

蛋黄凝胶特性影响因素及改善方法研究进展

Research progress on the factors affecting the characteristics of egg yolk gel and its modification

张玉凤¹ 王 怡¹ 吴永艳¹ 段文珊¹ 黄 群^{1,2}

ZHANG Yu-feng¹ WANG Qia¹ WU Yong-yan¹ DUAN Wen-shan¹ HUANG Qun^{1,2}

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建 福州 350002; 2. 贵州医科大学食品科学学院, 贵州 贵阳 550025)

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2. College of Food Science, Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

摘要:文章介绍了蛋黄凝胶形成机理及其特点,综述了不同影响因素在蛋黄凝胶形成中的作用,阐述了蛋黄凝胶常用的改善方法,并对其应用进行了展望。

关键词:蛋黄;凝胶特性;凝胶机理;改性

Abstract: In this paper, the formation mechanism and characteristics of egg yolk gel were introduced, and the effects of different influencing factors on the formation of egg yolk gel were summarized. The common improvement methods of egg yolk gel were expounded, and its application was also prospected.

Keywords: egg yolk; gel properties; gelation mechanism; modification

作为最大的生物细胞之一,蛋黄具有多种营养成分,是胚胎发育的营养储备^[1]。从物理化学的角度来看,蛋黄是一个假塑性的非牛顿混合物,具有高度复杂的乳化蛋白-脂类复合物体系^[2]。蛋黄中的蛋白质主要存在于蛋黄的血浆和颗粒中,通常与脂肪相结合形成脂蛋白,不以游离的形式存在。Farinazzo 等^[3-4]从蛋黄中鉴定出 316 种蛋白质,但主要是由低密度脂蛋白、高密度脂蛋白、卵黄球蛋白和卵黄高磷蛋白等组成^[5],4 种蛋白的主要营养与性质见表 1。

凝胶特性作为蛋黄重要的功能性质之一,其形成机制与蛋黄中多样且复杂的蛋白质密切相关。同时蛋黄的凝胶特性也决定着蛋黄制品的质构,感官和风味等,在食品工业中已被广泛应用,最常见的是在肉制品中(香肠、腊肠、火腿、鱼糜等)作为凝胶剂、黏合剂或发色剂使用,

以代替食品添加剂,提高肉制品的风味和口感^[6-7]。

然而,近年来,“橡皮蛋”事件频发,引起了消费者的恐慌,主要是因为不恰当的加工或贮藏方式,造成蛋黄变硬,弹性增加^[8]。所以,在蛋黄贮藏及深加工过程中,研究蛋黄凝胶的影响因素及其改善显得尤为重要。目前,国内外学者对蛋黄中活性物质,活性肽和乳化性等方面的研究较为全面^[9-11],而对于蛋黄凝胶的影响因素及其改善方法还有待深入研究。因此,文章拟从蛋黄蛋白质的组成成分和凝胶形成机理入手,对国内外蛋黄凝胶特性的研究现状进行综述,重点分析蛋黄凝胶形成的影响因素,包括物理因素(加热、冷冻、高压等)、化学因素(pH、盐及添加物等)、生物酶及联合作用,并进一步阐述蛋黄凝胶的改善方法,以期对蛋黄深加工过程中工艺参数的控制和蛋黄凝胶品质的提高提供理论参考。

1 蛋黄凝胶形成机理及其特征

蛋白质的凝胶是一种介于固态与液态之间的中间相,性质极不稳定。它是蛋白质分子在外力作用下,发生变性,使得未折叠的分子通过二硫键、疏水相互作用、氢键或静电相互作用发生不可逆的重排和相互聚集,形成空间网络结构的过程^[12],其本质是蛋白质在聚集过程中,分子间吸引力与排斥力达到平衡的结果,通常能保持大量的水分^[13]。

蛋黄中蛋白质含量丰富,种类繁多,这为凝胶的形成奠定了基础,蛋黄凝胶特性的形成是变性的蛋白质分子相互聚集并形成有序的空间结构的过程,这与低密度脂蛋白密切相关^[14]。此外,蛋黄凝胶结构的形成受到诸多外界因素的影响,如加热时间、温度、pH、离子强度或种类等。在这些外力作用下,蛋黄蛋白发生变性,疏水基团暴露,最终导致蛋黄凝胶的质地(硬度、弹性、内聚力)、持水性等发生不同程度的变化。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31871732)

作者简介:张玉凤,女,福建农林大学在读硕士研究生。

通信作者:黄群(1977—),男,贵州医科大学教授,博士后。

E-mail: huangqunlaoshi@126.com

收稿日期:2020-12-30

2 蛋黄凝胶特性的影响因素

2.1 物理因素

2.1.1 热处理 加热是凝胶形成的必要条件之一, 蛋黄蛋白的热诱导凝胶是一个多元化的过程, 主要分为 3 个阶段(图 1)^[15-16]: ① 加热使蛋白质变性, 解离; ② 变性后的蛋白随机聚集, 形成近似于球形的聚集体, 分子间通过二硫键相互交联, 形成初级凝胶结构; ③ 这些聚集体进一步交联, 冷却后形成致密的三维网状结构, 分子间通过氢键维持其结构的稳定性。

