

鱼糜凝胶的形成机制及混合鱼糜研究进展

王 嵬¹, 仪淑敏^{2*}, 李学鹏², 邵俊花², 励建荣^{2*}, 马兴胜², 李 春³

(1. 渤海大学科技实验管理中心, 锦州 121013; 2. 渤海大学食品科学与工程学院, 锦州 121013;
3. 渤海大学数理学院, 锦州 121013)

摘 要: 凝胶特性是决定鱼糜制品品质的重要指标, 本文主要从以下几个方面综述了鱼糜凝胶形成机制的研究进展: 鱼糜凝胶形成的物质基础(肌球蛋白、肌动蛋白), 凝胶形成作用力(二硫键、疏水作用、静电相互作用、氢键、酶交联作用), 凝胶形成过程中水分存在状态及混合鱼糜。目前鱼糜制品需求量逐年增加, 但其主要原料海水鱼资源却日益匮乏, 相反我国淡水鱼资源丰富且价格低廉, 而淡水鱼糜的凝胶特性较海水鱼糜差, 提高凝胶特性成为淡水鱼糜产品开发的研究方向之一。合适的比例混合不同种类的海水鱼糜或是淡水/海水鱼糜, 对其凝胶特性的提高均有协同增效作用, 有助于改善产品的色泽, 并有助于减少淡水鱼糜制品的土腥味, 改善其风味。

关键词: 鱼糜; 混合鱼糜; 凝胶

Formation mechanism of surimi gelation and research progress on blend surimi

WANG Wei¹, YI Shu-Min^{2*}, LI Xue-Peng², SHAO Jun-Hua², LI Jian-Rong^{2*},
MA Xing-Sheng², LI Chun³

(1. Laboratory Management Center, Bohai University, Jinzhou 121013, China; 2. College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China; 3. College of Mathematics, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

ABSTRACT: Gel property is an important indicator to the quality of surimi product. The paper mainly summarized in gelation mechanism of surimi from the following aspects: forming material basis (myosin, actin) and the gel forming force (disulfide bond, hydrophobic effect, electrostatic interaction, hydrogen bond, cross-linked enzyme) of surimi gel, water state during the gel forming and blend surimi. In the present, the demand quantity of surimi products has increased year by year, but the main raw materials of marine fish resources are increasingly scarce. On the contrary, freshwater fish that can be used for surimi processing resources are very rich in China, and their price is low. Gel properties of freshwater fish surimi is worse than marine fish surimi, and how to improve it is one of the bottlenecks in the development of freshwater fish surimi. The blended

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31571868、31301418、31471639、31301569)、辽宁省创新团队项目(LT2014024)、辽宁省教育厅重点实验室基础研究项目(LZ2014047, 20131003)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31571868, 31301418, 31471639, 31301569), the Innovation Team of Liaoning Province (LT2014024), and the Basic Research Program of Key Laboratory of Liaoning Province (LZ2014047, 20131003)

*通讯作者: 仪淑敏, 副教授, 主要研究方向为水产品加工与质量安全控制。E-mail: yishumin@163.com

励建荣, 教授, 主要研究方向为农、水产品加工与质量安全控制。E-mail: lijr6491@163.com

*Corresponding author: YI Shu-Min, Associate Professor, College of Food Science and Engineering, Bohai University, 19 Science and Technology Road, Jinzhou 121013, China. E-mail: yishumin@163.com

LI Jian-Rong, Professor, College of Food Science and Engineering, Bohai University, 19 Science and Technology Road, Jinzhou 121013, China. E-mail: lijr6491@163.com

surimi from freshwater fish with marine fish can produce gel synergies under the proper conditions, and improve the color and flavor, and meanwhile decrease the earthy smell of freshwater fish surimi.

KEY WORDS: surimi; blend surimi; gel

1 引言

鱼糜制品是将鱼肉绞碎,经加盐擂溃,成为黏稠的鱼糜(鱼浆),再经调味混匀、成型、加热而制成的具有一定弹性的水产食品,是我国水产加工品中增长最快和出口量最大的品种之一。随着人们生活方式的改变,生活节奏的加快,市场对鱼糜制品的需求量逐年增加,2013年年产量达132.68万吨^[1]。市场上常见的鱼糜制品包括鱼丸、模拟蟹肉、鱼肉香肠、鱼面、鱼排和鱼糕等。

