

蛋黄凝胶形成机理及影响因素研究进展

Research progress on formation mechanism and influencing factors of egg yolk gel

张根生 徐旖梦 遇仕友 潘雷

ZHANG Gen-sheng XU Yi-meng YU Shi-you PAN Lei

(哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028)

(College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150028)

摘要:文章介绍了热诱导、碱诱导和冷冻诱导蛋黄凝胶的凝胶过程、理化性质及形成机理,在此基础上重点阐述了不同影响因素对热诱导凝胶、碱诱导凝胶和冷冻诱导凝胶的影响,并对蛋黄凝胶的研究方向进行了展望。

关键词:凝胶;蛋黄;热诱导;碱诱导;冷冻诱导;影响因素

Abstract: In this review, gelation process, physicochemical properties and formation mechanism of egg yolk gel induced by heat, alkali and freezing were introduced. On this basis, the effects of different factors on heat-induced gel, alkali-induced gel and freezing-induced gel were elaborated, and the research direction of egg yolk gel was prospected.

Keywords: gel; egg yolk; heat-induced gel; alkali-induced gel; freezing-induced gel; influencing factor

禽蛋黄因其较高的营养价值和独特的口感广泛受到人们的欢迎,是许多食品的主要成分,如:蛋黄酱、奶油、蛋奶糊、煎蛋卷以及各式糖果糕点和焙烤食品等^[1]。不仅如此,禽蛋黄还具有良好的加工性能,其良好的凝胶性和乳化性能被广泛应用到食品生产加工中^[2]。

蛋黄主要含有 32% 的脂肪和 16% 的蛋白,可看作是脂质和蛋白质的天然超分子集合,具有多层结构^[3-4]。天然蛋黄并不是简单的蛋白质溶液,而是一种分散的粒子系统,包括低密度脂蛋白微粒和高密度脂蛋白颗粒,其中,中性甘油三酯埋藏在颗粒内部,而蛋白质则占据颗粒表面,以这种方式稳定系统^[5]。蛋黄中的组成成分复杂且多样,但天然蛋黄可以很轻易地分离出其主要组分,血浆和颗粒^[6]。血浆由 85% 的低密度脂蛋白(LDL)和 15% 的卵黄球蛋白组成,占蛋黄干物质的 78%^[7];颗粒中含有 70% 的高密度脂蛋白(HDL),16% 的磷蛋白和 12% 的低

密度脂蛋白,占蛋黄干物质的 22%^[8]。无论是蛋黄还是蛋黄中的血浆和颗粒,都能在一定条件下发生变性,形成凝胶。凝胶是指在分散介质中的胶体粒子或高分子溶质,形成整体构造而失去了流动性,或胶体全体虽含有大量液体介质但处于固化的状态,凝胶化是禽蛋蛋黄的一个重要功能特性^[9]。

蛋黄的凝胶化是指蛋黄蛋白质结构部分展开或者发生不可逆变性,蛋白分子间相互作用,聚集成有序的网络结构^[10]。物理或化学过程,如加热、加压、冷冻、强碱、酶、金属离子等,均能诱导形成蛋黄凝胶^[11]。根据诱导方式,蛋黄凝胶主要分为热诱导凝胶、碱诱导凝胶和冷冻凝胶^[12-14]。不同的诱导方式形成的蛋黄凝胶的理化性质、微观结构和凝聚机理都有差异。

1 蛋黄热诱导凝胶形成机理及影响因素研究进展

蛋黄的热诱导凝胶是一种常见的凝胶类型。天然蛋黄加热至 65 °C 左右开始稠化,环境温度达到 70 °C 时其流动性丧失,开始形成凝胶网络结构,这与蛋黄血浆的低变性温度有关^[15]。活素是蛋黄中最敏感的蛋白质,环境温度达到 60~62 °C 就会变性,这种高热敏性在相互作用的蛋白质网络中起到重要作用^[16]。

