

# 蛋清热凝胶透明机制研究进展

## Research progress on transparency mechanism of egg white heat gel

芦鑫宏 向小乐 庾卓思 陈 乐 董诗琴 黎子潇

LU Xinhong XIANG Xiaole YU Zhuosi CHEN Le DONG Shiqin LI Zixiao

(长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114)

(School of Food and Biological Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**摘要:**蛋白基凝胶由于其光学透明属性在食品和医药领域具有独特优势而倍受关注,透明凝胶有望成为类似于燕窝的高端蛋白基凝胶食品或其加工辅基(料),探明蛋清热凝胶光学性质的差异机制有望成为攻克蛋清热凝胶高质化利用的关键。文章对蛋清热凝胶透明度的形成机制及其影响因素进行综述。深入分析了蛋清热凝胶的形成机理,探讨了蛋白质的改性方法,并对蛋清透明热凝胶未来的研究发展方向进行了展望。

**关键词:**蛋清;蛋白质;热凝胶;透明

**Abstract:** Protein-based gels have attracted much attention due to their unique advantages in the field of food and medicine due to their optical transparency. Transparent gels are expected to become high-end protein-based gel foods similar to bird's nest or their processing excipients (materials). Exploring the difference mechanism of optical properties of egg white thermal gels is expected to become the key to overcome the high-quality utilization of egg white gels. In this paper, the formation mechanism and influencing factors of egg white gel transparency were reviewed. The formation mechanism of egg white thermal gel was analyzed in depth, the modification methods of protein were discussed, and the future research and development direction of egg white transparent thermal gel was prospected.

**Keywords:** egg white; protein; heat-induced gel; transparent

蛋清中蛋白质含量为 13%~15%<sup>[1]</sup>,主要成分包括卵清蛋白、卵转铁蛋白、卵类黏蛋白以及溶菌酶<sup>[2]</sup>。蛋清蛋白作为一种典型的凝胶形成物质在食品加工制造中发

挥着重要作用<sup>[3]</sup>。

蛋白质的凝胶化是指在特定条件下,蛋白质形成凝胶的过程。这一过程通常伴随着蛋白质结构的改变,使其形成三维网络结构,从而在水中形成凝胶体系<sup>[4]</sup>。根据诱导方式的不同,蛋清热凝胶可以分为多种类型,包括:碱诱导凝胶、酸诱导凝胶、离子诱导凝胶、酶诱导凝胶、热诱导凝胶等<sup>[5]</sup>。热诱导凝胶是在特定温度下形成的。当温度超过 58℃时,蛋清蛋白会展开并暴露其内部活性位点,随后聚集形成三维空间网络状结构。此外,蛋清蛋白的产热变性是不可逆的。与其他凝胶相比,热诱导凝胶通常具有更高的硬度、弹性和咀嚼性,以及更低的黏度和持水能力<sup>[6]</sup>。而碱诱导形成的凝胶机理涉及蛋白质变性、聚集、交联并与溶剂分子的反应<sup>[7]</sup>。其中二硫键在碱诱导下蛋清溶液转化为凝胶中起着关键作用。由于碱的引入,大量形成二硫键,使蛋清形成高刚度和弹性的三维网状结构,成为亮度更高、表面疏水性的凝胶<sup>[8]</sup>。因此,这一差异造成了凝胶外观光学性质上的差别。一般来说,碱诱导形成的蛋清热凝胶呈半透明或透明状<sup>[9]</sup>,如皮蛋;而热诱导形成的凝胶则光学性质差,如水煮蛋。

由于热诱导凝胶通常具有不透明的特性,因此提升热诱导凝胶透明度对于扩展其应用领域至关重要。透明蛋清热凝胶在食品或医药领域中具有独特优势,例如在布丁、糕点、涂层和封装材料等方面<sup>[10]</sup>。随着科学技术的发展和研究的深入,近年来已取得了一些重要的进展。Yang 等<sup>[11]</sup>研究表明,通过调节蛋清中蛋白质的组成和结构来形成透明热凝胶,包括改变蛋白质的折叠状态、调节蛋白质之间的相互作用等方法。此外,Duan 等<sup>[12]</sup>研究表明,蛋清蛋白热凝胶的透明度受到加热温度、处理时间、pH 值、蛋白质浓度等多种条件的影响。文章旨在综述蛋清热凝胶透明机制的研究成果,以期拓展其在食品工业中的创新思路和技术手段,为食品应用中透明蛋白质基凝胶的设计和 optimization 提供参考。

**基金项目:**国家重点研发计划(编号:2022YFD2101001);国家自然科学基金(编号:32172226);国家蛋鸡产业技术体系建设专项(编号:CARS-40-K25)

**作者简介:**芦鑫宏,女,长沙理工大学在读硕士研究生。

**通信作者:**向小乐(1989—),男,长沙理工大学副教授,博士。

E-mail: xiangxiaole@csust.edu.cn

**收稿日期:**2024-01-21 **改回日期:**2024-04-18

1 蛋清蛋白热凝胶形成的物质基础

蛋清中发现的蛋白质有 40 多种,其中卵白蛋白、卵转铁蛋白、卵类黏蛋白、溶菌酶是蛋清蛋白热凝胶形成的主要物质基础<sup>[13]</sup>。卵清蛋白、卵转铁蛋白和卵类黏蛋白

均是酸性蛋白,而溶菌酶是碱性蛋白<sup>[14]</sup>。它们在理化性质上有所不同,特别是氨基酸组成、相对分子量、等电点和变性温度等,因此在蛋清热凝胶的形成过程中起的作用也不同<sup>[5]</sup>。具体对比这些蛋白质的理化性质见表 1。

表 1 蛋清中 4 种蛋白的理化性质对比

Table 1 Comparison of physicochemical properties of four proteins in egg white

| 名称    | 分子结构                | 含量             | 热稳定性   | 等电点(pI) | 功能性                        |
|-------|---------------------|----------------|--------|---------|----------------------------|
| 卵白蛋白  | 单体球状磷酸糖蛋白           | 约占蛋清蛋白总量的 54%  | 易发生变性  | 约为 4.5  | 蛋清热凝胶的主导作用者,形成稳定的凝胶网络结构    |
| 卵转铁蛋白 | 含有 15 个二硫键,属于糖基化蛋白质 | 约占蛋清蛋白总量的 12%  | 热稳定性较差 | 约为 6.0  | 可能参与凝胶的稳定性调节               |
| 卵类黏蛋白 | 典型的糖蛋白              | 约占蛋清蛋白总量的 11%  | 热稳定性较好 | 约为 4.1  | 增加蛋清黏度,促进蛋白质聚集和交联,有助于凝胶的形成 |
| 溶菌酶   | 酶类蛋白                | 约占蛋清蛋白总量的 3.4% | 热稳定性较好 | 约为 10.7 | 具有水解作用,影响凝胶形成              |