2 鱼糜凝胶的形成机制

2.1 鱼糜凝胶网络结构的形成

一般认为鱼糜凝胶的形成过程分3个阶段:凝胶化、凝胶劣化和鱼糕化^[2,3]。鱼糜制品加工过程中,通常对鱼糜先空斩一段时间,破坏鱼肉组织,然后加入食盐后进行盐斩,使盐溶性的肌原纤维蛋白充分溶解,此时鱼糜呈现出溶胶状态,肌球蛋白与肌动蛋白结合成肌动球蛋白,形成相对较松散的网状结构,进而形成凝胶。鱼肉蛋白凝胶化一般发生在40℃左右,称低温凝胶化。低温凝胶化通常与谷氨酰胺转氨酶(glutamine transaminase, TGase)有关, TGase可以催化谷氨酸(Gln)残基 γ -羧基酰胺基与赖氨酸(Lys)残基 ϵ -氨基发生交联,产生分子内或分子间的 ϵ -(γ -Glu)-Lys架桥粘键,促进肌球蛋白重链(promote myosin heavy chain, MHC)互相交联,从而增强了鱼糜制品的凝胶特性^[4,5]。当鱼糜蛋白温度在50~70℃时,由于鱼体内自身存在大量的内源性组织蛋白酶,该酶可以使肌球蛋白发生降解,导致凝胶的空间网络断裂,使凝胶软化,降低鱼糜凝胶的质构特性,此现象称为凝胶劣化^[6-8]。50~70℃是组织蛋白酶降解蛋白反应的最适温度,因此在鱼糜制品加工时应最大限度地避开此温度带。若温度进一步升高,鱼糜凝胶会变成有序且非透明状,同时鱼糜凝胶的网状结构被固定,导致水分及其他辅料一同被包裹在空间网络结构内部,形成具有较高弹性和强度的凝胶体,完成鱼糕化。

2.2 肌球蛋白对鱼糜的胶凝作用

鱼糜中的蛋白质依据溶解性可分为盐溶蛋白质、水溶蛋白质和水不溶蛋白质,其中盐溶蛋白质(肌原纤维蛋白)是鱼糜胶凝作用的主要蛋白质,占总蛋白质的70%左右,而肌原纤维蛋白又由包括肌球蛋白(myosin)、肌动蛋白(actin)、原肌球蛋白(tropomyosin)和肌原蛋白(troponin)等蛋白质构成,myosin作为肌原纤维蛋白主要的蛋白质,约占

其总量的60%^[9]。

鱼肌球蛋白的胶凝作用,即肌球蛋白在加热的过程中,其HMM(heavy meromyosin,肌球蛋白的头部及螺旋形尾部的一部分)区的头部与一部分螺旋形尾部结构相连的肽链先发生解离,与相邻排列的其他分子之间进行相互链接,在高温作用下,相互链接的蛋白质分子通过LMM(light meromyosin,棒状肌球蛋白大部分螺旋形尾部)区的螺旋形尾部的结构进一步互相聚集、交联,形成较大的蛋白质聚集体,这种较大的蛋白质聚集体最后形成空间三维网络结构,形成具有一定弹性的凝胶体^[10]。

Sano等^[11]通过研究得出结论:凝胶的形成首先开始于肌球蛋白螺旋形尾部的肽链解旋,然后不同肌球蛋白分子中的螺旋形尾部部分发生分子间交联形成MMM(mediate myosin molecule),即调节肌球蛋白分子,随后调节肌球蛋白分子再由其他肌球蛋白头部和尾部的螺旋结构(HMM)相互凝集形成较大的颗粒,进而形成凝胶的空间网状结构。也有学者持有不同观点,他们认为肌球蛋白的胶凝作用主要是由肌球蛋白分子的超螺旋 α -helix尾部的变性所造成的^[12]。随着加热温度从30℃至70℃逐渐升高,肌球蛋白分子的 α -helix尾部肽链发生持续的解离,诱使肌球蛋白变性,肌球蛋白发生解螺旋以后,会有序地连接在一起,形成有规则的致密的三维空间立体网络结构, α -helix解离程度越大,凝胶的弹性越大,强度越强。但如果凝胶化温度过高且持续加热时间过长,解旋后的肌球蛋白会发生无序地结合,形成松散且无规则的网络结构,所形成的凝胶弹性较低,强度较弱。

肌球蛋白凝胶形成过程示意图如图1所示,首先肌球蛋白分子因其头部巯基数量的减少,开始聚集,分子内及分子外开始交联形成一些疏水性的凝胶颗粒,造成大量疏水基团暴露,形成更多的分子间交联。

2.3 肌动球蛋白对鱼糜的胶凝作用

肌动球蛋白是由肌球蛋白与F-肌动蛋白所形成的不溶于水的复合蛋白。肌动蛋白本身受热变性时不会形成凝胶,但是其与肌球蛋白结合所形成的肌动球蛋白却对鱼糜凝胶的形成起着一定的作用,与肌球蛋白的凝胶强度相比,肌动蛋白的凝胶强度约占肌球蛋白的12.5%~20%。有学者指出,倘若提高蛋白中的肌动球蛋白和肌动蛋白的含量,促进肌球蛋白和肌动蛋白之间发生相互作用,可以有效地提高凝胶强度^[11]。

