

冰蛋黄凝胶化机制及抑制方法研究进展

王瑞红, 张昆林, 杨攀闯, 何松, 杨伟, 何鸿举, 李波

Frozen Egg Yolk Gelation Mechanism and Inhibition Method: A Review

WANG Ruihong, ZHANG Kunlin, YANG Panchuang, HE Song, YANG Wei, HE Hongju, and LI Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060206>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脂质过氧自由基对蛋黄蛋白结构和加工性能的影响

Effect of Lipid Peroxyl Radicals on the Structure and Processing Properties of Egg Yolk Protein

食品工业科技. 2024, 45(20): 98-104 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110330>

绿色高效连续分离技术制备蛋黄中活性蛋白质和磷脂

Active Proteins and Phospholipids Prepared from Chicken Egg Yolk by Green and Efficient Sequential Separation Technology

食品工业科技. 2022, 43(1): 180-187 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040149>

腌制条件对熟制咸鸭蛋蛋黄组织形态及组成的影响

Effects of Salting Conditions on the Morphology and Composition of Cooked Salted Duck Eggs Yolk

食品工业科技. 2023, 44(11): 80-87 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022060301>

不同热处理蛋黄脂质对小鼠学习认知能力下降的缓解能力

Ability of Different Heat-treated Egg Yolk Lipids to Alleviate Cognitive Decline in Mice

食品工业科技. 2025, 46(1): 367-376 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010013>

速冻方式对冷冻贮藏中大口黑鲈鱼肉蛋白质特性的影响

Effects of Different Quick-freezing Methods on Protein Properties of Largemouth Bass (*Lateolabrax japonicus*)

食品工业科技. 2021, 42(20): 309-319 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020051>

阳离子对大豆蛋白及其组分凝胶特性影响的研究进展

Progress in the Effect of Cations on the Gel Properties of Soy Protein and Its Fractions

食品工业科技. 2025, 46(2): 9-16 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030372>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王瑞红, 张昆林, 杨攀闯, 等. 冰蛋黄凝胶化机制及抑制方法研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 466–472. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060206

WANG Ruihong, ZHANG Kunlin, YANG Panchuang, et al. Frozen Egg Yolk Gelation Mechanism and Inhibition Method: A Review[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 466–472. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060206

· 专题综述 ·

冰蛋黄凝胶化机制及抑制方法研究进展

王瑞红¹, 张昆林², 杨攀闯¹, 何松¹, 杨伟¹, 何鸿举¹, 李波^{1,*}

(1. 河南科技学院食品学院, 河南新乡 453003;

2. 河南科技学院机电学院, 河南新乡 453003)

摘要: 蛋黄营养丰富, 作为一种食品类原辅料, 由于其优良的乳化性而广泛应用于食品加工中。冷冻可以最大程度地保持蛋黄原有的风味, 解决蛋黄在运输和贮存过程中微生物生长和品质下降等问题, 延长货架期。然而, 冷冻后的蛋黄解冻后, 其流动性降低, 黏度增加, 出现凝胶化的现象。凝胶化作用导致蛋黄难以与其它食品成分混合, 降低其分散性和功能性。本文针对冰蛋黄凝胶化现象, 综述了冰蛋黄凝胶化形成机制研究现状, 包括冰晶的形成, 脂蛋白冷冻聚集及环境因素等, 探究了抑制冰蛋黄凝胶化的各种方法, 包括物理方法、化学方法及酶促方法, 然而, 不同方法通过不同机制抑制冰蛋黄凝胶化, 了解冰蛋黄凝胶化成因及抑制方法, 可为后期冰蛋黄在食品中的应用提供理论依据。

关键词: 蛋黄, 冷冻, 凝胶化, 蛋白质聚集, 抑制方法

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)09-0466-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060206

本文网刊:



Frozen Egg Yolk Gelation Mechanism and Inhibition Method: A Review

WANG Ruihong¹, ZHANG Kunlin², YANG Panchuang¹, HE Song¹, YANG Wei¹, HE Hongju¹, LI Bo^{1,*}

(1. School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The egg yolk is rich in nutrients and is a widely used ingredient in processed foods owing to its excellent emulsifying properties. Freezing can maximize the preservation of the original flavor of the egg yolk, inhibit microbial growth, minimize quality decline during transportation and storage, and extend its shelf life. However, upon thawing, the fluidity of the frozen yolk decreases, viscosity increases, and gelation occurs. Gelation makes it difficult to mix the yolk with other food ingredients, thereby reducing its dispersibility and functionality. To better understand the phenomenon of frozen yolk gelation, herein, this paper reviews up-to-date research on the mechanisms through which frozen yolk gelation occurs, including the formation of ice crystals, lipoprotein aggregation during freezing, and the influence of environmental factors. Various methods to inhibit frozen yolk gelation are also explored, including physical, chemical, and enzymatic methods. Because different methods inhibit frozen yolk gelation through different mechanisms, understanding the causes of frozen yolk gelation and the mechanisms underlying the methods of its inhibition can provide theoretical bases for improving the useability of frozen yolks in food preparation.