卵白蛋白是蛋清中唯一含有游离巯基的酸性蛋白质<sup>[15]</sup>,约占蛋清蛋白的 54%<sup>[16]</sup>,因此对蛋清热凝胶的形成起主导作用。在加热过程中,卵白蛋白会经历变性,使原本溶解在水中的分子聚集成大分子结构,形成凝胶的骨架。这一过程主要起作用的是疏水作用和静电吸引力等相互作用力<sup>[17]</sup>。虽然二硫键相互作用可能不是卵白蛋白聚集的主要驱动力<sup>[18]</sup>,但它可以使卵白蛋白形成更稳定的凝胶网络结构。

卵转铁蛋白是从蛋清中提取的单肽链糖蛋白,含有 686 个氨基酸残基,约占蛋清蛋白总量的 12%,是蛋清中第二丰富的蛋白质<sup>[19]</sup>。卵转铁蛋白有 15 个二硫键,属于糖基化蛋白质<sup>[20]</sup>。其热聚集体无定形<sup>[21]</sup>,变性温度为 60℃,初始聚集温度为 61℃<sup>[22]</sup>,在蛋清热凝胶形成过程中,卵转铁蛋白可能会参与到凝胶的稳定性调节中,可以调节热变性温度<sup>[6]</sup>。

卵类黏蛋白约占蛋清蛋白总量的 11%。是一种典型的糖蛋白<sup>[23]</sup>。在酸性条件下,卵类黏蛋白质能够耐受 100℃长时间高温处理,而其理化性质并不会明显改变<sup>[24]</sup>。因此它是热稳定蛋白,不会自我聚集<sup>[25]</sup>。卵类黏蛋白通过增加蛋清的黏度,促使蛋白质分子更易聚集和交联,从而有助于凝胶的形成<sup>[26]</sup>。

溶菌酶占蛋清蛋白总量的 3.4%,在很宽的 pH 范围内带有净正电荷,可以与蛋白质中的带负电荷的残基发生电荷相互作用<sup>[27]</sup>,这种相互作用可能导致蛋白质的构象变化。此外,溶菌酶具有热敏性<sup>[28]</sup>,高温下溶菌酶的结构也可能发生变化,从而会影响其与其他蛋白质的相互作用,而导致凝胶的形成和性质发生改变。

2 蛋白质热变性介导凝胶透明的潜在机制

蛋清热凝胶的形成是一个复杂的过程,通常分为两

个阶段:部分蛋白质的变性和变性蛋白质的聚集(图 1)<sup>[29]</sup>。随着加热温度的升高,蛋白质分子开始发生结构变化,导致其原有的空间结构破坏。这一阶段的变性使得蛋白质分子之间的相互作用增强,分子开始聚集形成团块。在变性之后,随着温度继续升高,蛋白质分子之间的相互作用进一步增强,形成了一个连续的三维网络结构。这种网络结构具有一定的稳定性,能够保持凝胶的形状并阻止液体再次流动,形成最终的凝胶状态<sup>[30]</sup>。因此,在热诱导凝胶形成中存在两个变性和凝固温度区域。第一次变性和凝固温度范围为 61.5~62.5℃,其中包括卵白蛋白在内的一些蛋白质变性并部分聚集。第二个区域是从 71~73℃,几乎所有的蛋白质都已经凝固<sup>[31]</sup>。

在这一过程中,蛋白质分子链的有序排列和相互作用对于凝胶的透明度至关重要。如果蛋白质分子链能够形成细链凝胶网络结构,且热聚集体的平均直径较小,凝胶就能够显示出较高的透明度<sup>[32-33]</sup>。此外,凝胶网络中的孔隙大小和分布也会影响光线的散射,从而影响透明度。小的孔隙和均匀的分布有助于减少光线的散射,提高凝胶的透明度<sup>[34]</sup>。

由于热诱导凝胶形成的机理极其复杂,影响凝胶形成的因素有很多,如温度、加热时间、离子强度、pH 等。

3 影响蛋清蛋白热凝胶透明度的因素

蛋白质功能性质受到多种因素的影响。首先,蛋白质的氨基酸组成和序列决定了其结构和性质。不同种类的蛋白质具有不同的氨基酸组成和排列方式,从而导致其在热凝胶化过程中表现出不同的特性。其次,蛋白质的表面疏水性和亲水性也会影响其在溶液中的行为,进而影响其在形成凝胶时的结构和稳定性。蛋白质的二级

