

不同处理方法对蛋黄及其组分结构和性质的影响研究进展

杨建荣¹, 刘嘉涵¹, 王跃猛², 吴越¹, 焦涵³, 吕建浩¹, 李鑫^{1,*}

(1.烟台大学生命科学学院, 山东 烟台 264005; 2.烟台理工学院食品与生物工程学院, 山东 烟台 264003;
3.安徽荣达食品有限公司, 安徽 广德 242200)

摘要: 蛋黄营养丰富、结构复杂, 其主要组分为蛋黄颗粒 (egg yolk granules, EYGs) 与蛋黄浆质 (egg yolk plasma, EYP) 两部分。在实际生产加工过程中, 不同处理方法对蛋黄及其组分的理化性质和微观结构均具有较大影响, 而蛋白质理化性质及微观结构的变化会影响其功能特性。因此, 本文综述了盐腌处理、碱处理、热处理和酶法处理对蛋黄及其组分 (EYGs和EYP) 理化性质 (表面疏水性、油脂渗出量、蛋白质溶解度等) 及微观结构的影响, 并对不同方法处理后蛋黄及其组分功能特性的变化进行了讨论和展望, 以为后续研究蛋黄组分理化性质及微观结构对其功能特性的影响提供更加明确的理论支持。

关键词: 蛋黄颗粒; 蛋黄浆质; 处理方法; 理化性质; 微观结构; 功能特性

Research Progress on the Effects of Different Treatments on the Microstructure and Properties of Egg Yolk and Its Components

YANG Jianrong¹, LIU Jiahao¹, WANG Yuemeng², WU Yue¹, JIAO Han³, LÜ Jianhao¹, LI Xin^{1,*}

(1. College of Life Sciences, Yantai University, Yantai 264005, China;
2. College of Food and Biosystem Engineering, Yantai Institute of Technology, Yantai 264003, China;
3. Anhui Rongda Food Co., Ltd., Guangde 242200, China)

Abstract: Egg yolk is rich in nutrition and complex in structure. Its major components are egg yolk granules (EYGs) and egg yolk plasma (EYP). The physicochemical properties and microstructures of egg yolk and its components are greatly affected by different treatments during processing, and in turn affect their functional properties. Therefore, this paper reviews the effects of different treatments including salting, alkali treatment, heat treatment and enzymatic treatment on the physicochemical properties (surface hydrophobicity, oil exudation, and protein solubility) and microstructure of egg yolk as well as EYGs and EYP. In addition, this paper discusses the functional changes of egg yolk and its components after different treatments. We expect this review to provide theoretical support for future research on the physicochemical properties and microstructure of egg yolk components and on their effects on the functional properties of egg yolk components.

Keywords: egg yolk granules; egg yolk plasma; different treatments; physicochemical properties; microstructure; functional properties

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220613-122

中图分类号: TS253.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2023) 15-0368-11

引文格式:

杨建荣, 刘嘉涵, 王跃猛, 等. 不同处理方法对蛋黄及其组分结构和性质的影响研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 368-378. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220613-122. <http://www.spkx.net.cn>

YANG Jianrong, LIU Jiahao, WANG Yuemeng, et al. Research progress on the effects of different treatments on the microstructure and properties of egg yolk and its components[J]. Food Science, 2023, 44(15): 368-378. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220613-122. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-06-13

基金项目: 山东省自然科学基金青年基金项目 (ZR2021QC065); 烟台大学博士科研启动基金资助项目 (SM20B61)

第一作者简介: 杨建荣 (1970—) (ORCID: 0000-0002-1134-4701), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为食品分析与蛋白质性质。

E-mail: edelweissjr@163.com

*通信作者简介: 李鑫 (1989—) (ORCID: 0000-0002-8446-179X), 女, 讲师, 博士, 研究方向为蛋白质界面性质。

E-mail: nallyxin@163.com

鸡蛋作为天然食品中最理想的蛋白质来源之一,深受消费者喜爱^[1]。鸡蛋主要由蛋壳、蛋清和蛋黄组成,蛋黄是其中结构最为复杂的一部分^[2]。通常认为蛋黄组分难以分离,现阶段最简单的分离方法是对蛋黄进行冷冻离心分离,得到蛋黄颗粒和蛋黄浆质^[3](图1)。蛋黄颗粒与蛋黄浆质的结构均较为复杂,且是天然的纳米和微米尺度自组装结构单元^[4]。蛋黄颗粒由70%的高密度脂蛋白(high-density lipoprotein, HDL)、16%的卵黄高磷蛋白(phosvitin, PV)和12%的低密度脂蛋白(low-density lipoprotein, LDL)组成,蛋黄浆质由15%的卵黄球蛋白和85%的LDL组成^[5]。由于蛋黄浆质中LDL含量较多,浆质主要以一种胶束状结构存在。但与浆质相比,颗粒结构更为复杂,扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)下观察到其由深色颗粒和浅色颗粒两部分组成,且颗粒主要以通过磷酸钙桥连接的不溶性HDL-PV复合物的形式存在,是一种复杂的球状结构^[6],在高盐浓度下,所有卵黄颗粒都会分解成100~200 nm的小颗粒聚集体^[7]。

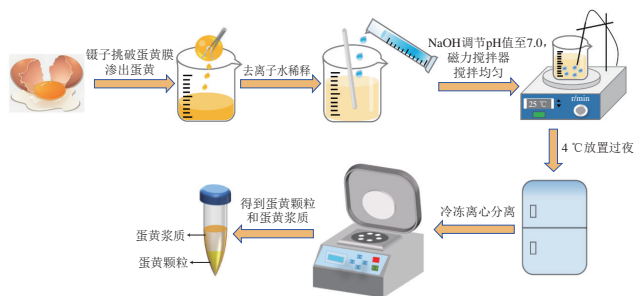


图1 蛋黄颗粒与蛋黄浆质的制备流程

Fig. 1 Flow chart for preparation of egg yolk granules and egg yolk plasma

蛋黄营养丰富、脂蛋白含量高、乳化性能好,是公认良好的乳化剂^[8-9],因此常被用于蛋糕、奶油、沙拉酱和蛋黄酱中^[10-11]。在实际生产加工过程中,蛋黄会经过不同的加工处理达到乳化分散、凝固成胶、盐腌流油等效果以实现生产需要。但现阶段对于蛋黄颗粒与蛋黄浆质的研究相对较少,还无法将蛋黄颗粒及浆质更好地应用于食品工业中,只能采取目前较为常用的几种处理方法,即盐腌、碱处理、热处理和酶法处理^[12-15]对蛋黄颗粒和浆质进行改性,以便更好地理解蛋黄颗粒与浆质在理化性质(表面疏水性、油脂渗出量、蛋白质溶解度)、微观结构及功能特性(乳化性、起泡性与凝胶性)等方面的差异,为蛋黄颗粒与浆质在今后生产加工中的应用奠定良好基础。因此,基于蛋黄颗粒与蛋黄浆质的区别,本文将重点综述蛋黄及其组分在以上处理方式下的理化性质、微观结构和功能特性,旨在梳理蛋黄及其组分经过不同处理后理化性质、微观结构与功能特性的区别和相关关系。

1 盐腌

1.1 盐腌对蛋黄及其组分理化性质的影响

盐腌处理蛋黄后,蛋黄会明显脱水、渗油,其理化性质发生显著变化。本节将对盐腌后蛋黄及其组分的表面疏水性和油脂渗出量进行重点综述。

1.1.1 表面疏水性

盐腌对蛋黄及其组分的表面疏水性均会造成一定影响。研究表明,蛋黄经过盐腌后,蛋白质的空间构象被破坏,疏水基团外露,其表面疏水性会随腌制时间的延长而显著增加,且NaCl浓度的增加也会导致蛋黄的表面疏水性升高^[16]。十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)分析结果表明,这种现象与蛋黄颗粒中存在的HDL和磷脂的解离程度密切相关^[17]。例如Xu Lilan等^[18]采用NaCl对蛋黄颗粒与蛋黄浆质进行盐腌发现,由于蛋黄颗粒结构较为紧密,表面的疏水氨基酸数量较少^[19],蛋白质分子间的排斥力受到静电屏蔽效应,促使HDL聚集形成凝胶,因此颗粒经过盐腌后,表面疏水性会显著降低。与蛋黄颗粒相比,蛋黄浆质具有更强的表面疏水性。这是由于在腌制过程中脂质从脂蛋白中逐渐释放,蛋白质去折叠和疏水基团暴露,导致浆质表面的疏水性随盐腌时间的延长而增加^[18]。由此可见,盐腌会降低蛋黄颗粒表面疏水性,使蛋黄浆质表面疏水性增加,而蛋黄表面疏水性的变化情况则与腌制时间和NaCl浓度有关,时间越长、浓度越高,其表面疏水性越高。