Key words: egg yolk; frozen; gelation; protein aggregation; inhibition method

国家统计局数据显示, 2023 年我国禽蛋产量为 3563 万吨, 占世界总产量的 35% 左右, 蛋与蛋制品

占有一定的市场地位^[1-2]。然而, 受限于生鲜品鸡蛋的保质期短的特征以及国内对于鸡蛋日常消费现买

收稿日期: 2024-06-14

基金项目: 河南省科技攻关项目 (232102110162)。

作者简介: 王瑞红 (1990-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 农畜产品深加工, E-mail: wrh622848@126.com。

* 通信作者: 李波 (1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学及农产品深加工, E-mail: libo@hist.edu.cn。

现吃的购销习惯,鸡蛋加工与分级利用率低。因此,快速发展蛋制品产业是我国蛋品行业发展的重要趋势。上世纪 90 年代起,欧盟国家、美国和日本等国家为了保证禽蛋制品利用率,分别制定了禁止鲜蛋直接进入食品企业的相关法规,要求必须使用杀菌蛋制品,这一措施极大地促进了液蛋制品的发展^[3]。我国蛋鸡产业不断以市场为导向,鸡蛋产品结构不断优化,也相继出现蛋粉、液蛋、冰蛋等新型产品,其中,冰蛋是液态蛋加工制品,是以鲜蛋为原料,经去壳、加工处理、冷冻等工艺制成的蛋制品,包括冰全蛋、冰蛋黄、冰蛋白等。冰蛋产品的出现克服了鲜蛋易碎、易污染、难运输和难贮藏等缺点,省去了打蛋、分蛋及蛋壳处理等环节,在食品加工业及餐饮业中使用比例日益增加。随着我国冷链运输的发展与普及,冰蛋制品在运输便利上有明显的优势,有着更广阔的应用前景。

冰蛋黄是新鲜蛋黄的冷冻产品,其保质期可长达 12 个月,具有制备简单,保留蛋黄的颜色、风味和营养价值,抑制微生物生长和脂质自动氧化、褐变和其他化学反应等优点,在食品加工中备受青睐,同时还能够在产蛋量较低迷时将其投入市场,以弥补生产鲜蛋的不足^[4]。然而,冷冻也会引起蛋黄产生不良变化,即蛋黄在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻藏超过 6 h 时,其表观黏度不可逆的增加,硬度增大,流动性损失,形成凝胶化^[5]。凝胶化作用严重影响力蛋黄原本优良的乳化性,即使搅拌也无法分散,用机械处理则会使蛋黄呈斑点状分散,难与其它食品组分混合,降低蛋黄品质,对食品制造企业产生巨大损失,限制了其更为广泛的应用。目前,针对冰蛋黄凝胶化现象,企业通常在蛋黄中添加 10%~30%(w/w)的盐或糖来抑制冰蛋黄凝胶化^[6]。但随着公众健康意识的增强,“低糖、低盐”的观念已逐渐被企业和消费者接受,因此,迫切需要找到抑制蛋黄凝胶化的有效方法并探究其潜在机制。本文系统地阐述了冰蛋黄的凝胶化机制及抑制冰蛋黄凝胶化的方法,为今后冰蛋黄的应用和开发提供研究参考。

1 冰蛋黄凝胶化现象

蛋黄经冷冻后产生凝胶化现象,直接影响了蛋黄原本优良的乳化性,该问题一直困扰着生产者和科学研究者。国外关于冰蛋黄的研究较多,但主要集中在二十世纪六七十年代,而我国关于冰蛋黄的研究起步较晚。有研究表明当蛋黄在冻藏 24 h 后,其黏度与硬度显著增加,冻藏 90 d 后,冰蛋黄表观黏度最大,其黏度相对于新鲜蛋黄增加了 73 倍^[7-8],对其进行频率扫描,弹性模量与黏性模量均显著增加^[9],冷冻贮藏 180 d 后,蛋黄黏度提高了 34.88 倍,乳化活性降低了 30.60%,蛋黄整体质量明显恶化。Wang 等^[10]研究发现,当蛋黄在为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冷冻 6 h 时,其黏度从 17.63 g·sec 增加到 1981.96 g·sec,其硬度是新鲜蛋黄硬度的 27 倍。冷冻 7 h 后, $\tan\delta<1$,说明蛋

黄冷冻后从液态向固态发生转变,形成凝胶化状态。这些变化都表明冷冻迫使蛋黄发生凝胶化现象,并且冰蛋黄凝胶化不利于蛋黄在食品中的应用。Harrison 等^[11]发现,使用冰蛋黄和新鲜蛋黄制作的蛋黄酱相比,冰蛋黄制作的蛋黄酱的硬度明显高于新鲜蛋黄,当制作的蛋黄酱黏度相同时,使用的冰蛋黄比例高于新鲜蛋黄。Primacella 等^[12]研究发现,水解蛋黄蛋白在 5%(wt/wt)浓度下可防止冰蛋黄凝胶化,采用添加水解蛋黄蛋白的冰蛋黄制备的蛋黄酱可与新鲜蛋黄制备的蛋黄酱相媲美。Huang 等^[13]研究了冰蛋黄和新鲜蛋黄制备的蛋黄酱,研究发现蛋黄冷冻降低了蛋黄酱的热稳定性,但冰蛋黄制成的蛋黄酱比用新鲜蛋黄制成的蛋黄酱更可接受。Gmach 等^[14]研究发现蛋黄和浆液制备的乳液冻融稳定性显著高于蛋黄颗粒,而通过磷脂酶处理后,其蛋黄及颗粒后的冻融稳定性高于蛋黄浆液。这均说明冰蛋黄凝胶化现象的产生严重影响蛋黄品质,因此,在实际食品生产中要抑制冰蛋黄发生凝胶化现象的产生。

2 冰蛋黄凝胶化形成机制

蛋黄组分复杂,关于冰蛋黄凝胶化已有许多研究,但其作用机制并未完全阐明。目前,研究人员提出了许多不同的解释,大多数学者认为,关于冰蛋黄的凝胶化机制与其冰晶的形成、蛋黄脂蛋白冷冻聚集和环境因素密切相关。