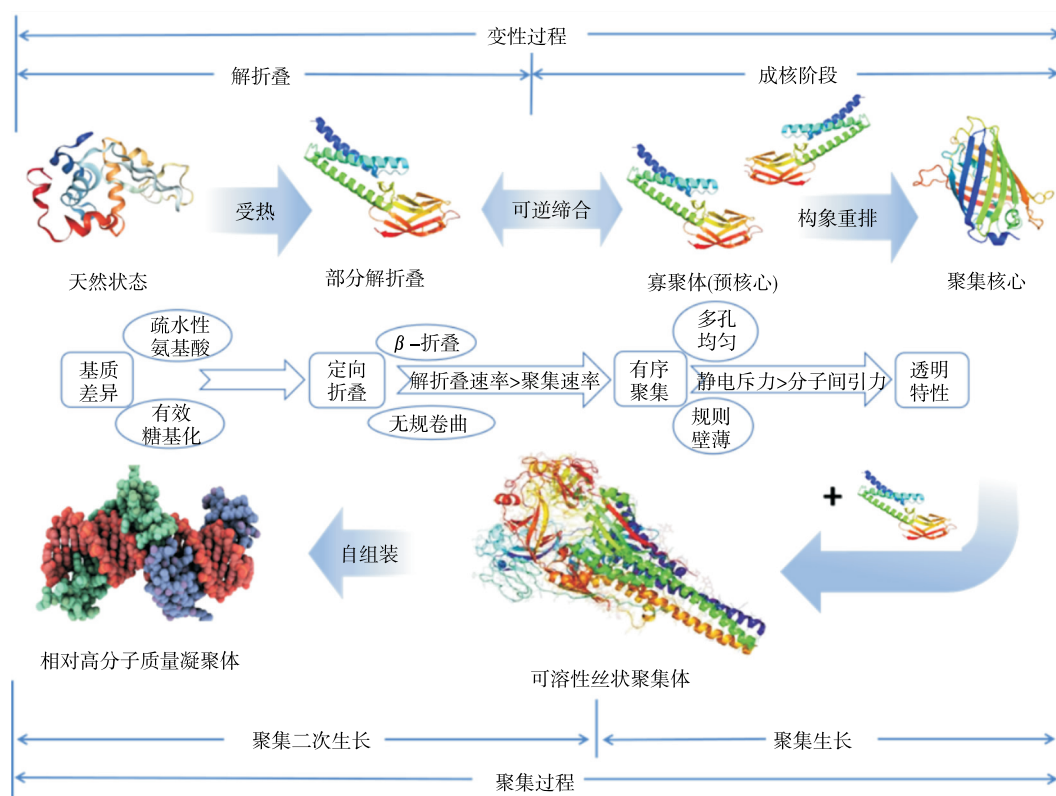


图1 蛋白质热变性介导的凝胶透明机制研究进展

Figure 1 Research progress on the mechanism of gel transparency mediated by protein thermal denaturation

和三级结构,也对凝胶形成过程起着重要作用,因为这决定了蛋白质分子之间的相互作用方式。此外,蛋白质的净电荷及其分布也会影响其在溶液中的相互作用,进而影响凝胶化过程中的结构形成<sup>[35]</sup>。

### 3.1 温度

在较低温度下,通常会观察到蛋清热凝胶呈现较高的透明度。这是因为在较低的温度下,蛋清中的蛋白质分子相对稳定,凝胶网络结构较为均匀<sup>[36]</sup>,在凝胶内部的传播受到较少的障碍,使凝胶呈现出较高的透明度。然而,随着温度的升高,蛋清中的蛋白质分子开始发生变性和聚集,凝胶硬度同步增大<sup>[37]</sup>,网络结构增强。这将导致光线在凝胶内部的散射增加,从而降低凝胶的透明度。特别是在高温条件下,蛋白质分子之间的相互作用加剧,可能导致凝胶结构的进一步疏松和不均匀性增加,进而使凝胶呈现出较低的透明度。

除了温度本身对凝胶透明度的直接影响外,温度还可能通过影响凝胶形成的速率和程度<sup>[38]</sup>,间接地影响凝胶的透明度。例如,快速升温可能导致蛋清凝胶形成过程中出现结构不均匀或气泡的形成,从而影响凝胶的透明度。

### 3.2 加热时间

随着加热时间的不同,蛋清中的蛋白质分子会发生

不同程度的构象变化和聚集,进而影响凝胶的透明度。短时间内的适度加热通常有利于促进蛋白质的水合作用和构象变化,从而形成较为均匀且紧密的凝胶结构,因此透明度更高。然而,当加热时间过长时,蛋白质分子可能会发生过度变性和聚集,导致凝胶结构不均匀、颗粒沉淀,使得凝胶的透明度更低<sup>[39-41]</sup>。

### 3.3 pH

pH对蛋清热凝胶透明度的影响是由蛋白质的结构变化引起的。随着pH值的变化,蛋白质的电荷状态和水合作用发生改变,进而影响凝胶的形成和结构。在等电点附近,蛋白质凝胶保水性差,形成粗糙凝胶。而离等电点较远时,蛋白质展开完全,凝胶具有良好的黏弹性和持水能力,且二硫键作用增强,提高了凝胶的质地<sup>[42-43]</sup>,因此透明度更好。

Liu等<sup>[44]</sup>探讨了pH值对蛋清凝胶透明度和结构的影响。研究表明,pH 7.0和9.0的凝胶结构更均匀细小且透明度更高。鸡蛋清卵白蛋白的等电点约为4.5,因此在此pH值附近最容易发生凝胶变性。相反,当pH远离等电点时,蛋清蛋白在加热过程中不易发生凝胶变性<sup>[45]</sup>。Hatta等<sup>[46]</sup>研究发现,pH值和离子强度对卵白蛋白凝胶的浊度和硬度有显著影响。在不同的溶剂环境下,这些因素可能导致形成透明分散液、透明凝胶、浑浊

分散液或浑浊凝胶。具有透明或半透明特性的凝胶通常具有更高的凝胶强度。此外,Xue等<sup>[47]</sup>研究发现,随着NaOH添加量的增加,卵白蛋白凝胶的透明度也随之增加。

### 3.4 离子强度

离子,包括金属和盐离子,可以通过改变蛋清蛋白分子间排斥的大小、破坏蛋白质分子结构或嵌入蛋白质分子结构来影响凝胶化过程,导致凝胶性质的变化<sup>[48]</sup>。离子强度的变化可以改变蛋清凝胶中离子的浓度和活性,从而影响蛋白质的相互作用和凝胶结构。

盐含量增加会导致蛋白质疏水性基团的暴露,蛋白质的相互作用因此增加,进而影响凝胶的透明度。适量的氯化钠可以增强蛋白质分子之间的疏水相互作用,但过量的盐会导致蛋白质分子之间的离子键和氢键断裂<sup>[49]</sup>。有研究<sup>[50]</sup>表明,在制备蛋清热凝胶时,加入不同浓度的盐溶液会产生不同的效果。当NaCl浓度为10~200 mmol/L时,形成透明凝胶,而当NaCl浓度为300~500 mmol/L时,则形成浑浊凝胶。Li等<sup>[51]</sup>研究也发现:随着氯化钠浓度的增加,蛋清蛋白的表面疏水性、颗粒浊度储存模量均逐渐增大,因此导致了蛋清凝胶的透明度降低。

此外,离子的种类也会对蛋清凝胶的透明度产生影响。Ai等<sup>[52]</sup>发现 $\text{Ca}^{2+}$ 可以嵌入蛋白质分子中并形成钙桥,降低凝胶表面的疏水性,导致形成结构粗糙、不规则、硬度增加、透明度降低的凝胶。Li等<sup>[53]</sup>研究发现,即便是添加相同浓度的不同盐类,也会对凝胶的透明度产生不同程度的影响。

