

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.01.035

热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化影响因素研究进展

Research progress on the affecting factors of heat-induced gelation of egg albumin

刘欣慈 吕云雄 孙维宝 徐帆 岳晓霞 张根生

LIU Xin-ci LV Yun-xiong SUN Wei-bao XU Fan YUE Xiao-xia ZHANG Gen-sheng

(哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 750076)

(College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 750076, China)

摘要:介绍了鸡蛋蛋清蛋白热诱导凝胶的微观结构、凝胶过程以及凝胶性状的作用机理,综述了糖基化、盐、酶、pH 值及添加 NaCl 或调节 pH 值分别协同糖基化、酶等影响鸡蛋蛋清蛋白热诱导凝胶化的研究现状,并对鸡蛋蛋清蛋白热诱导凝胶的研究方向及应用进行了展望。

关键词:鸡蛋;蛋清蛋白;热诱导;凝胶化

Abstract: This review summarized the microstructure, gelation process and the mechanism of gel properties of heat-induced from egg albumin. The effects of glycosylation, salt, enzymes, pH, adding NaCl or adjusting pH to synergistic glycosylation or enzyme on heat-induced gelation of egg white protein were discussed emphatically, and the research direction and application of heat-induced gelation of egg albumin were also prospected.

Keywords: egg albumin; heat-induced; gelation

鸡蛋含有丰富的氨基酸、脂肪酸、维生素以及人体必需的矿物质,是理想的天然食品^[1-2],蛋液里约 60% 为鸡蛋蛋清,其成分包括少量脂肪、碳水化合物和大量蛋白质,现已发现的蛋清蛋白质有 40 余种,约占蛋清的 11%^[3],较高的蛋白质含量使鸡蛋蛋清具有优良的凝胶特性,这种特性使添加鸡蛋蛋清的食品经凝胶化后持水力和胶黏性显著提高,因而鸡蛋蛋清被作为食品加工中重要的原辅料^[4-5]。

凝胶化是指分散在液体介质中的高分子溶质互相聚集形成有序的网状结构,最终成为无流动性的胶体的过

程^[6]。凝胶化后的弹性、持水性、硬度等是评价鸡蛋蛋清蛋白凝胶性能的重要指标^[7-8]。目前,鸡蛋蛋清蛋白凝胶化方法主要以加热为主,液态蛋清以水作为加热介质,于 65 °C 左右受热诱导进行凝胶化^[9]。研究^[10]表明,热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶的性能不仅受热诱导温度、时间及蛋白质浓度影响,还与凝胶化时体系中存在的对热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化起改性作用的物质有关,这些物质作为热诱导鸡蛋蛋清蛋白影响因素使其凝胶特性发生改变^[11]。文章拟综述热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化因素对凝胶性状的影响,对鸡蛋蛋清蛋白热诱导凝胶化的研究方向进行展望,为鸡蛋蛋清凝胶在食品品质改善中的应用提供依据。

1 热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化机理

鸡蛋蛋清蛋白在环境温度约 65 °C 时经预凝胶、凝胶点和后凝胶状态形成稳定细密的网状凝胶结构^[12]。预凝胶过程中蛋白质结构受热发生变化, α -螺旋减少、 β -折叠增加导致分子结构展开,蛋白质内部疏水基团暴露,促进蛋白质聚集为较小的凝集物,随后分子表面净电荷变稀,分子间引力增大^[13];凝胶点时,这些较小凝集物互相靠近形成分子质量较大的凝集物,疏水基团和巯基形成维持蛋白质网状结构稳定的二硫键和疏水键^[14];后凝胶阶段,体系中的自由水被截留在网状结构中变为结合水,使形成的蛋白蛋清凝胶具有保水性^[15]。

鸡蛋蛋清蛋白凝胶的性状由预凝胶过程中蛋白分子的展开程度决定,当蛋清蛋白在聚集前完全展开,疏水基团充分暴露使分子间引力增大,凝集物的结构细密,强度高^[16],反之,蛋白结构的不完全展开是凝胶网络不规律,凝胶硬度低、强度差的主要原因。加热过程中,糖基化、盐、酶、pH 值以及这些因素间的相互协同可影响蛋白分子的展开,更大程度增强凝胶化时分子间的相互作用,使凝胶质构产生差异^[17]。