热凝胶过程中,肌球蛋白和肌动球蛋白的质量比例不同,会不同程度地加强肌球蛋白-肌动蛋白系统(见图2),当两者比例为4:1时,交联程度最强,加热之前,游离的肌

球蛋白与肌动蛋白相结合(图 2a); 在变性温度下肌球蛋白的头部开始聚集(图 2b), 肌球蛋白杆部开始交联(图 2c),

肌球蛋白与肌动蛋白相结合, 凝胶的三维网络结构形成(图 2d)。

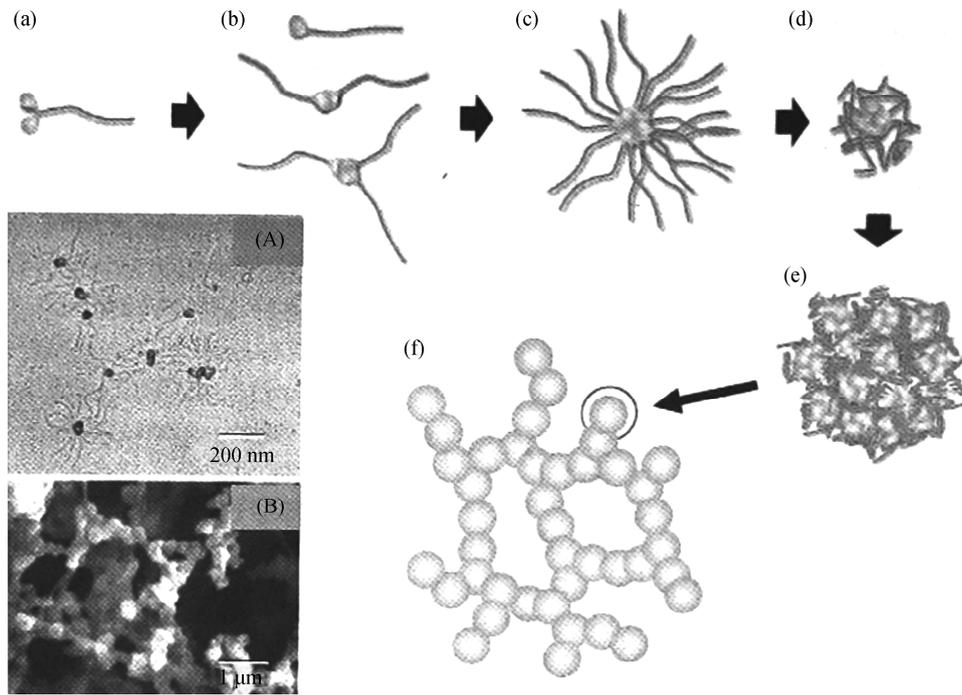


图 1 肌球蛋白凝胶形成过程示意图^[12]

Fig. 1 The diagrammatic sketch of myosin gel forming^[12]

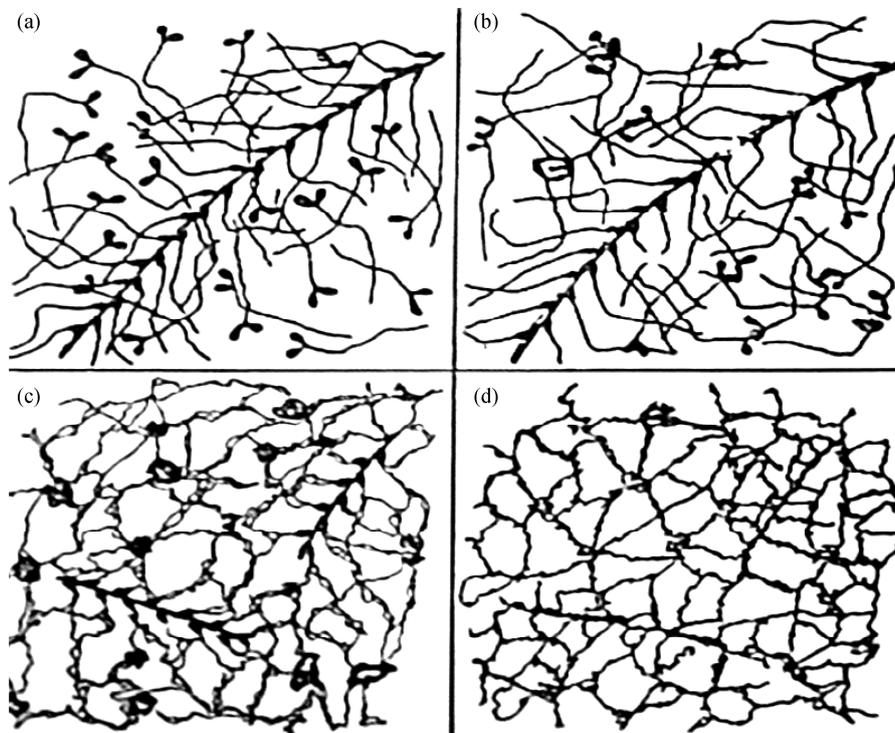


图 2 肌球蛋白在肌动球蛋白存在的条件下凝胶形成过程^[12]

