

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80392

结构化修饰对蛋清乳化特性调控研究进展

杨芳涵 艾民珉 王梓源 郭善广 肖南

(华南农业大学食品学院, 广东 广州 510642)

摘要:鸡蛋的蛋清部分因蛋白含量高和食品功能特性优异,在食品加工领域被广泛应用。蛋清蛋白的两亲性结构和表面活性使其有效吸附于油水界面,降低界面张力并形成稳定的界面膜,从而在乳液体系中表现出良好的界面调控能力。文章系统介绍了蛋清蛋白多尺度乳液体系(纳米乳液、皮克林乳液和高内相皮克林乳液)的特征及其形成机制,总结了化学性修饰和物理性修饰对蛋清蛋白乳化性能的影响机制及其在调控蛋清蛋白乳化特性方面的研究进展。

关键词:鸡蛋;蛋清蛋白;乳化性;结构化修饰;多尺度特征

Research progress in regulating the egg white emulsification properties by structured modification

YANG Fanghan AI Minmin WANG Ziyuan GUO Shanguang XIAO Nan

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract: Egg white, valued for its high protein content and superior food functional properties, is widely utilized in food processing. The amphiphilic structure and surface activity of egg white proteins enable effective adsorption at oil-water interfaces, reducing interfacial tension and forming stable interfacial films. Therefore, egg white proteins exhibit a robust interfacial regulation capacity in emulsion systems. This review systematically outlines the characteristics and formation mechanisms of multi-scale emulsion systems of egg white proteins (nano-emulsions, Pickering emulsions, and high internal phase Pickering emulsions). Additionally, a summary is presented of the research progress on the chemical/physical modification mechanisms of egg white emulsification performance, as well as their role in modifying egg white emulsification properties.

Keywords: egg; egg white protein; emulsification property; structured modification; multi-scale feature

鸡蛋营养价值高,富含高消化特性的蛋白质,全价必需氨基酸、维生素、微量元素等营养物质。多项研究^[1]表明,鸡蛋中的蛋白质是天然食品中最优质的完全蛋白质,其人体消化率为98%,生物效价高达94%。蛋清表现呈淡黄色透明状,约占整个鸡蛋质量的60%,富含卵清蛋白、卵转铁蛋白等蛋白质,是一种以蛋白质(11%)为分散相,水(88%)为分散质的胶体溶液^[2]。

乳化性是蛋清的重要功能特性之一。蛋清的乳化性是指蛋清蛋白质有效降低水油界面张力,使油滴均匀分散于水相中,形成稳定乳浊液的能力^[3]。这种乳化作用在食品加工中运用非常广泛,如蛋糕、冰淇淋等加工。蛋清

的乳化作用不仅能赋予食品细腻、柔软的口感,还能增强食品的稳定性和促进脂溶性成分的溶解,使营养成分更易于被人体吸收,满足人们对食品营养的需求。

然而,蛋清本身具有一定的腥味,同时还含有一定量的抗生素蛋白质及蛋白酶抑制剂,在功能食品中直接加入蛋清蛋白会影响蛋白质的消化和吸收,造成蛋白质资源浪费^[4],限制了蛋清在食品行业中的应用。通过糖基化、磷酸化等化学改性,或采用超声、微波等物理方法对蛋白质进行修饰,可以增强其乳化性和稳定性,减缓蛋白质氧化降解,从而提高蛋白质的生物利用率。因此,文章拟介绍3种应用广泛的乳液体系,并对近年来国内外关于

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金省市联合基金(编号:2023A1515110947)

通信作者:艾民珉(1993—),男,华南农业大学首聘副教授,博士。E-mail: scauaiminmin@scau.edu.cn

收稿日期:2025-04-24 改回日期:2025-08-21

引用格式:杨芳涵,艾民珉,王梓源,等.结构化修饰对蛋清乳化特性调控研究进展[J].食品与机械,2026,42(2):206-215.

Citation: YANG Fanghan, AI Minmin, WANG Ziyuan, et al. Research progress in regulating the egg white emulsification properties by structured modification[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 206-215.

结构化多尺度修饰调控蛋清蛋白乳化性的研究进行综述,总结不同方法调控蛋清蛋白乳化性的优缺点,并指出未来的主要发展方向,以期为深入探究蛋清蛋白的乳化机理及优化策略提供依据,并为提高蛋清中营养成分的利用率和扩大蛋清作为乳化剂在食品行业中的应用范围提供参考。

1 蛋清蛋白乳化性能及其局限性

乳化是将一种液体以极微小液滴均匀分散在互不相溶的另一种液体中的过程。目前关于乳化活性的研究多关注富含脂质的蛋黄为主,而蛋清中不含胆固醇,适用范围更广,可避免高胆固醇带来的健康问题。蛋清蛋白所含人体必需氨基酸种类多,比例平衡,生物利用效率高,有利于预防心脑血管等疾病。蛋清蛋白是天然的两亲性物质,含有亲油和亲水基团,能自发迁移至油水界面或气水界面。油—水界面上的蛋白分子聚集后,其表面张力逐渐降低,形成亲油亲水的混合物^[5]。

乳化稳定性是衡量蛋清乳化性质的重要指标,反映蛋清蛋白质稳定乳化体系的能力。目前的研究多通过物理或化学等方法修饰蛋清蛋白,以提高其乳化性能和稳定性。孙乐常等^[6]研究发现,经冷冻干燥处理后的蛋清蛋白比表面积和溶解度增大,表面张力减小,乳化性能更佳;周玲等^[4]研究发现,当碱性蛋白酶用量为4%,底物浓度为3%,酶解时间为6 h时,可以降低水解蛋清蛋白液的起泡性能,增强乳化性能,有利于食品加工;李晶晶等^[7]研究表明,酶解絮凝耦联制备蛋清粉粒径较小,乳化稳定性提升明显;张川等^[8]发现,经热诱导制备质量比为1:3的蛋清蛋白/黄油复合凝胶网络结构更致密均匀,提高了蛋清蛋白的凝胶特性和乳化稳定性;赵笑蕾等^[9]的研究证实在水力空化处理后,蛋白质分子伸展,亲水基团暴露,增强了乳化活性和稳定性。然而,具有两亲性蛋清蛋白中大部分疏水基团被包埋在分子内部,导致其亲水性强,相较于大豆蛋白、乳蛋白等传统高性能乳化蛋白,蛋清蛋白的乳化性能与乳液稳定性较弱,亟待提升^[10]。

2 蛋清蛋白稳定的乳液特征

2.1 纳米乳液

纳米乳液又称为微乳液,是粒径在1~100 nm的具有热力学稳定性,透明或半透明的均相分散体系^[11]。纳米乳液与粗乳液和悬浮液等粗分散体之间的区别在于各自的稳定性差异。粗分散体是弱动力学稳定和热动力学不稳定体系,一般在几小时至几天内发生相分离。由于纳米乳液平均粒径更小,具备更好的抗聚集和絮凝的能力,常被认为是动力学稳定的体系,能保存的时间可达到几个月甚至更长^[12]。