1.1.2 油脂渗出量

盐腌法对于油脂渗出量的影响研究多集中于对鸭蛋黄的腌渍效果方面。蛋黄及其组分中油脂的渗出量都会随盐腌时间的延长而增加,并且蛋黄和浆质的油脂渗出量要高于颗粒。这是由于NaCl的盐析效应会促进游离脂质的释放、诱导LDL聚集^[20],进而导致稳定蛋黄中油脂的蛋白质形态发生变化,因此油脂渗出量也会相应增加^[21]。同时,在盐腌蛋黄的过程中,蛋黄颗粒中的Ca²⁺会逐渐被Na⁺所取代,导致蛋黄颗粒结构随盐的渗透而被破坏^[22],游离脂蛋白被稀释,因此油脂不断渗出。但总体而言,盐腌对蛋黄及其组分的油脂渗出具有良好的改善效果。

1.2 盐腌对蛋黄及其组分微观结构的影响

蛋黄组分微观结构的变化多通过其本身发生的聚集或分散行为进行表征。近年来的研究表明,不论是对蛋黄颗粒单独进行盐腌,或与酸碱处理、高压处理等联合进行处理,微观结构下蛋黄颗粒均会发生聚集^[18,23-24]。这可能是由于盐腌会导致水分流失,使颗粒间的间距变小,从而使颗粒的结构更加紧密发生聚集^[25]。同时,

蛋黄浆质经过盐腌后也会发生不同程度的聚集,主要表现为LDL的聚集^[26]。当LDL发生大规模聚集后,会促进磷脂-磷脂分子和磷脂-蛋白质分子间的迁移^[18]。Wakamatsu等^[27]的研究表明,LDL的聚集可以通过减少单个颗粒的表面积,促使磷脂外露,外露的磷脂在聚集的LDL之间形成层状结构,有助于促进聚集体之间的相互作用。这种聚集结构主要是由变性后的蛋白质结合在一起导致的。综上所述,颗粒与浆质经过盐腌后均会发生一定程度的聚集。

1.3 盐腌对蛋黄及其组分功能特性的影响

1.3.1 乳化性

乳化性是指蛋白中油和水形成乳化液的能力,而维持稳定乳化性的能力被称为乳化稳定性^[28]。盐腌对蛋黄组分乳化性的影响主要取决于溶液的离子强度。乳化型蛋黄颗粒是一种天然的蛋白质-脂质复合物,其结构紧密,在低离子强度下($<0.3 \text{ mol/L NaCl}$)不溶,因此可以稳定水包油(oil in water, O/W)和油包水(water in oil, W/O)乳液,具有用作新型食品级Pickering乳化剂的潜力^[29]。当采用适当浓度NaCl对蛋黄颗粒进行盐腌时,腌制后的蛋黄颗粒结构被破坏,HDL和PV被释放并溶解,经过盐处理后的蛋黄颗粒比天然颗粒更能有效地形成并稳定O/W乳液^[30],乳化稳定性提高。与蛋黄颗粒不同的是,盐腌对蛋黄浆质的影响主要体现在提高其乳化活性上。由于蛋黄浆质中的LDL是蛋黄特殊乳化活性的主要贡献者^[31],会导致浆质在任何离子强度下均可溶解,因此蛋黄浆质经盐腌处理后,其乳化活性高于蛋黄颗粒。

传统意义上的腌制多采用NaCl,而其他盐类的腌制也会对蛋黄乳化性产生不同程度的影响。有研究表明,三聚磷酸钠、琥珀酸酐、焦磷酸钠和磷酸氢二钠均会导致蛋黄(液)乳化性发生变化^[32-33]。三聚磷酸钠和琥珀酸酐均会增加蛋白质在蛋黄中的溶解度,改变脂蛋白疏水性及亲水性之间的平衡,从而破坏蛋黄的乳化能力。同时,盐腌后可溶性蛋白会快速扩散到油-水界面,降低界面张力,从而提高蛋黄的乳化稳定性。焦磷酸钠和磷酸氢二钠则会对蛋黄液的乳化活性产生影响,随着焦磷酸钠浓度的增加,蛋黄液乳化活性呈先升高后降低的趋势,而当磷酸氢二钠的质量分数达到0.3%~0.9%时,蛋黄液的乳化活性趋于平缓。这一系列研究表明,盐腌会显著提高蛋黄颗粒的乳化稳定性和蛋黄浆质的乳化活性,且基于盐的种类与浓度不同,蛋黄的乳化性能也不同。因此在未来的研究中,可根据具体的机理变化选取适宜的盐种类与浓度,为提高蛋黄及组分的乳化性提供更多可行方案。

1.3.2 凝胶性

蛋黄的凝胶性是指蛋黄蛋白质结构部分展开或者发生

不可逆变性,蛋白分子间发生相互作用,聚集成有序的网络结构^[34]。盐腌对蛋黄及其组分凝胶性的影响主要通过其保水性和质构特性两个指标反映。杨海燕等^[35]研究发现,盐腌时可采用不同质量分数NaCl对蛋黄浆质进行腌制,当NaCl质量分数达到2%时,蛋黄浆质的凝胶保水性最好。这是由于NaCl会提高凝胶内部水分的流动性,使蛋白分子形成水离子键,从而改变凝胶内部的疏水相互作用,同时凝胶的保水性也反映了蛋黄浆质对水的保持能力,保水性越高,越能防止水分子逸出。质构特性包括多个参数:如硬度、咀嚼性、胶黏性、内聚性和弹性等。研究表明,蛋黄的硬度、咀嚼性和胶黏性随腌制时间的延长呈先升高后降低的趋势^[36],这是由于在腌制前期,盐的浸入使蛋黄形成紧密的凝胶网络结构,因此提高了蛋黄的硬度、咀嚼性和胶黏性;而过长时间的腌制会增加油脂渗出量,使原本紧密结合的蛋白结构变得松散,因此降低了蛋黄的硬度、咀嚼性和胶黏性。由此可见,蛋黄及其组分的理化性质在一定程度上会影响功能特性,油脂渗出量的增高降低了蛋黄凝胶的质构特性。此外,蛋黄颗粒与蛋黄浆质的质构特性也得到一定的研究。Xu Lilan等^[18]研究发现,蛋黄颗粒与蛋黄浆质经盐腌后的内聚性变化趋势较为相似,都会随腌制时间的延长而增加,而蛋黄浆质的弹性在腌制过程中呈先升高后降低的趋势,同时,蛋黄颗粒凝胶的硬度大于蛋黄浆质的硬度。Valverde等^[37]对于这一现象的解释为颗粒蛋白经盐腌处理后形成了HDL-PV复合物,具有较高的耐热性。因此蛋黄颗粒凝胶对于变形和断裂的抵抗力要好于蛋黄和蛋黄浆质。总体而言,盐腌对提升蛋黄组分的凝胶性具有良好效果,但在处理蛋黄时应注意盐腌时长。

综上所述,蛋黄及其组分经过一定程度的盐腌后,其理化性质与功能特性均会得到良好改善。但现阶段的研究方法多集中于采用NaCl进行腌制,而其他盐类对蛋黄组分化理性质、微观结构及功能特性的影响还鲜见详细的阐述,未来仍需进一步探究。

2 碱处理

2.1 碱处理对蛋黄及其组分蛋白理化性质的影响

碱处理对蛋黄及其组分的蛋白质理化性质的影响主要体现在溶解度方面,其对溶解度影响显著,且有学者将pH法与盐腌法相结合,以探究碱处理对蛋黄浆质脂蛋白溶解度的影响^[38]。结果表明,当体系中含有NaCl且pH值为8.7时,蛋黄浆质脂蛋白溶解度无显著变化,当pH值为10.0时,蛋黄浆质脂蛋白溶解度逐渐升高。由此可见,pH值的升高对蛋黄浆质的蛋白溶解度有良好的改善作用。此外,中华鳖蛋中的蛋黄及其组分的蛋白质溶解度也受到了研究者的关注。Chen等^[39]研究发现,在弱酸性