加热时间和温度对蛋黄凝胶的形成具有显著影响, 肖静等^[17]研究指出热处理温度和时间对蛋黄液热凝胶的硬度及咀嚼性均有显著影响。周长旭^[18]研究了不同加热时间(20~40 min)和温度(70~90 °C)对蛋黄热诱导凝胶煮制损失率和凝胶保水性的影响, 结果表明, 在 35 min, 90 °C 时蛋黄热诱导凝胶的煮制损失最小, 凝胶的保水性最大。Romanoff 等^[19]指出蛋黄液在 65 °C 开始变厚, 70 °C 失去其流变性, 85 °C 形成凝胶, 但目前普遍认为蛋黄液在 90 °C 加热 30 min, 并在 4 °C 下保存过夜, 可形成较好的凝胶^[20]。

2.1.2 冷冻 蛋黄在-6 °C 或更低的温度下冷藏一段时间, 解冻后的蛋黄会发生不可逆的表观黏性增加、弹性增强, 即蛋黄的冷冻凝胶化^[21]。蛋黄冷冻时发生凝胶的必要条件是冰晶形成达到 81%^[22], 该过程主要与蛋黄中的 LDL 有关^[23], 此外, 卵黄高磷蛋白、高密度脂蛋白、 α -和 β -卵黄蛋白也参与其中^[24]。

冷冻一般会导致蛋黄变硬, 弹性增加, 形成的凝胶品质较差。闫峥蓉等^[25]对冷藏 0~180 d 的蛋黄进行研究, 结果发现冻藏期间蛋黄表观黏度、黏性系数、弹性模量和黏性模量均显著增加, 而流动指数和损耗角正切值显著减小, 表明冷冻导致了蛋黄严重的胶凝化。Wang 等^[26]也进行了同样的研究, 发现冰蛋黄在 6 h 后失去流动性, 随着冷冻时间的延长, 蛋黄的凝胶强度显著增加。Harri-

son 等^[27]发现蛋黄的冷冻胶凝化同时也会导致其他功能性质的改变, 如乳化能力明显下降, 当蛋黄经过 90 d 的冷冻贮藏后, 其表观黏度相对于新鲜蛋黄增加了 73 倍, 且乳化活性下降了 11.53%。因此, 合理控制蛋黄冷藏期间的时间和温度, 可最大程度防止“橡皮蛋”的产生。

2.1.3 高压 高压通过改变蛋黄蛋白的空间构象并进一步作用来诱导凝胶的形成, 该过程与蛋白质的结构(空间结构), 压力范围及压力作用的时间密切相关^[28]。不同的压力处理对蛋黄蛋白修饰的差异可能归因于蛋白质聚集程度的不同^[29]。Singh 等^[30]发现随着压力和处理时间的增加, 蛋黄的颜色、硬度及内聚力显著增加, 形成的凝胶柔软而富有弹性。阎微^[31]研究了不同压力下(100~500 MPa), 处理相同时间后蛋黄凝胶的变化, 结果显示, 蛋黄在 400 MPa 处理 10 min 后大部分形成凝胶, 而 500 MPa 处理 10 min 后则可以完全形成凝胶。表明压力对凝胶网络结构的稳定起到促进作用。但张敏^[32]的研究显示, 蛋黄粉凝胶的硬度、组织细腻程度、弹性、保水性等随着压力的增大呈先增大后减小的趋势, 因此, 当压力超过一定范围时, 继续加压, 蛋黄中的蛋白质会混乱聚集成团状结构, 三维网络结构的交联变低, 导致凝胶的稳定性降低^[33]。

2.2 化学因素

2.2.1 pH pH 通过影响蛋白质的净电荷和巯基的反应性, 从而影响凝胶的形成。该过程与蛋黄蛋白的等电点(5~6)密切相关^[34], 通常稳定的凝胶在 pH 值 4~9 的条件下形成^[35], 当 pH 较低时, 正电荷增加引起静电斥力, 导致蛋黄颗粒破坏, 形成的凝胶较弱, 而当环境中的 pH 过高时, 远离了蛋黄蛋白的等电点, 蛋白质发生变性, 导致聚集体变大, 凝胶的硬度、黏弹性等显著增大, 甚至诱导冷凝胶的形成^[36]。不同 pH 下形成的凝胶特点不同, 通过扫描电子显微镜, 可观察到不同的凝胶特征, 见表 2。