蛋清蛋白基纳米乳液的长效稳定性在抑菌、防腐、延长食品保质期、提升食品风味等方面具有广阔的应用前

景。Rao等^[13]使用凝胶包埋法制备了不同pH条件下的卵清蛋白—香芹酚纳米颗粒并研究其抗菌特性,结果发现在pH值2.0条件下制备的卵清蛋白—香芹酚纳米颗粒对革兰氏阳性蜡样杆菌和沙门氏菌的最低抑制浓度较低,表现出更好的稳定性、包封率和抗菌活性;Long等^[14]开发了一种基于姜黄素、亚麻籽胶和蛋清蛋白的纳米乳液涂层,在不同程度上延缓了淀粉类物质的水分迁移,有利于其品质保持。

在实际应用过程中,蛋清蛋白基纳米乳液仍存在不可忽视的缺陷。①蛋清蛋白基纳米乳液在贮藏或加工过程中易发生聚集、絮凝或分层,导致乳液失稳,且对pH值、温度、离子强度等环境因素敏感,稳定性较差;②由于成本高和制备工艺较为复杂等原因难以大规模投入生产之中,在高温、高压或机械剪切等加工条件下,蛋清蛋白乳液界面膜强度不足,难以耐受剧烈加工条件,易发生结构破坏或功能丧失。总体而言,纳米乳液在食品工业中表现出的优异性能,在未来有望成为功能食品行业关注的重点。

2.2 皮克林(Pickering)乳液

Pickering乳液是以固体颗粒直接吸附在油—水界面上形成抗聚结的稳定乳液(图1)。Pickering乳液不仅保留了传统乳液的功能特性,还能利用固体颗粒实现乳液的稳定化。固体颗粒稳定乳液时降低了体系的自由能,为液滴之间构建了良好的界面机械屏障,从而有效保护了乳液液滴的形态,并赋予乳液更高的稳定性。此外, Pickering乳液还具有粒径分布可控、毒性低、生物相容性好等优点^[15]。

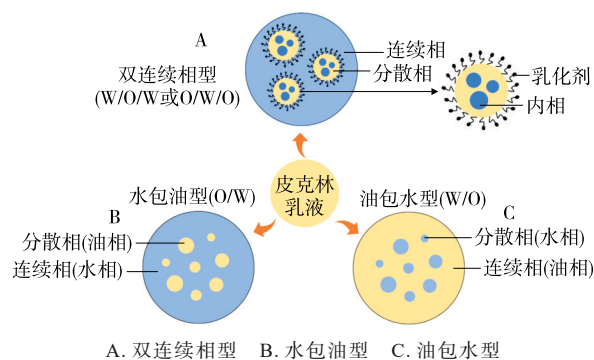


Figure 1 Common types of Pickering emulsions

蛋清是制备 Pickering 乳液的优质蛋白质原料。Zhan 等^[16]在蛋清蛋白—海藻酸盐纳米颗粒稳定的 Pickering 乳液研究中,提出了一种简便易行的方法,成功制备了基于蛋清蛋白的 Pickering 乳液,因其具有优越的热和冻融稳定性,而被广泛应用于奶油以及 3D 打印食品中的可食用油墨;潘晴楣等^[17]研究发现,蛋白含量对蛋清蛋白稳定的

Pickering 乳液有显著影响,在蛋白质含量为 4% 时,乳液各方面性能表现良好,稳定性较高;王春颖^[18]通过单因素试验法确定浓度为 2% 的蛋清蛋白微凝胶颗粒分散液制备的 Pickering 乳液在 8 000 r/min 离心 2 min 后,乳析指数为 0,且在 4 °C 下可稳定贮藏 30 d 以上,未出现乳析或破乳现象,表明其具有良好的离心稳定性和贮藏稳定性。

尽管实验室对 Pickering 乳液的成分、结构、功能特性等有较为深入的研究,但如何简单快捷、低成本地制备 Pickering 乳液以实现大规模工业化生产,仍是当前亟待解决的问题。此外,蛋清蛋白基 Pickering 乳液在实际应用中存在以下缺陷:① 蛋清蛋白对环境因素敏感,易发生变性或聚集,导致 Pickering 乳液稳定性下降;② 在生产与加工过程中,蛋清蛋白基 Pickering 乳液可能与食物中的表面活性剂、电解质等物质发生反应,影响其风味及贮藏时限^[19]。针对这些问题,目前常用天然生物大分子如多糖、蛋白等协同稳定 Pickering 乳液,以减少环境条件对其影响^[20],而构建高内相 Pickering 乳液体系也是扩大其应用范围的有效途径。田怀香等^[21]研究表明,寻求兼具油水两相亲和性的食品级微粒及具备功能优势的小分子化合物作为 Pickering 颗粒,并将微通道技术和膜乳化等高效乳化手段融入制备流程中,将是 Pickering 乳液未来的发展方向和潜在增长点。因此,若要将蛋清蛋白制成 Pickering 乳液应用到食品行业中,需要精确控制蛋白质含量,以降低成本,增强乳液稳定性,并进一步扩大其在食品、医药等领域的应用范围。

2.3 高内相乳液

高内相乳液又称为超浓缩乳液,通常指分散相体积占总体积比例 $\geq 74\%$ 的浓缩乳液体系,由于其具有极高的连续相和良好的界面性质,因此形成了与半固体相似的结构特征,并展现出普通乳液所不具备的特殊性质,如极高的黏度,卓越的稳定性以及优良的抗氧化性等^[22]。

制备高内相乳液的方法分为一步法和两步法(图 2)。由于高内相乳液属于热力学不稳定体系,因此在制备过程中通常需要加入表面活性剂来维持其稳定性^[25]。相较于十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、失水山梨醇单油酸酯(Span 80)、十二烷基硫酸钠(SDS)等小分子表面活性剂,蛋清蛋白具有良好的油水两相亲和性和绿色、安全的独特优势,是稳定高内相乳液的良好选择(图 2)^[26]。Yang 等^[27]研究发现,蛋清蛋白颗粒与鼠李糖脂复合物稳定的高内相乳液在鼠李糖脂充足的体系中表现出良好的稳定性;Zhang 等^[28]研究发现,蛋清蛋白能作为乳化剂有效稳定高内相乳液,而糖基化的蛋清蛋白高内相乳液更表现出了优异的物理稳定性和细胞抗氧化活性;郭建^[22]则通过试验对比了天然蛋清蛋白和经凝胶化处理后的蛋清蛋白所稳定的高内相 Pickering 乳液的区别。结果发现,天然蛋清蛋白稳定的乳液通过界面颗粒网络表现出更好的