环境中, 整蛋蛋黄及其组分中的蛋白溶解度较低, 而碱处理可显著增加其蛋白溶解度, 尤其对蛋黄和颗粒的影响更为显著。通过以上结论可得出, pH值对蛋白质碱性侧链上的电荷有较大影响^[40], 碱性环境会增加相同静电荷分子间的排斥力, 使水-蛋白质间的相互作用增强, 从而导致蛋黄及其组分的蛋白溶解度升高^[41]。

2.2 碱处理对蛋黄及其组分微观结构的影响

碱处理还可促进蛋白质聚集和变性, 继而引起蛋黄及其组分微观结构发生变化^[42]。Yang Yuan等^[43]利用透射电子显微镜(transmission electron microscopy, TEM)观察发现, 碱处理可诱导凝胶的形成, 促使蛋黄颗粒与蛋黄浆质形成蛋白质基质, 从而发生聚集。但相比之下, 蛋黄颗粒形成凝胶所需的时间要短于蛋黄浆质, 微观结构也更加紧密^[44]。这种现象表明碱处理可使蛋黄颗粒的凝胶硬度与黏弹性增大, 导致其微观结构更加致密。由此亦可说明, 蛋黄及其组分的功能特性与微观结构间有着密切的联系, 凝胶网络的形成会直接影响其微观结构的变化。

2.3 碱处理对蛋黄及其组分功能特性的影响

2.3.1 乳化性

蛋黄乳化性与其中蛋白质的溶解度变化密切相关。黄群等^[45]研究发现, pH值会影响不同蛋白质乳状液的形成及稳定性, 当蛋黄处于中性环境时其乳化性最低, 经碱处理后, 蛋黄的蛋白溶解度升高, 乳化性得到改善, 且随pH值的升高而逐渐增加。这一现象也再次印证了蛋黄的理化性质与功能特性有着紧密关联, 蛋白溶解度的升高会直接导致乳化性的增加。同时, 碱处理对蛋黄颗粒稳定高内相乳液的类固体或类液体状态也有影响。研究表明, 较小的颗粒组分与释放的磷脂胶束在碱性条件下会更快地迁移和吸附到油-水界面, 使稳定的高内相乳液呈凝胶状倒挂在瓶底, 形成Pickering乳液, 从而提高乳液的稳定性^[46]。le Denmat等^[47]对蛋黄组分所制备的乳液在不同pH值下的性质进行分析发现, 蛋黄颗粒所制备的乳液液滴在酸性环境中粒径较大, 稳定性较差, 而当其处于碱性环境时, 乳液稳定性会显著增加。与蛋黄颗粒不同的是, 蛋黄浆质的乳化性及乳液稳定性并不会因pH值的变化而受到太大影响, 不论是酸性环境还是碱性环境, 浆质的乳化性都呈较为平缓的变化状态。因此, 碱处理会提高蛋黄的乳化性和颗粒的乳液稳定性, 而对蛋黄浆质的乳化性没有显著影响。

2.3.2 凝胶性

碱处理对蛋黄及组分凝胶性的影响主要体现在硬度方面。研究表明, 蛋黄蛋白在短时间内会迅速聚集形成凝胶, 致使蛋黄的硬度在碱处理4 min时增加, 但由于蛋黄凝胶中的系统平衡, 因此在48 min前, 其硬度都较为稳定^[43]。而颗粒凝胶的硬度会随碱处理时间的延长

而增加。针对这一结果有两种解释: 一是由于不溶性天然颗粒的致密结构有利于蛋白质分子间的相互作用^[48]; 二是颗粒中最主要的蛋白质——磷蛋白是自然界中最高度磷酸化的蛋白质之一, 具有强金属结合能力^[49]。基于这两个方面, 颗粒凝胶的硬度会显著增强。此外, 蛋黄浆质经碱处理后其硬度会呈先增加后降低的趋势, 这是由于碱处理会导致LDL发生聚集, 使凝胶相互作用增强, 因此导致碱处理前期浆质的硬度增加^[50]。但随着时间的延长, 蛋白质间的相互作用会受到其表面带有负电荷的静电排斥力影响, 因此在处理后期, 浆质的硬度逐渐降低。总之, 在碱性条件下, 蛋黄颗粒凝胶的硬度要好于蛋黄和浆质的凝胶硬度, 且具有更好的稳定性, 不易发生变形和断裂^[51]。通过以上结论可推断出, 相较于蛋黄和浆质, 蛋黄颗粒可能具有更好的凝胶性。但鉴于现阶段研究的局限性, 在实际生产加工中还无法有效地利用蛋黄颗粒的凝胶性质, 因此在后续研究中, 仍需对蛋黄组分进行系统化探究, 使蛋黄组分广泛应用于食品行业中。

3 热处理

3.1 热处理对蛋黄及其组分蛋白理化性质的影响

热处理对蛋黄组分化理性质的影响主要表现为对其溶解度的影响。阎微^[52]研究了在65 °C条件下加热时间对蛋黄的蛋白溶解度影响情况。结果表明, 短时间加热会使蛋黄的蛋白溶解度呈下降趋势, 当加热到6.5 min后, 溶解度暂时趋于平缓, 而后持续加热到9.5 min时, 蛋白质聚集紧密形成凝胶, 此时蛋黄的蛋白溶解度显著降低。关于加热温度对蛋黄颗粒和蛋黄浆质蛋白溶解度的影响, 苏宇杰等^[53]进行了详细的研究。结果表明, 当加热时间相同, 加热温度在65 °C以下, 蛋黄浆质的蛋白溶解度也不会发生显著变化, 当温度达到68 °C时, 溶解度显著降低, 表明高温会破坏蛋白质的结构, 使解离的亚基相互作用形成不溶性聚合物, 从而降低浆质的蛋白溶解度^[54]。相比之下, 蛋黄颗粒的蛋白溶解度经热处理后低于蛋黄浆质。但由于蛋黄颗粒蛋白质含量较高, 且蛋白质具有较好的热稳定性, 因此蛋黄颗粒的蛋白溶解度变化较小^[55]。总体而言, 温和的热处理条件并不会对蛋黄及组分的蛋白溶解度造成显著影响, 但长时间的加热与较高的温度会使蛋黄和浆质的溶解度降低, 由此说明蛋黄浆质中蛋白质的聚集或变性是导致蛋黄溶解度变化的主要原因^[53]。

3.2 热处理对蛋黄及其组分微观结构的影响

目前有关热处理对蛋黄组分微观结构影响的研究相对较少, 仅集中在对蛋黄微观结构的影响方面。因此, 仅可根据蛋黄在热处理后成分变化、微观结构改变推测

其组分微观结构的变化。Xu Lilan等^[56]研究发现,长时间的热处理会导致蛋白质与脂质不断细化并聚集,且温度越高,聚集范围越大、聚集程度也越紧密。例如,蛋白质与脂质在72℃时开始聚集且分布不均,76℃时蛋白质与脂质逐渐细化并进一步聚集,形成粗蛋白聚集体,当温度达到80℃与84℃后,粗蛋白聚集体形状扩大且聚集程度更加紧密。由于蛋黄颗粒中的主要成分是不溶性的HDL,而蛋黄浆质中则含有大量的LDL和脂质,因此,根据蛋黄中蛋白质与脂质的变化情况可推断出,热处理对蛋黄浆质微观结构的影响可能更加显著,当加热到一定程度后,浆质会发生聚集,具体变化机制如图2所示。

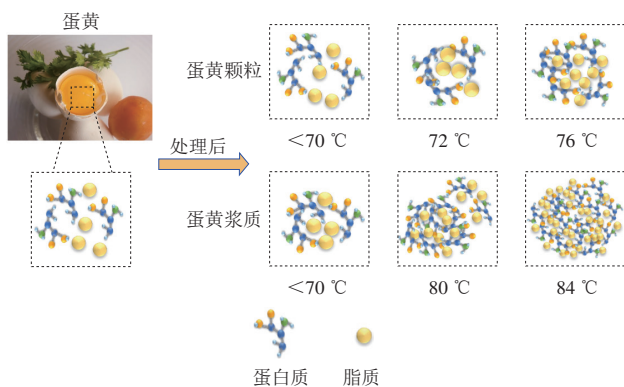


图2 蛋黄加热过程中蛋白质与脂质微观结构变化机理

Fig. 2 Mechanism of protein and lipid microstructures in egg yolk during heating treatment