Fig. 2 The diagrammatic sketch of myosin gel forming with the actin^[12]

2.4 分子作用力对胶凝作用的研究

二硫键是肌原纤维蛋白热诱导凝胶形成的主要化学键。凝胶化过程中肌球蛋白头部的二硫键在凝胶形成的过程中起重要作用^[6]。鱼的种类、加工方式均能影响二硫键的数量^[13]，例如200 Mpa以上的超高压处理10 min可以显著降低金线鱼鱼糜的总巯基数量而增加二硫键的数量^[14]。二硫键的形成由于鱼的种类不同，发生在鱼糜凝胶的不同阶段，箭齿鲽鱼、鲤鱼、白鲢鱼和明太鱼二硫键分别在20~30℃、30~50℃、70~80℃和80℃以上的凝胶化过程中形成^[15-18]。

疏水作用：蛋白质受热变性展开，非极性多肽暴露于分子表面，内部肌球蛋白分子尾部的疏水结构也暴露于水中，使得这些疏水基团附近的水分子通过分子间氢键定向排列，致使水分子的流动性降低，因此溶胶体系变得有序化，焓值降低，为形成热力学上更稳定的体系，相邻多肽非极性片段的疏水部分发生紧密结合，发生了疏水相互作用，引起蛋白质凝集，合适的条件下形成凝胶^[14]。鱼的种类、加工方式均能影响凝胶形成过程中的疏水作用^[13,14]，例如200 Mpa以上的超高压处理10 min可以显著提高金线鱼鱼糜的表面疏水活性。

静电相互作用：蛋白质分子所带电荷使蛋白分子间相互吸引或者排斥，影响蛋白质分子间以及蛋白质分子与溶剂之间的相互作用^[15]，但胶凝的聚集过程受疏水作用的影响，静电相互作用在蛋白质聚集过程中通常表现为静电斥力。参与肌球蛋白分子尾部螺旋结构的相互交联的过程，而不参与肌球蛋白分子及分子间的头部聚集作用。pH值和离子强度影响蛋白质中氨基酸残基的解离状态和电荷分布，改变蛋白分子之间的静电相互作用，从而对蛋白凝胶形成产生影响^[16-18]。

氢键：是弱偶极键，在蛋白质凝胶体系中的数量极大，是增加凝胶强度的重要化学键，对稳定结合水起重要作用。加热时，肽骨架中的羰基和酰胺基之间用于维持蛋白质空间结构的大量氢键被破坏，从而使得多肽链更易于发生广泛的水合作用，减少水分子的移动性。因此，裸露多肽链的水合作用成为影响凝胶保水性的重要因素。当肌球蛋白高温受热变性时，氢键断裂且 α -螺旋解旋，温度降低后氢键重新形成又能稳定蛋白质构象^[19]。鱼糜凝胶中水分和蛋白结构改变时发现凝胶形成后蛋白质二级结构发生的改变主要是 α -螺旋向 β -折叠转变，并通过氢键重新排列，最后形成致密的三维网状结构^[20]。鱼的种类、加工方式均能影响凝胶形成过程中的氢键数量^[13]。

酶交联作用：内源性谷氨酰胺转氨酶(TG酶)可以催化赖氨酸上的 ϵ -氨基和谷氨酸残基上的 γ -酰胺基在蛋白质内部或分子间发生转酰基反应，形成 ϵ -(γ -谷氨酰基)-赖氨酸共价交联键，促进蛋白质凝胶网络的形成，且随着TG酶浓度的增加，鱼糜蛋白质分子间共价交联程度逐渐增加^[21]，如图3所示。

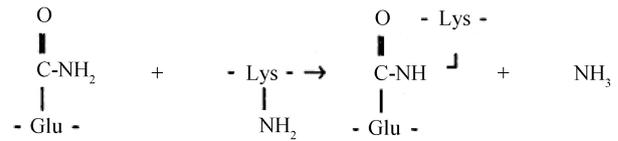


图3 谷氨酰胺转氨酶催化反应^[22]
Fig. 3 Catalytic reaction of glutamine transaminase^[22]