离心和冻融稳定性,具有更强的界面网络和更小的液滴尺寸;在贮藏特性及氧化稳定性方面,凝胶化的蛋清蛋白所稳定的乳液体系表现出更优越的性能。两者在不同的应用场景下各有优势,实际上也扩大了蛋清蛋白乳液在生产实践中的应用范围。

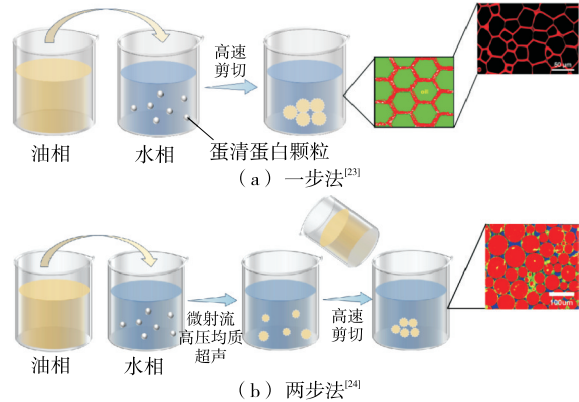


图 2 一步法和两步法制备高内相乳液

Figure 2 One-step and two-step preparation of high internal phase emulsions

3 化学性修饰调控蛋清蛋白乳化性

3.1 糖基化

糖基化反应是常见的蛋白质化学修饰方法之一。蛋白质糖基化反应本质上是指蛋白质分子侧链上的自由氨基与还原糖末端的羰基之间发生的羰氨反应^[29]。有关蛋白质进行糖基化改性的方法主要有干热法和湿热法两大类^[30]。通过糖基化作用,蛋清蛋白的表面活性和空间构象发生改变,进而对蛋清蛋白的凝胶性和乳化性等功能特性产生影响[图 3(a)]^[31]。Al-Hakkak 等^[32]研究发现,通过美拉德反应制备的蛋清—高甲氧基果胶(HMP)偶联物表现出了优异的乳化性能,并将乳液保持稳定的时间延长了 3~18 周;Kato 等^[33]利用 6-磷酸葡萄糖改性卵清蛋白,改性后卵白蛋白乳化性提高了 5 倍;胥伟等^[34]研究发现,选用葡聚糖与蛋清粉发生糖基化反应,蛋清粉的乳化活性随反应时间的延长不断提高,且前 3 d 的增幅显著;王晨莹^[35]研究表明,糖基化改善蛋清蛋白乳化性的主要机理有:① 糖基化使得原本包埋在蛋白质内部的疏水基团和电荷暴露出来,疏水基团在水—油界面发生变性并溶解于油滴中,而亲水的多糖部分则溶于水;同时,由于内部电荷的裸露,糖基化修饰后的蛋清蛋白制备的乳液 Zeta 电位也明显高于未修饰的蛋清蛋白制备的。② 糖基化蛋清蛋白具有较高的表面疏水性,能够有效抑制液滴的聚集并促进小液滴的形成,从而使乳液的粒径更小、更均一,进而增强了蛋清蛋白乳液的稳定性。

经过糖基化修饰后的蛋清蛋白既保留了蛋白质的表

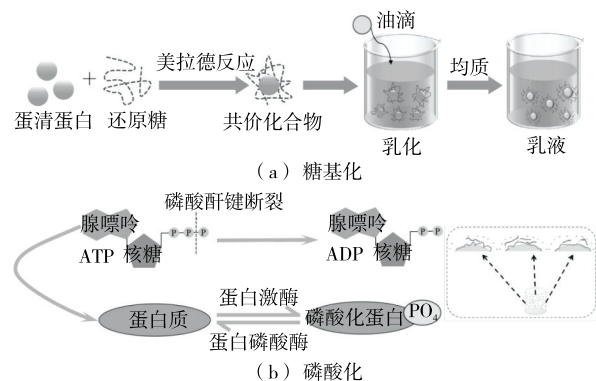


图3 蛋清蛋白质的糖基化、磷酸化修饰及其乳液稳定效应

Figure 3 Glycosylation and phosphorylation modifications of egg white proteins and their emulsion stabilization effects

面活性,又具备了多糖的亲水性能,在乳化性、抗氧化性、热稳定性等功能性质上均有了不同程度的改善。然而,糖基化反应过程中容易产生美拉德反应的副产物,如丙烯酰胺、羟甲基糠醛等,可能对食品安全和营养价值产生负面影响。同时,糖基化反应的效率和产物均一性难以精确控制,导致最终产品的质量稳定性较差。因此,如何优化糖基化反应条件,减少副反应并提高反应效率,是当前蛋清蛋白糖基化修饰技术亟待解决的关键问题。

3.2 磷酸化

蛋白质磷酸化反应是生物体内最常见、最关键的一种蛋白质翻译后修饰过程^[36]。磷酸化修饰的核心机理在于,通过向蛋白质氨基酸侧链引入一个带有强负电的磷酸基团发生酯化反应,从而改变蛋白质的构型、活性及与其他分子的相互作用能力,进而影响蛋白质的功能特性[图3(b)]^[37]。杨燃等^[38]对蛋清蛋白进行磷酸化修饰后,并全面分析了修饰位点及功能特性,揭示出磷酸化蛋白质在结合、催化等方面的重要作用;Lv等^[39]添加焦磷酸钠,且在温度为85℃、pH值为4.0的条件下干燥加热卵蛋白3d,发现磷酸化能够改变其热诱导的不溶性,并增强其乳化性质;Hayashi等^[40]利用焦磷酸盐对卵转铁蛋白进行干热磷酸化处理,同样观察到磷酸化后卵转铁蛋白的乳化等功能特性得到显著改善;Jafari等^[41]将磷酸化和微波处理的改性方法联用,通过扫描电子显微镜(SEM)分析发现磷酸化和微波处理减小了蛋清蛋白粉的粒径,同时增加了蛋白质分子的表面积,1.5%磷酸化预处理联用200W微波处理得到的蛋清粉乳化稳定性和乳化活性最高。

磷酸化改性技术是一种有效改善食物蛋白质功能特性的方法,常见的磷酸修饰方法可分为酶法磷酸化和非酶法磷酸化等^[42]。然而,酶法磷酸化虽可通过温和条件实现蛋白质功能性质的定向调控,且具备较高的生物安

全性,但其应用仍受限于磷酸激酶种类匮乏、磷酸基团引入量有限及ATP依赖导致的成本过高等瓶颈,难以满足工业化生产需求。非酶法体系中,高活性化学试剂(如 POCl_3 、 P_2O_5)易引发蛋白质交联及有毒副产物残留,存在安全性与营养损失风险^[43]。因此,开发兼具高效性、可控性与安全性的位点特异性磷酸化技术,实现蛋清蛋白乳化性的精准修饰,是拓展其工业化应用的关键突破方向。