目前,研究人员对于蛋黄的加工已不再采用单一的热处理形式,而是与盐腌法相结合。例如Xu Lilan等^[16]的研究表明,对加热后的蛋黄腌制21 d后,蛋黄中的 α -螺旋含量逐渐减少,形成了紧密的凝胶网络结构。当继续腌制28~35 d后,释放的蛋白质和脂质通过疏水相互作用重组,从而发生聚集。由此说明,不论是单一的热处理还是盐腌联合热处理均会导致蛋黄中的蛋白质与脂质聚集,且凝胶网络的形成可能是导致蛋白质与脂质聚集的主要原因。但由于目前研究多集中于实验室水平,关于热处理对蛋黄组分微观结构的影响暂时还处于探索阶段,因此相关研究人员可就此方向继续开展系统化研究,为蛋黄组分的微观结构研究提供更多理论支持。

3.3 热处理对蛋黄及其组分功能特性的影响

3.3.1 乳化性

热处理对蛋黄及其组分乳化性的影响主要取决于加热温度与加热时间。阎微^[52]和苏宇杰^[53]等研究了蛋黄液、蛋黄颗粒和蛋黄浆质经热处理后乳化活性和乳化稳定性的变化情况。研究表明,当加热温度在65℃时,短时间的热处理对三者的乳化性几乎没有影响,但当加热

时间达到8.5 min后,部分蛋黄出现凝结现象,加速蛋白质变性,使凝结的颗粒存在于稀释后的蛋黄液中,此时蛋黄液的乳化活性有所升高。而当温度达到68℃时,长时间的加热使HDL发生变性,蛋黄颗粒与浆质中的蛋白质和其他成分相互作用形成聚合物,因此导致二者的乳化活性降低。在乳化稳定性方面,蛋黄液与蛋黄浆质在加热到9 min后,蛋白质的变性会使疏水基团聚集,增加了静电排斥作用,抑制了乳状液的絮凝,从而使乳化稳定性降低。对于蛋黄颗粒而言,持续的加热增强了颗粒蛋白的无序排列程度,提高了颗粒在油-水界面上的吸附能力^[57],具有稳定乳液的作用,因而使乳化稳定性升高。

此外,部分研究者对热处理前后蛋黄及组分的乳化性能也进行了详细的研究^[58-60]。结果发现,热处理后蛋黄和浆质制备的乳状液粒径(d_{50})变化趋势较为相似,在69~76℃间显著升高,且蛋黄制备的乳液的乳膏层高度显著降低,这表明热处理使乳液油滴紧密聚集,提高乳液稳定性。而蛋黄颗粒制备的乳状液在未经热处理前,乳析率和最终油体积的占比均低于蛋黄和浆质,当热处理温度在55~76℃时,颗粒稳定的样品 d_{50} 、乳析率和最终油体积的占比均未发生显著变化,由此表明热处理不会对蛋黄颗粒的乳化性能产生影响,因此蛋黄颗粒具有更好的耐热性,在日后的生产加工环节,蛋黄颗粒将有望代替蛋黄应用到乳化型食品中。

综上所述,较温和的热处理条件对蛋黄及其组分的乳化性影响较小,但长时间的加热会增加蛋黄液的乳化活性,降低乳化稳定性。当处理温度低于69℃时,蛋黄颗粒与浆质的乳化活性均较低,但颗粒乳化稳定性较高;当处理温度达到76℃后,蛋黄及浆质的乳化稳定性会显著提升,而颗粒的乳化稳定性并未发生明显变化。由此可见,蛋黄颗粒相较于蛋黄及浆质而言,对热处理温度的耐受性更强,乳化稳定性相对更高。

3.3.2 起泡性

通常认为泡沫是气体在连续相中的分散体,在热力学中较不稳定^[61]。在泡沫形成过程中,蛋白质的疏水链在空气中展开,亲水链则将水保持在水相中,因此对于泡沫系统的排水及气泡聚结有很好的阻隔作用^[62]。Li Xin等^[63]研究了蛋黄组分对蛋清蛋白发泡性的影响,结果表明蛋黄及其组分均会造成蛋清蛋白的发泡性降低,但当固形物含量与蛋黄组分含量相同时,由于脂质-脂蛋白的吸附力与蛋白质聚集状态决定了蛋清蛋白的发泡性,因此颗粒与浆质打发性均高于蛋黄,对蛋清蛋白的发泡性损害较小。

当前关于热处理对起泡性的研究多集中于蛋黄液或全蛋液中。徐旭东等^[64]研究表明, 蛋黄液的起泡性在60 °C内随温度升高显著增加, 当加热温度达到70 °C时, 蛋黄液的起泡性下降。这表明较温和的处理温度可使蛋白结构展开, 增加表面疏水性, 有利于水-空气界面形成, 从而增加起泡性^[65]。而过高的处理温度会破坏蛋黄蛋白质的二级结构, 暴露蛋白内部的疏水基团, 使内源蛋白质分子形成非共价聚集体, 增大蛋白颗粒的体积, 过大的蛋白颗粒不利于泡沫的形成, 因此蛋黄液的起泡性在高温时有所下降^[66]。与起泡性不同的是, 蛋黄液的泡沫稳定性在70 °C时会显著升高, 这是由于蛋黄蛋白的热变性温度较高, 在此温度下并不会发生大程度的聚集, 增加水-空气界面膜的稳定性, 致使泡沫稳定性升高。此外, 乔立文等^[67]对热处理后全蛋液泡沫性质的变化进行了研究。结果表明, 全蛋液的起泡性与泡沫稳定性在61 °C时呈上升趋势, 当加热温度达到64 °C与67 °C时, 其起泡性与泡沫稳定性显著降低, 这是由于蛋白质分子遇热不稳定, 通过非共价键形成分子聚集体, 使水-空气界面膜的稳定性下降, 进而降低了泡沫稳定性。总体而言, 低温会增加蛋黄液与全蛋液的起泡性, 当温度逐渐升高时, 蛋黄液的起泡性降低, 泡沫稳定性升高, 而全蛋液的起泡性和泡沫稳定性均有所降低, 由此可见, 与全蛋液相比, 蛋黄液具有更好的泡沫稳定性。

4 酶法处理

4.1 酶法处理对蛋黄及其组分理化性质的影响

除以上3种方法外, 酶法处理也会对蛋黄组分的理化性质有所影响, 主要表现在表面疏水性与蛋白溶解度两方面。

4.1.1 表面疏水性

表面疏水性是判断蛋白质构象变化的重要指标之一^[68]。酶法处理蛋黄通常会增加溶液表面疏水性。这是由于适当酶解可改变蛋白质结构, 使其分子内的疏水位点暴露^[69]。但长时间水解也会导致溶液表面疏水性降低。例如研究发现, 采用中性蛋白酶、胰蛋白酶与碱性蛋白酶对蛋黄进行水解后, 蛋黄溶液表面疏水性会出现先升高后降低的趋势, 当水解时间达到4.5 h后疏水性最低^[70-71]。这是由于小分子肽的疏水结合点数量比大分子肽少, 过度酶解则降低了蛋黄中蛋白质的表面疏水性。此外, 也有学者研究了木瓜蛋白酶、枯草杆菌酶与胰蛋白酶对蛋黄蛋白表面疏水性的影响^[72]。结果表明, 木瓜蛋白酶与枯草杆菌酶会降低溶液表面疏水性, 而胰蛋白酶对其表面疏水性的影响不大。这一研究表明, 蛋白酶对蛋黄及其组分表面疏水性的影响一定程度上取决于酶解

时间, 而更重要的则是蛋白酶的种类。随着技术的不断进步, 学者们不止停留在研究单一蛋白酶或复合蛋白酶酶解蛋黄及其组分, 例如, Li Qiqi等^[73]使用超声技术联合酶解对蛋黄蛋白进行了处理。相较于单纯的酶解而言, 与超声技术的联合使用显著提高了蛋黄蛋白的酶解率, 但阻止了疏水基团的过量暴露, 因此, 超声联合酶解处理对蛋黄蛋白表面疏水性无显著影响, 并使其理化性质更加稳定。然而, 尽管目前的科研水平已取得大幅度提升, 但关于酶法处理对蛋黄颗粒与蛋黄浆质表面疏水性的影响还鲜见报道, 学者们仍将科研重心集中于蛋黄的表面疏水性上, 因此, 如何选择适宜的酶种类对蛋黄颗粒与浆质的表面疏水性进行改性, 在未来仍需探究。