蛋黄热诱导凝胶的形成被认为是加热后蛋黄颗粒(低密度脂蛋白胶束和高密度脂蛋白颗粒)的不稳定过程,是由于其表面稳定的蛋白质变性导致的,变性的蛋白质间相互作用,形成了凝胶网络结构^[17]。蛋黄凝胶化的过程主要由 LDL 载脂蛋白相互作用主导,而颗粒因其球状结构及 HDL 载脂蛋白与颗粒结构磷元素间的复合物对热不敏感,作为凝胶网络形成剂的效果较差^[5,7]。一般认为,形成和维持蛋黄热诱导凝胶的主要作用力是疏水相互作用、二硫键、氢键等,其中起到决定性作用的是二硫键^[15,17]。物理力似乎主导了蛋黄蛋白质间的相互作用。Paraskevopoulou 等^[17]发现蛋黄脱水会破坏颗粒间

作者简介:张根生(1964—),男,哈尔滨商业大学教授,硕士。

E-mail: zhanggsh@163.com

收稿日期:2021-01-08

的疏水相互作用和氢键,经过水化后会自发地形成“弱”凝胶结构,此时加热系统,才会形成真正的凝胶结构,这验证了变性蛋白质间的共价二硫键对蛋黄凝胶的形成起决定性的作用。

1.1 盐对蛋黄热诱导凝胶的影响

向蛋黄中加入 NaCl,会改变蛋黄凝胶的凝胶温度,影响蛋黄凝胶的性能。Kaewmanee 等^[18]在试验中发现,添加质量分数 1.0% 和 3.0% NaCl 的蛋黄的变性温度分别为 84.8、91.1 °C。说明在加热过程中向蛋黄中加入 NaCl 会使蛋白质分子趋于稳定,导致变性温度升高,凝胶网络形成延迟。Wakamatu 等^[19]也在试验中验证了这一现象,发现当添加质量分数 1%~2% NaCl 时,形成低密度脂蛋白—水—NaCl 复合物,会抑制 LDL 形成凝胶,还会使形成的凝胶性能下降。杨海燕等^[20]研究了不同 NaCl 添加量对蛋黄浆质凝胶性能的影响,发现在质量分数 0.5%~2.0% NaCl 的作用下,浆质凝胶的硬度、咀嚼性和内聚性系数均下降,降低了蛋黄浆质凝胶的质构特性。

NaCl 处理对蛋黄蛋白质的一级结构不造成影响,但会使蛋白质的二级结构发生改变(β -折叠和 α -螺旋减少, β -转角增加),破坏了氢键,对蛋白质凝胶网络系统产生一定的影响^[21-22]。NaCl 对蛋黄热诱导凝胶特性的影响机理还需要进一步讨论。

1.2 酶对蛋黄热诱导凝胶的影响

酶法改性对蛋黄液热诱导凝胶影响的研究较少,大多集中在通过酶法改性提高蛋黄粉的凝胶性能方面。黄迪等^[23]发现谷氨酰胺转氨酶(TGase)通过交联作用能有效地提高蛋黄粉的性能。当 TGase 添加量为 1.5 U/g 蛋黄时,适度的交联反应使蛋黄蛋白质中部分巯基转化成二硫键,小分子蛋白质间的交联形成网络结构促进水分子与肽链间的结合,增加了肽链间共价键的数目,有助于蛋黄热诱导凝胶网络结构的形成^[24]。有研究者^[25]也使用酶改性来提高蛋黄粉的热稳定性。Strixner 等使用磷脂酶 A₂(PLA₂)改性蛋黄及其主要成分,发现 PLA₂ 预处理的蛋黄血浆组分增强了 LDL 在喷雾干燥过程中的热稳定性^[26],并且改性蛋黄的变性温度和凝胶温度都在 100 °C 以上,有很强的耐热性^[27-28]。

酶能促进蛋黄蛋白质间的交联作用,且交联的程度与酶的添加量有关。适度的交联会改善蛋黄凝胶特性,过度交联会使凝胶网络结构致密,不利于与周围水分子的结合,形成的凝胶硬度会下降^[29-30]。酶法改性作为蛋白质改性的热点,未来可以研究不同种类酶对蛋黄液热凝胶性能的影响。