3.3 酰基化

酰基改性主要通过蛋白分子的亲核基团(如氨基)与酰基试剂发生相互作用,接入具有新功能的基团,增加蛋白质分子表面的负电荷,使多肽链伸展以及改变蛋白质的部分空间结构,这些变化共同提高了蛋白质分子的柔韧性,进而改善了蛋白质的溶解性、持水吸油性以及乳化性等性质,常用的酰基试剂有琥珀酸酐与乙酸酐等^[44]。Gandhi等^[45]研究表明,用3,3-二甲基戊二酸酐对蛋清蛋白进行改性能显著提高其热稳定性和乳化能力,但发泡能力并未得到提升;Lawal^[46]研究则发现,琥珀酰化不仅能使包埋在蛋白质内部的官能团暴露出来,增强蛋白质与油界面的相互作用,还增加了油滴周围界面膜电离层的电势,使油滴颗粒难以聚结,从而显著提升了蛋白质的乳化性能;Wu等^[47]通过超声辅助琥珀酰化的方法修饰蛋清蛋白,发现其溶解度和电负性显著增强,同时二级结构由无序转变为有序,乳化性能也得到了显著改善;Ma等^[48]研究表明,高度琥珀酰化的蛋清蛋白固体的乳化能力、乳化活性指数和乳液稳定性指数均有所增加,其中乳液稳定性指数的增加最为明显。

尽管酰基改性因其显著的改性效果和低成本的优点已被广泛应用于多种蛋白质的改性,但高度琥珀酰化后的蛋清蛋白仍存在一些缺点,如降低了发泡性和发泡稳定性^[49],说明对蛋清蛋白进行酰基化修饰的条件还需进一步优化。例如,利用超声等物理方式辅助改性,在改性过程中选用不同类型和数量的酰基化试剂,并对酰基化蛋清蛋白的安全性和生物利用率进行更深入的探究以规避酰基化作用带来的弊端,有助于未来在生产过程中根据需求改变修饰条件,进而制造出符合需求的酰基化蛋清蛋白。

3.4 氧化修饰

经研究^[50]证实,甲硫氨酸、半胱氨酸、组氨酸和酪氨酸等氨基酸残基容易遭受具有高反应活性的活性氧的攻击。由于蛋清蛋白富含游离氨基,因此氧化成为其主要的化学修饰途径之一^[51]。在氧化修饰过程中,蛋清蛋白质的主链、脂肪族氨基酸侧链和芳香族氨基酸侧链上的位点容易受到攻击,氧化剂通过夺氢、加氧、断裂和交联等方式导致蛋白质结构发生改变,进而影响其生理活性^[52]。

在加工和贮藏过程中,蛋清蛋白质与氧化剂、催化剂

和金属离子等的接触可能会诱发氧化反应的发生,通常有以下两个途径:①直接与活性氧系统相互作用导致的直接氧化;②与氧化反应的次级副产物共价结合引发的间接氧化^[53]。自由基作为活性氧系统中的主要组成部分,是蛋白质氧化的重要引发剂。目前,两种常见的自由基诱导氧化体系包括脂质氧化产物引发的过氧自由基氧化体系以及金属离子与过氧化氢(H₂O₂)结合所产生的羟自由基体系^[54]。牛思思^[51]采用由H₂O₂、FeCl₃和抗坏血酸组成的羟自由基氧化系统对蛋清蛋白进行氧化修饰,发现随着H₂O₂浓度的增加,蛋清蛋白的乳化能力及乳化稳定性均呈先增后减趋势;Li等^[55]分析了蛋清蛋白在内源活性氧介导的氧化作用下的理化性质和功能性质的变化,发现适度氧化条件下,蛋清蛋白能够通过调节自身结构变化来适应氧化环境,乳化性有所增强;然而,过度氧化则会导致蛋白质分子柔性减弱,蛋清蛋白结构由原本的有序、致密状态转变为松散、无序的状态,乳化性能呈下降趋势;这与Li等^[56]的结果相符,即约2 h的适度氧化能够改善卵清蛋白的乳化性能,其乳化活性指数和乳化稳定性指数相较于粗蛋白均有所提升;而3 h的过度氧化则降低了这些界面性能。

蛋清蛋白质经适度氧化后,其乳化能力及乳化稳定性均有所提升,但过度氧化则会降低其乳化性能,这主要与蛋白质的分子柔性有着紧密的关联。由于氧化通过影响蛋白质柔性进而改变其乳化性的机理十分复杂,可能受到不同蛋白质种类、数量、氧化程度、氧化方式等因素的协同作用^[57]。

4 物理性修饰调控蛋清蛋白乳化性

4.1 超声处理

超声是指频率超过20 kHz的声波,主要分为两大类:①频率为100 kHz~1 MHz,场强低于1 W/cm²的高频率低场强声波;②频率为20~100 kHz,场强处于10~1 000 W/cm²范围内的低频率高场强声波^[58]。高功率超声波对蛋白质分子进行改性的主要机制与其产生的空化效应、机械效应等密切相关[图4(a)]^[59]。

空化效应导致蛋清蛋白内部结构发生变化,暴露出更多疏水基团,增强了空间位阻,从而提高了蛋清蛋白的乳化性能[图4(b)]^[60]。Jiang等^[61]通过单频超声和多频超声处理全蛋蛋白粉,并与真空条件下的蛋白粉进行对比,发现单频超声真空干燥和双频超声真空干燥的全蛋蛋白粉乳化性能分别提升了18.56%和34.00%;Asaithambi等^[62]研究显示,超声处理的蛋清蛋白样品相比对照组具有更高的乳液稳定性,这归因于超声使蛋清蛋白分子粒径减小,结构更加均匀,同时超声波增加了油滴分子间斥力,防止液滴聚集和絮凝;Abker等^[63]全面评估了高强度超声对蛋清蛋白乳液的影响,发现高强度超声

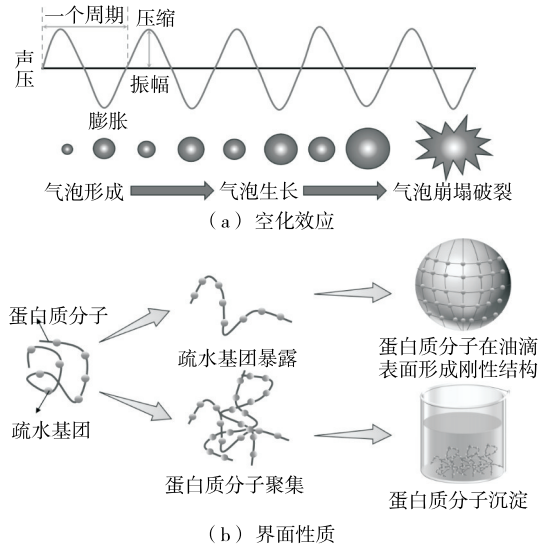


图4 超声对蛋白质改性的原理

Figure 4 Principles of protein modification by ultrasound

优化了乳液的微观结构,随着超声处理时间的延长,Zeta电位的绝对值增加,乳液的粒径和表面张力显著降低。此外,增加超声处理周期可降低蛋清蛋白乳液的黏度并增强其弹性,表明超声处理对改善蛋清蛋白的乳化性具有积极作用,为未来通过高强度超声调控蛋清蛋白乳化性的研究提供了理论支撑和试验依据。