表 1 蛋黄中主要蛋白质的种类及特征

Table 1 Types and characteristics of mainly proteins in egg yolk

名称	占蛋黄干重/%	分子量/ku	存在形式	主要作用
低密度脂蛋白(LDL)	65	2.5×10^6	LDL ₁ 、LDL ₂ (LDL ₁ : LDL ₂ =1: 4)	与蛋黄的凝胶化密切相关
高密度脂蛋白(HDL)	16	400	α -、 β -(α : β =1: 18)	提供营养, 保证胚胎的正常发育
卵黄球蛋白(livetin)	10	45~180	α -、 β -、 γ -	含有重要的免疫球蛋白(IgY)
卵黄高磷蛋白(PV)	4	37~45	α -、 β -	高度磷酸化的糖蛋白



图 1 热诱导蛋黄凝胶

Figure 1 Heat-induced gelation of egg yolk

表 2 不同 pH 下蛋黄热凝胶特征

Table 2 Effect of different pH on heat-induced gelation characteristics of egg yolk

pH	凝胶特性
≤4	凝胶结构弱,形成颗粒状凝胶网络结构(主要由 1~3 mm 蛋白质颗粒组成)
5	硬度、黏弹性等较大,凝胶不均匀,含有较大聚集体
6~7	硬度最小,典型的三维凝胶网络结构,也包含少量蛋白颗粒
8	凝胶网络结构致密,外观透明度低
≥9	硬度大,形成高度有序的“念珠串状”网络结构

2.2.2 盐 盐诱导也是蛋黄凝胶形成的常用途径,不同盐离子对蛋黄凝胶作用机制差异较大,其中最常见的是向蛋黄中加入食盐(NaCl)并进行腌制,可形成“咸蛋”。低盐浓度时,由于 Na⁺ 对蛋白质负电荷的屏蔽作用,分子间斥力减小,相互作用增强,聚集加快,有助于蛋黄蛋白凝胶的形成,但处于高盐浓度时,则表现出相反的效果,主要是因为高盐的胁迫作用破坏了维持低密度脂蛋白(LDL)稳定性的疏水相互作用,形成了 LDL—水—NaCl 复合物,造成凝胶的质构特性下降^[37-38]。表 3 列出了部分浓度 NaCl 对蛋黄浆质的色度、凝胶的持水性及微观结构的影响。

盐对蛋黄蛋白的聚集效果相对于 pH、稀释等的作用较弱。Thammarat 等^[39]对比了 NaCl 的浓度和渗透脱水

对蛋黄黏弹性的影响,结果表明,脱水对聚集和凝胶网络形成的影响明显大于 NaCl 浓度。但两者存在相互促进作用,在较低脱水作用下,NaCl 的加入可调节蛋黄的黏弹性,使蛋黄形成质地均匀的凝胶网络。此外,研究^[40]发现一些磷酸盐(三聚磷酸钠、焦磷酸钠等)可明显改善蛋黄凝胶的颜色和黏弹性。

2.2.3 其他添加物 除了盐,一些不常用的或新兴的添加物也开始加入到蛋黄制品中以改善其凝胶特性或抑制凝胶的形成,表 4 显示了其他添加物对蛋黄凝胶的影响。

2.3 生物因素

酶通过催化水解或相互交联作用使得蛋白质分子水解为小分子的肽或交联形成更大的聚合物。研究^[14,47]表明,适当的酶解或交联反应可使包埋在蛋白质内部的非极性氨基酸残基暴露,增强蛋白质间的疏水相互作用,进而改善凝胶结构。与化学处理相比,酶水解具有反应条件温和、易于控制、不破坏底物等优点。工业上常采用非专一性蛋白酶进行水解,增加其溶解度,从而抑制凝胶的形成^[48],表 5 列出了蛋黄蛋白酶解过程中常用酶的种类及其特征,通过控制酶解的温度和 pH 可改善蛋黄凝胶的质地。

2.4 联合作用

各因素除了单独影响蛋黄凝胶的形成,更多的是物理、化学和生物酶之间的联合作用。Woodward 等^[35]研究了 3 组交互作用(pH×温度×时间;蛋白质浓度×pH;

表 3 添加不同水平 NaCl 对蛋黄凝胶特性的影响

Table 3 Effects of different NaCl addition levels on the gel properties of egg yolk

NaCl 浓度/%	色度	持水性	微观结构
0.5	淡黄色	显著增加	许多圆形颗粒,嵌入纤维状凝胶网络中
1.0	黄色	显著增加	颗粒粒径变大,蛋白呈不规则块状分布
1.5	亮黄色	增加但不显著	凝胶网络孔径变小,网络链变细
2.0	橙黄色	显著增加	凝胶表面紧缩、纹理粗糙
3.0	红黄色	显著增加	表面粗糙,结构复杂,网络链变粗