基金项目:黑龙江省百千万工程科技重大专项(编号:2019ZX07B03);哈尔滨商业大学研究生创新科研基金项目(编号:YJSCX2020-688HSD)

作者简介:刘欣慈,女,哈尔滨商业大学在读硕士研究生。

通信作者: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:2020-10-16

2 热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化影响因素

2.1 糖基化对热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化的影响

鸡蛋蛋清蛋白的糖基化改性方法主要分为干法糖基化和湿法糖基化,两种改性方法的机理相同,均为还原糖的羰基经糖基化反应与鸡蛋蛋清蛋白的 ϵ -氨基间通过共价键连接^[18]。干法糖基化反应温和可控,可用于蛋清蛋白凝胶改性的糖种类多,而湿法糖基化中,虽然糖与蛋清蛋白接枝度高但反应过程剧烈,鸡蛋蛋清蛋白分子聚合速度大于展开,凝胶强度受影响,所以干法糖基化在研究及生产中的应用较湿法糖基化多^[19]。

2.1.1 干法糖基化 干法糖基化凝胶是以蛋清蛋白与糖的水溶液经冷冻干燥后于50~65℃下反应,利用得到的改性蛋白粉制成的凝胶^[20]。张辉^[21]研究发现,由于果糖较半乳糖和乳糖的还原性更强,其与鸡蛋蛋清蛋白产生的糖基化反应程度更高,与鸡蛋蛋清蛋白的交联程度大,所以提高凝胶硬度的作用更明显。Wang等^[22]研究发现,糖基化反应活性随反应时间的增长而增大,涉及异麦芽寡糖—蛋清蛋白凝胶形成的氢键与二硫键含量增加,促进了可溶性蛋白聚集,有利于形成致密、有序的凝胶基质^[23-24]。段汝清^[25]发现,由于鸡蛋蛋清蛋白中赖氨酸和精氨酸侧链的游离氨基可直接与甘露低聚糖共价交联,反应后体系中赖氨酸和精氨酸含量降低,蛋清蛋白获得大量羟基,氢键作用增强,更多水分子被吸附,凝胶硬度和持水性增大。王晨莹^[26]研究发现,鸡蛋蛋清蛋白分子的 α -氨基与糖类羰基间发生缩合反应,游离氨基被消耗;傅里叶红外光谱测定结果表明,糖基化反应增加了蛋清蛋白分子内和分子间的 β -折叠,使蛋清蛋白分子聚集前充分展开,增强了凝胶硬度。

2.1.2 湿法糖基化 湿法糖基化对蛋清蛋白的改性是将糖与鸡蛋蛋清蛋白混合,以溶液形式加热使二者发生接枝反应。魏晨^[27]研究发现,糖与蛋清蛋白的浓度比可影响接枝程度,一方面糖浓度增加可使反应位点接触率增大,提高糖基化反应强度,使改性凝胶更稳定;另一方面,由于蛋清蛋白中的卵清蛋白空间位阻大,故蛋清蛋白浓度增大时糖基化反应被抑制,形成的凝胶结构疏松,强度差。刘建华等^[28]证明等量混合的蛋清蛋白与刺槐豆胶的接枝度随糖基化时间的增长而增大,并在12 h时达最大,改性蛋清蛋白凝胶的强度、持水性增加。涂勇刚等^[29]研究发现,当黄原胶浓度为0.40~3.19 mg/mL时,体系中的水分被具有吸水性的黄原胶吸收,蛋清蛋白相对浓度增大,改性凝胶强度升高,而黄原胶添加量过高会导致蛋白结构的不完全伸展,凝胶强度下降。

鸡蛋蛋清蛋白的干法糖基化在研究及生产中的应用较湿法糖基化更多,糖与蛋清蛋白分子间的交联程度决定了糖基化改性后的蛋清蛋白凝胶性状。还原性高或具

有更多羰基的糖与蛋清蛋白的游离氨基反应性更强,交联程度更高^[30],交联后的蛋清蛋白微观结构稳定,凝胶的硬度、弹性提高;湿法糖基化时糖与蛋清蛋白的浓度比可影响接枝程度,从而影响凝胶的强度和持水性。