2.1 冰晶对冰蛋黄凝胶化的影响

冷冻技术可有效地延长食品保质期、保持食品新鲜度,然而,水/冰的转变不可避免地会导致食品成分脱水和破坏,从而降低产品品质^[15]。蛋黄中水分含量约占 51%,因此,学术界普遍认为,冷冻条件下,蛋黄中水的变化对凝胶化有直接影响。这是因为当蛋黄在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下冷冻时,超过 80%的水通过形成冰核转化为冰晶,随后进行晶体生长^[16]。冰晶的形成改变了蛋白质分子内部和分子之间的相互作用,从而在蛋黄的凝胶化中发挥重要作用^[17]。研究表明,蛋黄冷冻时发生凝胶化的必要条件是冰晶形成达到 81%^[18],这是因为水合层的破坏影响了蛋黄蛋白的结构完整性并导致蛋黄蛋白聚集,缓慢冷冻过程中冰晶的逐渐生长促进了蛋白质之间的相互作用,随后压实形成物理凝胶^[19-20]。但有部分学者研究认为,冷冻引起蛋黄中水形成冰晶,导致水分子发生迁移,蛋白质和水分子结合状态发生改变,蛋白质侧链之间的相互聚集,迫使蛋黄液粘稠度增大,冰蛋黄解冻后水分子不能复位,即冷冻破坏了蛋白质的复水能力而引起了蛋白质不可逆变性,从而造成冰蛋黄凝胶化现象^[19-21]。也有研究表明,蛋黄脱水破坏了分子的结构完整性,在缓慢冷冻过程中通过晶体生长“去除”水分,促进蛋黄成分的重新排列和聚集^[22-23]。最新的研究表明,冷冻通过促进冰的升华和水的迁移,导致了蛋黄中的水分流失,促进了蛋黄蛋白质的重排和聚集,加速了蛋黄凝胶化的形成^[24-25]。以上研究均说

明,冻藏过程中冰晶的形成是影响冰蛋黄品质发生劣变的不可或缺的重要因素之一。

2.2 蛋黄脂蛋白对冰蛋黄凝胶化的影响

冰蛋黄凝胶化现象的产生直接影响了蛋黄原本优良的乳化性。在研究冰蛋黄凝胶化机制中,大多数研究人员认为,聚集是冰蛋黄失去流动性的主要原因,学术界对影响冰蛋黄凝胶化的聚集组分有诸多报道,但是对聚集成分仍然存在异议,其中,最常见的解释是低密度脂蛋白(Low Density Lipoprotein, LDL)冷冻聚集^[19-21]。例如,Primacella等^[26]认为冰蛋黄凝胶化是由于蛋黄颗粒部分增加和LDL释放所致。而Wang等^[27]研究认为,LDL聚集可能是由边界水结晶过程中的疏水相互作用引发的。因此,冷冻诱导的蛋黄凝胶化通过在释放LDL的同时保持其致密的凝胶结构。Kurisaki等^[28]发现载脂蛋白和磷脂从LDL的表面释放,迫使LDL结构不稳定,进而导致了LDL的聚集。而Kamat等^[29]研究结果表明,冰蛋黄凝胶化是因多肽之间的交联作用和/或相邻LDL颗粒的磷脂极性头基团相互作用导致非特异性聚集引起的。冷冻过程中,LDL上卵磷脂与蛋白质之间化学键断裂后,蛋白质之间相互作用增加,而泄漏的磷脂不仅形成磷脂分子的头-头的结构层,还促进了聚集物之间的相互作用。除此以外,蛋黄颗粒中高密度脂蛋白(High Density Lipoprotein, HDL)也参与了凝胶,这是因为当LDL聚集时,一些高分子量蛋黄球蛋白和HDL也与LDL聚集形成相互作用,导致由不同分子量的不同蛋白组成的异质聚集物,迫使冰蛋黄凝胶化增强^[26]。Wang等^[22]的研究也表明,蛋黄颗粒包括HDL和卵黄高磷蛋白会形成聚集

体,在长期冻藏期间也参与了冰蛋黄的凝胶化。Wang等^[22]提出了两阶段的凝胶化机制,即在第一阶段,在-20℃的蛋黄贮存28d,蛋黄脂蛋白由于疏水相互作用而聚集,形成凝胶网络结构。在第二阶段,在28~84d的某个时间点,蛋白质释放,表面积增加,暴露更多的结合位点,先前聚集的蛋白质进一步聚集,加剧冰蛋黄凝胶网络结构。而Wang等^[30-31]的研究表明,冰蛋黄凝胶化与脂蛋白聚集体的形成密切相关,脂蛋白聚集行为离不开蛋白质分子间相互作用,而氢键是影响冷冻蛋黄凝胶化的主要化学键,其次是疏水作用和二硫键。Wang等^[27]研究也表明冻藏过程中,疏水性和静电相互作用是蛋黄凝胶化的主导力量。但Fei等^[32]研究认为,蛋黄蛋白质冷冻聚集会形成物理凝胶,而非是分子间相互作用形成的凝胶。总的来说,冷冻过程中,冰晶与脂蛋白的相互作用以及蛋白质之间的相互作用的空间位阻的减少促进了蛋白质的聚集。