表 4 添加物对蛋黄凝胶的影响

Table 4 Effect of different additives on egg yolk gel

添加物种类	典型代表	作用机理
水	无	影响凝胶表面巯基的含量,含水量与巯基的含量呈负相关 ^[41]
淀粉	无	淀粉糊化产生的交联作用可促进蛋黄凝胶网络结构的形成 ^[6]
氨基酸	脯氨酸	通过屏蔽蛋白质的疏水和易聚集区域来抑制凝胶的形成,10%可完全抑制 ^[42]
糖	蔗糖	在蛋白质表面的特定位点形成氢键来稳定凝胶的网状结构 ^[43]
油脂	甘油	蛋白质吸附在油滴表面,油滴为惰性填充颗粒,二硫键等作用力,增强了凝胶强度 ^[44]
水解卵蛋白	水解蛋黄蛋白	可阻止冰晶氢键的形成并在 LDL 表面形成疏水相互作用,进而阻止蛋黄蛋白的聚集 ^[45]
棉籽加工品	棉籽油(粕)	不直接作用,代替日粮喂养蛋鸡,改变肝脏中脂质的合成、转运和分泌,使蛋黄变硬 ^[46]

表 5 蛋黄凝胶过程中常用酶的种类及特征

Table 5 Types and characteristics of common enzymes during gelatiton of egg yolk

名称	来源	最佳 pH	最佳温度/°C	主要作用方式
转谷氨酰胺酶	动物、微生物	6.0~7.0	52	胺的导入、交联、脱胺 3 种,但主要是异构肽键 ^[49]
卵磷脂酶 A	禽蛋卵黄	7.0	50	催化水解蛋黄中的磷脂生成溶血磷脂 ^[50]
胰蛋白酶	动物胰脏	8.0	37	催化蛋白质水解,并将氨基酸中的羧基端切断 ^[51]
中性蛋白酶	枯草芽孢杆菌	7.0	40~50	对肽键的亲核基团进行攻击使蛋白质水解 ^[52]
木瓜蛋白酶	木瓜	6.0~7.0	55~65	催化蛋黄蛋白水解,降低 LDL 等的分子量 ^[53]
菠萝蛋白酶	菠萝	6.0~8.0	55	催化 LDL 胶束表面蛋白质水解,可抑制凝胶化 ^[24]

NaCl 浓度 \times pH)对蛋黄凝胶硬度的影响。结果表明,蛋黄凝胶硬度一般随 pH、蛋白质或盐浓度、加热温度和时间的增加而增加,pH 为 5,80 °C 加热 30 min,蛋黄凝胶形成的速度最快,此时凝胶的黏弹性达到最大。但相同 pH,随着 NaCl 浓度的增加,蛋黄的硬度呈先上升后下降的趋势,在 0.32 mol/L 时达到最大,这与上述相符。Nakamura 等^[54]认为热诱导凝胶的温度随蛋白质溶液 pH 的不同而不同,蛋黄分散液的 pH<5,LDL 分散体凝胶在 70 °C 时快速形成,但当 pH>6 时,LDL 分散体凝胶需在 80 °C 或更高的温度才能形成。李欢欢等^[55]采用不同温度的热处理与胰蛋白酶共同作用于蛋黄液,得到酶解后蛋黄凝胶的持水性与对照组均呈先下降后上升的趋势,且在 60 °C 时凝胶的持水性达到最低。

传统“皮蛋”的制作是碱液诱导凝胶的典型代表,其本质是 pH 和离子强度共同作用达到平衡的结果。艾民珉等^[56]研究了蛋黄腌制过程中(7~42 d)凝胶的变化,结果显示,腌制过程中蛋黄的凝胶强度显著增强,而在后熟期间变化不显著,且最终蛋黄逐渐呈外部凝胶、溏心黏稠状,主要是因为腌渍过程中,NaOH 与蛋黄中的油脂发生皂化反应使得蛋黄表面开始凝固。同时,随着碱液的渗透,水分和脂质不断迁移,使得变性蛋白之间相互交联,最终蛋黄呈胶凝状,凝胶强度显著增强,而后熟期间皮蛋内部环境趋于稳定,故凝胶强度变化不明显。Yang 等^[57]指出碱液的加入导致了血浆和颗粒的组分被破坏并释放,它们随机聚集或结合,形成“聚集带”,但聚集作用的产生主要是由于血浆蛋白结构的变化所引起,颗粒的加入只起到了“增强”的作用,此过程由离子键和二硫键共同来维持凝胶强度。此外,碱液的浓度对蛋黄凝胶的形成也具有重要影响,浓度过高的碱液可能会导致蛋黄凝胶的降解,聚集的凝胶随后变成液体,陈晓^[58]采用响应面优化法得到蛋黄碱诱导凝胶的最佳工艺为:凝固温度 3.5 °C,NaOH 添加量 1.18%,后熟温度 36.8 °C,此时蛋黄的感官评分最高。

