

外源添加物和辅助加工技术对鱼糜凝胶 动态流变中温度扫描的影响

Effects of exogenous additives and auxiliary processing techniques on
temperature scanning in dynamic rheology of surimi gel

陈婷婷¹ 郭全友² 包海蓉^{1,3,4}

CHEN Ting-ting¹ GUO Quan-you² BAO Hai-rong^{1,3,4}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院东海水产研究所,
上海 200090; 3. 农业部水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室〔上海〕, 上海 201306;
4. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

(1. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090,
China; 3. Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Aquatic Products on Storage and
Preservation [Shanghai], Ministry of Agriculture, Shanghai 201306, China; 4. Shanghai Engineering
Research Center of Aquatic-Product Processing and Preservation, Shanghai 201306, China)

摘要:综述了不同外源添加物及新型辅助加工技术对鱼糜凝胶过程储能和损耗模量的影响,从动态流变学角度,阐述鱼糜凝胶形成的机制,并展望了辅助加工技术和新型外源添加物在改善鱼糜凝胶性能和低盐鱼糜制品质地等方面的潜力。

关键词:鱼糜凝胶; 温度扫描; 淀粉; 亲水胶体; 蛋白质物质; 超声处理; 电子束辐照; 超高压技术

Abstract: The effects of different exogenous additives and new auxiliary processing technologies on the energy storage and loss modulus of surimi gel process were reviewed. From the perspective of dynamic rheology, the formation mechanism of surimi gel was expounded, and the potential of auxiliary processing technologies and new external additives in improving surimi gel properties and texture of low-salt surimi products was prospected.

Keywords: surimi gel; temperature scanning; starch; hydrophilic colloid; protein substance; ultrasonic treatment; electron beam irradiation; ultra high pressure

基金项目:国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项(编号:2020YFD0901203);中国水产科学研究院基本科研业务费资助项目(编号:2020TD68)

作者简介:陈婷婷,女,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:包海蓉(1969—),女,上海海洋大学副教授,博士。

E-mail: hrbao@shou.edu.cn

收稿日期:2022-08-01 **改回日期:**2022-12-23

食品动态流变学是研究食品在加工、储存、运输过程中产生的变形与流动的科学。温度扫描是鱼糜流变学研究中最常用的扫描模式,该模式可以反映鱼糜凝胶过程对温度的依赖。温度扫描模式下测得的储能模量(G'),又称为弹性模量,常用作鱼糜凝胶形成的指标,其特征是鱼糜的柔韧性, G' 值越高表明凝胶强度越好。损耗模量(G''),又称为黏性模量,其特征是鱼糜的黏度。

市面上常见的鱼糜制品是以鱼肉为原材料,经过漂洗、精滤等工序加以处理,制备成商品鱼糜,添加一些辅料,经过斩拌、加热等步骤使鱼糜产生凝胶化反应,最终制得口味鲜美、富有弹性的凝胶状食品^[1]。鱼糜加热形成凝胶的过程会经历凝胶化、凝胶劣化、鱼糜化 3 个阶段,其模量也会发生相应的变化。凝胶化阶段(50℃之前),鱼糜的 G' 和 G'' 缓慢降低,肌球蛋白分子间的相互作用形成了一个弱的三维凝胶网络^[2]。凝胶劣化阶段(50~70℃),随着温度升高,鱼糜的 G' 和 G'' 急剧下降。导致模量下降的原因有两方面,首先,高活性内源蛋白水解酶可以降解肌球蛋白并破坏凝胶结构^[3];其次,肌球蛋白的降解或肌球蛋白尾部的变性会增加蛋白质分子的流动性,导致凝胶塌陷^[4]。鱼糜化阶段(80~90℃左右),随着温度的上升,肌球蛋白和肌动蛋白重链分子交联形成稳固的凝胶网络结构,鱼糜的 G' 和 G'' 在该阶段内迅速升高^[5]。