1.3 其他成分对蛋黄热诱导凝胶的影响

除了盐和酶等添加成分会影响蛋黄热诱导凝胶的性能,酚类物质、蛋白质等也会对蛋黄热诱导凝胶性能产生影响。Carla 等^[31]发现橄榄苦苷的加入影响了蛋黄凝胶

网络的凝聚行为,并且还受到环境 pH 的影响,在 pH 4.5 的体系中影响最为显著。在酚类化合物存在及环境 pH 4.5 的情况下,基团间的静电相互作用促进了蛋黄蛋白质间相互聚集,凝胶点向较低的温度下移动。Kojima 等^[32]研究了低密度脂蛋白—蛋白质混合物的热凝胶特性,发现添加蛋白质对 LDL 热诱导凝胶强度的影响随溶液 pH 的变化而变化较大。在添加另一种蛋白质(牛血清蛋白和卵清蛋白)后,LDL 与其相互作用,在中性和碱性 pH 区域环境下的凝胶强度显著增加。

酚类和蛋白质等添加成分均会对蛋黄热诱导凝胶产生一定影响,且大多与环境的 pH 也有关。蛋黄是一种重要的食品原料,其热凝胶特性在很多食品生产中都有利用,因此研究蛋黄蛋白质的热凝胶特性是否受到食品体系中其他成分的影响是非常有意义的。

1.4 加工技术对蛋黄热诱导凝胶的影响

不仅添加剂会影响蛋黄热诱导凝胶性能,加工技术也会影响蛋黄热诱导凝胶特性。Xie 等^[33]使用高强度超声(HIU)处理蛋黄液,发现经过 HIU 处理降低了蛋黄的 Zeta 电位绝对值和游离巯基含量,降低了蛋黄的平均粒径,改变了蛋黄组分的聚集行为,使蛋黄热诱导凝胶性能增强。蛋黄作为食品加工中的基本和重要组成成分,研究现代加工技术对蛋黄的功能和营养特性的影响对其应用也具有重要意义,今后可进一步研究脉动压、真空技术等对蛋黄热诱导凝胶的影响。

2 蛋黄碱诱导凝胶形成机理及影响因素研究进展

在诱导蛋黄凝胶形成的因素中,pH 的影响最为显著。Kaewmanee 等^[34]发现 $\text{pH} < 4.2$ 或者 $\text{pH} > 6.3$ 时颗粒蛋白破裂蛋黄才能形成凝胶。当环境 pH 值接近蛋黄蛋白质等电点时,形成的凝胶不均匀,聚集物较大^[35]。环境 pH 远离蛋黄蛋白质等电点,蛋白质会发生线性聚集,这有助于形成“串珠”网络结构^[36]。碱诱导蛋黄涉及多种相互作用,包括蛋白质分子之间或与脂质之间的相互作用、水分的迁移和脂质的捕获,主要通过离子键和二硫键逐渐形成致密的凝胶网络结构^[37]。

艾民珉等^[38]发现在氢氧化钠的作用下,蛋黄脂蛋白被破坏,蛋白质与油脂分离,油脂与碱发生皂化反应使得原本柔软的外层蛋黄开始凝固,蛋白质分解成小片段多肽,这些多肽通过内部化学键发生交联包裹水分而富有弹性,凝胶强度增加。外层蛋黄凝胶的形成主要靠离子键和二硫键的作用^[39]。

2.1 处理温度对蛋黄碱诱导凝胶的影响

处理温度在碱诱导凝胶形成过程中不起主要作用,但却是影响其凝胶行为的主要因素之一,是决定凝胶特性好坏的关键。陈晓^[40]³⁵⁻³⁹发现处理温度对蛋黄碱诱导

凝胶性能有显著的影响。碱处理时升高体系温度更利于凝胶网络结构的形成,使其硬度增加。若温度过低会影响 OH^- 渗入蛋体的速率^[41]。但处理温度并非越高越好,在 30~35 °C 形成的凝胶最佳。处理后的温度对蛋黄碱诱导凝胶体系的影响也很大。适当提高碱作用后的温度(30 °C)有助于凝胶体系充分与碱反应,使得质构特性得到增强^[40]^[43-47]。这与孙静等^[42]的研究结果一致。热处理可以在一定程度上促进水分和碱从蛋黄内溢出,降低蛋体内的含水量和游离碱度,加快蛋黄的凝固^[42]。