鱼糜凝胶形成作用力主要有二硫键、疏水作用、静电相互作用、TGase的交联，不同种类鱼糜凝胶形成作用力不同^[23]。加工方式也可以影响鱼糜凝胶分子间作用力的形成^[23,24]，与常规热处理相比，经200 Mpa以上的超高压处理10 min，可以提高金线鱼鱼糜的凝胶强度，显著降低其总巯基数量而增加二硫键的数量，同时增加表面疏水活性^[24]。且同一种作用力的形成阶段也因鱼糜种类的不同而不同，如箭齿鲽鱼、鲤鱼、白鲢鱼和明太鱼的二硫键分别在20~30℃、30~50℃、70~80℃和80℃以上的凝胶化过程中形成^[3, 12, 25,26]。

2.5 水分分布和存在状态对胶凝作用的研究

水分是鱼糜制品加工中含量最高的成分，含量一般在78%~84%之间，作为介质参与鱼糜凝胶形成过程中的各种理化反应，对凝胶的质构、色泽、风味和新鲜度等均具有重大影响。近几年，人们越来越重视对鱼糜凝胶形成过程中的水分的研究，特别是利用核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)技术对鱼糜凝胶形成中水分分布和横向弛豫特性的研究。

低场核磁的共振频率在20 MHz左右，通常应用在液体和固体(鱼糜凝胶属于固体)的研究，低场核磁共振技术(low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)是一种无损、快速的检测手段，可以快速分析出食品中的水分分布和存在的状态。在低场核磁共振中，由同类离间交换能量所引起的横向磁化矢量的恢复快慢被称为自旋-自旋弛豫或横向弛豫，该过程所需要的时间为自旋-自旋弛豫时间或横向弛豫弛豫时间(T_2)。凝胶系统中的水分特性通常用 T_2 来表征^[27]。 T_2 值的大小反映了水分流动性的强弱^[28]。在鱼糜凝胶形成过程中，凝胶的空间三维网络结构与水分的相互作用对鱼糜的凝胶特性和保水性有重要影响，凝胶的网络结构越致密，网络的空隙越小越均匀，水分越易被网络结构所捕获，凝胶网络中亲水性物质越不易渗出，同时加固凝胶的网络强度，进而提高鱼糜的凝胶特性和保水性。

Sánchez-González等^[20]利用同位素H/D交换和拉曼光谱技术研究鱼糜凝胶过程中蛋白质和水分的结构变化时发现，致密的网络结构有利于捕获更多的水分，促进水分与蛋白质、水分与凝胶的三维网络结构相互作用，进而提高鱼糜的凝胶特性和持水性。Han等^[29]也发现在肌原纤维蛋

白凝胶形成过程中, 具有规则有序、微孔结构的凝胶的形成促使凝胶中水分的流动性减弱, 导致其横向弛豫时间 T_2 降低, 增加凝胶的持水性。Zhang 等^[30]指出高温($\geq 100\text{ }^\circ\text{C}$)下诱导的阿拉斯加鲑鱼鱼糜凝胶中水分存在状态对其凝胶特性有重大影响。

3 混合鱼糜

3.1 混合鱼糜产生的背景

鱼糜制品的生产原料多采用海水鱼, 但海水鱼资源正日趋匮乏, 合适的比例混合不同种类的海水鱼糜或是淡水/海水鱼糜, 对其凝胶特性的提高均有协同增效作用^[31-33], 且有助于改善产品的色泽。目前国内已有很多鱼糜制品生产企业使用海水鱼糜或是淡水/海水鱼糜生产鱼糜制品, 且已经有生产企业研制了“新型淡水/海水混合鱼糜加工技术”^[34]。我国可用于鱼糜加工的淡水鱼资源非常丰富。2013 年我国淡水鱼类年产量达 2647.8 万吨, 海水鱼类年产量 930 万吨^[1], 是世界上唯一一个淡水鱼总产量高于海水鱼的国家。但我国淡水鱼加工比例不足 15%^[21], 导致目前淡水鱼养殖效益普遍不高甚至亏本, 发展淡水鱼糜加工是我国淡水鱼产业的发展方向之一。然而, 与海水鱼糜相比, 淡水鱼糜凝胶特性差、土腥味强^[35], 影响了淡水鱼糜的发展。凝胶特性和风味是决定鱼糜制品品质和经济价值的重要指标, 将淡水鱼糜和海水鱼糜混合, 在合适的条件下不但可以提高淡水鱼糜的凝胶特性, 而且有助于减少淡水鱼糜的土腥味, 改善其风味。