4.1.2 蛋白溶解度

酶法处理对蛋黄及组分蛋白溶解度的影响也受到研究人员们的关注。Tang Shitao等^[72]分别采用木瓜蛋白酶、胰蛋白酶与枯草杆菌蛋白酶对蛋黄粉进行酶解后发现, 虽然3种酶都会提高蛋黄粉的溶解度, 但枯草杆菌蛋白酶的影响更显著, 这是因为枯草杆菌蛋白酶水解后产生了大量的疏水基团或疏水侧链, 通过疏水相互作用与游离脂蛋白结合后, 表面疏水性降低, 避免游离脂蛋白漂浮造成分层, 从而导致蛋黄粉的溶解度升高。除了单一酶解处理, Strixner等^[74]对喷雾干燥结合磷脂酶A₂处理后蛋黄颗粒与蛋黄浆质的蛋白溶解度进行了对比分析。结果表明, 单独的喷雾干燥会降低颗粒与浆质的蛋白溶解度, 但经磷脂酶A₂结合处理后, 颗粒与浆质的蛋白溶解度都会显著提高, 尤其是颗粒的蛋白溶解度经酶解后可以达到80%以上, 这表明酶处理对颗粒与浆质的蛋白溶解度有良好的改善作用, 但对颗粒的影响更明显。

综上, 本文对盐腌、碱处理、热处理及酶法处理对蛋黄及其组分理化性质的影响进行了总结, 如表1所示。

表1 不同处理方法对蛋黄及其组分理化性质的影响

Table 1 Effects of different treatments on physicochemical properties of egg yolk and its components

处理方法	处理指标	蛋黄	蛋黄颗粒	蛋黄浆质	参考文献
盐腌	表面疏水性	升高	降低	升高	[16-19]
	油脂渗出量	升高	升高	升高	[20-22]
碱处理	蛋白溶解度	升高	升高	升高	[38-41]
热处理	蛋白溶解度	低温: 变化较小	低温: 变化较小	低温: 变化较小	[52-55]
		高温: 降低	高温: 变化较小	高温: 降低	
酶法处理	表面疏水性	中性蛋白酶、胰蛋白酶、碱性蛋白酶: 先升高后降低	/	/	[68-73]
	蛋白溶解度	木瓜蛋白酶、枯草杆菌酶: 先降低后升高	升高	升高	[72,74]

注: / 文献未提及。下同。

4.2 酶法处理蛋黄及其组分对微观结构的影响

酶法处理对蛋黄组分的微观结构影响较大, 且不同酶种类可能产生的影响不同。例如脂肪酶和磷脂酶

都可使蛋黄组分微观结构发生变化,但作用机制有所不同。通过SEM观察发现,脂肪酶会使蛋黄颗粒与浆质发生一定程度的聚集,形成集合体^[75-76]。且相较于浆质而言,颗粒在经过脂肪酶处理后,其内部出现许多粗糙的气孔与凹坑,这表明脂肪酶并不是作用于颗粒的表面,而是作用于颗粒内部。磷脂酶A₂则会使原本结构较为紧密的颗粒与浆质发生分散并出现破碎的团块形状。除脂肪酶和磷脂酶A₂外,磷脂酶A₁对蛋黄组分的结构也有影响。相关研究表明,新鲜颗粒中蛋白质球的结构紧密堆积在一起,经磷脂酶A₁处理后,HDL含量发生变化使原本聚集的颗粒逐渐分散,形成较大的球状结构^[77]。而浆质经过磷脂酶A₁处理后,其微观结构也会发生显著差异。天然浆质表面有大量的圆形球状物,经酶处理后,圆形球状物发生聚集,形成较大的蛋白质簇,且与颗粒相比,浆质中的蛋白质颗粒尺寸经磷脂酶A₁处理后会更大。因此,无论是脂肪酶还是各种磷脂酶(磷脂酶A₁或磷脂酶A₂)处理蛋黄组分后,微观结构均会发生一定程度的改变。

综上所述,表2总结了盐腌、碱处理、热处理及酶法处理对蛋黄及其组分微观结构的影响。同时,为了更加直观清晰地解释颗粒与浆质的聚集或分散行为,本文展示了不同处理方法对颗粒与浆质微观结构的影响,分别如图3、4所示。

表2 不同处理方法对蛋黄组分微观结构的影响

Table 2 Effects of different treatments on microstructure of egg yolk and its components

处理方法	蛋黄	蛋黄颗粒	蛋黄浆质	参考文献
盐腌	/	聚集	聚集	[18,23-27]
碱处理	/	聚集	聚集	[42-44]
热处理	蛋白质与脂质聚集	聚集	聚集	[16,56]
酶法处理	/	磷脂酶A ₁ : 分散	磷脂酶A ₁ : 聚集	[75-77]
		磷脂酶A ₂ : 分散	磷脂酶A ₂ : 分散	
		脂肪酶: 聚集	脂肪酶: 聚集	

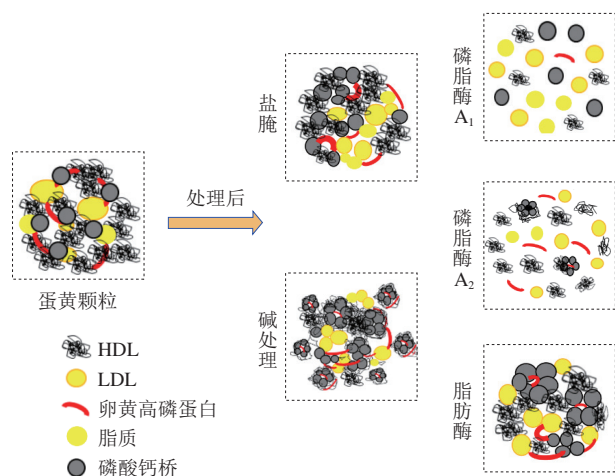


图3 不同处理方法对蛋黄颗粒微观结构的影响机理

Fig. 3 Mechanism of the effects of different treatments on the microstructure of egg yolk granules

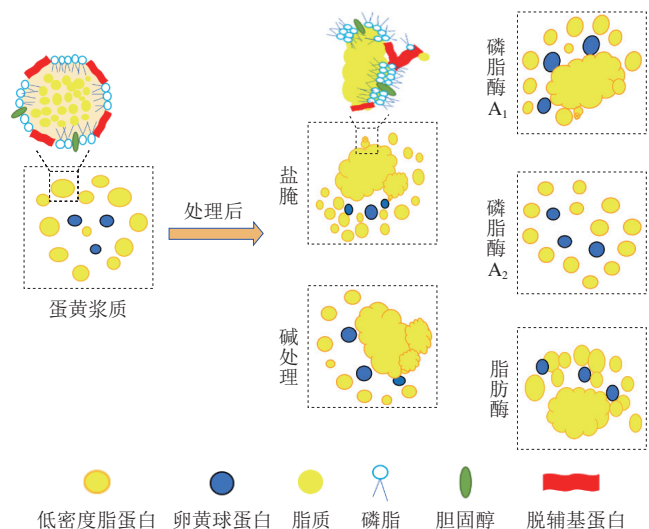


图4 不同处理方法对蛋黄浆质微观结构的影响机理

Fig. 4 Mechanism of the effects of different treatments on the microstructure of egg yolk plasma

4.3 酶法处理对功能特性的影响

4.3.1 乳化性

酶法处理是提高蛋黄及其组分乳化性的一种常用方法。研究表明,采用蛋白酶处理蛋黄和颗粒后,内部氢键和表面电荷数量增加,且蛋白溶解度的升高更利于其吸附在油-水界面上,从而提高了蛋黄和颗粒的乳化稳定性^[78-80]。但相较于蛋白酶,学者们更加倾向采用磷脂酶对蛋黄及其组分进行处理,以提高其功能特性。例如黄丹等^[81]研究发现,磷脂酶A₁对蛋黄粉的功能特性也具有优化作用。蛋黄粉的乳化容量、乳化稳定性及热稳定性经磷脂酶A₁改性后,分别提高了近75%、3.89倍与1.32倍,由此说明,磷脂酶处理可显著增强蛋黄和颗粒的乳化稳定性。