处理温度对蛋黄碱诱导凝胶特性都具有显著影响,体系温度过高或过低都会使蛋黄凝胶的质构特性和感官品质变差。温度协助碱液形成蛋黄碱凝胶的机理还未见详细阐述,需进一步探讨研究。

2.2 处理时间对蛋黄碱诱导凝胶的影响

处理时间对蛋黄碱诱导凝胶的形成具有重要的影响。时间的长短影响渗入到蛋黄体系中的碱含量,从而影响蛋黄凝胶行为。在碱液的作用下,蛋黄中的水分会逐渐流失。随着处理时间的延长,蛋黄发生皂化反应会使其固化率升高,导致蛋黄凝胶的硬度和咀嚼性升高^[43];同时脱水后的蛋黄凝胶由于疏水相互作用和氢键作用的减弱,使得蛋黄凝胶网络变得松散,弹性和内聚性等质构特性下降^[17]。若碱液对蛋黄的作用时间过长,可能会导致蛋黄凝胶出现再次液化的现象。处理时间与体系温度的协同作用对蛋黄碱诱导凝胶特性的影响还需进一步讨论。

2.3 盐对蛋黄碱诱导凝胶的影响

碱诱导蛋黄凝胶形成过程中,体系内的水分会逐渐流失,向体系中添加一价或二价阳离子会影响蛋黄的凝胶失水率,对其特性产生影响。Ganasen 等^[43]发现添加 ZnCl_2 和 CaCl_2 ,蛋黄凝胶体系水分流失更加显著;同样,添加 PbO_2 形成的蛋黄碱诱导凝胶体系水分含量却较高。这是因为卵黄蛋白和 Pb^{2+} 形成的高交联蛋白在一定程度上防止了蛋黄脱水。添加阳离子的浓度对蛋黄凝胶也会有显著影响。Ganasen 等^[43]发现低浓度的 ZnCl_2 和 CaCl_2 会使蛋黄凝胶较硬;同浓度的 PbO_2 会使蛋黄凝胶颜色较深。

二价阳离子的种类和浓度会对蛋黄碱诱导凝胶的质地和颜色产生不同的影响。Ganasen 等^[44]提出,二价和四价阳离子与蛋白质分子可以通过盐桥的形式聚集形成凝胶,相关机理有待研究者进一步讨论。

3 蛋黄冷冻诱导凝胶形成机理及影响因素研究进展

不仅高温可以诱导禽蛋蛋黄蛋白质形成凝胶结构,在低温状态下,也可以形成凝胶结构。冷冻诱导凝胶是指禽蛋蛋黄在冷冻条件下(≤ -6 °C),其黏度迅速提高,

形成具有良好黏弹性的凝胶,这种凝胶体解冻后蛋黄也不能恢复原有形态^[45]。许多研究^[46-47]表明,冷冻凝胶化是由 LDL 聚集引起的,但也有研究^[48]表明,冷冻凝胶化可能涉及除 LDL 以外的化合物。尽管蛋黄凝胶化存在许多不同的机制,但大多数研究人员同意,通过冰晶形成去除水分是凝胶发生的必要条件。

蛋黄凝胶形成最普遍的解释是血浆中低密度脂蛋白的聚集^[49],然而聚集机制存在分歧。Telis 等^[50]提出血浆低密度脂蛋白胶束的断裂是蛋白凝胶化形成的第一步。在冷冻状态下,载脂蛋白的脱水导致其相互作用被破坏,非极性蛋白质相互作用增强,低密度脂蛋白聚集导致最终凝胶化^[51]。Au 等^[14]认为在研究蛋黄凝胶化机理与血浆低密度脂蛋白有关的同时不应忽视颗粒的作用。蛋黄成分聚集形成凝胶有两个原因:① 脂蛋白颗粒表面的破坏;② 在冻结过程中形成的大冰晶导致蛋黄成分的浓缩^[51]。尽管这些年对蛋黄冷冻诱导凝胶研究广泛,但其凝胶机理尚未完全阐明。