作为绿色节能的物理改性技术,超声改性在蛋白质改性领域的应用日益广泛。然而,超声场虽能改善蛋清蛋白乳化性,但存在显著缺陷:高功率或长时间处理易导致蛋白质过度变性及氧化损伤(如巯基氧化和二硫键增加),削弱蛋清蛋白的溶解性、界面活性及乳化稳定性;同时可能降低凝胶性、起泡性等其他功能特性^[64]。因此,将超声处理与其他改性方法(如糖基化、磷酸化)结合使用,可获得更佳的改性效果^[65]。超声预处理可以打开蛋白质的空间结构,增加其与糖基或磷酸基团的反应位点,从而提高糖基化或磷酸化的效率;同时,超声辅助改性还能缩短反应时间,减少副反应的发生,提升改性产品的功能性和稳定性。

4.2 微波处理

微波是指频率处于300 MHz~300 GHz的电磁波^[66]。微波处理蛋清蛋白主要体现为“热效应”与“非热效应”两大作用。热效应是指食品吸收微波能转化为热量的现象^[67],非热效应指的是介质材料吸收电磁能后产生的,不能单纯归因于温度变化的系统响应^[68]。在微波作用下,蛋白质中的极性分子会发生高速振荡,分子间热运动加剧,从而破坏维持蛋白质空间结构的非共价键,改变蛋白质分子的空间结构和功能特性^[69]。

微波处理的时间和功率对蛋清蛋白的乳化活性和乳

化稳定性具有显著影响。刘丽莉等^[70]以 100~500 W 的功率对蛋清蛋白粉进行微波真空冷冻干燥,发现随着微波功率的增加,蛋清蛋白的乳化性能先增后减,当微波功率为 300 W 时,蛋清蛋白粉的乳化活性和乳化稳定性均达到最大值,此时蛋清蛋白粉的 Zeta 电位值最大,平均粒径最小,乳液液滴分布均匀;史胜娟^[71]研究表明,适度的微波作用可以打开蛋清蛋白之间的部分氢键,削弱范德华力,使分子结构变得松散,暴露出内部的疏水基团,从而提高蛋清蛋白对水油界面的乳化能力。然而,微波功率过高,蛋白质可能聚集形成聚集体,导致分子粒径增大,不利于乳液的稳定。陈红兵等^[72]研究发现,当微波功率为 80 W 时,蛋白质的结构先折叠,处理 30 s 后蛋白结构又展开;当微波功率为 640 W 时,处理时间较长的蛋白分子发生堆叠,这也验证了过高微波功率会使蛋清蛋白聚集,导致乳液稳定性下降。

微波改性蛋白质是一项具有广泛应用前景的技术,不仅在食品工业中的改性过程中得到了应用,还在食品熟化、真空干燥等方面展现出广泛用途^[73]。但微波改性仍存在加热不均匀易导致局部过热,引发蛋白质过度变性或聚集,降低溶解性和功能特性;同时高温可能破坏热敏性氨基酸(如赖氨酸)或诱发美拉德反应,生成潜在有害物质并影响风味等缺点^[74]。

4.3 高压脉冲电场

高压脉冲电场技术是一种通过在两个电极之间利用高压脉冲电源产生脉冲电场,对置于两电极之间的物质进行高电场强度、短脉冲宽度和高脉冲频率连续处理的技术,由于其效率高、成本低、对食品品质几乎无影响等特点在食品加工领域具有广阔的应用前景^[75]。

Fernandez-Diaz 等^[76]用 35 kV/cm 指数衰减波处理反超滤蛋清,与在 55 °C 下热处理蛋清 15 min 后的样品进行比较,发现蛋清的疏水性无明显变化,表明在此条件下脉冲电场对蛋清蛋白结构的改变作用有限;张铁华等^[77]通过调整电场强度和脉冲电场数,当电场强度为 30 kV/cm 时,蛋清蛋白的乳化性和乳化稳定性达到峰值,此时蛋清蛋白展现出最佳的乳化性能。然而,随着电场强度的进一步提升,蛋清蛋白溶液的乳化性和乳化稳定性均呈下降趋势。同时,在 30 kV/cm 的电场强度下,脉冲数的变化对蛋清乳化能力和乳化稳定性的影响并不显著。综合分析高压脉冲电场处理后蛋白质结构特征的变化,可以推测,适当的高压脉冲电场处理能够改变蛋清蛋白原本紧密的结构,使其展开并暴露出部分疏水基团和疏基,从而在特定处理范围内显著提升乳化功能。然而,随着电场强度和处理时间的增加,可能会促使大分子聚集物的形成,导致可溶性蛋白含量减少,进而引发乳液失稳^[78]。

虽然高压脉冲电场技术在食品工业中应用广泛,主

要集中在食品杀菌、物料干燥和辅助冷冻解冻等方面^[79],但关于其对蛋清蛋白或食品中其他有机大分子的影响结果仍存在一定的不确定性,适度的高压脉冲电场处理可以改善蛋白质的溶解性和表面活性,甚至增强其抗氧化能力,而过度高压脉冲电场处理导致蛋清蛋白质部分变性,破坏其二级和三级结构,从而影响其功能性质,这种不确定性的原因可能在于高压脉冲电场处理参数的多样性以及蛋白质本身的结构复杂性。

5 结语

近年来,蛋清因其高蛋白含量、低热量特性以及优异的乳化性和起泡性,在食品工业中得到了广泛应用。文中综述了包括化学修饰(如糖基化、磷酸化、酰基化和氧化修饰)和物理处理(如超声、微波和高压脉冲电场)等手段对蛋清多尺度乳液性能的影响机制,这些方法通过改变蛋清蛋白的构象和表面性质,显著提升其乳化性能。然而,蛋清蛋白组分复杂,不同蛋白质对乳化性能的贡献存在显著差异,且其作用机制尚未完全阐明。尽管已有研究初步探讨了蛋白质结构与乳化性能之间的关联,但在分子层面的机制研究仍较为匮乏,尤其是蛋白质构象变化、界面行为及其与乳化稳定性之间的内在关系仍需深入探索。此外,现有改性方法普遍存在局限性,如化学修饰引入副产物影响蛋白质的营养价值,物理处理则因参数不当导致蛋白质过度变性或功能丧失。因此,系统揭示蛋清蛋白的乳化机制,并探索多种改性方法的协同效应,以优化处理条件并精准调控蛋清蛋白的乳化性能,是未来研究的重点方向。