2.5 其他

蛋黄凝胶的形成除了受到外界因素的影响,目前,研究较多的是蛋白质浓度对蛋黄凝胶形成的影响。Nakamura 等^[54]认为热诱导蛋黄蛋白凝胶的强度与蛋白质浓度呈正比。王蓉蓉等^[59]指出蛋黄质量浓度在 55 mg/mL 才能形成凝胶,低于 55 mg/mL 时,蛋黄蛋白分子间由于水的存在,无法发生交联形成凝胶。Paraskevopoulou 等^[60]以蛋黄为原料,制备了低胆固醇浓缩蛋黄蛋白,加热后制得的凝胶具有更高的硬度和弹性,此外,以蛋黄浓缩液制得的蛋糕与对照组相比,硬度明显增加。

3 蛋黄凝胶的改善

通过物理、化学、酶等处理方式(表 3)可对蛋黄的凝胶特性进行改善,进而提高蛋黄制品的外观、口感、贮藏性等。

3.1 物理改性

物理改性是指利用热、电、磁、机械剪切等物理作用改善蛋白质的功能特性,它是一种定向的改性,具有作用时间短、无副产物、对蛋白质影响较小等优点,而目前应用于改善蛋黄蛋白凝胶特性的物理方式主要是搅拌或均质。Woodward 等^[35]认为加热前对蛋黄液进行搅拌或均质,加热后形成的凝胶更富有弹性,硬度显著增加,主要是因为搅拌或均质破坏了蛋黄内部结构,释放的血浆作为连续相流体,颗粒作为非连续相的一部分,这种微观结构的变化使蛋黄蛋白释放到溶液中,在加热过程中形成了坚硬、橡皮质地的三维网络结构。

3.2 化学改性

采用化学处理改善蛋黄凝胶主要分为两种:①利用快速冷冻,加入抗凝剂等化学手段对蛋黄蛋白进行修饰,从而改善蛋黄的凝胶特性。如冷冻通过延缓微生物的生长与繁殖,延长了蛋黄的保质期,在短时间内可以保持蛋黄固有的风味和颜色。但冷冻中形成的凝胶通常是不理想的,因为它降低了蛋黄的其他功能性质,使其难与食品

配料相结合。一般认为,快速冷冻可以最大程度上防止蛋黄黏度的增加,进而减少冷冻对蛋黄的损伤。Jaax等^[61]曾指出利用液氮快速冷冻可以防止凝胶化。Lopez等^[62]发现干燥的冰丙酮混合物也可达到快速冷冻的效果。此外,冷冻期间加入一些抗凝剂可延缓冷冻带来的损伤,传统上认为添加10%的糖或盐可以延缓蛋黄冷冻诱导的凝胶,但近年来,随着“降糖减盐”理念的不断深入,新型的抗凝剂亟待研发。目前,脯氨酸、半胱氨酸、水解蛋黄(HEY)/清蛋白(HEW)、抗冻肽等都被证实是有效的冷冻凝胶抑制剂^[24,63],Monica等^[64]指出冷冻期间采用5% HEY处理蛋黄和用10%盐或糖处理蛋黄具有相同的抗凝作用,且HEY具有用量少,成本低,环保等优点,有望取代传统的凝胶抑制剂。随着中国冷冻工业的快速发展,具有特定功能和结构组成的食源性抗冻抑制剂是解决蛋黄在冷冻过程中胶凝化的有效途径,具有极大的发展前景。②蛋白质化学衍生化,即利用特定的化学试剂对蛋白质或多肽分子上的特定基团如氨基、羟基、羧基等进行修饰,其本质是对氨基酸侧链的残基进行改性,主要包括糖基化、酰基化和磷酸化。Ren

等^[65]用三聚磷酸钠和琥珀酸酐两种盐分别对卵黄蛋白进行磷酸化和琥珀酰化修饰,结果发现两种方式均改变了蛋黄中蛋白质的结构,进而使得蛋黄形成精细而致密的凝胶网络,且凝胶强度和保水性显著提高。刘静媛^[66]以未改性处理的新鲜蛋黄作为对照,分析了磷酸化(三聚磷酸钠)和酰基化(丁二酸酐)改性对新鲜蛋黄的凝胶强度和持水性的影响,猜测可能是因为磷酸化和酰基化打开了蛋白质内部结构,疏水基团暴露,疏水相互作用增强,从而使得蛋黄凝胶的质构特征(硬度、凝聚力)和持水性显著提升。

4 蛋黄制品及其凝胶化的应用

随着人们对食品的食用便捷、保存期长、高营养价值等方面的需求,蛋黄深加工制品成为近年来研究的热点。运用现代化技术改善蛋黄的某些功能特性,或将蛋黄与其他原料相结合,研制出新的产品,这不仅克服了蛋黄易变质、难运输等缺点,也极大地提高了产品的附加值^[67-70]。图2列出了蛋黄深加工制品及其凝胶化现象的具体应用。