3.1 作用时间对蛋黄冷冻诱导凝胶的影响

冷冻保存时间对蛋黄凝胶化有影响,时间越长,形成的凝胶越坚硬。闫峥蓉等^[52]研究表明,冻藏 180 d 的蛋黄经自然解冻后自由水含量降低,黏性系数和表面疏水性增加,促进蛋黄凝胶形成。Au 等^[14]研究了更长的贮藏时间对蛋黄冷冻凝胶的影响,发现贮存 168 d 后弹性模量增加了 10 倍,屈服应力增加了 3 倍,凝胶结构变得更加坚硬。据推测,低密度脂蛋白的聚集是因为缓慢冷冻形成的冰晶破坏了载脂蛋白之间的蛋白—蛋白相互作用,水分的去除导致非水分子浓度增加,有利于 LDL 的聚集。Au 等^[14]还提出了两阶段凝胶法。第一阶段,在 -20 °C 贮存 1~28 d,涉及脂蛋白颗粒的聚集,通过疏水相互作用在缓慢冻结的过程中除去水分子。第二阶段是贮存 28~84 d,之前参与第一阶段凝胶化的蛋白质或粒子被释放出来,暴露出的结合位点促进了进一步的自我结合或与之前形成的网络结合,加强了凝胶结构。两段凝胶法不仅解释了冷冻保存时间对蛋黄凝胶化的影响,还为阐述蛋黄冷冻诱导凝胶机理奠定了基础。

3.2 添加剂对蛋黄冷冻诱导凝胶的影响

冷冻会延长蛋黄的贮存期,方便运输和储藏,但蛋黄解冻后出现的凝胶化现象不是所有企业所期待的^[52]。研究者^[53-54]讨论过糖、盐、氨基酸、酶等添加剂能有效地抑制冷冻凝胶化;同样,期许蛋黄冷冻凝胶化行为出现的研究者也研究了添加剂对凝胶结构的影响。Wakamatu 等^[19]发现添加 NaCl 不仅可以抑制冷冻凝胶的形成,在一定条件亦可促进蛋黄冷冻凝胶的形成。当环境温度在 -30, -40, -60 °C 时,NaCl 质量分数超过 4% 即可诱导蛋黄形成凝胶。NaCl 作为凝胶抑制剂时,LDL—水—NaCl 络合物的形成使水几乎不冻结成冰,增加了 LDL 溶

液中的未冻结水; 当作为凝胶形成促进剂时, 促进了复合物中水分的去除^[19]。

因蛋黄解冻形成凝胶后乳化性等其他功能会下降, 品质的变化严重影响了下游企业的应用, 所以研究者的研究方向一直都是如何抑制蛋黄冷冻凝胶化的形成, 添加剂对蛋黄冷冻凝胶的影响及形成机理还有待研究者探讨。

4 展望

加热、加碱、冷冻都可以诱导蛋黄蛋白质形成凝胶, 但不同的诱导方式形成的凝胶机理及影响因素都不相同。从目前的研究情况看, 有关禽蛋的热诱导凝胶机理和碱诱导凝胶机理大多集中在蛋清的研究上, 蛋黄凝胶机理的研究相对较少, 研究其凝胶特性、微结构、蛋白质聚集力及其分子结构和构型的变化, 以测试分子级的凝胶机制, 对食品凝胶体系的研究很重要。

蛋黄蛋白质凝胶在食品加工应用中都是与其他添加成分, 如: 防腐剂、调味料或其他蛋白质一起使用的, 各诱导凝胶与其发生的相互作用还有待进一步讨论。蛋白质具有多种功能特性, 一般认为蛋白质间的相互作用都是有关联的, 所以, 蛋黄蛋白质乳化等功能性质对凝胶性能的影响也值得深入探讨。