2.2 盐对热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化的影响

叶阳等^[31]研究表明,低浓度NaCl、KCl能与蛋白发生非特异性的静电相互作用,使蛋白分子在凝胶化前肽链充分展开,凝胶硬度增大;但高浓度的盐通过破坏蛋清蛋白的氢键,蛋清蛋白结构稳定性降低^[32],随着MgCl₂、CaCl₂浓度的增大,凝胶黏性、硬度及持水性均下降。Ai等^[33]研究发现,Ca(OH)₂在热处理时解离出的Ca²⁺可嵌入蛋白分子内并形成钙桥,凝胶表面疏水性降低,使形成的凝胶具有粗糙的不规则结构,凝胶硬度增加、弹性降低。仇旭等^[34]研究发现,Fe³⁺可结合在卵转铁蛋白的金属离子结合位点上,促进凝胶结构稳定,凝胶硬度随之增大。Jin等^[35]研究发现,聚合度越低的磷酸盐空间位阻越小,结合蛋清蛋白的能力越强,对改善蛋清凝胶的离心持水量的效果越显著。Vassilios等^[36]发现NaCl能够中和蛋清蛋白分子表面的负电荷,更多疏水基团外露,分子间斥力减小,凝胶化后的凝胶硬度增加。Li等^[37]也发现,蛋清蛋白分子氢键的稳定性受NaCl影响,有序的二级结构减少,随着NaCl浓度的增大,凝胶中蛋白分子间疏水相互作用增强,降低了蛋白凝胶自由水的迁移率和分布,影响蛋清凝胶的离心持水量,从而降低蛋清凝胶的断裂强度。

盐离子可通过改变蛋清蛋白分子间斥力大小^[38-39],破坏蛋白分子结构或嵌入蛋白分子结构影响凝胶化过程,导致凝胶性状改变^[40]。NaCl是食品工业中应用最多的盐,在盐法诱导鸡蛋蛋清热凝胶化的研究中最多。

2.3 酶对热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化的影响

目前酶法改性对鸡蛋蛋清凝胶的影响研究相对薄弱,且主要以转谷氨酰胺酶为研究对象^[41]。转谷氨酰胺酶作用于蛋清蛋白时,以蛋白质肽链上谷氨酰胺残基上的甲酰氨基作为乙酰基供体,蛋白质或游离氨基酸上的胺基或水作为受体将酰基转移^[42],催化蛋清蛋白分子间、分子内的交联,使交联后的凝胶结构稳定^[43]。Alavi等^[44]发现蛋清蛋白分子上的 ϵ -氨基和转谷氨酰胺酶的 γ -羧酰胺之间形成的Gln-Lys键相较于非共价键强约20倍^[45],故经转谷氨酰胺酶改性的蛋清蛋白凝胶强度、硬度增大。徐东红^[46]研究发现,转谷氨酰胺酶浓度及诱导时间可影响凝胶的强度。酶浓度过大,酶与蛋白过度交联会降低蛋白凝胶的强度;热诱导时间过长,以共价键结合形成的基团中和了分子表面正负电荷,使体积较小的凝胶聚集体不能继续结合新的蛋白分子,凝胶性下降。陈曙光^[47]利用蘑菇中的多酚氧化酶与卵清蛋白交联,促进了卵清蛋白酪氨酸上的酚羟基间的共价结合,使

亲水基团被覆盖,凝胶表面疏水性增强,凝胶硬度增大。

酶促进蛋清蛋白分子间的共价交联,同时其自身也与蛋清蛋白通过共价键连接,交联程度与酶浓度及反应时间有关,过度交联会导致蛋白质网络结构松散,凝胶强度下降。但用于蛋清凝胶改性的酶种类较少,改性过程控制困难可能是酶法改性研究较少的原因。