参考文献

- [1] 徐桂云. 鸡蛋品质及营养价值的新认识[J]. 中国家禽, 2012, 34(13): 36-38.
XU G Y. New understanding of egg quality and nutritional value [J]. China Poultry, 2012, 34(13): 36-38.
- [2] 王晓翠, 武书庚, 张海军, 等. 鸡蛋蛋清品质营养调控的研究进展[J]. 动物营养学报, 2019, 31(4): 1 491-1 498.
WANG X C, WU S G, ZHANG H J, et al. Nutritional modulation of egg albumen quality of laying hens: a review[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(4): 1 491-1 498.
- [3] 望运滔, 王营娟, 白艳红. 预处理技术改善蛋白质乳化性研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 211-215.
WANG Y T, WANG Y J, BAI Y H. Recent advances in pretreatment techniques to improve the emulsifying property of proteins[J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 211-215.
- [4] 周玲, 谢爱英, 汪学荣. 酶解对蛋清蛋白液起泡性能和乳化性能的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(24): 103-105.
ZHOU L, XIE A Y, WANG X R. Effects of hydrolysis on the foaming and emulsifying properties of egg white protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(24):

- 103-105.
- [5] 杨建荣, 吴越, 焦涵, 等. 物理、化学、生物法处理蛋黄颗粒对其乳化特性影响的研究进展[J]. 现代食品科技, 2022, 38(12): 129-138.
YANG J R, WU Y, JIAO H, et al. Research progress in the emulsifying properties of egg yolk granules after physical, chemical, and biological treatments[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(12): 129-138.
- [6] 孙乐常, 曾添, 林端权, 等. 干燥方式对蛋清蛋白理化性质和功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 102-111.
SUN L C, ZENG T, LIN D Q, et al. Effects of different drying methods on physicochemical and functional properties of egg white protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(24): 102-111.
- [7] 李晶晶, 蔡为荣, 朱樱, 等. 酶解絮凝耦联对咸蛋清脱盐及理化性质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(9): 202-212.
LI J J, CAI W R, ZHU Y, et al. Effect of enzymatic flocculation coupling on the desalination and physicochemical properties of salted egg whites[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(9): 202-212.
- [8] 张川, 李倩文, 王晓楠, 等. 蛋清蛋白/黄油复合凝胶的特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(7): 151-156.
ZHANG C, LI Q W, WANG X N, et al. Study on the properties of egg white protein-butter compound gel[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(7): 151-156.
- [9] 赵笑蕾, 杨锋, 张晓. 水力空化对蛋清蛋白功能特性的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(10): 105-109.
ZHAO X L, YANG F, ZHANG X. Effects of hydrodynamic cavitation on functional characteristics of egg white protein[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(10): 105-109.
- [10] 关玉. pH-shifting 诱导蛋清蛋白结构和乳化特性变化及其在乳液中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023: 1-2.
GUAN Y. Structure and emulsifying properties of egg white protein induced by pH-shifting and its application in emulsion [D]. Changchun: Jilin University, 2023: 1-2.
- [11] 康钰钊, 陶烁同, 邓思惠, 等. 壳聚糖/阿拉伯胶纳米乳液的制备、表征及稳定性研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(1): 2-8.
KANG Y L, TAO S T, DENG S H, et al. Preparation, characterization and stability of chitosan/gum Arabic nano-emulsion[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(1): 2-8.
- [12] QADIR A, FAIYAZUDDIN M D, TALIB HUSSAIN M D, et al. Critical steps and energetics involved in a successful development of a stable nanoemulsion[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2016, 214: 7-18.
- [13] RAO S Q, XU G W, ZENG H W, et al. Physicochemical and antibacterial properties of fabricated ovalbumin-carvacrol gel nanoparticles[J]. *Food & Function*, 2020, 11(6): 5 133-5 141.
- [14] LONG Y Z, ZHANG M, YANG C H. Effects of flaxseed gum/egg white protein-based edible curcumin nanoemulsion coatings on starch retrogradation and quality of fried rice in freeze-thaw treatment[J]. *Food Bioscience*, 2024, 59: 103977.
- [15] XIA T H, XUE C H, WEI Z H. Physicochemical characteristics, applications and research trends of edible Pickering emulsions[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 107: 1-15.
- [16] ZHAN Y L, QIN S Y, ZENG Y, et al. Pickering emulsions stabilized by egg white protein-alginate nanoparticles: freeze-thaw stability after heating[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 150: 109675.
- [17] 潘晴楣, 张志鹏, 冉乐童, 等. 蛋清蛋白 Pickering 乳液制备及其负载 β -胡萝卜素的稳定性[J]. 中国食品学报, 2023, 23(3): 271-277.
PAN Q M, ZHANG Z P, RAN L T, et al. Preparation of Pickering emulsion stabilized by egg white protein particles and the stability of β -carotene loaded[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(3): 271-277.
- [18] 王春颖. 蛋清蛋白高内相皮克林乳液的制备及其包埋姜黄素的性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 28-31.
WANG C Y. Preparation of high internal phase Pickering emulsion stabilized by egg white protein and its properties of embedding curcumin[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 28-31.
- [19] 郝梦, 毛书灿, 汪兰, 等. 食品中动物蛋白形成皮克林乳液的研究进展[J]. 中国食品学报, 2023, 23(6): 420-430.
HAO M, MAO S C, WANG L, et al. Research progress on formation of Pickering emulsion from animal protein in food [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(6): 420-430.
- [20] 朱雨晴, 刘伟, 陈兴, 等. 食品级皮克林乳液的稳定机制及稳定性研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 315-322.
ZHU Y Q, LIU W, CHEN X, et al. Advances in stabilization mechanism and stability control of food grade Pickering emulsion[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(7): 315-322.
- [21] 田怀香, 卢卓彦, 胡静. 食品级皮克林乳液制备及应用研究进展[J]. 中国食品学报, 2018, 18(1): 225-232.
TIAN H X, LU Z Y, HU J. Preparation and application of food-grade pickering emulsion[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(1): 225-232.
- [22] 郭健. 加工方式对酪蛋白/蛋清蛋白基高内相乳液的稳定与应用特征研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023: 4, 29-30.
GUO J. Study on the stability and application characteristics of casein/egg white protein-based high internal phase Pickering emulsions with various processing methods[D]. Changchun: Jilin University, 2023: 4, 29-30.
- [23] ZHANG J N, ZHAO S Q, LI L T, et al. High internal phase emulsions stabilized by pea protein isolate modified by ultrasound combined with pH-shifting: micromorphology, rheology, and physical stability[J]. *Foods*, 2023, 12(7): 1 433.