参考文献

- [1] 帅益武, 张维, 阎微, 等. 焙烤食品中蛋黄夹心料的研制[J]. 食品与机械, 2007, 23(3): 151-154.
- [2] 李勇. 鸡蛋蛋黄的功能及其制品[J]. 中国食品添加剂, 2002(2): 89-91, 95.
- [3] 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: 1-4.
- [4] 阎微, 苏晓蓉, 杨严峻. 蛋黄组成成分的性质研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(1): 158-160.
- [5] KIOSSEOGLOU V. Egg yolk protein gels and emulsions[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2003, 8(4/5): 365-370.
- [6] LACA A, PAREDES B, RENDUELES M, et al. Egg yolk granules: Separation, characteristics and applications in food industry[J]. LWT-Food Science & Technology, 2014, 59(1): 1-5.
- [7] ANTON M, DENMAT M L, BEAUMAL V, et al. Filler effects of oil droplets on the rheology of heat-set emulsion gels prepared with egg yolk and egg yolk fractions[J]. Colloids & Surfaces B Biointerfaces, 2001, 21(1/2/3): 137-147.
- [8] 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.
- [9] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 12-13.
- [10] TOTOSAUS A, MONTEJANO J G, SALAZAR J A, et al. A review of physical and chemical protein-gel induction[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 37(6): 589-601.
- [11] 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.
- [12] 肖静, 朱倩, 叶鸿亮, 等. 蛋黄液热凝胶的质构特性研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2019, 38(2): 155-158, 198.
- [13] 凌子庭, 蒋爱民, 周伦, 等. 碱诱导鸭蛋清凝胶特性的变化规律[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 1-6.
- [14] AU C, ACEVEDO N C, HORNER H T, et al. Determination of the gelation mechanism of freeze-thawed hen egg yolk[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2015, 63(46): 10170.
- [15] KIOSSEOGLOU V, PARASKEVOPOULOU A. Molecular interactions in gels prepared with egg yolk and its fractions[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(3): 527-532.
- [16] ANTON M, BEAUMAL V, GANDEMERE 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.
- [17] PARASKEVOPOULOU A, KIOSSEOGLOU V, ALEVI-SOPOULOS S, et al. Small deformation measurements of single and mixed gels of low cholesterol yolk and egg white[J]. Journal of Texture Studies, 2010, 31(2): 225-244.
- [18] KAEWMANEE T, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, et al. Effect of sodium chloride and osmotic dehydration on viscoelastic properties and thermal-induced transitions of duck egg yolk[J]. Food & Bioprocess Technology, 2013, 6(2): 367-376.
- [19] WAKAMATU T, SATO Y, SAITO Y. On sodium chloride action in the gelation process of low density lipoprotein (LDL) from hen egg yolk[J]. Journal of Food Science, 1983, 48(2): 507-512.
- [20] 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.
- [21] LI Jun-hua, LI Xin, WANG Chen-ying, et al. Characteristics of gelling and water holding properties of hen egg white/yolk gel with NaCl addition[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 77: 887-893.
- [22] NASABI M, LABBAFI M, MOUSAVI M E, et al. Effect of salts and nonionic surfactants on thermal characteristics of egg white proteins[J]. International Journal of Biological Macromolecules Structure Function & Interactions, 2017, 102: 970-976.
- [23] 黄笛, 李翠云, 万敏惠, 等. 不同 TGase 添加量对蛋黄粉乳