### 3.5 蛋白质种类

不同种类的蛋白质在氨基酸序列、空间结构、变性温度、电荷和分布等方面存在差异,而这些差异影响着它们之间的相互作用方式。蛋白质的结构稳定性和相对分子质量直接影响其在溶液中的溶解度和凝胶化能力,进而影响凝胶的透明度。较大相对分子质量的蛋白质通常倾向于形成较密集的凝胶结构,从而降低凝胶的透明度。Guo等<sup>[54]</sup>研究发现,由于形成大量不溶性蛋白质聚集体,球状蛋白质形成的热诱导凝胶通常是不透明的。此外,还有研究<sup>[55]</sup>表明,大豆7S球蛋白凝胶透明度显著高于分离蛋白。

### 3.6 蛋白质浓度

蛋白质交联形成凝胶需要满足一定的浓度,超过一定的浓度蛋白质才能形成具有三维网络结构的凝胶。浓度主要影响蛋白质分子间的疏水相互作用和离子键<sup>[56]</sup>。高蛋白浓度下,由于大量的蛋白质分子表面基团可以参与凝胶网络的形成,蛋白质凝胶结构会更加紧密,凝胶的透光率更低。此外,蛋白质浓度还可以影响凝胶的结构

和形态。高浓度的蛋白质溶液往往形成更加致密和均匀的凝胶网络,而低浓度的蛋白质溶液可能形成更为松散和不规则的凝胶结构。有研究<sup>[57]</sup>表明,低蛋白浓度甚至可以诱导蛋白构象变化。这些结构差异也会直接影响凝胶的透明度。

### 3.7 禽蛋种类

不同禽蛋中的蛋白质组成和结构特性,以及其生物化学特性的差异,均可能对最终形成的热凝胶网络结构产生显著影响。具体来说,鸽蛋蛋清形成的凝胶以其高度透明性而著称,这一特性在与其他禽蛋相比时尤为突出<sup>[58]</sup>。此外,Yang等<sup>[11]</sup>研究发现,鸽蛋蛋清热凝胶具备透明胶冻状、晶莹剔透的特质,与一般鸡蛋蛋清形成的凝胶在外观上有显著差异。这是因为鸽蛋蛋清热凝胶形成了细链凝胶网络结构,热聚集体的平均直径较小,从而使鸽蛋蛋清凝胶的透明度更高。付胜勇等<sup>[59]</sup>的试验结果显示白羽王鸽蛋的不透明蛋清凝胶比例最高,而泰深鸽蛋的蛋清凝胶不透明比例最小。鸽子挑食的特性导致其采食习惯和营养摄入出现差异,影响了鸽蛋的营养沉积和形成,进而导致不同透明度鸽蛋的产生<sup>[60]</sup>。综上,禽蛋种类不仅决定了蛋清凝胶的物理特性,而且反映了营养沉积差异对蛋清凝胶透明度的影响。

### 3.8 其他因素

在探讨影响蛋清蛋白热凝胶透明度的因素时,除了已知的温度、时间和pH值等关键因素外,压力和添加物等其他因素也扮演着重要角色。高压处理将内部疏水基团暴露在蛋白质表面,它们与周围介质接触,并参与新的疏水相互作用,导致变性蛋白质聚集,进而影响透明度<sup>[61]</sup>。Kanaya等<sup>[62]</sup>研究发现,在压力处理过程中,一些凝胶会变得混浊,并且光散射性质发生了显著变化。多酚类物质(例如茶多酚)的添加可以改变蛋清蛋白的热稳定性和二级结构<sup>[63]</sup>。Wang等<sup>[64]</sup>发现,随着茶多酚浓度的增加,蛋清凝胶的不透明度也随之增加。NaOH的添加量对蛋清凝胶透明度有显著影响<sup>[65]</sup>。这可能是由于NaOH引起pH值的升高,导致蛋白质分子间的电荷排斥作用减弱,促进了蛋白质分子间的相互作用,从而有利于形成更加细腻、均匀的凝胶网络结构<sup>[66]</sup>。

## 4 提高蛋清凝胶透明度的修饰改性方法

蛋白质改性是调节蛋清凝胶性质的重要方法。通过改变蛋白质的化学结构、表面性质或凝胶形成过程中的条件,可以有效地调控蛋清凝胶的透明度。凝胶透明度的提高不仅能够推动食品科学领域对蛋白质凝胶化机制的深入理解,而且有助于开发新的食品加工技术和产品创新。此外,这种研究还能够促进对食品原料的高效利用,提升食品工业的可持续性。蛋清凝胶透明度的改性方法主要包括化学改性、物理改性和生物酶法改性。

## 4.1 化学改性

4.1.1 酰化改性 磷酸化修饰是通过在蛋白质的氨基酸侧链上引入带强负电荷的磷酸基团而发生酯化,从而改变蛋白质的结构和活性。酰化修饰是通过蛋白质分子中的亲核基团与酰化试剂羰基加成反应,将新的官能团引入蛋白质分子的过程。磷酸化和琥珀酰化使蛋白质表面引入电负性基团、分子间静电斥力增强、聚集速率降低,从而形成链状或索状等有序网络结构透明热凝胶<sup>[67-69]</sup>。Hu 等<sup>[70]</sup>研究发现,在未经酰化修饰的情况下,卵白蛋白凝胶呈现完全不透明的外观,透射率约为 1.7%。随着酰化修饰程度的增强,蛋白质水凝胶的透明度显著提高。

4.1.2 糖基化修饰 糖基化是指糖分子与蛋白质分子中的氨基基团发生共价结合的化学反应。在蛋清凝胶中,糖分子可以与蛋白质分子中的游离氨基(赖氨酸和精氨酸)发生反应,形成糖基化产物<sup>[71]</sup>。糖基化修饰是研究最广泛的蛋清蛋白修饰方法,主要分为糖基化干热改性和糖基化湿热改性。这两种方法具有相同的机制,都是通过增强蛋白质分子间静电斥力、促进  $\alpha$ -螺旋向  $\beta$ -折叠转化、提高蛋白质热稳定性、抑制不溶性蛋白聚集等方式或作用,来调控蛋白质解折叠或聚集行为;最终,致使蛋白质有序组装形成透明热凝胶<sup>[72]</sup>。在糖基化过程中,球状蛋白首先经历部分去折叠,随后形成熔融球状构象,从而赋予其高柔韧性,糖基化后构象相对完整<sup>[73]</sup>。糖基化不仅改变了蛋白质的结构,还增强了其性能。例如,卵清蛋白和羧甲基纤维素经过糖基化后,其热稳定性显著提高。此外,还有研究<sup>[44]</sup>表明,添加硫酸葡聚糖可以诱导蛋清凝胶呈现出透明的特性,并且具备优越的持水能力和机械强度。