在目前的研究中,学者们已不仅限于对样品进行单一的酶处理,而是将酶法处理结合其他技术对蛋黄组分进行改性研究。例如唐世涛^[82]通过超声技术联合蛋白酶对蛋黄颗粒与蛋黄浆质进行处理后发现,二者形成的乳液乳析指数均有所下降,乳化稳定性升高。但二者的改善机理较为不同。浆质的乳化稳定性改善主要归功于超声结合酶解后降低了乳液的粒径及表面张力,而颗粒经过处理后,热稳定性的提高在一定程度上促进了乳化稳定性的改善,且蛋白浓度越高,处理后的热稳定效果越好。酶处理结合冻融技术对蛋黄及其组分乳化性的影响也有研究。Gmach等^[83]采用磷脂酶A₂结合冻融技术来评估蛋黄及其组分的乳化能力。但与之前的研究略有不同的是,在-20℃条件下,单一的冻融技术会使蛋黄和浆质稳定的乳剂具有更高的冻融稳定性,但经磷脂酶A₂

处理后, 蛋黄和颗粒的乳化稳定性随之增加, 浆质的乳化稳定性则有所降低, 且失稳程度与冻融时间成正比。总体而言, 大部分研究都已证实酶法处理可显著提高蛋黄及其组分的乳化稳定性, 但冻融技术结合酶处理对蛋黄及其组分乳化性的影响与以往结论稍有差异。因此, 酶处理结合多种技术对蛋黄组分乳化性的影响仍需继续探究, 以此提供更多理论依据与对比分析数据。

4.3.2 起泡性

酶法处理对蛋黄组分功能性的影响还体现在泡沫性质方面。酶水解会将蛋白质降解为肽, 增强蛋白溶解度与表面疏水性^[84], 使蛋黄中的蛋白质在水-空气界面中产生较低的表面张力, 从而增加起泡能力。由此亦可表明, 理化性质对于功能特性的影响还体现在起泡性上。但过多的肽会使泡沫系统无法稳定, 因此泡沫稳定性在前期会随水解度的增加而升高, 当水解到一定程度后, 体系泡沫稳定性逐渐降低^[71], 且不同酶种类对蛋黄及其组分泡沫性质的影响也不同。例如有研究者采用磷脂酶A₁、A₂和脂肪酶对蛋黄及组分进行水解后发现, 虽然三者的起泡性均有所提高, 但脂肪酶的水解效果远不如磷脂酶, 且会导致泡沫稳定性降低^[75,77], 这可能是由于磷脂酶和脂肪酶的水解机制不同, 磷脂酶主要水解酯键或磷酸二酯键, 而脂肪酶会水解二酰甘油和单酰甘油中的酯键, 释放额外的脂肪酸, 最终释放出甘油^[85]; 因此降低了蛋黄及其组分的泡沫稳定性。总之, 酶解可显著提高蛋黄及组分的起泡性, 但对泡沫稳定性的影响效果却因酶种类而异。但就现阶段的研究而言, 学者们多采用磷脂酶A₁与A₂对蛋黄组分进行改性, 而其他酶类(如磷脂酶C)对蛋黄组分影响的报道相对较少, 因此在后续研究中, 可采用多种酶类对蛋黄组分进行处理, 以提供更多理论支持与研究依据。

从上述研究中还可以看出, 提高蛋黄及其组分的蛋白溶解度后, 其乳化性也会得到改善, 并且由于凝胶形成后, 其硬度与黏弹性均会增加, 导致颗粒与浆质的结构更加紧密从而发生聚集。这也充分说明了理化性质、微观结构及功能特性间的关系, 理化性质的提高会改善功能特性, 而功能特性也会导致微观结构发生变化, 三者间的关系紧密相连。

综上所述, 表3汇总了盐腌、碱处理、热处理及酶法处理对蛋黄及其组分功能特性的影响。但鉴于目前对于功能特性的研究大多集中于乳化性上, 因此本文特将以上4种处理方法对蛋黄及其组分乳化性的影响单独列出(表4)。

表3 不同处理方法对蛋黄及其组分功能特性的影响

Table 3 Effects of different treatments on functional properties of egg yolk and its components

处理方法	处理指标	蛋黄	蛋黄颗粒	蛋黄浆质	参考文献
盐腌	凝胶性	硬度、咀嚼性、黏弹性: 先升高后降低	硬度升高 内聚性升高	保水性升高 内聚性升高 弹性先升高后降低	[18,34-37]
碱处理	凝胶性	硬度升高	硬度升高, 不易变形	硬度先升高后降低	[43,48-51]
热处理	起泡性	低温: 起泡性升高, 泡沫稳定性变化较小 高温: 起泡性降低, 泡沫稳定性升高	/	/	[61-67]
酶法处理	起泡性	磷脂酶A ₁ : 起泡性升高 磷脂酶A ₂ : 起泡性升高 脂肪酶: 泡沫稳定性降低	磷脂酶A ₁ : 起泡性升高 磷脂酶A ₂ : 起泡性升高 脂肪酶: 泡沫稳定性降低	磷脂酶A ₁ : 起泡性升高 磷脂酶A ₂ : 起泡性升高 脂肪酶: 泡沫稳定性降低	[71,75,77,84-85]

表4 不同处理方法对蛋黄及其组分乳化性的影响

Table 4 Effects of different treatments on emulsifying properties of egg yolk and its components

处理方法	蛋黄	蛋黄颗粒	蛋黄浆质	参考文献
盐腌	乳化活性升高 乳化稳定性下降	乳化稳定性升高	乳化活性升高	[28-33]
碱处理	乳化活性升高	形成Pickering乳液	乳化活性变化较小 乳化稳定性变化较小	[45-47]
热处理	低温: d_{90} 变化较小 高温: d_{90} 升高	乳化活性 { 低温: 变化较小 高温: 降低 乳化稳定性 { 低温: 变化较小 高温: 升高	乳化活性 { 低温: 变化较小 高温: 降低 乳化稳定性 { 低温: 变化较小 高温: 先升高后降低	[52-53,57-60]
酶法处理	乳化稳定性升高	乳化稳定性升高	乳化稳定性升高	[78-83]

5 结 语

蛋黄颗粒与蛋黄浆质是蛋黄的重要组成部分, 它们的相关性质受到了学者们的广泛关注, 但仍然缺乏深入而系统的研究和总结。本文综述了目前使用较为广泛的几种处理方法——盐腌、碱处理、热处理及酶法处理, 这4种处理方法都可提高蛋黄及其组分的理化性质, 改变其微观结构, 改善其功能特性, 并且理化性质的改变可能会影响功能特性, 而功能特性中凝胶网络的形成亦会使微观结构发生变化, 三者之间有着密切的联系。此外, 在实际生产、加工中, 也应注意处理方法的具体工艺参数与类别。例如盐腌时间过长会降低蛋黄的质构特性, 过高的温度会导致蛋黄颗粒与蛋黄浆质的乳化活性降低, 而脂肪酶则会降低蛋黄颗粒与蛋黄浆质的泡沫稳定性等。因此, 根据实际情况与样品的不同性质选择适宜的处理方式和条件至关重要。现有成果为后续的研究与探索提供了坚实的理论基础和可行性依据, 且科学技术与科研能力也在不断地进步和完善, 相信蛋黄及其组分在未来的食品领域中必将有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 黄晨轩, 岳巧娟, 孙浩政, 等. 蛋制品及其加工技术研究进展[J]. 畜牧兽医学, 2021(7): 4-7. DOI:10.3969/j.issn.2096-3637.2021.07.002.