3.2 混合鱼糜凝胶协同增效研究进展

国内外学者已开展了对混合鱼糜凝胶特性的研究, 陈汉勇等^[31]研究发现将罗非鱼鱼糜与红杉鱼鱼糜 1:1 混合时对提高混合鱼糜的凝胶特性有显著的协同增效作用。带鱼鱼糜经热处理后使带鱼-鲢鱼混合鱼糜凝胶强度和凝胶劣化指数都得到显著改善, 但冷冻带鱼鱼糜中含有蛋白酶能够降低复合鱼糜凝胶特性, SDS-PAGE 结果表明加入带鱼鱼糜的蛋白酶提取液经 $55\text{ }^\circ\text{C}$ 反应 240 min 之后肌球蛋白重链全部消失^[36]。罗永康研究团队^[37-39]将白姑鱼与鲢鱼鱼糜混合后其凝胶破断力和破短距离显著高于单一鱼糜, 凝胶强度有显著增强, 在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时混合鱼糜凝胶劣化程度显著低于单一鱼糜, 且改善了鱼糜制品的色泽; 将鲢鱼和小黄鱼的肌原纤维蛋白 1:1 混合后, 随加热温度的升高, 蛋白溶液的浊度呈 S 型曲线增加, 且混合蛋白溶液的浊度增加模式与小黄鱼肌原纤维蛋白的增加模式相似, 但与鲢鱼肌原纤维蛋白的增加模式不同; 凝胶化温度和时间均对混合鱼糜凝胶的协同增效作用有影响, $30\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下凝胶 120 min 鲢鱼鱼糜和带鱼鱼糜比例为 7:3 时混合鱼糜凝胶强度达到最大值, 而 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下凝胶 60 min 鲢鱼鱼糜和带鱼鱼糜比例为 6:4 时混合鱼糜凝胶强度达到最大值。

Panpipat 等^[32]将马鲛鱼鱼糜与黄花鱼鱼糜混合后, 其肌球蛋白重链交联聚集成大分子以及肌动蛋白的量会显著增加, 导致肌球蛋白重链数量减少, 推测可能是由于内源性 TGase 增强了肌原纤维蛋白之间的交联, TGase 活性是一种依赖于 Ca^{2+} 浓度的酶, 当马鲛鱼鱼糜添加到黄花鱼鱼糜中, 由于马鲛鱼内源性 TGase 及 Ca^{2+} 的作用更适合黄花鱼鱼糜肌球蛋白的交联, 且可能两种鱼糜存在可供反应的物质, 促进蛋白质相互之间的交联, 导致混合鱼糜凝胶强度增加。已有很多学者的研究证明 TGase 对鱼糜的凝胶强度、持水性、弹性、硬度等品质特性有显著影响, 其凝胶强度随着添加量的增加而逐渐增加, 蛋白分子间共价交联程度逐渐增加, 其凝胶微观结构更加致密^[39-41]。蛋白质中 ϵ -氨基含量高, TGase 的凝胶提高能力强, 不同种类鱼糜蛋白质 ϵ -氨基(仅存在于赖氨酸中)数目以及肌原纤维蛋白的组成不同, 可能是因为外源性微生物 TGase 对不同种类鱼糜凝胶增强能力不同^[42]。

4 结论与展望

总结相关学者的研究成果, 鱼糜凝胶形成机制主要由于肌原纤维蛋白构象的改变形成三维空间网络结构, 并通过氢键、二硫键、离子键、疏水相互作用和氢键等化学作用力来维持。混合鱼糜凝胶协同增效的原因可能是不同种类鱼糜在最佳配比条件下混合后, 其内源性 TGase、金属离子及蛋白质氨基酸组成增加了各种作用力的强度, 以致形成了更致密的三维网络结构, 增加了鱼糜的凝胶强度。

国内外学者对于鱼糜凝胶形成机制的研究主要集中在单一鱼糜热凝胶形成, 而对混合鱼糜凝胶协同增效机制的研究较少。对于混合鱼糜的研究有待于综合运用现代仪器分析、分子生物学等技术进一步揭示其凝胶协同增效作用机制, 丰富鱼糜制品加工理论, 也可为淡水鱼高值化利用技术的发展提供支撑。

参考文献

- [1] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014. The People's Republic of China Ministry of Agriculture, Fisheries Bureau. China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014.
- [2] Zhou A, Lin L, Liang Y, et al. Physicochemical properties of natural actomyosin from threadfin bream (*Nemipterus* spp.) induced by high hydrostatic pressure [J]. Food Chem, 2014, 156: 402-407.
- [3] Visessanguan W, Ogawa M, Nakai S, et al. Physicochemical changes and mechanism of heat-induced gelation of arrowtooth flounder myosin[J]. J Agric Food Chem, 2000, 48(4): 1016-1023.
- [4] Sano T, Ohno T, Otsuka-Fuchino H, et al. Carp natural actomyosin: Thermal denaturation mechanism [J]. J Food Sci, 1994, 59(5): 1002-1008.
- [5] Liu R, Zhao S, Xie B, et al. Contribution of protein conformation and intermolecular bonds to fish and pork gelation properties [J]. Food Hyd,