2.3 环境因素对冰蛋黄凝胶化的影响

此外,除去蛋黄本身组成以外,环境因素也是影响冰蛋黄凝胶化的关键,有大量研究表明冷冻时间长短、冻结和解冻的速度、温度以及贮藏时间均会影响冰蛋黄凝胶化现象^[31]。冷冻时间延长,蛋黄组分在冷冻过程中持续迁移和相互作用,增加了形成更强、更稳定的凝胶结构的可能性。其次,蛋黄在冻藏过程中,冰晶的融化和再结晶循环,导致其冰晶尺寸的增加,进一步加剧冰蛋黄凝胶化的形成^[10,33-34]。一些研究表明,在冷冻24h后,蛋黄的黏度和硬度显著增加,而冷冻时间达到180d后,其黏度增加34.88倍,硬度增加了16.32倍,胶黏性增加了15.23倍。同

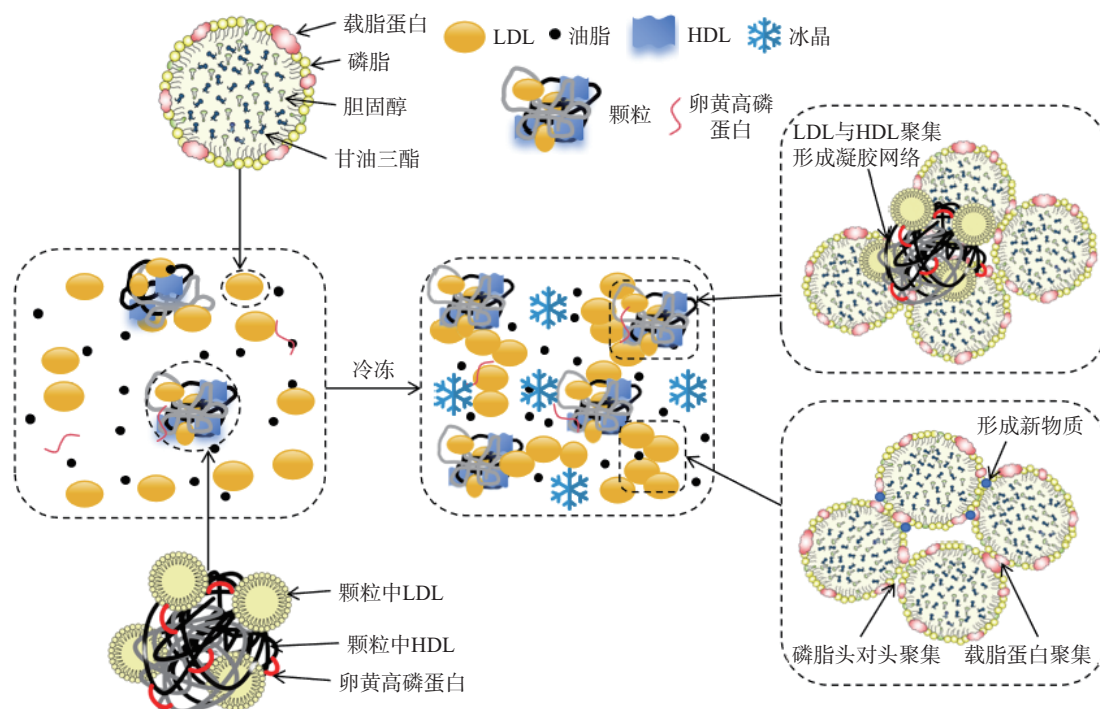


图1 冰蛋黄凝胶化预测模型^[38]

Fig.1 Prediction model of frozen egg yolk gelation^[38]

样, Powrie 等^[35]指出, 冷冻时间增加, 冰蛋黄的黏度和浊度增加。具体来说, 较长的冷冻时间导致蛋黄形成更强的凝胶结构。Lopez 等^[36]发现提高冰蛋黄的冻结速率, 可以减少冰蛋黄凝胶化程度, 因为使用液氮($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$)将蛋黄快速冷冻后, 其表观粘度低于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 直接贮藏的冰蛋黄表观粘度, 抑制了凝胶部分的形成, 降低了蛋黄的凝胶化。杜清普等^[37]研究了不同解冻方法对冰蛋黄功能特性和结构的影响, 发现超声解冻后的蛋黄凝胶化现象低于微波解冻的冰蛋黄, 而水浴解冻次之。总体来说, 冷冻速率、冷冻温度及时间、解冻方式等环境因素的变化均会影响冰蛋黄凝胶化的形成。图 1 显示了冰蛋黄凝胶化预测模型。

然而蛋黄组成复杂, 这为研究冰蛋黄凝胶化成因增加了一定的难度, 目前尚不清楚脂类是否通过蛋白质的变化直接或间接地促进聚集, 并且也不清楚水状态的变化对脂类作用及这两者与脂蛋白的相互关系对蛋黄冷冻凝胶化产生的影响。

3 冰蛋黄凝胶化的抑制方法

新鲜蛋黄在冷冻条件下不经过任何处理, 会发生不可逆的凝胶化现象, 严重影响了蛋黄的功能特性, 限制了其作为原料在食品中的应用^[10]。因此, 国内外很多学者都在探究抑制冰蛋黄凝胶化的方法, 其中, 最常见的方法是物理方法、化学方法和酶促方法。

3.1 物理方法

由于冰晶在冰蛋黄的凝胶化过程中起着不可或缺的作用, 抑制大晶体的形成或冰的再结晶可能有助于减轻冷冻损伤, 调节冰蛋黄的凝胶化行为。有大量的文献记录表明, 快速冷冻以改变冰晶的大小可以减缓蛋黄的凝胶化^[39]。因此, 利用液氮快速冷冻蛋黄可以有效抑制凝胶的形成, 防止蛋黄凝胶化现象的产生^[40]。其次, 冷冻前对蛋黄进行均质或胶体研磨等