## 4.2 物理改性

4.2.1 干热处理 干热处理是指将粉末置于高温室中,在受控温度超过 60 °C 且一定湿度条件下加热数天的处理方法<sup>[74]</sup>。干热处理可导致蛋白质发生去折叠现象,改变其原有的二级和三级结构,其中包括聚集体的  $\alpha$ -螺旋转化为  $\beta$ -折叠<sup>[75]</sup>。这一过程暴露出蛋白质分子内部的疏醇基团和疏水残基,进而增加了蛋白质分子之间的亲和力。这些暴露的官能团有助于形成更为紧密的蛋白质网络结构,从而改善了凝胶的性能,提高了凝胶的透明度<sup>[76]</sup>。干热预处理降低了 EWP 凝胶形成的临界蛋白质浓度,显著提高了 EWP 凝胶的强度、透明度和保水性<sup>[77]</sup>。Cheng 等<sup>[78]</sup>发现经过一定时间的干热处理后,蛋清凝胶的硬度和透明度呈增加趋势,凝胶硬度与透明度呈正相关。

4.2.2 超声改性 超声波在液体中传播时,会引起液体内部的剧烈振动和微小气泡的形成与崩溃。这种微小气泡的形成和崩溃会产生局部的高温 and 高压,从而导致蛋白质

分子的结构变化。这种物理效应可以破坏蛋白质的非共价键,如氢键和疏水相互作用,有助于蛋白质分子的解聚和重组<sup>[79]</sup>。Sun 等<sup>[80]</sup>的研究结果显示,超声处理后蛋清凝胶网络中的自由水含量增加。此外,高强度超声改性还可以使卵白蛋白结构展开,使更多的巯基暴露在蛋白质分子表面,从而导致凝胶网络结构更容易形成二硫键<sup>[81]</sup>。因此,经过超声处理的蛋清粉形成的凝胶更为透明<sup>[82]</sup>。

## 4.3 生物酶法改性

通过将酶与其他蛋白质修饰方法相结合,可以改善蛋白质的凝胶性质。酶可以与蛋清蛋白形成共价键,促进蛋清蛋白分子之间的交联<sup>[83]</sup>。然而,截至目前,只有少数酶被用于蛋清凝胶修饰,而控制修饰过程的困难可能是酶修饰研究较少的原因。其中 Huyst 在联合加热(温度为 78 °C, pH 值为 7,持续 22 h)和胰蛋白酶处理(温度为 37 °C,持续 48 h)的条件下,含有 2.0% 卵白蛋白的溶液转化成了一种透明的凝胶状物质<sup>[84]</sup>。

## 5 总结与展望

文章综述了蛋清凝胶透明机制的研究进展,包括蛋清蛋白凝胶形成的基础和机理,以及影响凝胶透明的主要因素,包括凝胶形成时的温度、pH 值、离子强度等 7 个方面。通过对这些因素的系统性分析,揭示了它们是如何影响蛋清热凝胶的透明度。此外,文章还探讨了通过蛋白质改性提高凝胶透明度的多种方法,这些方法包括但不限于化学修饰、物理处理和生物技术手段。这些改性策略为蛋清凝胶在食品工业中的应用提供了新的可能性,并为未来的研究方向提供了指导。

蛋清热凝胶的形成是一个受多种因素调控的复杂过程。除了蛋白质种类外,浓度、温度、时间和 pH 值等因素也会对凝胶化过程产生重要影响<sup>[85]</sup>。对这些影响因素的深入理解,有助于人们更好地掌握蛋清蛋白质热凝胶透明的机制,进而优化食品加工工艺和产品质量。因此,深入研究蛋清凝胶透明机制不仅能为蛋清(粉)高质化利用提供理论指导,而且也能扩展蛋清凝胶在食品和医药领域的应用范畴。

## 参考文献

- [1] WILSON P B. Recent advances in avian egg science: A review[J]. Poultry Science, 2017, 96(10): 3 747-3 754.
- [2] 张根生, 李琪, 黄昕钰, 等. 蛋清蛋白凝胶改性及其在肉制品加工中的应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 198-204.  
ZHANG G S, LI Q, HUANG X Y, et al. Egg white protein gel modification and its application in meat processing[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 198-204.
- [3] MINE Y. Recent advances in the understanding of egg white protein functionality[J]. Trends in Food Science & Technology, 1995, 6(7): 225-232.