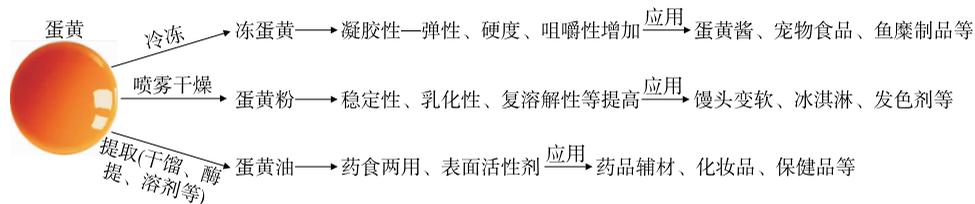


图2 蛋黄深加工制品及其凝胶化的具体应用

Figure 2 The specific application of egg yolk processing products and its gelation

5 结论与展望

在蛋黄酱、冰淇淋、鱼糜制品、鸡蛋干等食品的制备中,蛋黄的凝胶性是其重要功能特性之一。影响蛋黄凝胶特性的因素有很多,主要有温度(冷冻、加热)、压力、常见的化学添加剂(盐、碱液)、酶及其协同作用等。此外,对于蛋黄凝胶的改善,现有的物理(均质或搅拌)、化学(快速冷冻、加入抗凝剂、化学基团的修饰等)和酶法改性中仍存在很多局限性,所用酶、抗凝剂的种类单一;酶的复合作用、新型食源性抗冻抑制剂及不同改性方式的协同作用缺乏研究。因此,后续可在完善蛋黄凝胶化规律的基础上,进一步寻求影响蛋黄胶凝化的其它因素及改善方法,拓宽蛋黄凝胶在食品工业中的应用。

参考文献

[1] LESNIEWSKI G, STANGIERSKI J. What's new in chicken egg research and technology for human health promotion: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 71: 46-51.

[2] XIAO Nan-hai, ZHAO Yan, YAO Yao, et al. Biological activities of egg yolk lipids: A review[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(7): 1 948-1 957.

[3] FARINAZZO A, RESTUCCIA U, BACHI A, et al. Chicken egg yolk cytoplasmic proteome, mined via combinatorial peptide ligand libraries[J]. Journal of Chromatography A, 2009, 1 216: 1 241-1 252.

[4] MANN K, MANN M. The chicken egg yolk plasma and granule proteomes[J]. Proteomics, 2008, 8: 178-191.

[5] 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.

[6] 辛楠. 蛋液凝胶形成影响因素分析及产品创制[D]. 长春: 吉林大学, 2018: 5-6.

[7] 郭卓钊, 潘丽娟, 郭美媛, 等. 肉制品发色剂研究进展[J]. 农产品加工, 2020(1): 90-93.

[8] 穆杨. 棉籽油和棉籽粕在鸡“橡皮蛋”形成中的作用及机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019: 1.

[9] 杨福明, 王立枫, 赵英, 等. 鸡蛋黄中天然活性物质的开发与利用[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(7): 1 890-1 895.

[10] BHATT Z F, KUMAR S, BHAT H F. Bioactive peptides from egg:

- A review[J]. *Nutrition & Food Science*, 2015, 45(2): 190-212.
- [11] 黄丽燕, 张强, 韩兆鹏, 等. 蛋黄乳化性研究进展[J]. *食品科技*, 2012, 37(12): 44-47.
- [12] 王佳蓉, 丁阳月, 姜云庆, 等. 酶法修饰对大豆分离蛋白凝胶性质影响研究进展[J/OL]. *食品科学*. (2020-11-04) [2021-03-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20201103.1643.002.html>.
- [13] 周绪霞, 陈红, 陈婷, 等. 脂质对食品中蛋白质凝胶特性的影响及其作用机制[J]. *核农学报*, 2018, 32(9): 1 808-1 813.
- [14] 张映萍, 杨慧娟, 张晋, 等. 鸡蛋蛋白质凝胶特性影响因素的研究进展[J/OL]. *食品工业科技*. (2020-08-26) [2021-03-06]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050262>.
- [15] ALLEONI, ANA Claudia C. Albumen protein and functional properties of gelation and foaming[J]. *Scientia Agricola*, 2006, 63(3): 291-298.
- [16] YIN L H, JOE M, REGENSTEIN M, et al. Gel point of whey and egg proteins using dynamic rheological data[J]. *Journal of food science*, 1993, 58(1): 116-119.
- [17] 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.
- [18] 周长旭. 鸡蛋热诱导凝胶形成及凝胶特性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012: 40-44.
- [19] ROMANOFF A L, ROMANOFF A J. *The avian egg*[J]. Wiley and Sons, 1949, 66(2): 215-218.
- [20] CORDOBES F, PARTAL P, GUERRERO A. Rheology and microstructure of heat-induced egg yolk gels[J]. *Rheologica Acta*, 2004, 43(2): 184-195.
- [21] STADELMAN W J, COTTERILL O J. *Egg science and technology*[M]. West Lafayette: Macmillan Education, 1995: 226-233.
- [22] TELLS V R N, KIECKBUSCH T G. Viscoelasticity of frozen/thawed egg yolk [J]. *Journal of Food Science*, 1997, 62(3): 548-550.
- [23] HASIAK R J, VADEHRA D V, BAKER R C, et al. Effect of certain physical and chemical treatments on the microstructure of egg yolk[J]. *Journal of Food Science*, 1972, 37(6): 913-917.
- [24] CHANGE 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*, 1977, 42(6): 1 658-1 665.
- [25] 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.
- [26] WANG Rui-hong, MA Yuan-qiu, MA Zihong, et al. Changes in gelation, aggregation and intermolecular forces in frozen-thawed egg yolks during freezing [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 11(108): 105947.
- [27] HARRISON L J, CUNNINGHAM F E. Influence of frozen storage time on properties of salted yolk and its functionality in mayonnaise[J]. *Journal of Food Quality*, 1986, 9(3): 167-174.
- [28] ARZENI C, MARTÍNEZ K, ZEMA P, et al. Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality (Article)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 108(3): 463-472.
- [29] YAN Wei, QIAN Li-wei, GU Xiao-hong, et al. Effect of high pressure treatment on the physicochemical and functional properties of egg yolk[J]. *European Food Research Technology*, 2010, 231(3): 371-377.
- [30] SINGH A, RAMASWAMY H. Effect of high pressure processing on color and textural properties of eggs[J]. *Journal of Food Research*, 2013, 2(4): 22-29.
- [31] 阎徽. 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: 12.
- [32] 张敏. 蛋黄粉凝胶形成过程及其控制研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2013: 46-50.
- [33] 李孝莹, 高彦祥, 袁芳. 超高压对食品凝胶特性影响的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(7): 385-389, 394.
- [34] NAVIDGHASEMIZAD S, TEMELLI F, WU Jian-ping. Phase separation behavior of egg yolk suspensions after anionic polysaccharides addition[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 117: 297-303.
- [35] WOODWARD S A, COTTERILL O J. Texture profile analysis, expressed serum, and microstructure of heat-formed egg yolk gels[J]. *Journal of Food Science*, 1987, 52(1): 68-74.
- [36] AGUILAR J M, CORDOBÉS F, BENGOCHEA C, et al. Heat-induced gelation of egg yolk as a function of pH. Does the type of acid make any difference? [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 142-148.
- [37] 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.
- [38] LI Jun-hua, ZHANG Meng-qi, CHANG Cui-hua, et al. Molecular forces and gelling properties of heat-set whole chicken egg protein gel as affected by NaCl or pH [J]. *Food Chemistry*, 2018, 261: 36-41.
- [39] THAMMARAT K, SOOTTAWAT B, WONNOP V, et al. Effect of sodium chloride and osmotic dehydration on viscoelastic properties and thermal-induced transitions of duck egg yolk[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(2): 367-376.
- [40] LI Jun-hua, WANG Chen-ying, ZAHNG Meng-qi, et al. Effects of selected phosphate salts on gelling properties and water state of whole egg gel[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 1-7.
- [41] 张敏, 李文钊. 加水量对蛋黄粉凝胶特性的影响[J]. *天津科技大学学报*, 2012, 27(6): 27-30.
- [42] MONICA P, TAO Fei, NURIA A, et al. Effect of food additives on egg yolk gelation induced by freezing[J]. *Food Chemistry*, 2018, 263: 142-150.
- [43] WANG Bing-quan, TCHESALOV S, WARNE N, et al. Impact of sucrose level on storage stability of proteins in freeze-dried solids: Correlation of protein-sugar interaction with native structure preservation[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2009, 98(9): 3 131-3 144.