机械处理, 或提高蛋黄冻结速率, 或解冻时对其进行轻微的热处理, 均会在一定程度阻止冰蛋黄黏度增加^[41]。其中, 关于加热解冻方面, 国内外许多学者常把 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 解冻称为加温解冻。Mine 等^[42]也发现, 将冰蛋黄置于 $45\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下加热 1 h 可以部分降低蛋黄的凝胶化现象。改变其解冻方式也可在一定程度上抑制凝胶的形成, 杜清普等^[37]研究表明超声解冻可以降低冰蛋黄的硬度、内聚力和黏度, 破坏蛋白质共价键的作用, 增强冰蛋黄的流动性。以上研究均表明, 抑制大冰晶的形成, 或对蛋黄进行物理处理可一定程度上阻止冰蛋黄黏度增加, 抑制蛋白质之间的相互作用, 减缓冰蛋黄凝胶化现象, 图 2 显示了快速冷冻法抑制冰蛋黄凝胶化的模型。

3.2 化学方法

仅仅采用物理的方法去减缓冰蛋黄凝胶化现象的产生不足以完全满足食品企业和国内外学者的需求。后来, 一些学者研究发现在冷冻前加入一定量的抗冻化学试剂, 可以抑制食品中蛋白质的变性, 包括防冻蛋白/多肽、糖类、酚类、盐类和天然的深层共晶溶剂, 可以通过控制冰晶的形成和再结晶来帮助防止冷冻损伤影响^[6]。目前发现的常用的有抗冻效果的化合物主要是一些分子量比较小的糖或糖醇类、氨基酸类、羧酸类、抗冻肽等, 但最常用的还是糖类和 NaCl ^[44]。糖类通过降低可冷冻水含量、抑制大冰晶的形成, 降低蛋黄凝胶化, 主要包括己糖(果糖、葡萄糖)、二糖(蔗糖、麦芽糖)、戊糖(木糖、核糖), 戊糖由于活性醛基较多(醛基可与蛋白质分子的氨基反应引起蛋白质聚集), 其抗冻效果低于己糖和二糖^[8,45]。Ma 等^[24]研究了蔗糖、L-阿拉伯糖、木糖醇、海藻糖、D-纤维二糖和木糖对冰蛋黄的低温保护作用, 表明糖通过增加不可冻结水含量和降低自由水含量来抑制大冰晶的形成。其次, 在蛋黄中添加糖醇类物

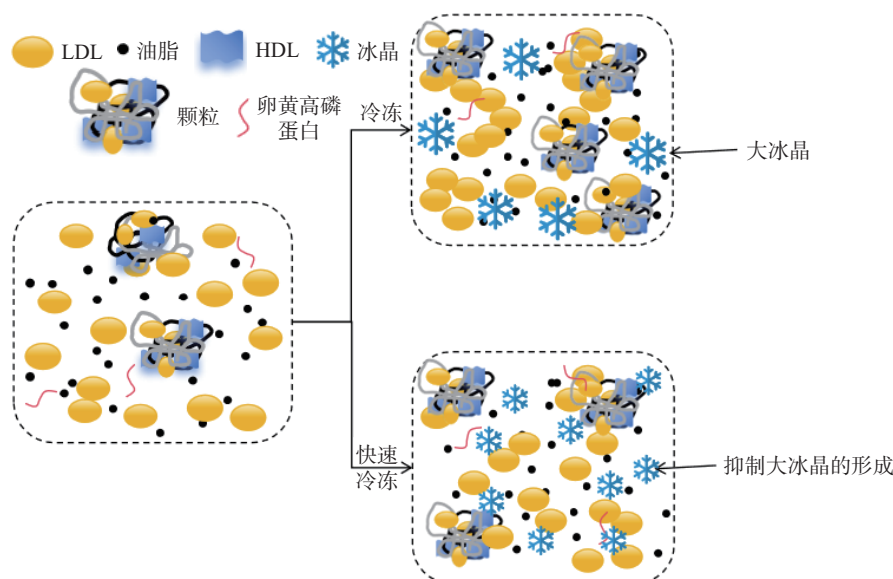


图 2 快速冷冻法抑制冰蛋黄凝胶化预测模型^[43]

Fig.2 Prediction model of rapid freezing method for inhibition of frozen egg yolk gelation^[43]

质,如木糖醇、甘露醇、麦芽糖醇和赤藓糖醇等,亦或是木糖醇和氯化钠复合物的添加,均可以抑制蛋黄凝胶化的形成^[46-47]。Xu 等^[46]研究表明盐和木糖醇均能抑制冷冻蛋黄凝胶的形成。其中,氯化钠可以捕获流失的水分,然后与蛋白质结合形成复合物。木糖醇能防止冰晶的生长,抑制蛋白质的聚集。然而,在保证抑制冰蛋黄凝胶化效果保持不变的条件下,木糖醇能有效改善冷冻蛋黄的流动性,同时减少氯化钠和蔗糖的添加。Ma 等^[24]研究表明 L-阿拉伯糖在调节冻融引起的蛋黄不稳定性方面最有效,其次是木糖醇,这与其低分子量有关^[48]。Li 等^[49]研究表明, D-半乳糖与胰蛋白酶的结合具有协同效应,可通过氢键结合提高蛋黄蛋白的溶解度,从而减少蛋黄的聚集。而 Ye 等^[50]研究发现,冰蛋黄颗粒在弱碱环境中,蛋黄颗粒发生解聚,其凝胶化作用显著下降。表 1 展示了目前常用的抗冻化学剂改善冰蛋黄凝胶化的影响机制。