- [24] YANG J, KIM H, SUNG M, et al. High internal phase emulsion stabilization through restricted interdrop fusion across water drainage channels[J]. *Langmuir*, 2023, 39(16): 5 670-5 678.
- [25] 徐丽兰. 蛋黄—变性淀粉复合高内相乳液的构建、形成机制及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022: 3-4.
XU L L. Study on construction, formation mechanism and applications of high internal phase emulsions stabilized by egg yolk-modified starch[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 3-4.
- [26] 米思杰. 蛋黄颗粒高内相乳液体系构建及其对食品基质的稳态调控的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022: 9-11.
MI S J. Construction of egg yolk granules-stabilized high internal phase emulsion system and research on homeostatic regulation of food matrices[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022: 9-11.
- [27] YANG Y Y, LI J H, SU Y J, et al. Composite emulsifying behavior of egg white protein and rhamnolipid: properties of the constructed high internal phase emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 123: 106913.
- [28] ZHANG T, LI S L, YANG M, et al. The influence of unique interfacial networks based on egg white proteins for the stabilization of high internal phase Pickering emulsions: physical stability and free fatty acid release kinetics[J]. *Food Chemistry*, 2024, 442: 138448.
- [29] 张根生, 苏文文, 徐桂杨, 等. 低聚糖改性对蛋清蛋白凝胶性影响研究进展[J]. *食品与机械*, 2023, 39(10): 228-232, 240.
ZHANG G S, SU W W, XU G Y, et al. Progress in the effect of oligosaccharide modification on gelability of egg white protein [J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(10): 228-232, 240.
- [30] 曾冰蕙, 郝梦真, 刘桂蓉, 等. 酪蛋白糖基化改性的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(6): 477-484.
DENG B H, HAO M Z, LIU G R, et al. Research progress of casein glycosylation and changes in functional properties[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(6): 477-484.
- [31] 万俊, 张孝芹, 邓博文, 等. 糖基化结合单宁酸改性对熔球态蛋清蛋白乳化特性的影响[J]. *食品与机械*, 2024, 40(11): 12-18.
WAN J, ZHANG X Q, DENG B W, et al. Effects of glycosylation combined with tannic acid modification on the emulsification properties of molten globule egg white protein [J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(11): 12-18.
- [32] AL-HAKKAK J, AL-HAKKAK F. Functional egg white-pectin conjugates prepared by controlled Maillard reaction[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 100(1): 152-159.
- [33] KATO Y, AOKI T, KATO N, et al. Modification of ovalbumin with glucose 6-phosphate by amino-carbonyl reaction improvement of protein heat stability and emulsifying activity [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995, 43(2): 301-305.
- [34] 胥伟, 黄迪, 王海滨, 等. 糖基化反应过程中蛋清蛋白粉的功能性研究[J]. *食品科技*, 2016, 41(1): 33-36.
XU W, HUANG D, WANG H B, et al. Functional properties of egg white powder during glycation[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(1): 33-36.
- [35] 王晨莹. 糖基化蛋清蛋白的制备、性质及其在纳米颗粒中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 32-35.
WANG C Y. The preparation, properties of glycated egg white protein and its application in nanoparticles[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 32-35.
- [36] BILBROUGH T, PIEMONTESE E, SEITZ O. Dissecting the role of protein phosphorylation: a chemical biology toolbox[J]. *Chemical Society Reviews*, 2022, 51(13): 5 691-5 730.
- [37] 张根生, 李琪, 黄昕钰, 等. 蛋清蛋白凝胶改性及其在肉制品加工中的应用[J]. *食品与机械*, 2023, 39(4): 198-204.
ZHANG G S, LI Q, HUANG X Y, et al. Egg white protein gel modification and its application in meat processing[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(4): 198-204.
- [38] 杨燃, 宋洪波, 黄群, 等. 鸡蛋清磷酸化蛋白质组鉴定与分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(11): 30-35.
YANG R, SONG H B, HUANG Q, et al. Identification and analysis of phosphoproteome in chicken egg white[J]. *Food Science*, 2019, 40(11): 30-35.
- [39] LV L, CHI Y J. Improvement of functional properties of ovalbumin phosphorylated by dry-heating in the presence of pyrophosphate[J]. *European Food Research and Technology*, 2012, 235(5): 981-987.
- [40] HAYASHI Y, LI C P, ENOMOTO H, et al. Improvement of functional properties of ovotransferrin by phosphorylation through dry-heating in the presence of pyrophosphate[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2008, 21(4): 596-602.
- [41] JAFARI Z, GOLI M, TOGHYANI M. The effects of phosphorylation and microwave treatment on the functional characteristics of freeze-dried egg white powder[J]. *Foods*, 2022, 11(17): 2 711.
- [42] 刘潇, 吴进菊, 高金燕, 等. 食物蛋白质的酶法改性研究进展[J]. *食品科学*, 2010, 31(19): 409-413.
LIU X, WU J J, GAO J Y, et al. Research progresses in enzymatic modification of food proteins[J]. *Food Science*, 2010, 31(19): 409-413.
- [43] 熊舟翼, 马美湖, 卢素芳, 等. 酶法与非酶法磷酸化改性食品蛋白质的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(21): 310-319.
XIONG Z Y, MA M H, LU S F, et al. Research progress of enzymatic and non-enzymatic phosphorylation of food proteins [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(21): 310-319.
- [44] 胡敢. 琥珀酰化卵白蛋白凝胶结构及其伤口敷料应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022: 14.
HU G. Study on the structure of succinylated ovalbumin gels