- [4] MA Y Q, ZHAO Y, CHI Y J. Changes in the gel characteristics of two hen egg white powders modified by dry heating and the Maillard reaction during long-term storage[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2019, 109: 123-129.
- [5] LIU T T, ZHAO Y, WU N, et al. Egg white protein-based delivery system for bioactive substances: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(3): 617-637.
- [6] LIU X, WANG J Q, HUANG Q, et al. Underlying mechanism for the differences in heat-induced gel properties between thick egg whites and thin egg whites: Gel properties, structure and quantitative proteome analysis [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 106: 105873.
- [7] 陈彰毅. 强碱诱导的皮蛋蛋白凝胶形成机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015: 4.  
CHEN Z Y. Study on gel formation mechanism of preserved egg white gel induced by strong alkali [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015: 4.
- [8] GAO X J, YAO Y, WU N, 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.
- [9] CHEN Z Y, LI J K, TU Y G, et al. Changes in gel characteristics of egg white under strong alkali treatment[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 45: 1-8.
- [10] 耿嘉, 周媛, 孙佳慧, 等. 鸽蛋的生产和贮藏研究进展[J]. *畜禽业*, 2023, 34(5): 49-52.  
GEN J, ZHOU Y, SUN J H, et al. Research progress in production and storage of pigeon eggs[J]. *Livestock and Poultry Industry*, 2023, 34(5): 49-52.
- [11] YANG C R, HU G, XIANG X L, et al. Translucency mechanism of heat-induced pigeon egg white gel[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 126909.
- [12] DUAN X, LI M, SHAO J, et al. Effect of oxidative modification on structural and foaming properties of egg white protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 75: 223-228.
- [13] DONG X, ZHANG Y Q. An insight on egg white: From most common functional food to biomaterial application[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2021, 109(7): 1 045-1 058.
- [14] JI S N, AHN D U, ZHAO Y L, et al. An easy and rapid separation method for five major proteins from egg white: Successive extraction and MALDI-TOF-MS identification[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126207.
- [15] 黄群, 马美湖, 黄茜, 等. 鸡蛋清卵白蛋白与溶菌酶的两步超滤法分离[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(3): 146-151.  
HUANG Q, MA M H, HUANG Q, et al. Separation of ovalbumin and lysozyme from chicken egg white using two-stage ultrafiltration technique[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3): 146-151.
- [16] 袁旦. 卵白蛋白的糖基化改性及其对陈皮油纳米乳液的稳定机理[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017: 1.  
YUAN Q. Ovalbumin glycation and mechanism of the stabilization on aged orange peel oil[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2017: 1.
- [17] WEIJERS M, DE HOOG E H A, STUART M A C, et al. Heat-induced formation of ordered structures of ovalbumin at low ionic strength studied by small angle X-ray scattering[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, 270: 301-308.
- [18] BROERSEN K, VAN TEEFFELN A M M, VRIES A, et al. Do sulfhydryl groups affect aggregation and gelation properties of ovalbumin? [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54: 5 166-5 174.
- [19] WEI Z H, CHEN Y S, WIJAYA W, et al. Hydrogels assembled from ovotransferrin fibrils and xanthan gum as dihydromyricetin delivery vehicles[J]. *Food & Function*, 2020, 11(2): 1 478-1 488.
- [20] 庄虎, 张珊, 杨俊鹏, 等. 超声辅助磷酸化修饰对卵转铁蛋白理化及乳化特性影响的研究[J]. *食品科技*, 2022, 47(1): 269-276.  
ZHUANG H, ZHANG S, YANG J P, et al. Effects of ultrasound-assisted phosphorylation on physicochemical and emulsifying properties of ovotransferrin [J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(1): 269-276.
- [21] KHAN M V, ISHTIKHAR M, RABBANI G, et al. Polyols (Glycerol and Ethylene glycol) mediated amorphous aggregate inhibition and secondary structure restoration of metalloproteinase-conalbumin (ovotransferrin) [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 94(Pt A): 290-300.
- [22] HONG T, IWASHITA K, HANDA A, et al. Arginine prevents thermal aggregation of hen egg white proteins[J]. *Food Research International*, 2017, 97: 272-279.
- [23] 纪胜男. 卵类粘蛋白的分离纯化及其胰蛋白酶抑制活性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 11.  
JI S N. Isolation and purification of ovomucoid and its inhibitory activity research of trypsin [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 11.
- [24] 史晓霞. 蛋清卵类粘蛋白分离纯化, 结构表征及其过敏原性的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012: 2.  
SHI X X. Study on the isolation and purification, structural characterization and allergenicity of chicken egg white ovomucoid [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012: 2.
- [25] WANG J Q, LIU X, LI S G, et al. Ovomucin may be the key protein involved in the early formation of egg-white thermal gel[J]. *Food Chemistry*, 2022, 366: 130596.
- [26] YUNO-OHTA N, KATO T, ASHIZAWA S, et al. Role of ovomucoid in the gelation of a  $\beta$ -lactoglobulin-ovomucoid mixture [J]. *Colloid and Polymer Science*, 2016, 294(6): 1 065-1 073.
- [27] SYNGAI G G, AHMED G. Lysozyme: A natural antimicrobial enzyme of interest in food applications[M]// *Enzymes in food*

- biotechnology. [S.l.]: Academic Press, 2019: 169-179.
- [28] GÜNAY N, KILIMCI U, ÖZTÜRK G. Lysozyme modified cryogels for efficient bacteria removal[J]. Chemical Papers, 2023, 77(10): 5 839-5 846.
- [29] 陈彰毅, 赵燕, 涂勇刚, 等. 蛋清蛋白质凝胶化机理的研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(4): 369-373.
- CHEN Z Y, ZHAO Y, TU Y G, et al. Research progress in the gelation mechanism of egg white proteins [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(4): 369-373.
- [30] QUAN T H, BENJAKUL S. Duck egg albumen hydrolysate-epigallocatechin gallate conjugates: Antioxidant, emulsifying properties and their use in fish oil emulsion [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 579: 123711.
- [31] CAMPBELL L, RAIKOS V, EUSTON S R. Modification of functional properties of egg-white proteins [J]. Food/Nahrung, 2003, 47(6): 369-376.
- [32] 韩宗元, 邵俊花, 潘燕墨, 等. 蛋白质适度加工: 热聚集与凝胶品质阐述以及过度聚集的调控对策[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 177-184.
- HAN Z Y, SHAO J H, PAN Y M, et al. Moderate protein processing: Elucidation of thermal aggregation and gel quality and regulatory strategies for excessive aggregation[J]. Food Science, 2023, 44(9): 177-184.
- [33] DU X, ZHAO M N, PAN N, et al. Tracking aggregation behaviour and gel properties induced by structural alterations in myofibrillar protein in mirror carp (*Cyprinus carpio*) under the synergistic effects of pH and heating[J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130222.
- [34] NICOLAI T. Gelation of food protein-protein mixtures [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2019, 270: 147-164.
- [35] 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: 7.
- ZHOU C X. Study on heat-induced gel formation and gel properties of egg [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012: 7.
- [36] 丁雨欣. 不同热加工条件下柞蚕蛹蛋白质及全粉热诱导凝胶特性的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023: 66.
- DING Y X. Studies on heat-induced gel properties of protein and raw flour of *Antheraea pernyi* pupae under different thermal processing conditions [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023: 66.
- [37] 李俐鑫, 迟玉杰, 孙波, 等. 蛋清蛋白凝胶特性影响因素的研究[J]. 食品工业, 2008(2): 54-57.
- LI L X, CHI Y J, SUN B, et al. Study on affecting factors of egg white protein gel property[J]. The Food Industry, 2008(2): 54-57.
- [38] 徐琳. 鸡蛋煮制过程中凝胶形成机理及正心技术探究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2022: 6.
- XU L. Exploration of gel formation mechanism and positive technology during egg cooking process[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022: 6.
- [39] WANG J Q, LIU X, LI S G, et al. Ovomucin may be the key protein involved in the early formation of egg-white thermal gel[J]. Food Chemistry, 2021, 366: 130596.
- [40] 何立超, 马素敏, 李成梁, 等. 不同煮制时间对水煮鸡蛋质构及蛋黄脂质成分的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 25-30, 37.
- HE L C, MA S M, LI C L, et al. Effect of different cooking time on the textural profile and lipid composition of hard-boiled egg[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(6): 25-30, 37.
- [41] 杨雅婧, 徐琳, 杨须跃, 等. 蛋清蛋白热诱导凝胶特性研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(11): 5-10.
- YANG Y J, XU L, YANG X Y, et al. Study on heat-induced gel characteristics of egg white protein[J]. China Condiment, 2023, 48(11): 5-10.
- [42] MAISSA K, HAMADI A, ALI A M. The effect of pH, sucrose, salt and hydrocolloid gums on the gelling properties and water holding capacity of egg white gel[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 87: 11-19.
- [43] HANDA A, TAKAHASHI K, KURODA N, et al. Heat-induced egg white gels as affected by pH[J]. Journal of Food Science, 1998, 63(3): 403-407.
- [44] LIU J B, CHAI J L, YUAN Y X, et al. Dextran sulfate facilitates egg white protein to form transparent hydrogel at neutral pH: Structural, functional, and degradation properties [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122: 107094.
- [45] CROGUENEC T, NAU F, BRULE G. Influence of pH and salts on egg white gelation[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(2): 608-614.
- [46] HATTA H, KITABATAKE N, DOI E. Turbidity and hardness of a heat-induced gel of hen egg ovalbumin [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1986, 50(8): 2 083-2 089.
- [47] XUE H, HAN T F, ZHANG G W, et al. Combined effects of NaOH, NaCl, and heat on the characteristics of ovalbumin gel and the exploration of the mechanism of transparent gel formation[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 140: 108589.
- [48] DENG C Y, SHAO Y Y, XU M S, et al. Effects of metal ions on the physico-chemical, microstructural and digestion characteristics of alkali-induced egg white gel [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105956.
- [49] SOW L C, YANG H S. Effects of salt and sugar addition on the physicochemical properties and nanostructure of fish gelatin[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 45: 72-82.
- [50] KITABATAKE N, HATTA H, DOI E. Heat-induced and transparent gel prepared from hen egg ovalbumin in the presence of salt by a two-step heating method [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1987, 51(3): 771-778.
- [51] LI J H, ZHANG Y F, FAN Q, et al. Combination effects of NaOH and NaCl on the rheology and gel characteristics of hen egg white proteins[J]. Food Chemistry, 2018, 250: 1-6.