3.3 酶促方法

近年来,一些学者使用蛋白水解酶防止冰晶形成或使用化学处理改变有利于蛋黄蛋白聚集的理化

条件,从而抑制凝胶的形成^[49,51-52]。Ma 等^[4]证明,蛋黄在冷冻前添加 0.05% 的中性蛋白酶,即使在 180 d 后也能保持其理想的特性。Fei 等^[32]研究表明水解的蛋黄和蛋白可以通过疏水屏蔽蛋黄蛋白之间的相互作用来有效抑制凝胶化,而蛋黄中增加盐含量迫使脂蛋白分离,降低流动性和自由水的量,抑制蛋黄凝胶化。有学者研究认为,抗冻肽在冷冻期间可以抑制冰晶生长和再结晶,然而,抗冻肽的活性主要取决于局部特异性肽链的结构域,其中,氨基酸的组成和序列是影响多肽抗冻活性的关键结构特征,脯氨酸是一种天然的低温保护剂,通过屏蔽蛋白质的疏水相互作用和聚集倾向区域来抑制聚集,通过与相邻脯氨酸分子的带负电荷的羧基形成氢键,在水溶液中形成疏水堆叠^[49]。Tang 等^[53]表明,胶原肽中的脯氨酸、羟脯氨酸和丙氨酸残基可能通过创造一个非极性环境来稳定肽-冰晶复合物之间的氢键而阻碍冰晶的生长。最新的研究发现,水解羧甲基纤维素(HCMC)、脯氨酸和水解蛋白和水解蛋黄均可以有效地抑制冰蛋黄凝胶化形成^[8]。图 3 展示了不同抗冻剂抑制冰蛋黄凝胶化模型。

表 1 抗冻剂抑制冰蛋黄凝胶化机制及劣势

Table 1 Mechanism and disadvantages of antifreeze in inhibiting frozen egg yolk gelation

抗冻剂	抑制机制	劣势
氯化钠	蛋黄中蛋白质-水-氯化钠形成复合物,增加了蛋黄蛋白中冷冻水的含量 ^[4]	1. 过量摄入氯化钠引起健康隐患 2. 对加工设备压力的要求较高
糖类	促进游离水转化为结合水,减少蛋白质交联,抑制冻藏期间蛋白质变性 ^[24]	1. 过量摄入糖引起健康隐患 2. 风味变化显著
蛋白酶	通过酶解作用将蛋黄中大分子被水解成小分子,其结构和功能性质发生了改变。多肽中的氨基酸-OH与水结合形成氢键,减少蛋黄中水分的流失,抑制冰蛋黄凝胶化形成 ^[30]	1. 成本较高 2. 产生异味
抗冻肽	抑制冰晶的再结晶,并通过疏水作用抑制冰蛋黄蛋白质聚集 ^[49]	1. 难以保证产品混合均匀 2. 成本较高

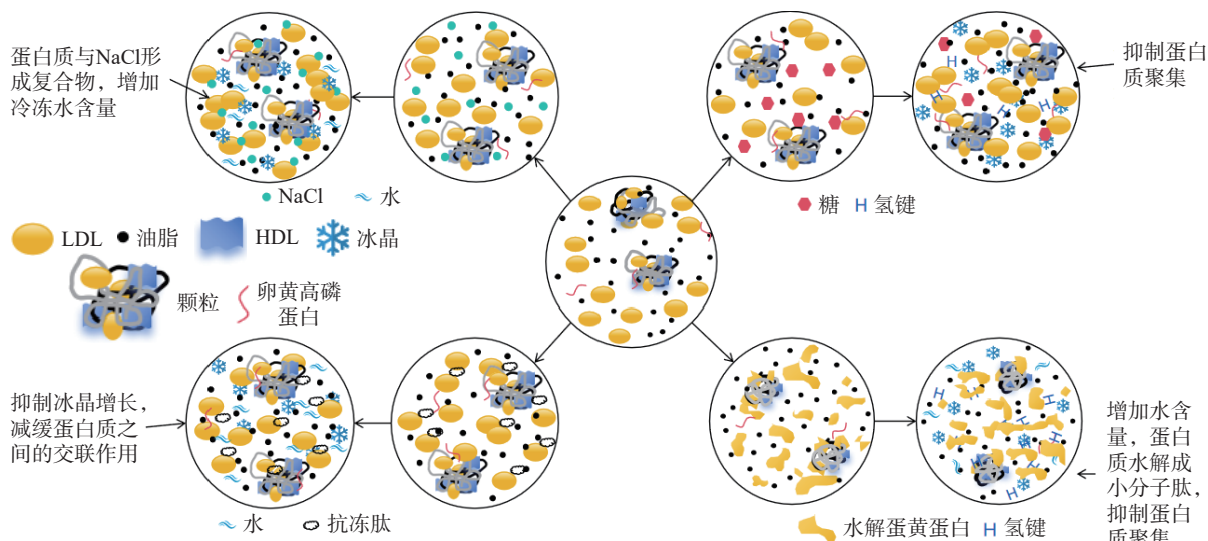


图 3 不同抗冻剂抑制冰蛋黄凝胶化模型^[43]

Fig.3 Inhibition model of different antifreeze agents on frozen egg yolk gelation^[43]