- and their application in wound dressings[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022: 14.
- [45] GANDHI S K, SCHULTZ J R, BOUGHEY F W, et al. Chemical modification of egg white with 3, 3-dimethylglutaric anhydride[J]. *Journal of Food Science*, 1968, 33(2): 163-169.
- [46] LAVAL O S. Functionality of native and succinylated Lablab bean (*Lablab purpureus*) protein concentrate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2005, 19(1): 63-72.
- [47] WU Y Y, XIANG X L, LIU L, et al. Ultrasound-assisted succinylation comprehensively improved functional properties of egg white protein[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 171: 114155.
- [48] MA C Y, POSTE L M, HOLME J. Effects of chemical modifications on the physicochemical and cake-baking properties of egg white 1[J]. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 1986, 19(1): 17-22.
- [49] 姚璇, 吕晓慧, 金永国, 等. 动、植物蛋白的酰化改性及其应用研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(16): 337-346.
- YAO X, LÜ X H, JIN Y G, et al. Research progress on acylation modification and application of animal and vegetable proteins[J]. *Food Science*, 2024, 45(16): 337-346.
- [50] 文镜, 张春华, 董雨, 等. 蛋白质羰基含量与蛋白质氧化损伤[J]. *食品科学*, 2003, 24(10): 153-157.
- WEN J, ZHANG C H, DONG Y, et al. Review on relationship between protein carbonyl content and protein oxidative injury[J]. *Food Science*, 2003, 24(10): 153-157.
- [51] 牛思思. 氧化对蛋清蛋白结构及功能特性的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 9-11, 33-34.
- NIU S S. Effect of oxidation structure and functional properties of egg white protein[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2017: 9-11, 33-34.
- [52] 牛思思, 汪建明, 贺雅欣, 等. 羟基自由基氧化对蛋清蛋白质结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(8): 113-117.
- NIU S S, WANG J M, HE Y X, et al. Effect of hydroxyl radical oxidation system on structure of egg white protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(8): 113-117.
- [53] 李泽坤, 肖宇, 焦阳, 等. 脂质和蛋白质氧化对肉品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(7): 438-449.
- LI Z K, XIAO Y, JIAO Y, et al. Effects of lipid and protein oxidation on meat quality[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(7): 438-449.
- [54] 龚萍. 自由基诱导的氧化对蛋清蛋白结构与功能特性的调节机制探究[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 9-11.
- GONG P. Investigation of the regulation mechanism of free radicals-induced oxidation on the structural and functional properties of egg white protein[D]. Changchun: Jilin University, 2022: 9-11.
- [55] 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: 131843.
- [56] LI S G, HUANG Y, AN F P, et al. Hydroxyl radical-induced early stage oxidation improves the foaming and emulsifying properties of ovalbumin[J]. *Poultry Science*, 2019, 98(2): 1 047-1 054.
- [57] 李鹤林, 李芳, 吴晓娟, 等. 蛋白质氧化影响乳液稳定性研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(6): 190-196.
- LI H L, LI F, WU X J, et al. Research progress on effects of protein oxidation on emulsion stability[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(6): 190-196.
- [58] 李弓中, 赵英, 王俊彤, 等. 超声处理对蛋清蛋白结构性质及蛋清液起泡性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(9): 68-75.
- LI G Z, ZHAO Y, WANG J T, et al. Effect of ultrasonic treatment on protein structure and physicochemical and foaming properties of liquid egg white[J]. *Food Science*, 2019, 40(9): 68-75.
- [59] 马秋平, 王辉, 涂宗财, 等. 超声波辅助糖基化对 β -乳球蛋白消化过程中致敏性的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(4): 6-11.
- MA Q P, WANG H, TU Z C, et al. Effects of ultrasound-assisted glycation on the allergenicity of β -lactoglobulin during digestion[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(4): 6-11.
- [60] CHEN W J, MA X B, WANG W J, et al. Preparation of modified whey protein isolate with gum acacia by ultrasound Maillard reaction[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 298-307.
- [61] JIANG M M, CHEN P X, WANG X J, et al. Effect of ultrasonic vacuum drying on the structural characteristics of whole-egg protein powder[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 191: 115490.
- [62] ASAITHAMBANI N, SINGHA P, SINGH S K. Comparison of the effect of hydrodynamic and acoustic cavitations on functional, rheological and structural properties of egg white proteins[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 82: 103166.
- [63] ABKER A M, WANG S R, CHEN S H, et al. The effects of high-intensity ultrasound and oil types on the physicochemical properties of egg white protein emulsions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 339: 111276.
- [64] 邹宇欣, 谢静雯, 王洪涛, 等. 超声对动物蛋白结构及性质影响研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(9): 399-409.
- ZHOU Y X, XIE J W, WANG H T, et al. Research progress on the effect of ultrasound on animal protein structure and properties [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(9): 399-409.
- [65] 闫雨洁. 超声结合糖基化反应改性卵白蛋白及其理化性质与乳化性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021: 36-45.
- YAN Y J. Study on the physicochemical and emulsifying properties of ovalbumin modified by ultrasonically assisted glycation[D]. Nanning: Guangxi University, 2021: 36-45.

- [66] 谢欢. 不同时空条件下微波对蛋清蛋白糖基化反应的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2017: 4.
XIE H. Effect of microwave on glycation reaction of egg white with different space-time conditions[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017: 4.
- [67] 冯建慧, 曹爱玲, 陈小强, 等. 微波对食品蛋白凝胶性和结构影响研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 317-322.
FENG J H, CAO A L, CHEN X Q, et al. Research progress of effect of microwave heating on gelation properties and structure of food protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(18): 317-322.
- [68] 薛丁萍, 徐斌, 姜辉, 等. 食品微波加工中的非热效应研究[J]. 中国食品学报, 2013, 13(4): 143-148.
XUE D P, XU B, JIANG H, et al. The non-thermal effects of microwave food processing[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(4): 143-148.
- [69] 崔亚鹏, 张国治, 张康逸. 微波处理对食品风味及营养成分影响的研究进展[J]. 粮食加工, 2020, 45(6): 62-65.
CUI Y P, ZHANG G Z, ZHANG K Y. Research progress on effects of microwave treatment on food flavor and nutritional components[J]. Grain Processing, 2020, 45(6): 62-65.
- [70] 刘丽莉, 史胜娟, 吴红梅, 等. 微波功率对蛋清蛋白粉乳化特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 76-84.
LIU L L, SHI S J, WU H M, et al. Effect of microwave power on emulsifying properties of egg white protein powder[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2022, 50(5): 76-84.
- [71] 史胜娟. 微波真空冷冻干燥对蛋清蛋白乳化性影响及差异蛋白质组分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022: 10-15.
SHI S J. Effect of microwave vacuum freeze drying on emulsification of egg white protein and differential proteomic analysis[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022: 10-15.
- [72] 陈红兵, 杨峰, 高金燕, 等. 微波处理条件对蛋清结构和IgG结合能力的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 355-361.
CHEN H B, YANG H, GAO J Y, et al. Effects of microwave treatment on structure of egg white and IgG binding capacity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 355-361.
- [73] 何大博, 全其根. 鸡蛋蛋白质改性研究进展[J]. 农产品加工, 2018(3): 47-51, 54.
HE D B, TONG Q G. Advances in modification methods of egg proteins[J]. Farm Products Processing, 2018(3): 47-51, 54.
- [74] 钟比真. 微波场中卵清蛋白糖基化反应不均匀性的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 139-140.
ZHONG B Z. Inhomogeneity of glycation of ovalbumin in microwave field[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021: 139-140.
- [75] JADHAV H B, ANNAPURE U S, DESHMUKH R R. Non-thermal technologies for food processing[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 657090.
- [76] FERNANDEZ-DIAZ M D, BARSOTTI L, DUMAY E, et al. Effects of pulsed electric fields on ovalbumin solutions and dialyzed egg white[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(6): 2332-2339.
- [77] 张铁华, 殷涌光, 刘静波. 高压脉冲电场(PEF)对蛋清蛋白功能特性的影响[J]. 食品科学, 2007, 28(9): 98-102.
ZHANG T H, YIN Y G, LIU J B. Effects of high intensity pulsed electric fields on functional properties of egg albumen[J]. Food Science, 2007, 28(9): 98-102.
- [78] 吴永艳, 王怡, 段文珊, 等. 物理改性在蛋清蛋白功能特性改善中的应用[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 195-200.
WU Y Y, WANG Q, DUAN W S, et al. Application of physical modification in the improvement of functional properties of egg white protein[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3): 195-200.
- [79] 杨宇帆, 陈倩, 王浩, 等. 高压电场技术在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(19): 316-320, 325.
YANG Y F, CHEN Q, WANG H, et al. Research progress of high voltage electric field technology in food processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(19): 316-320, 325.