- [52] AI M M, ZHOU Q, XIAO N, et al. Enhancement of gel characteristics of NaOH-induced duck egg white gel by adding  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  with/without heating [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103: 105654.
- [53] LI J H, ZHANG W J, TANG T T, et al. Thermal gelation and digestion properties of hen egg white: Study on the effect of neutral and alkaline salts addition [J]. Food Chemistry, 2023, 409: 135263.
- [54] GUO J, ZHANG Y, YANG X Q. A novel enzyme cross-linked gelation method for preparing food globular protein-based transparent hydrogel [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 26 (1): 277-285.
- [55] 陈复生. 大豆蛋白凝胶光学性质及其应用的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002: 11.  
CHEN F S. Studies on optical properties and applications of soybean protein gels[D]. Beijing: China Agricultural University, 2002: 11.
- [56] HONGSPRABHAS P, BARBUT S. Protein and salt effects on  $\text{Ca}^{2+}$ -induced cold gelation of whey protein isolate[J]. Journal of Food Science, 1997, 62(2): 382-385.
- [57] LI C, ARAKAWA T. Feasibility of circular dichroism to study protein structure at extreme concentrations [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 1 290-1 295.
- [58] SUN C J, LIU J N, YANG N, et al. Egg quality and egg albumen property of domestic chicken, duck, goose, turkey, quail, and pigeon[J]. Poultry Science, 2019, 98(10): 4 516-4 521.
- [59] 付胜勇, 卜柱, 汤青萍, 等. 不同品种鸽蛋组分、蛋白透明度差异比较及相关性分析[J]. 中国家禽, 2020, 42(9): 26-30.  
FU S Y, BU Z, TANG Q P, et al. Study on differences in components, boiled albumen transparency of eggs from different pigeon breeds and related correlation research[J]. China Poultry, 2020, 42(9): 26-30.
- [60] 朱小芳. 蛋鸽生产的发展前景研究[J]. 浙江畜牧兽医, 2004(2): 18-19.  
ZHU X F. Research on the development prospect of egg pigeon production[J]. Zhejiang Journal Animal Science and Veterinary, 2004(2): 18-19.
- [61] VAN DER PLANCKEN I, VAN LOEY A, HENDRICKX M E. Combined effect of high pressure and temperature on selected properties of egg white proteins[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2005, 6(1): 11-20.
- [62] KANAYA H K H, HARA K H K, NAKAMURA A N A, et al. Investigations of pressure and temperature effects on gelation process of egg white by time-resolved turbidimetric measurements [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1994, 33(5R): 2 817-2 820.
- [63] 周绪霞, 陈婷, 吕飞, 等. 茶多酚改性对蛋清蛋白凝胶特性的影响及机理[J]. 食品科学, 2018, 39(16): 13-18.  
ZHOU X X, CHEN T, LU F, et al. Effect and mechanism of modification with tea polyphenols on the gel properties of egg white protein[J]. Food Science, 2018, 39(16): 13-18.
- [64] WANG Z Y, XIAO N, GUO S G, et al. Tea polyphenol-mediated network proteins modulate the NaOH-heat induced egg white protein gelling properties [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109514.
- [65] 叶阳, 王洋, 王凌云. 不同碱液对鸡蛋清凝胶特性的影响研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(3): 147-149.  
YE Y, WANG Y, WANG L Y. Influence of different alkali on gel properties of hen egg white[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(3): 147-149.
- [66] CAMPBELL L, RAIKOS V, EUSTON S R. Modification of functional properties of egg-white proteins [J]. Food/Nahrung, 2003, 47(6): 369-376.
- [67] 熊舟翼. 磷酸化对卵白蛋白分子特性和功能性质的影响及其机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017: 7.  
XIONG Z Y. The effect of phosphorylation on the molecular characteristics and functional properties of ovalbumin and study of the mechanism [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017: 7.
- [68] WU Y Y, XIANG X L, LIU L, et al. Ultrasound-assisted succinylation comprehensively improved functional properties of egg white protein[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 171: 114155.
- [69] HU G, HUANG X Y, MA J X, et al. Elastic and transparent ovalbumin hydrogels formed via succinylation combined with pH-shifting treatment [J]. Food Research International, 2023, 165: 112174.
- [70] HU G, MA M, BATTOOL Z, et al. Gel properties of heat-induced transparent hydrogels from ovalbumin by acylation modifications [J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130912.
- [71] WANG C Y, LI J H, LI X, et al. Molecular forces and gelling properties of heat-induced gel from egg white protein glycosylated with isomaltoligosaccharide [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105356.
- [72] 袁一心. 硫酸化多糖介导的蛋清蛋白凝胶特性及增凝机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023: 28.  
YUAN Y X. Influence by sulfated polysaccharides insight into the mechanism of egg white protein gelling properties[D]. Changchun: Jilin University, 2023: 28.
- [73] WANG C Y, LI J H, LI X, et al. Emulsifying properties of glycation or glycation-heat modified egg white protein[J]. Food Research International, 2019, 119: 227-235.
- [74] BELYAVIN C G. Eggs: Use in the food industry[J]. Encyclopedia of Food and Health, 2016: 476-479.
- [75] MA Z H, CHI Y, ZHANG H J, et al. Inhibiting effect of dry heat on the heat-induced aggregation of egg white protein[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132850.
- [76] PLANCKEN I V D, LOEY A V, HENDRICKX M E. Effect of