- 2011, 25(5): 898–906.
- [6] Hossain MI, Itoh Y, Morioka K, *et al.* Contribution of the polymerization of protein by disulfide bonding to increased gel strength of walleye Pollack surimi gel with preheating time [J]. *Fish Sci*, 2001, 67(4): 710–717.
- [7] Yang Z, Wang W, Wang H, *et al.* Effects of a highly resistant rice starch and pre-incubation temperatures on the physicochemical properties of surimi gel from grass carp (*Ctenopharynxodon Idellus*) [J]. *Food Chem*, 2014, 145: 212–219.
- [8] Debusca A, Tahergorabi R, Beamer KS, *et al.* Physicochemical properties of surimi gels fortified with dietary fiber [J]. *Food Chem*, 2014, 148: 70–76.
- [9] Liu J, Wang X, Ding Y. Optimization of adding konjacglucomannan to improve gel properties of low-quality surimi [J]. *Carbohydr Poly*, 2013, 92(1): 484–489.
- [10] Zhu Z, Lanier CT, Farkas EB, *et al.* Transglutaminase and high pressure effects on heat-induced gelation of Alaska pollock (*Theragra chalcogramma*) surimi [J]. *J Food Eng*, 2014, 131: 154–160.
- [11] Hur SJ, Choi BD, Choi YJ, *et al.* Quality characteristics of imitation crab sticks made from Alaska Pollack and spent laying hen meat [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2011, 44(6): 1482–1489.
- [12] Jae WP. Surimi and surimi seafood [M]. Florida: The Chemical Rubber Company Press, 2013.
- [13] Ding YQ, Liu YM, Yang H, *et al.* Effects of CaCl₂ on chemical interactions and gel properties of surimi gels from two species of carps [J]. *Eur Food Res Technol*, 2011, 233: 569–576.
- [14] Benjakul S, Visessanguan W, Srivilai C. Porcine plasma protein as proteinase inhibitor in bigeye snapper (*Priacanthustayenus*) muscle and surimi [J]. *J Sci Food Agric*, 2001, 10(81): 1039–1046.
- [15] Phillips LG, Whitehead DM, Kinsella JE. Structure-function properties of food proteins [M]. INC: Academic Press, 1994.
- [16] Totosaus A, Montejano JG, Salazar JA, *et al.* A review of physical and chemical protein induction [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2002, 37(6): 589–601.
- [17] 李明清, 孔保华. 影响鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的理化因素[J]. *农产品加工(学刊)*, 2009, 10: 58–61.
Li MQ, Kong BH. Influence of physical and chemical factors on the (*Cyprinus carpio*) myofibrillar protein gelation [J]. *Farm Prod Proc*, 2009, 10: 58–61.
- [18] 董秋颖, 杨玉玲, 许婷. 从质构学角度研究肌原纤维蛋白凝胶形成的作用力[J]. *食品发酵与工业*, 2009, 35(5): 45–49.
Dong QY, Yang YL, Xu T. Study on molecular forces in the formation in myofibrillar protein gelation from textural perspective [J]. *Food Ferment Ind*, 2009, 35(5): 45–49.
- [19] 李杰. 草鱼鱼糜凝胶及其形成机制的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
Li J. Studies on grass carp surimi gel and gel-forming mechanism [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011.
- [20] Sánchez-González I, Carmona P, Moreno P, *et al.* Protein and water structural changes in fish surimi during gelation as revealed by isotopic H/D exchange and Raman spectroscopy [J]. *Food Chem*, 2008, 106(1): 56–64.
- [21] 夏文水, 罗永康, 熊善柏, 等. 大宗淡水鱼贮藏保鲜与加工技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- Xia WS, Luo YK, Xiong SB, *et al.* Storage and processing technology of freshwater fish [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014.
- [22] Zhu Y, Rinzema A, Tramper J, *et al.* Microbial transglutaminase—a review of its production and application in food processing [J]. *Appl Microbiol Biot*, 1995, 44(3–4): 277–282.
- [23] Tadpichayangkoon P, Park JW, Yongsawatdigul J. Gelation characteristics of tropical surimi under water bath and ohmic heating [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2011, 46: 97–103.
- [24] Ma XS, Yi SM, Yu YM, *et al.* Changes in gel properties and water properties of *Nemipterusvirgatus* surimi gel induced by high-pressure processing [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2015, 61(2): 377–384.
- [25] 王镜岩, 朱圣庚, 徐长发. 生物化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
Wang JY, Zhu SG, Xu CF. Biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [26] 曲楠, 曾名勇, 赵元辉. 鱼糜凝胶性能研究进展[J]. *肉类研究*, 2009, 10: 80–84.
Qu N, Zeng MY, Zhao YH. Research progress on gel properties of surimi [J]. *Meat Res*, 2009, 10: 80–84.
- [27] Goh KS, Bhat R, Karim AA. Probing the sol-gel transition of egg white proteins by pulsed-NMR method [J]. *Eur Food Res Technol*, 2009, 228(3): 367–371.
- [28] DuceL V, Pouliquen D, Richard J, *et al.* ¹H NMR relaxation studies of protein–polysaccharide mixtures [J]. *Int J Biol Macromol*, 2008, 43(4): 359–366.
- [29] Han M, Wang P, Xu X, *et al.* Low-field NMR study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with microstructural characteristics [J]. *Food Res Int*, 2014, 62: 1175–1182.
- [30] Zhang L, Zhang F, Wang X. Effects of hydrolyzed wheat gluten on the properties of high-temperature (≥100 °C) treated surimi gels [J]. *Food Hyd*, 2015, 45: 196–202.
- [31] 陈汉勇, 李沛生, 阮征, 等. 三种冷冻鱼糜制备的混合鱼糜凝胶特性研究[J]. *农产品加工*, 2014, 361(8):20–23.
Chen HY, Li BS, Ruan Z, *et al.* Gel properties of three kinds of blended surimi [J]. *Farm Prod Proc*, 2014, 361(8):20–23.
- [32] Panpipat W, Chaijan M, Benjakul S. Gel properties of croaker-mackerel surimi blend [J]. *Food Chem*, 2010, 122(4): 1122–1128.
- [33] Liu L, Luo Y, Song Y, *et al.* Study on gel properties of Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and White Croaker (*Argyrosomus argentatus*) blended surimi at different setting conditions [J]. *J Aquat Food Prod*, 2013, 22:36–46.
- [34] 福建安井食品股份有限公司. 新型淡水/海水混合鱼糜加工技术(科技成果-应用技术) [Z]. 2011.
Fujian Anjoy Food Co., Ltd. New marine/freshwater blended surimi processing technology (Technol Achiev-Appl Technol) [Z]. 2011.
- [35] Yarnpakdee S, Benjakul S, Penjamras P, *et al.* Chemical compositions and muddy flavour/odour of protein hydrolysate from Nile tilapia and broadhead catfish mince and protein isolate [J]. *Food Chem*, 2014, 142: 210–216.
- [36] 巫朝华, 周文果, 张婷, 等. 含冷冻带鱼糜的复合鱼糜凝胶特性的研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(13): 70–74.
Wu CH, Zhou WG, Zhang T, *et al.* Study on gel properties of mixture