2.4 pH 值对热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化的影响

pH 值影响鸡蛋蛋清蛋白凝胶化的研究主要以鸡蛋蛋清蛋白等电点为分类依据,研究鸡蛋蛋清蛋白处于等电点(pI)及远离等电点时的凝胶化过程。Nyemt 等^[48]研究发现,pH 接近蛋清蛋白 pI 时,蛋清蛋白分子间净电荷接近零,肽链聚集速度大于展开速度,疏水基团暴露不完全,更易形成簇状的海绵状微观结构,凝胶强度、硬度较差。苏芳萍^[49]发现,pH 处于等电点时,蛋白链聚集大于展开,伴随着快速的聚集,凝胶产生脱水收缩现象,大量水分因蒸发而流失导致凝胶的硬度上升,越接近等电点硬度增大越明显。Zhao 等^[50-51]研究表明,碱性环境下蛋清蛋白受热使蛋白质发生解折叠,这是由于极端碱性时蛋白质分子中的羧基、酚羟基、氨基和巯基被电离并暴露在体系中亲水区内,而疏水区被逐渐极化导致疏水性降低,蛋白分子间引力减小,凝胶强度下降。Huang 等^[52]认为强碱环境下,蛋清蛋白的巯基氧化和 SH-SS 间的交换反应减少,减少了二硫键的形成,使凝胶不易成形。陈晓等^[53]研究发现,蛋清蛋白的巯基氧化与 SH-SS 之间的转化发生在加热温度 25℃ 左右,此温度下凝胶的疏水键含量低,蛋白在聚集前充分展开,有助于凝胶体系的形成。综上,蛋清蛋白处于等电点和远离等电点时,不同强度的静电排斥力是导致凝胶微观结构改变的主要原因。极端酸碱条件下,凝胶性状差甚至无法形成凝胶。

2.5 pH 或 NaCl 辅助协同对热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化的影响

相对于单独的糖基化或酶法对凝胶性能的改善,调节 pH 值或加入 NaCl 可协同糖基化或酶等影响鸡蛋蛋清蛋白在热诱导时的凝胶化过程,进一步改善凝胶性状,也是近些年研究的热点。

2.5.1 pH 辅助协同 pH 变化能改变糖基化反应中糖与蛋白的交联情况。杜文琪等^[54]发现,碱性环境中,美拉德反应速度快,有利于糖和蛋白的深度交联。Wang 等^[55]研究发现,pH 高于 pI 时,糖基化改性后增加的 ζ 电位可增强异麦芽寡糖—蛋清蛋白分子之间的静电排斥,当 pH 为 7~9 时,异麦芽寡糖—蛋清蛋白的热聚集受抑制而形成粒径较小的聚集,使改性凝胶保持透明。Alavi 等^[56-57]认为,由于天然蛋清蛋白的结构紧凑而不是微生物转谷氨酰胺酶的良好底物,而碱性条件下预热的热变性蛋清蛋白具有较高的表面疏水和表面自由巯基可与微生物转谷氨酰胺酶在加热条件下充分交联,蛋清蛋白凝

胶的强度、断裂应力和稳定性增加。因此,调节 pH 可改变糖基化、酶在热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化时的作用强度,促进反应活性,改善蛋清蛋白凝胶性状。

2.5.2 NaCl 辅助协同 崔冰^[58]研究发现,未添加 NaCl 时,因羧甲基纤维素和卵清蛋白带相同电荷而产生相分离现象,添加 NaCl 浓度达 150 mmol/L 后,分子表面电荷被屏蔽,复合凝胶的结构均一稳定。雷明辉^[59]研究发现,体系中 NaCl 浓度对蛋清蛋白热凝固的影响较酶浓度显著,NaCl 浓度为 0.1~0.4 mol/L 时能促进转谷氨酰胺酶对鸡蛋蛋清的交联作用,使独立的蛋白分子形成分子量较大的蛋白聚集,凝胶的硬度及保水性在 0.4 mol/L 时达最大;NaCl 浓度 > 0.4 mol/L 时蛋白质变性,转谷氨酰胺酶活性降低,凝胶内聚力、弹性降低。NaCl 在凝胶化中通常起到改善凝胶性质或抵消诱导物质的作用,但 NaCl 在不同调节状态下的作用机理及调节能力尚不清楚,添加 NaCl 改变诱导条件的程度仍需进一步探究。