- [2] 张清, 袁诺, 赵金红, 等. 鸡蛋哈夫值与其脂肪酸组成的相关关系[J]. 食品科技, 2021, 46(4): 37-44. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2021.04.006.
- [3] MARCET I, ALVAREZ C, PAREDES B, et al. Inert and oxidative subcritical water hydrolysis of insoluble egg yolk granular protein, functional properties, and comparison to enzymatic hydrolysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(32): 8179-8186. DOI:10.1021/jf405575c.
- [4] 杜振亚. 两性性蛋黄蛋白肽的自组装及其在食品胶体中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 1.
- [5] LI Teng, ZHONG Qixin, WU Tao. Effects of NaCl on the freezing-thawing induced gelation of egg yolk at pH 2.0-8.0[J]. Food Biophysics, 2022, 17(1): 106-113. DOI:10.1007/S11483-021-09703-W.
- [6] 徐丽兰, 赵燕, 徐明生, 等. 食盐诱导的蛋黄凝聚行为研究进展[J]. 中国食品学报, 2019, 19(3): 317-325. DOI:10.16429/j.1009-7848.2019.03.039.
- [7] GENG Fang, XIE Yunxiao, WANG Yi, et al. Depolymerization of chicken egg yolk granules induced by high-intensity ultrasound[J]. Food Chemistry, 2021, 354: 129580. DOI:10.1016/J.FOODCHEM.2021.129580.
- [8] LI Junhua, ZHAI Jiali, GU Luping, et al. Hen egg yolk in food industry: a review of emerging functional modifications and applications[J]. Food Science & Technology, 2021, 115: 12-21. DOI:10.1016/j.tifs.2021.06.031.
- [9] LI Zhe, SUN Yi, JIN Haobo, 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.
- [10] 张诗思. 高乳化性蛋黄液的制备及其应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 1.
- [11] KIOSSEOGLU V. Egg yolk protein gels and emulsions[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2003, 8(4/5): 365-370. DOI:10.1016/S1359-0294(03)00094-3.
- [12] LI Teng, SU Huanhuan, ZHU Jiaqian, et al. Janus effects of NaCl on structure of egg yolk granules[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131077. DOI:10.1016/J.FOODCHEM.2021.131077.
- [13] WANG Anheng, XIAO Zhigang, WANG Jingjing, et al. Fabrication and characterization of emulsion stabilized by table egg-yolk granules at different pH levels[J]. Science of Food and Agriculture, 2020, 100(4): 1470-1478. DOI:10.1002/jfsa.10154.
- [14] GUILMINEAU F, KULOZIK U. Influence of a thermal treatment on the functionality of hen's egg yolk in mayonnaise[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(2): 648-654. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.11.002.
- [15] SU Yujie, ZHENG Chen, LI Junhua, et al. Characterization of salted egg yolk flavoring prepared by enzyme hydrolysis and microwave irradiation[J]. Food Chemistry, 2020, 338: 127913. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127913.
- [16] XU Lilan, ZHAO Yan, XU Mingsheng, et al. Changes in aggregation behavior of raw and cooked salted egg yolks during pickling[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 68-77. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.01.026.
- [17] LI Junhua, LI Xin, WANG Chenying, et al. Characteristics of gelling and water holding properties of hen egg white/yolk gel with NaCl addition[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 887-893. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.11.034.
- [18] XU Lilan, ZHAO Yan, XU Mingsheng, et al. Changes in physicochemical properties, microstructure, protein structures and intermolecular force of egg yolk, plasma and granule gels during salting[J]. Food Chemistry, 2018, 275: 600-609. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.09.078.
- [19] CHALAMAIAH M, ESPARZA Y, HONG H, et al. Physicochemical and functional properties of leftover egg yolk granules after phosphatidylcholine extraction[J]. Food Chemistry, 2018, 268: 369-377. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.06.033.
- [20] XU Lilan, ZHAO Yan, XU Mingsheng, et al. Formation mechanism of low-density lipoprotein gel induced by NaCl[J]. Poultry Science, 2019, 98(10): 5166-5176. DOI:10.3382/ps/pez232.
- [21] KAEWMANEE T, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W. Effects of salting processes and time on the chemical composition, textural properties, and microstructure of cooked duck egg[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(2): S139-S147. DOI:10.1111/j.1750-3841.2010.01975.x.
- [22] AI Minmin, GUO Shanhuang, ZHOU Quan, et al. The investigation of the changes in physicochemical, texture and rheological characteristics of salted duck egg yolk during salting[J]. Food Science and Technology, 2018, 88: 119-125. DOI:10.1016/j.lwt.2017.10.013.
- [23] SIRVENTE H, BEAUMAL V, GAILLARD C, et al. Structuring and functionalization of dispersions containing egg yolk, plasma and granules induced by mechanical treatments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(23): 9537-9544. DOI:10.1021/JF0719398.
- [24] LI Teng, SU Huanhuan, ZHU Jiaqian, et al. Janus effects of NaCl on structure of egg yolk granules[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131077. DOI:10.1016/J.FOODCHEM.2021.131077.
- [25] 邵萍, 刘会平, 邹乾, 等. 酸浸减压法腌制咸蛋与传统咸蛋的对比[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 8-13. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.18.002.
- [26] WANG Jing, QI Shen, ZHANG Wenhui, et al. Study on effect of salting process on egg yolk plasma using AF4 combined with ATR-FTIR and DSC[J]. Food Science and Technology, 2018, 93: 362-367. DOI:10.1016/j.lwt.2018.03.058.
- [27] WAKAMATSU H, HANDA A, CHIBA K. Observations using Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance (³¹P-NMR) of structural changes in freeze-thawed hen egg yolk[J]. Food Chemistry, 2018, 244: 169-176. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.10.032.
- [28] 刘培玲, 张晴晴, 高增丽, 等. 乳清蛋白改性研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 333-348. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201023-232.
- [29] 申一梅. 蛋黄颗粒/磷脂复合胶团的制备与表征及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 4.
- [30] ANTON M, BEAUMAL V, GANDEMER G. Adsorption at the oil-water interface and emulsifying properties of native granules from egg yolk: effect of aggregated state[J]. Food Hydrocolloids, 2000, 14(4): 327-335. DOI:10.1016/S0268-005X(00)00009-6.
- [31] LACA A, PAREDES B, RENDUELES M, et al. Egg yolk plasma: separation, characteristics and future prospects[J]. Food Science and Technology, 2015, 62(1): 7-10. DOI:10.1016/j.lwt.2015.01.048.
- [32] REN Liuyang, LIU Jingyuan, ZHANG Xueqi, et al. Emulsion, gelation, physicochemical properties and microstructure of phosphorylated and succinylated egg yolk[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109675. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109675.
- [33] 秦凤娇, 何强, 赵志峰. 磷酸盐对鸡蛋蛋黄乳化活性的影响研究[J]. 食品科技, 2017, 42(11): 279-283. DOI:10.13684/cnki.spkj.2017.11.052.
- [34] 张根生, 徐旖梦, 遇仕友, 等. 蛋黄凝胶形成机理及影响因素研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 1-5. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.04.001.
- [35] 杨海燕, 金永国, 孙秀秀, 等. 添加不同水平NaCl对蛋黄浆质凝胶性的影响研究[J]. 现代食品科技, 2018, 34(8): 165-171. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.8.024.