- surimi containing frozen hairtail surimi [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2013, 34(13): 70–74.
- [37] 刘蕾, 洪惠, 宋永令, 等. 不同加热条件对复合鱼糜凝胶特性的影响[J]. *肉类研究*, 2010, 136(6): 15–18, 21.
Liu L, Hong H, Song YL, *et al.* Study on gel properties of the composed surimi at different setting conditions [J]. *Meat Res*, 2010, 136(6): 15–18, 21.
- [38] 刘蕾, 王航, 罗永康, 等. 复合鱼肉肌原纤维蛋白加热过程中理化特性变化的研究[J]. *淡水渔业*, 2012, 42(3): 88–91.
Liu L, Wang H, Luo YK, *et al.* Study on the physicochemical properties of blended fish myofibrillar protein during heat treatment [J]. *Freshwater Fish*, 2012, 42(3): 88–91.
- [39] Carlos C, Rogerio M, Paulo VP, *et al.* Effect of dietary fibre and MTGase on the quality of mackerel surimi gels [J]. *J Sci Food Agric*, 2009, 89(10): 1648–1658.
- [40] Wang Y, Liu A, Ye R, *et al.* Transglutaminase-induced crosslinking of gelatin-calcium carbonate composite films [J]. *Food Chem*, 2015, 166: 414–422.
- [41] Chanarat S, Benjakul S, Xiong Y. Nonprotein nitrogenous compounds and gelling property of whitecheek shark (*Carcharhinus Dussumieri*) mince as affected by washing and microbial transglutaminase [J]. *J Texture Stud*, 2014, 45(4): 307–316.
- [42] Chanarat S, Benjakul S, H-Kittikun A. Comparative study on protein

cross-linking and gel enhancing effect of microbial transglutaminase on surimi from different fish [J]. *J Sci Food Agric*, 2012, 92: 844–852.

(责任编辑: 杨翠娜)

作者简介



王 崑, 实验师, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: ww11812002@163.com



仪淑敏, 副教授, 主要研究方向为水产品质量与安全。

E-mail: yishumin@163.com



励建荣, 教授, 主要研究方向为农、水产品加工与质量安全控制。

E-mail: lijr6491@163.com