4 结论

蛋黄是一个复杂的乳化体系,蛋黄经过冷冻后

出现凝胶化现象,流动性和分散性降低,黏度增加,乳化性能也相继发生改变,严重地影响了冰蛋黄在食品

加工中的应用。针对冰蛋黄凝胶化现象,本文综述了冰蛋黄凝胶化现象及形成机制,探讨了抑制冰蛋黄凝胶化形成的方法,包括物理、化学和酶促方法。冰蛋黄凝胶化形成与冰晶的形成,脂蛋白冷冻聚集及蛋黄各组分之间的相互作用密不可分。采用物理方法或加入抗冻剂或酶结合的方法可以一定程度地抑制冰蛋黄的凝胶化,然而,不同抗冻剂其作用机制不同,但总体来说,均是通过抑制冰晶的形成,弱化蛋白质的聚集,减缓冰蛋黄凝胶化。抑制冰蛋黄凝胶化现象的产生对其进一步的发展和应用都具有重要意义。今后应重点探究不同抗冻剂与蛋黄脂蛋白的分子作用机制,以及不同抗冻剂对蛋黄功能特性及品质的影响,使冰蛋黄在食品企业中有更广泛的应用。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 迟玉杰. 蛋制品加工技术[M]. 中国轻工业出版社, 2009. [CHI Y J. Egg processing technology[M]. China Light Industry Press Co., Ltd., 2009.]
- [2] 周建军, 于爱芝, 王长梅. 我国鸡蛋价格波动传导的影响因素分析——基于非对称的研究视角[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 44: 1–15. [ZHOU J J, YU A Z, WANG C M. Analysis of factors influencing the transmission of egg price fluctuations in China: Based on asymmetric research perspective[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 44: 1–15.]
- [3] VIEIRA D A P, CABRAL L, NORONHA M F, et al. Microbiota of eggs revealed by 16S rRNA-based sequencing: From raw materials produced by different suppliers to chilled pasteurized liquid products[J]. *Food Control*, 2019, 96: 194–204.
- [4] MA Z, MA Y, WANG R, et al. Influence of antigelation agents on frozen egg yolk gelation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 302: 110585.
- [5] LI T, ZHONG Q, WU T. Effects of NaCl on the freezing-thawing induced gelation of egg yolk at pH 2.0–8.0[J]. *Food Biophysics*, 2022, 17: 106–113.
- [6] PRIMACELLA M, ACEVEDO N C, WANG T. Effect of freezing and food additives on the rheological properties of egg yolk[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105241.
- [7] 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*, 2010, 9(3): 167–174.
- [8] 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.
- [9] 闫峥蓉, 赵英, 迟玉杰. 冻藏期间蛋黄凝胶化现象及成因分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(19): 29–35. [YAN Z R, ZHAO Y, CHI Y J. Origin analysis for freezing-thawing gelation of yolk appears during frozen storage[J]. *Food Science*, 2018, 39(19): 29–35.]
- [10] WANG R, MA Y, ZHANG L, et al. Changes in egg yolk gelation behaviour and mechanisms during freezing[J]. *LWT*, 2021, 151: 112223.
- [11] HARRISON L J, CUNNINGHAM F E. Factors influencing the quality of mayonnaise[J]. *Journal of Food Quality*, 2010, 8(1): 1–20.
- [12] PRIMACELLA M, WANG T, ACEVEDO N C. 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.
- [13] HUANG L, WANG T, HAN Z, et al. Effect of egg yolk freezing on properties of mayonnaise[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 56: 311–317.
- [14] GMACH O, GOLDA J, KUŁOZIK U. Freeze-thaw stability of emulsions made with native and enzymatically modified egg yolk fractions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 123: 107109.
- [15] LU F, CHI Y, CHI Y. High-temperature glycosylation of saccharides to modify molecular conformation of egg white protein and its effect on the stability of high internal phase emulsions[J]. *Food Research International*, 2024, 176: 113825.
- [16] ZHU Z, ZHOU Q, SUN D W. Measuring and controlling ice crystallization in frozen foods: A review of recent developments[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 90: 13–25.
- [17] ZHAO Y, FENG F, YANG Y, et al. Gelation behavior of egg yolk under physical and chemical induction: A review[J]. *Food Chemistry*, 2021, 355(5): 129569.
- [18] LUAN L, WANG L, WU T, et al. A study of ice crystal development in hairtail samples during different freezing processes by cryosectioning versus cryosubstitution method[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 87: 39–46.
- [19] LI F, DU X, WANG B, et al. Inhibiting effect of ice structuring protein on the decreased gelling properties of protein from quick-frozen pork patty subjected to frozen storage[J]. *Food Chemistry*, 2021, 353: 129104.
- [20] LIU L, WANG J, WANG G, et al. Quantitative proteomics provides a new perspective on the mechanism of network structure depolymerization during egg white thinning[J]. *Food Chemistry*, 2022, 392: 133320.
- [21] DENG L, WANG Y, JIANG H, et al. Specific protection mechanism of oligosaccharides on liposomes during freeze-drying[J]. *Food Research International*, 2023, 166: 112608.
- [22] WANG T, AU C, ACEVEDO N, et al. Determination of the gelation mechanism of freeze-thawed hen egg yolk[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2015, 63(46): 10170–10180.
- [23] VRN T, KIECKBUSCH T G. Viscoelasticity of frozen/thawed egg yolk[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 62(3): 548–550.
- [24] MA Z, CHI Y, CHI Y. Cryoprotective role of saccharides in frozen egg yolks: Water/ice tailoring effect and improved freeze-thaw stability[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 109161.
- [25] CHEN Q, XIE Y, YU H, et al. Non-destructive prediction of colour and water-related properties of frozen/thawed beef meat by Raman spectroscopy coupled multivariate calibration[J]. *Food Chemistry*, 2023, 413: 135513.
- [26] PRIMACELLA, MONICA. Determination of gelation mechanism and prevention methods of frozen-thawed hen egg yolk[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 46: 1–88.
- [27] WANG X, LI J, SU Y, et al. Freeze-thaw treatment assists isolation of IgY from chicken egg yolk[J]. *Food Chemistry*, 2021, 364: 130225.
- [28] KURISAKI J I, KAMINOGAWA S, YAMAUCHI K. Studies on freeze-thaw gelation of very low density lipoprotein from hen's egg yolk[J]. *Journal of Food Science*, 1980, 45: 463–466.
- [29] KAMAT V, GRAHAM G, BARRATT M, et al. Freeze-thaw gelation of hen's egg yolk low density lipoprotein[J]. *Journal of the*