- 化性和凝胶性的影响[J/OL]. 食品与发酵工业. [2021-01-18]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024786>.
- [24] 李睿, 王勇章, 李智, 等. 转谷氨酰胺酶添加量对鸡蛋全蛋液热凝固性的影响[J]. 食品与发酵科技, 2014, 50(2): 36-38.
- [25] DAIMER K, KUŁOZIK U. Impact of a treatment with phospholipase A2 on the physicochemical properties of hen egg yolk[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2008, 56(11): 4 172-4 180.
- [26] STRIXNER T, REBECCA W, KUŁOZIK 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): 1 485-1 496.
- [27] 胡新平. 磷脂酶 A₂ 制备功能性蛋黄粉的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005: 36-37.
- [28] 徐榕榕, 董世建, 胡新平, 等. 磷脂酶 A₂ 水解蛋黄磷脂工艺及改性蛋黄性质的研究[J]. 食品与机械, 2008, 24(6): 46-50.
- [29] 王然, 迟玉杰. 转谷氨酰胺酶提高蛋清粉凝胶性能的研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(2): 109-113.
- [30] 王勇章, 李睿, 李智, 等. 谷氨酰胺转氨酶对鸡蛋全蛋液热凝固性的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 62-66.
- [31] CARLA D, DI M, SACCHETTI G, et al. Egg yolk gels: Sol-gel transition and mechanical properties as affected by oleuropein enrichment[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 435-440.
- [32] KOJIMA E, NAKAMURA R. Heat gelling properties of hen's egg yolk low density lipoprotein (LDL) in the presence of other protein[J]. Journal of Food Science, 1985, 50(1): 63-66.
- [33] XIE Yun-xiao, WANG Jin-qiu, WANG Yi, 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.
- [34] KAEWMANEE T, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W. Effect of salting processes on chemical composition, textural properties and microstructure of duck egg[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 89(4): 625-633.
- [35] AGUILAR J M, CORDOBÉS F, RAYMUNDO A, et al. Thermal gelation of mixed egg yolk/kappa-carrageenan dispersions[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 161: 172-180.
- [36] GUERRERO A, CARMONA J A, MARTÍNEZ I, et al. Effect of pH and added electrolyte on the thermal-induced transitions of egg yolk[J]. Rheologica Acta, 2004, 43(5): 539-549.
- [37] YANG Yuan, ZHAO Yan, XU Ming-sheng, et al. Changes in physico-chemical properties, microstructure and intermolecular force of preserved egg yolk gels during pickling[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 131-142.
- [38] 艾民珉, 汤婷, 蒋爱民, 等. 化学作用力对皮蛋蛋黄凝胶形成的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 5-9.
- [39] 涂勇刚, 赵燕, 徐明生, 等. 皮蛋加工过程中流变与凝胶特性的变化规律[J]. 食品科学, 2012, 33(19): 21-24.
- [40] 陈晓. 温度对蛋清和蛋黄碱诱导凝胶形成速度及品质的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [41] 吴汉东. 不同温度对皮蛋质量影响的研究[J]. 食品工业, 2013, 34(1): 36-38.
- [42] 孙静, 马美湖, 吴玲, 等. 热处理对皮蛋生产周期和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 367-372.
- [43] GANASEN P, BENJAKUL S. Physical properties and microstructure of pidan yolk as affected by different divalent and monovalent cations[J]. LWT-Food Science & Technology, 2010, 43(1): 77-85.
- [44] GANASEN P, BENJAKUL S. Chemical composition, physical properties and microstructure of pidan white as affected by different divalent and monovalent cations[J]. Journal of Food Biochemistry, 2011, 35(5): 1 528-1 537.
- [45] 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 & Food Chemistry, 2018, 66(2): 512.
- [46] JAEKEL T, DAUTEL K, TERNES W. Preserving functional properties of hen's egg yolk during freeze-drying[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(4): 522-526.
- [47] GUILMINEAU F, KUŁOZIK 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): 1 105-1 113.
- [48] CHANG C H, POWRIE W D, FENNEMA O. Studies on the gelation of egg yolk and plasma upon freezing and thawing[J]. Journal of Food Science, 2006, 42(6): 1 658-1 665.
- [49] 郝丽芳, 邱宁, 马美湖, 等. 鸡蛋黄中蛋白质研究进展[J]. 中国家禽, 2012, 34(21): 45-50.
- [50] TELIS V R N, KIECKBUSCH T G. Viscoelasticity of frozen/thawed egg yolk as affected by salts, sucrose and glycerol[J]. Journal of Food Science, 1998, 63(1): 20-24.
- [51] SIMKO P. Improving the safety and quality of eggs and egg products[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2011, 50(3): 191-192.
- [52] 闫峥蓉, 赵英, 迟玉杰. 冻藏期间蛋黄胶凝化现象及成因分析[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 29-35.
- [53] ARAKAWA T, EJIMA D, TSUMOTO K, et al. Suppression of protein interactions by arginine: A proposed mechanism of the arginine effects[J]. Biophysical Chemistry, 2007, 127(1/2): 1-8.
- [54] PRIMACELLA M, FEI T, ACEVEDO N, et al. Effect of food additives on egg yolk gelation induced by freezing[J]. Food Chemistry, 2018, 263: 142-150.