- [44] 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 and Surfaces B: Biointerfaces*, 2001, 21(1): 137-147.
- [45] MONICA P, TONG W, NURIA A. Characterization of mayonnaise properties prepared using frozen-thawed egg yolk treated with hydrolyzed egg yolk proteins as anti-gelator[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 529-536.
- [46] 朱洛毅. 日粮中添加棉粕和棉籽油对鸡蛋质量的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 54.
- [47] CREUSOT N, GRUPPEN H. Enzyme-induced aggregation and gelation of proteins[J]. *Biotechnol Adv*, 2007, 25(6): 597-601.
- [48] 汪师帅, 李斌, 黄婷, 等. 鸡蛋蛋白质改性研究进展[J]. *食品科技*, 2012, 37(2): 76-80.
- [49] 何灿, 高红亮. 谷氨酰胺酶的应用研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(32): 15 883-15 885.
- [50] 胡新平. 磷脂酶 A-2 制备功能性蛋黄粉的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005: 1.
- [51] NIETO-NIETO TV, WANG Yi-xing, OZIMEK L, et al. Effects of partial hydrolysis on structure and gelling properties of oat globular proteins [J]. *Food Research International*, 2014, 55: 418-425.
- [52] HOU Yao, ZAHNG Xin-hui. Abstract: Limited hydrolysis of two soybean protein products with trypsin or neutrase and the impacts on their solubility, gelation and fat absorption capacity[J]. *Biotechnology*, 2011, 10(2): 190-196.
- [53] LOPEZ A, FELLERS C R, POWRIE W D. Enzymatic inhibition of gelation in frozen egg[J]. *Milk and Food Technol*, 1955, 18: 77-84.
- [54] NAKAMURA R, TANIGUCHI M, FUKANO T. Heat-induced gelation of hen's egg yolk low density lipoprotein (LDL) dispersion[J]. *Journal of Food Science*, 1982, 47(5): 1 449-1 453.
- [55] 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.
- [56] 艾民珉, 汤婷, 蒋爱民, 等. 化学作用力对皮蛋黄凝胶形成的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(6): 5-9.
- [57] YANG Yuan, ZHAO Yan, XU Ming-sheng, 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.
- [58] 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: 55-62.
- [59] 王蓉蓉, 辛营营. 蛋黄凝胶形成及凝胶特性研究[J]. *农产品加工·综合刊*, 2011(12): 8-9.
- [60] PARASKEVOPOULOU A, KIOSSEOGLU V. Texture profile analysis of heat-formed gels and cakes prepared with low cholesterol egg yolk concentrates[J]. *Journal of Food Science*, 1997, 62(1): 208-211.
- [61] JAAX S, TRAVNICEK D. The effect of pasteurization selected additives and freezing rate on the gelation of frozen defrosted egg yolk[J]. *Poultry Science*, 1968, 47(3): 1 013-1 022.
- [62] LOPEZ A, FELLERS C R, POWRIE W D. Some factors affecting gelation of frozen egg yolk[J]. *Milk and Food Technology*, 1954, 17: 334-340.
- [63] 陈旭, 蔡茜茜, 汪少芸, 等. 抗冻肽的研究进展及其在食品工业的应用前景[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 331-337.
- [64] MONICA P, NURIA C A, TONG W. Effect of freezing and food additives on the rheological properties of egg yolk [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105241.
- [65] REN Liu-yuan, LIU Jing-yuan, ZHANG Xue-qi, et al. Emulsion, gelation, physicochemical properties and microstructure of phosphorylated and succinylated egg yolk[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 131: 109675.
- [66] 刘静媛. 化学改性对大豆蛋白和蛋黄性质的影响[D]. 北京: 北京农学院, 2018: 39-40.
- [67] MA C Y, HARWALKAR V R, POSTE L M, et al. Effect of gamma irradiation on the physicochemical and functional properties of frozen liquid egg products[J]. *Food Research International*, 1993, 26(4): 247-254.
- [68] SANG Shang-yuan, CHEN Yu-ting, ZHU Xiao, et al. Effect of egg yolk lipids on structure and properties of wheat starch in steamed bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 86: 77-85.
- [69] 马爽, 刘静波, 王二雷. 蛋粉加工及应用的研究现状分析[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(2): 393-397, 400.
- [70] 严建业, 王璐, 李顺祥, 等. 蛋黄油的现代研究进展[J]. *中国中医药信息杂志*, 2012, 19(3): 106-110.
- (上接第 168 页)
- [17] PAN Zhong-li, SHIH C, MCHUGH T H, et al. Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(10): 1 944-1 951.
- [18] 徐保国, 周天楚, 魏本喜, 等. 催化式红外辐照改善樱桃番茄去皮效果及品质[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(24): 299-305.
- [19] 吴小华, 马渊博, 宁旭丹, 等. 西洋参分段式热风干燥动力学模型构建[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(5): 318-324.
- [20] 张茜, 肖红伟, 代建武, 等. 哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(增刊 1): 382-388.
- [21] VIDYARTHI S K, EI-MASHAD H M, KHIR R, et al. Tomato peeling performance under pilot scale catalytic infrared heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 246: 224-231.
- [22] 姜苗. 云南核桃热风干燥特性及其传质模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013: 28-32.
- [23] 张波. 核桃射频热风联合干燥特性及品质变化研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017: 15-21.
- [24] ATUNGULU G G, TEH H E, WANG Tian-xin, et al. Infrared pre-drying and dry-dehulling of walnuts for improved processing efficiency and product quality[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013, 29(6): 961-971.