- Science of Food and Agriculture*, 1976, 27: 913–927.
- [30] WANG R, ZHANG L, CHI Y, et al. Forces involved in freeze-induced egg yolk gelation: Effects of various bond dissociation reagents on gel properties and protein structure changes[J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131190.
- [31] WANG R, MA Y, MA Z, et al. Changes in gelation, aggregation and intermolecular forces in frozen-thawed egg yolks during freezing[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 105947.
- [32] FEI T, LEYVA-GUTIERREZ F M A, WAN Z, et al. Gelation inhibiting additives and freezing impact rheological, thermal, and microstructural properties of yolk[J]. *LWT*, 2021, 144: 111160.
- [33] 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*, 2010, 48(2): 507–512.
- [34] HUANG L, WANG T, HAN Z, et al. Effect of egg yolk freezing on properties of mayonnaise[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 56(5): 311–317.
- [35] POWRIE W D, LITTLE H, LOPEZ A J. Gelation of egg yolk[J]. *Journal of Food Science*, 1963, 28(1): 38–46.
- [36] LOPEZ A, FELLERS C R, POWRIE W D. Some factors affecting gelation of frozen egg yolk[J]. *Journal of Milk Food Technology*, 1954, 17(11): 1–10.
- [37] 杜清普, 赵英, 王瑞红, 等. 不同解冻方法对冰蛋黄功能特性、理化特性及蛋白质结构的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(11): 9–15. [DU Q P, ZHAO Y, WANG R H, et al. Effects of different thawing method on the functional properties, physicochemical properties, and protein structures of frozen egg yolks[J]. *Food Science*, 2021, 42(11): 9–15.]
- [38] ZHAO Y, FENG F, YANG Y, et al. Gelation behavior of egg yolk under physical and chemical induction: A review[J]. *Food Chemistry*, 2021, 355: 129569.
- [39] KUMAR S A, MAHADEVAN S J J O A. Physicochemical studies on the gelation of hen's egg yolk: Delipidation of yolk plasma by treatment with phospholipase-C and extraction with solvents[J]. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 1970, 18(4): 666–670.
- [40] 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): 1013–1022.
- [41] PEARCE J A, LAVERS C G. Liquid and frozen egg; viscosity, baking quality, and other measurements on frozen egg products[J]. *Canadian Journal of Research*, 1949, 27(5): 231–240.
- [42] MINE Y. Egg bioscience and biotechnology[J]. *Nano Today*, 2008, 3(5): 48.
- [43] ZHANG J, MA Y. Formation mechanism and inhibition methods of frozen egg yolk gelation: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 148: 104491.
- [44] HADIPERNATA M, OGAWA M, HAYAKAWA S. Improved rheological properties of chicken egg frozen gels fortified by D-ketohexoses: H adipernata et al[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2017, 41(5): 13184–13194.
- [45] URBAN O M, MILLER J N. Relative merits of sucrose, dextrose, and levulose as used in the preservation of eggs by freezing[J]. *Indengchem*, 1930, 22: 355–356.
- [46] XU X, LI Z, TANG Q, et al. Exploring xylitol as a low-salt alternative for effective inhibition of gelation in frozen egg yolks[J]. *Food Chemistry*, 2024, 436: 137681.
- [47] ZHU H, LI J, SU Y, et al. Sugar alcohols as cryoprotectants of egg yolk: Inhibiting crystals and interactions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 342: 111360.
- [48] MA Z, QING M, ZANG J, et al. Effects of freezing on the gelation behaviors of liquid egg yolks affected by saccharides: Thermal behaviors and rheological and structural changes[J]. *Poultry Science*, 2024, 103(6): 103657.
- [49] LI X, HUANG Q, ZHANG Y, et al. Inhibitory mechanism of trypsin combined with D-galactose on freeze-induced gelation and the physicochemical and protein properties of egg yolk[J]. *LWT*, 2023, 188: 115337.
- [50] YE H, SUI J, WANG J, et al. Research note: Aggregation-depolymerization of chicken egg yolk granule under different food processing conditions[J]. *Poultry Science*, 2023, 102(7): 102696.
- [51] DADASHI S, KIANI H, RAHIMI H, et al. Effect of freezing-thawing and stabilizers on the phase behavior of egg micro-particles and quality attributes of liquid egg[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2017, 19(4): 821–834.
- [52] SU Y, CHEN Z, LI J, et al. Characterization of salted egg yolk flavoring prepared by enzyme hydrolysis and microwave irradiation[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 127913.
- [53] TANG C, ZHOU K, ZHU Y, et al. Collagen and its derivatives: From structure and properties to their applications in food industry[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 131: 107748.