] ALVAREZ I, NIEMIRA B A, FAN X T, et al. Inactivation of *Salmonella* Enteritidis and *Salmonella* Senftenberg in liquid whole egg using generally recognized as safe additives, ionizing radiation, and heat[J]. Journal of Food Protection, 2007, 70(6): 1402-1409. DOI:10.4315/0362-028X-70.6.1402.
- [129] ANDRÁSSY, FARKAS J, SEREGÉLY Z, et al. Changes of hen eggs and their components caused by non-thermal pasteurizing treatments II. some non-microbiological effects of gamma irradiation or hydrostatic pressure processing on liquid egg white and egg yolk[J]. Acta Alimentaria, 2006, 35(3): 305-318. DOI:10.1556/aalim.35.2006.3.8.
- [130] RAHMAN M S. Hurdle technology in food preservation[M]//SIDDIQI M W, RAHMAN M S, eds. Food engineering series. Cham: Springer International Publishing, 2014: 17-33. DOI:10.1007/978-3-319-10677-9_2.
- [131] MONFORT S, RAMOS S, MENESES N, et al. Design and evaluation of a high hydrostatic pressure combined process for pasteurization of liquid whole egg[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 14: 1-10. DOI:10.1016/j.ifset.2012.01.004.
- [132] RIBEIRO A C, BARBA F J, BARBER X, et al. Influence of pressure pre-treatments on liquid whole egg thermal pasteurization-microbiological, physicochemical and functional properties[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100293. DOI:10.1016/j.focha.2023.100293.
- [133] KAHRAMAN O, LEE H, ZHANG W, et al. Manothermosonication (MTS) treatment of apple-carrot juice blend for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 820-828. DOI:10.1016/j.ultsonch.2016.11.024.
- [134] BEITIA E, GKOGKA E, CHANOS P, et al. Microbial decontamination assisted by ultrasound-based processing technologies in food and model systems: a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(4): 2802-2849. DOI:10.1111/1541-4337.13163.
- [135] CONDÓN S, RASO J, PAGÁN R. Microbial inactivation by ultrasound[M]//BARBOSA-CANOVAS G V, TAPIA M S, CANO M P. Novel food processing technologies. Boca Raton: CRC Press. 2004: 423-442. DOI:10.1201/9780203997277.ch19.
- [136] MAÑAS P, PAGÁN R, RASO J, et al. Inactivation of *Salmonella* Enteritidis, *Salmonella* Typhimurium, and *Salmonella* Senftenberg by ultrasonic waves under pressure[J]. Journal of Food Protection, 2000, 63(4): 451-456. DOI:10.4315/0362-028X-63.4.451.
- [137] DOLAN K D, VALDRAMIDIS V P, MISHRA D K. Parameter estimation for dynamic microbial inactivation: which model, which precision?[J]. Food Control, 2013, 29(2): 401-408. DOI:10.1016/j.foodcont.2012.05.042.