- [36] 吕蕙, 马美湖, 刘远远. 稻秸灰水提取物对咸蛋黄理化特性的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(4): 148-156. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.4.021.
- [37] VALVERDE D, LACA A, ESTRADA L N, et al. Egg yolk and egg yolk fractions as key ingredient for the development of a new type of gels[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2016, 3: 30-37. DOI:10.1016/j.ijgfs.2016.02.001.
- [38] SOUSA R D C S, COIMBRA J S R, ROJAS E E G, et al. Effect of pH and salt concentration on the solubility and density of egg yolk and plasma egg yolk[J]. Food Science and Technology, 2007, 40(7): 1253-1258. DOI:10.1016/j.lwt.2006.08.001.
- [39] CHEN S Y, KUO M I. Physicochemical and functional properties of Chinese soft-shell turtle (*Pelodiscus sinensis*) egg[J]. Food Research International, 2016, 85: 36-43. DOI:10.1016/j.foodres.2016.04.013.
- [40] CHALAMAIAH M, ESPARZA Y, TEMELLI F, et al. Physicochemical and functional properties of livetins fraction from hen egg yolk[J]. Food Bioscience, 2017, 18: 38-45. DOI:10.1016/j.fbio.2017.04.002.
- [41] ASSIS T F, GARCIA ROJAS E E, SOUZA C J F, et al. Solubility of egg yolk proteins: modelling and thermodynamic parameters[J]. European Food Research and Technology, 2010, 231(5): 745-750. DOI:10.1007/s00217-010-1326-3.
- [42] GAO Xuejing, YAO Yao, WU Na, et al. The sol-gel-sol transformation behavior of egg white proteins induced by alkali[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 588-597. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2020.03.209.
- [43] YANG Yuan, ZHAO Yan, XU Mingsheng, et al. Effects of strong alkali treatment on the physicochemical properties, microstructure, protein structures, and intermolecular forces in egg yolks, plasma, and granules[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125998. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125998.
- [44] 张玉凤, 王怡, 吴永艳, 等. 蛋黄凝胶特性影响因素及改善方法研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 187-193. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.05.034.
- [45] 黄群, 麻成金, 黄诚, 等. 鹌鹑蛋功能特性及其影响因素[J]. 食品与发酵工业, 2008(9): 89-92. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2008.09.020.
- [46] GMACH O, BERTSCH A, BILKE-KRAUSE C, et al. Impact of oil type and pH value on oil-in-water emulsions stabilized by egg yolk granules[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 581: 123788. DOI:10.1016/j.colsurfa.2019.123788.
- [47] LE DENMAT M, ANTON M, BEAUMAL V. Characterisation of emulsion properties and of interface composition in O/W emulsions prepared with hen egg yolk, plasma and granules[J]. Food Hydrocolloids, 2000, 14(6): 539-549. DOI:10.1016/S0268-005X(00)00034-5.
- [48] STRIXNER T, KULOZIK U. Continuous centrifugal fractionation of egg yolk granules and plasma constituents influenced by process conditions and product characteristics[J]. Food Engineering, 2013, 117(1): 89-98. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2013.02.009.
- [49] LACA A, PAREDES B, RENDUELES M, et al. Egg yolk granules: separation, characteristics and applications in food industry[J]. Food Science and Technology, 2014, 59(1): 1-5. DOI:10.1016/j.lwt.2014.05.020.
- [50] YANG Yuan, ZHAO Yan, XU Mingsheng, et al. Alkali induced gelation behavior of low-density lipoprotein and high-density lipoprotein isolated from duck eggs[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125952. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125952.
- [51] KIOSSEOGLOU V, PARASKEVOPOULOU A. Molecular interactions in gels prepared with egg yolk and its fractions[J]. Food Hydrocolloids, 2004, 19(3): 527-532. DOI:10.1016/j.foodhyd.2004.10.027.
- [52] 阎微. 高压和热处理对蛋黄体系中蛋白质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 20-21.
- [53] 苏宇杰, 杨新宇, 周岷, 等. 热处理对鸡蛋蛋黄性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(10): 70-75. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2012.10.025.
- [54] 张蒙琪. 鸡蛋蛋白与大豆分离蛋白间相互作用及其凝胶特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 43.
- [55] ANTON M, DENMAT M L, GANDEMER G. Thermostability of hen egg yolk granules: contribution of native structure of granules[J]. Food Science, 2010, 65(4): 581-584. DOI:10.1111/j.1365-2621.2000.tb16052.x.
- [56] XU Lilan, GU Luping, SU Yujie, et al. Impact of thermal treatment on the rheological, microstructural, protein structures and extrusion 3D printing characteristics of egg yolk[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105399. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105399.
- [57] 刘佩, 陈澄, 秦新光, 等. 乳清分离蛋白聚集体乳化性能及其Pickering乳液稳定性[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 24-30. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200610-144.
- [58] SAKAI S, IKEDA N. A numerical analysis to evaluate the emulsifying activity of pasteurized egg yolk[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107087. DOI:10.1016/j.foodhyd.2021.107087.
- [59] GUILMINEAU F, KULOZIK U. Impact of a thermal treatment on the emulsifying properties of egg yolk. part 1: effect of the heating time[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(8): 1105-1113. DOI:10.1016/j.foodhyd.2005.12.005.
- [60] DENMAT M, ANTON M, GANDEMER G. Protein denaturation and emulsifying properties of plasma and granules of egg yolk as related to heat treatment[J]. Journal of Food Science, 1999, 64(2): 194-197. DOI:10.1111/j.1365-2621.1999.tb15863.x.
- [61] WOUTERS A G B, ROMBOUTS I, FIERENS E, et al. Foaming and air-water interfacial characteristics of solutions containing both gluten hydrolysate and egg white protein[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 176-186. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.09.033.
- [62] LI Xin, MURRAY B S, YANG Yanjun, et al. Egg white protein microgels as aqueous Pickering foam stabilizers: bubble stability and interfacial properties[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105292. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105292.
- [63] LI Xin, LI Junhua, CHANG Cuihua, et al. Foaming characterization of fresh egg white proteins as a function of different proportions of egg yolk fractions[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 90: 118-125. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.12.014.
- [64] 徐旭东, 吴文琪, 尹吉帆, 等. 热处理和乳酸钙对蛋液起泡性的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(3): 112-115. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2019.03.019.
- [65] 乔立文. 机械剪切与热处理对于鸡蛋全蛋液功能性质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2011: 22.
- [66] 李欢欢, 陈伊凡, 张晋, 等. 热处理对酶解蛋黄液功能特性和热稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(10): 105-114. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.10.013.
- [67] 乔立文, 杨新宇, 杨严峻. 热处理对于鸡蛋全蛋液功能性质的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(11): 134-137. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2011.11.075.
- [68] SHENG Long, WANG Yibo, CHEN Jiahui, 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.

- [69] 刘杰, 徐明生, 刘建涛, 等. 水相酶法提取蛋黄油工艺的响应面分析法研究[J]. 江西农业大学学报, 2007(5): 821-826. DOI:10.3969/j.issn.1000-2286.2007.05.028.
- [70] FU Xing, HUANG Xi, JIN Yongguo, et al. Characterization of enzymatically modified liquid egg yolk: structural, interfacial and emulsifying properties[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105763. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.105763.
- [71] BAO Zhijie, ZHAO Ying, WANG Xiaoying, et al. Effects of degree of hydrolysis (DH) on the functional properties of egg yolk hydrolysate with alcalase[J]. Food Science and Technology, 2017, 54(3): 669-678. DOI:10.1007/s13197-017-2504-0.
- [72] TANG Shitao, ZHOU Xin, GOUDA M, et al. Effect of enzymatic hydrolysis on the solubility of egg yolk powder from the changes in structure and functional properties[J]. Food Science and Technology, 2019, 110: 214-222. DOI:10.1016/j.lwt.2019.04.070.
- [73] LI Qiqi, ZHANG Xinyue, TANG Shitao, et al. Improved effect of ultrasound-assisted enzymolysis on egg yolk powder: structural properties, hydration properties and stability characteristics[J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132549. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.132549.
- [74] STRIXNER T, WÜRTH R, KULOZIK U. Combined effects of enzymatic treatment and spray drying on the functional properties of egg yolk main fractions granules and plasma[J]. Drying Technology, 2013, 31(13/14): 1485-1496. DOI:10.1080/07373937.2013.790411.
- [75] LI Xin, WANG Yuemeng, SUN Chengfeng, et al. Comparative study on foaming properties of egg white with yolk fractions and their hydrolysates[J]. Foods, 2021, 10(9): 2238. DOI:10.3390/foods10092238.
- [76] 李鑫. 基于界面特性解析蛋清蛋白体系泡沫性质及其调控机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 54-56.
- [77] JIN Yongguo, HUANG Dan, DING Tian, et al. Effect of phospholipase A₁ on the physicochemical and functional properties of hen's egg yolk, plasma and granules[J]. Food Biochemistry, 2013, 37(1): 70-79. DOI:10.1111/j.1745-4514.2011.00608.x.
- [78] LI Qin, TANG Shitao, MOURAD F K, et al. Emulsifying stability of enzymatically hydrolyzed egg yolk granules and structural analysis[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105521. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105521.
- [79] GAO Yang, LI Junhua, CHANG Cuihua, 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.
- [80] 高扬. 酶解蛋黄乳化性质及壳聚糖对其稳定性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 24.
- [81] 黄丹, 马美湖, 蔡朝霞, 等. 磷脂酶A₁改性制备高乳化性蛋黄粉的工艺条件优化[J]. 食品科学, 2010, 31(6): 20-25.
- [82] 唐世涛. 超声联合蛋白酶酶解对蛋黄粉溶解性及乳化稳定性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019: 91.
- [83] GMACH O, GOLDA J, KULOZIK U. Freeze-thaw stability of emulsions made with native and enzymatically modified egg yolk fractions[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107109. DOI:10.1016/j.foodhyd.2021.107109.
- [84] LAMSAL B P, JUNG S, JOHNSON L A. Rheological properties of soy protein hydrolysates obtained from limited enzymatic hydrolysis[J]. Food Science and Technology, 2007, 40(7): 1215-1223. DOI:10.1016/j.lwt.2006.08.021.
- [85] GERITS L R, PAREYT B, DECAMPS K, et al. Lipases and their functionality in the production of wheat-based food systems[J]. Food Science and Food Safety, 2014, 13(5): 978-989. DOI:10.1111/1541-4337.12085.