2.6 其他因素对热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化的影响

周旭霞等^[60]发现,茶多酚含有的活性羟基可与蛋清蛋白主链上的肽基、侧链上的羧基和羟基交联,更多水分子被封闭在凝胶结构中,凝胶表面微观结构更加平滑、均匀,蛋清蛋白的热稳定性、强度和持水性增加。Xue 等^[61]研究发现香料、茶叶可使鸡蛋蛋清水分含量和表面疏水性下降,蛋清蛋白炖煮中形成了致密多孔结构,蛋白凝胶弹性、硬度增大,但茶叶及香料中多酚类物质对凝胶化影响机理及程度不同,凝胶化过程复杂,凝胶机理仍需进一步研究。张明等^[62]研究发现,香菇脚纤维可提高蛋清蛋白凝胶的硬度和咀嚼性,降低凝胶黏聚性,其影响程度随香菇脚纤维添加量的提高而增大。

3 总结与展望

糖基化、盐、酶、pH 值可在热诱导鸡蛋蛋清凝胶化时使蛋白分子相互作用力增强、共价键结合速率加快;添加 NaCl、调节 pH 能促进糖基化反应进程、增强酶与蛋白分子间的交联作用,所以单因素作用和协同因素作用都可使凝胶微观结构致密均匀,进一步体现在凝胶的弹性、硬度、持水性和稳定性提升。但现有的糖基化、盐、酶法研究中所涉及的糖、盐、酶的种类单一;已有的糖、盐、酶的研究缺乏添加量与蛋清蛋白凝胶性状变化规律的探究;得到的凝胶含有金属盐离子等食用安全性隐患成分。后续可在完善热诱导鸡蛋蛋清蛋白凝胶化规律的基础上,寻找新的影响鸡蛋蛋清蛋白热诱导凝胶化的因素,同时注重凝胶的食用安全性,拓宽蛋清蛋白凝胶在食品中应用的范围。