- heat-treatment on the physico-chemical properties of egg white proteins: A kinetic study[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 75(3): 316-326.
- [77] MA Y Q, SHAN A S, WANG R H, et al. Characterization of egg white powder gel structure and its relationship with gel properties influenced by pretreatment with dry heat[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106149.
- [78] CHENG Y, WANG J T, CHI Y, et al. Effect of dry heating on egg white powder influencing water mobility and intermolecular interactions of its gels[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(2): 433-440.
- [79] 熊舟翼, 马美湖, 蔡朝霞, 等. 卵白蛋白修饰改性对功能活性影响的研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(15): 3 473-3 477.
- XIONG Z Y, MA M H, CAI C X, et al. Research advance on the influence of modification on functional activity of ovalbumin[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(15): 3 473-3 477.
- [80] SUN J, MU Y Y, JING H, et al. Effects of single- and dual-frequency ultrasound on the functionality of egg white protein[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 277: 109902.
- [81] XIONG W F, WANG Y T, ZHANG C L, et al. High intensity ultrasound modified ovalbumin: Structure, interface and gelation properties[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 31: 302-309.
- [82] WANG Y C, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. The application of ultrasound pretreatment and pulse-spouted bed microwave freeze drying to produce desalted duck egg white powders[J]. *Drying Technology*, 2013, 31(15): 1 826-1 836.
- [83] 刘松, 张东旭, 堵国成, 等. 微生物谷氨酰胺转氨酶的表达及分子改造研究进展[J]. *生物工程学报*, 2011, 27(12): 1 681-1 689.
- LIU S, ZHANG D X, DU G C, et al. Progress in expression and molecular modification of microbial transglutaminase[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2011, 27(12): 1 681-1 689.
- [84] HUYST A M R, DELEU L J, LUYCKX T, et al. Impact of heat and enzymatic treatment on ovalbumin amyloid-like fibril formation and enzyme-induced gelation [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 131: 107784.
- [85] LU X, HUANG X, MA B, et al. Modification methods and applications of egg protein gel properties: A review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(3): 2 233-2 252.

(上接第 87 页)

- [16] CHEN L C, PAPANDREOU G, SCHROFF F, et al. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation[J/OL]. *arXiv*. (2017-12-05) [2024-03-19]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.05587>.
- [17] CHEN L C, PAPANDREOU G, KOKKINOS I, et al. Deeplab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected crfs[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 40(4): 834-848.
- [18] 马冬梅, 李鹏辉, 黄欣悦, 等. 改进 DeepLabV3+ 的高效语义分割[J]. *计算机工程与科学*, 2022, 44(4): 737-745.
- MA D M, LI P H, HUANG X Y, et al. Improved efficient semantic segmentation of DeepLab V3+ [J]. *Computer Engineering and Science*, 2022, 44(4): 737-745.
- [19] 王淑青, 黄剑锋, 张鹏飞, 等. 基于 YOLOv4 神经网络的小龙虾质量检测方法[J]. *食品与机械*, 2021, 37(3): 120-124, 194.
- WANG S Q, HUANG J F, ZHANG P F, et al. Crayfish quality detection method based on YOLOv4[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(3): 120-124, 194.
- [20] 郑帅. 语义分割技术在船舶卫星图像识别中的应用[J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(14): 155-158.
- ZHENG S. Application of semantic segmentation technology in ship satellite image recognition[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(14): 155-158.
- [21] 赵世达, 王树才, 李振强, 等. 基于 U 型卷积神经网络的羊肋排图像分割[J]. *食品与机械*, 2020, 36(9): 116-121, 154.
- ZHAO S D, WANG S C, LI Z Q, et al. Image segmentation of sheep ribs based on U-shaped convolutional neural network[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(9): 116-121, 154.
- [22] 马冬梅, 黄欣悦, 李煜. 基于特征融合和注意力机制的图像语义分割[J]. *计算机工程与科学*, 2023, 45(3): 495-503.
- MA D M, HUANG X Y, LI Y. Image semantic segmentation based on feature fusion and attention mechanism [J]. *Computer Engineering and Science*, 2023, 45(3): 495-503.

(上接第 121 页)

- [11] 河野澄夫. 近赤外分光法による果実糖度の測定[J]. *食糧その科学と技術*, 2005, 43(3): 69-86.
- HEYE C F. Determination of fruit sugar content by near-infrared spectroscopy[J]. *Food and Science and Technology*, 2005, 43(3): 69-86.
- [12] 常汉. 水心病苹果水心病程度与可溶性固形物含量在线无损检测方法与分级装备研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 22.
- CHANG H. Research on online nondestructive testing method and grading equipment for water-centered degree and soluble solids content of apple with water heart disease[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 22.
- [13] WORKMAN J R J, WEYER L. Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007: 27.