参考文献

[1] 韩帅娟,林辉松,杨丰帆,等.鸡蛋粉在猪生产中的应用研

- 究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(5): 20-24.
- [2] 张江, GRZEGORZ Lesnierowski, JERZY Stangierski. 鸡蛋改善人类健康的研究和技术新进展[J]. 国外畜牧学(猪与禽), 2018, 38(9): 73-74.
- [3] 徐保立. 鸡蛋清蛋白凝胶特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010: 1-2.
- [4] 甘爱园, 豁银强, 刘松继, 等. 蛋清蛋白对豌豆淀粉凝胶化及凝胶特性的影响[J/OL]. 中国粮油学报. (2020-11-03) [2020-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20201103.1314.058.html>.
- [5] 郑颖. 蛋清蛋白抗氧化肽的酶法制备、微胶囊化及生物活性评价[D]. 南昌: 南昌大学, 2017: 14-15.
- [6] 谭文, 张钦俊, 万鹏宇, 等. 球磨处理对鸡蛋蛋清蛋白结构、性质及起泡性的影响[J/OL]. 食品科学. (2020-09-24) [2020-11-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200924.1333.002.html>.
- [7] 张书迪, 卢运明, 王维部, 等. 鸡蛋品质的评价及其影响因素[J]. 中国家禽, 2019, 41(5): 64-67.
- [8] 吕静, 刘亚平, 党润卿, 等. 不同压力条件下蛋清蛋白结构和凝胶性的比较分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(6): 1-8.
- [9] 郑优, 贾亮, 段蓉, 等. 响应面法优化可食性鸡蛋清蛋白膜的磷酸化改性工艺[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 242-249.
- [10] 叶钰, 高金燕, 陈红兵, 等. 超声波加工对蛋清蛋白质结构和凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 45-52.
- [11] 胥伟, 代钰, 王宏勋, 等. 冷冻处理对蛋清液起泡性与凝胶性的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 96-98.
- [12] 汪吴晶, 终平, 陈红兵, 等. 鸡蛋中卵白蛋白和溶菌酶相互作用对其结构和致敏性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 16-24.
- [13] 刘丽莉, 代晓凝, 杨晓盼, 等. 喷雾冷冻干燥对鸡蛋清蛋白结构和特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 30-35, 41.
- [14] 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: 51-53.
- [15] GAO Xue-jing, 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.
- [16] CHENG Yuan, WANG Jun-tong, CHI Yuan, et al. Effect of dry heating on egg white powder influencing water mobility and intermolecular interactions on its gels[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 101(2): 433-440.
- [17] 华霄, 王洋, 杜航, 等. 甯汁卤蛋风味分析及贮藏过程中蛋清蛋白变化[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 133-139.
- [18] 王希希, 许美玉, 林超, 等. 湿法糖基化改善卵白蛋白的起泡性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 46(5): 595-600.
- [19] 黄小琴. 基于质谱技术的蛋白质组学方法对食品蛋白质糖基化的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013: 2-4.
- [20] 王超颖, 蒋盼盼, 胥伟, 等. 均质与加糖对蛋清液凝胶性与起泡性的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(9): 210-213.
- [21] 张辉. 小分子添加剂对蛋清蛋白凝胶特性的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 37-38.
- [22] WANG Chen-ying, LI Jun-hua, LI Xin, et al. Molecular forces and gelling properties of heat-induced gel from egg white protein glycosylated with isomaltoligosaccharide [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105356.
- [23] MA Yan-qi, SHAN An-shan, WANG Rui-hong, et al. Characterization of egg white powder gel structure and its relationship with gel properties influenced by pretreatment with dry heat [J]. Food Hydrocolloids, DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.106149.
- [24] 马艳秋, 迟玉杰. 干热处理提高卵白蛋白凝胶强度及其机理的研究[C]// 2017中国食品科学技术学会第十四届年会暨第九届中美食品业高层论坛论文摘要集. 无锡: 中国食品科学技术学会, 2017: 2.
- [25] 段汝清, 苏宇杰, 王俊伟, 等. 瓜尔豆胶酶解液改性蛋清蛋白凝胶性质的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(7): 714-721.
- [26] 王晨莹. 糖基化蛋清蛋白的制备、性质及其在纳米颗粒中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 46-47.
- [27] 魏晨. 木糖糖基化改性对卵白蛋白功能特性的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 38-42.
- [28] 刘建华, 苏琦, 朱旻琪, 等. 糖基化凝胶增强剂对鱼糜制品凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 102-107.
- [29] 涂勇刚, 赵燕, 王丹, 等. 糖类对蛋清蛋白凝胶强度的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 39(4): 72-75.
- [30] 赵艳娜, 辛岩, 姜瞻梅. 乳清蛋白糖基化反应特性及抗氧化性的研究[J]. 中国乳品工业, 2010, 38(8): 18-21.
- [31] 叶阳, 王洋. 金属离子对鸡蛋清凝胶特性的影响[J]. 食品科技, 2013, 38(2): 242-244, 248.
- [32] SUN Xiang-dong, LAN Yu, SHI Dan, et al. Determination of molecular driving forces involved in heat-induced corn germ proteins gelation[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 66: 24-30.
- [33] AI Min-min, ZHOU Quan, XIAO Nan, et al. Enhancement of gel characteristics of NaOH-induced duck egg white gel by adding Ca(OH)₂ with/without heating[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103: 105654.
- [34] 仇旭, 吴子健, 吕瑜峰. 鸡卵转铁蛋白结构与功能的关系[J]. 天然产物研究与开发, 2015, 27(6): 1118-1123.
- [35] JIN Hao-bo, CHEN Jia-hui, ZHANG Jian, et al. Impact of phosphates on heat-induced egg white gel properties: Texture, water state, micro-rheology and microstructure [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 110: 106200.
- [36] VASSILIOS Raikos, LYDIA Campbell, STEPHEN R Euston. Rheology and texture of hen's egg protein heat-set gels as affected by pH and the addition of sugar and/or salt[J].

- Food Hydrocolloid, 2007, 21: 237-244.
- [37] 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, 2018, 77: 87-93.
- [38] LI Jun-hua, ZHANG Yu-fan, FAN Qiao, 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.
- [39] DENG Chun-yang, SHAO Yao-yao, XU Ming-sheng, 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.
- [40] 段云霞, 赵英, 迟玉杰. 基于低场核磁共振技术分析不同贮藏条件下白煮蛋水分分布及品质变化[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 26-32.
- [41] 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.
- [42] 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. (2020-08-12) [2020-11-10]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024786>.
- [43] 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.
- [44] ALAVI Farhad, EMAM-DJOMEH Zahra, CHEN Lingyun. Acid-induced gelation of thermal co-aggregates from egg white and hempseed protein; Impact of microbial transglutaminase on mechanical and microstructural properties of gels[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105960.
- [45] WEN Xiao-yu, JIN Feng, REGENSTEIN M Joe, et al. Transglutaminase induced gels using bitter apricot kernel protein; Chemical, textural and release properties[J]. Food Bioscience, 2018, 26: 15-22.
- [46] 徐东红. 酶法制备高特性蛋清蛋白粉工艺研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013: 17-22.
- [47] 陈曙光. 多酚氧化酶交联鸡蛋卵白蛋白的研究及交联产物制备的中试生产设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2016: 56-57.
- [48] NYEMB Kéra, GUÉRIN-DUBIARD Catherine, PÉZENNEC Stép Hane, et al. The structural properties of egg white gels impact the extent of in vitro protein digestion and the nature of peptides generated [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 315-327.
- [49] 苏芳萍. 蛋清蛋白微颗粒及其再制凝胶性质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 66-68.
- [50] ZHAO Yan, CHEN Zhang-yi, LI Jian-ke, et al. Changes of microstructure characteristics and intermolecular interactions of preserved egg white gel during pickling[J]. Food Chemistry, 2016, 203: 323-330.
- [51] ZHAO Yan, CHEN Zhang-yi, LI Jian-ke, et al. Formation mechanism of ovalbumin gel induced by alkali[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61: 390-398.
- [52] HUANG Xiao-ling, LI Jun-hua, CHANG Cui-hua, et al. Effects of NaOH/NaCl pickling on heat-induced gelation behaviour of egg T white[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124939.
- [53] 陈晓, 郭善广, 周伦, 等. 温度对蛋清碱诱导凝胶形成的影响及机理研究[J]. 食品工业, 2017, 38(12): 196-200.
- [54] 杜文琪, 蒋盼盼, 胥伟, 等. 糖基化反应改善蛋清粉凝胶性的影响因素研究[J]. 食品工业, 2019, 40(2): 185-189.
- [55] WANG Chen-ying, REN Xi-dong, SU Yu-jie, et al. Application of glycation in regulating the heat-induced nanoparticles of egg white protein [J]. Nanomaterials, 2018, 8 (11): 8110943.
- [56] ALAVI Farhad, EMAM-DJOMEH Zahra, SALAMI Maryam, et al. Effect of microbial transglutaminase on the mechanical properties and microstructure of acid-induced gels and emulsion gels produced from thermal denatured egg white proteins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 523-532.
- [57] ALAVI Farhad, EMAM-DJOMEH Zahra, MOMEN Shima, et al. Fabrication and characterization of acid-induced gels from thermally-aggregated egg white protein formed at alkaline condition[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105337.
- [58] 崔冰. 卵白蛋白-CMC 复合体系相行为及糖基化改性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012: 34-35.
- [59] 雷明辉. 谷氨酰胺转氨酶对鸡蛋蛋清热凝固性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015: 14-27.
- [60] 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.
- [61] XUE Hui, TU Yong-gang, XU Meng, et al. Changes in physicochemical properties, gel structure and in vitro digestion of marinated egg white gel during braising[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127321.
- [62] 张明, 吴子男, 王稳航. 香菇脚纤维制备与性能评价及对蛋清凝胶特性的影响[J/OL]. 食品工业科技. (2020-06-24) [2020-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200623.1459.032.html>.
-
- (上接第 174 页)
- [25] POULSON B, SZCZEPSKI K, LACHOWICZ J, et al. Aggregation of biologically important peptides and proteins: Inhibition or acceleration depending on protein and metal ion concentrations[J]. RSC Advances, 2020, 10(1): 215-227.
- [26] SINGH G, BROVCHENKO I, OLEINIKOVA A, et al. Peptide aggregation in finite systems [J]. Biophysical Journal, 2008, 95(7): 3 208-3 221.
- [27] LAM R, NICKERSON M. Food proteins: A review on their emulsifying properties using a structure function approach[J]. Food Chemistry, 2013, 141(2): 975-984.