研究拟综述不同外源添加物和不同新型辅助加工技

术对鱼糜凝胶过程中温度扫描的影响,以期对鱼糜凝胶性能的改善提供参考。

1 外源添加物对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

1.1 淀粉对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

淀粉由于其溶胀和保水的能力,成为鱼糜制品中广泛使用的填充剂,鱼糜凝胶形成过程中,添加的外源淀粉和鱼糜蛋白浓度共同决定了鱼糜 G' 的变化。低温下(淀粉的糊化温度之前),淀粉的添加会降低鱼糜的 G' ,可能是淀粉—鱼糜系统中蛋白质的相对浓度的降低引起的。在糊化温度之前,蛋白质的相对浓度对鱼糜 G' 的影响占主导地位,淀粉的加入降低了蛋白质的相对浓度,使得低温下淀粉处理组的 G' 低于纯鱼糜的;达到糊化温度后,填充在蛋白凝胶缝隙中的淀粉颗粒开始吸水膨胀,并对蛋白凝胶施加压力,从而形成坚固的三维网状结构,淀粉—鱼糜蛋白体系最终的 G' 高于纯鱼糜的^[6]。Kong 等^[7] 的研究也证明了这一点,在 5~55 °C 下,添加了变性淀粉的阿拉斯加鳕鱼鱼糜的 G' 明显低于对照组,当温度升高到 80 °C 时,淀粉处理组的 G' 又高于对照组。胡爱军等^[8] 发现木薯淀粉吸水糊化填充在泥鳅肌原纤维蛋白网络空隙中,使鱼糜凝胶表面更加平整,提高了蛋白凝胶强度。

淀粉添加量会对鱼糜凝胶的动态流变特性产生影响,低浓度范围内,淀粉可以填充在凝胶网络结构中,改善鱼糜的流变特性。过高的淀粉浓度则降低鱼糜蛋白相对浓度,对鱼糜的动态流变特性产生不利影响,也会使鱼糜的粉面感增强,口感变差。Luo 等^[9] 发现,当马铃薯淀粉添加量在 16% 时,带鱼鱼糜的最终 G' 达到最大值,高于这个浓度时,带鱼鱼糜的 G' 将开始下降。

淀粉可以分为原淀粉和变性淀粉。淀粉种类往往是加工过程中对于鱼糜凝胶化反应产生影响的因素之一。原淀粉作为从原料中直接提取出来的、不经过任何其他处理的原料,其对鱼糜凝胶化的影响与自身结构、加工条件及加工鱼糜种类的差异有关,如淀粉中直链淀粉和支链淀粉的比例、贮藏条件等。淀粉颗粒吸水膨胀并对淀粉凝胶基质产生压力,在此过程中,由于不断产生的压力,会使直链淀粉析出,最终形成一种独特的三维网状结构,吸水膨胀的颗粒会填充在该连续的基质中,淀粉的这一特性大大提高了鱼糜凝胶的强度。固有直链淀粉含量越高,淀粉颗粒结构的硬度越高,淀粉凝胶的 G' 越高^[10]。陈海华等^[11] 发现添加量为 4% 时,添加了玉米淀粉、小麦淀粉、马铃薯淀粉和绿豆淀粉的竹荚鱼鱼糜升温后的 G' 都高于对照组,其中,直链淀粉含量高的绿豆淀粉组 G' 高于其他 3 种淀粉组。直链淀粉含量高,分子相互缠绕形成的网络越强,形成的凝胶硬度越大, G' 就越大。虽然添加直链淀粉含量高的淀粉会使鱼糜凝胶形成硬度较大的

脆性凝胶,但形成的鱼糜凝胶弹性差。而支链淀粉溶胀能力强,对鱼糜凝胶基质施加更大的挤压力,增加鱼糜凝胶的黏合性。综上,在工厂流水化生产的要求下,支链含量较多的淀粉是理想的增稠剂,在符合食品安全标准的前提下,大大改善了鱼糜成品的口感品质。

由于原淀粉存在老化回生现象,通过物理、化学和酶解等方法,改变原淀粉的理化性质,从而更加有利于鱼糜凝胶特性的改善。得到的变性淀粉具有溶胀能力强、黏度大等特点。典型的变性淀粉如羟丙基淀粉、醋酸酯淀粉等已被广泛用于鱼糜制品加工产业。羟丙基淀粉中的羟丙基基团可以阻止淀粉的聚集,减缓老化速度,改善鱼糜制品的口感^[12]。黏度更大的交联淀粉和亲水性更高的醋酸酯淀粉和羟丙基淀粉可以使鱼糜凝胶网络中的自由水转化为不易冻结的水,减少冷冻过程中冰晶的产生,起到抗冻作用^[13]。变性淀粉也发挥鱼糜增稠剂的作用,鲍佳彤等^[14] 发现添加木薯变性淀粉的革胡子鲶鱼鱼糜升温后的 G' 和 G'' 高于对照组。羟丙基等变性淀粉的添加可以提高白鲢鱼鱼糜的凝胶强度和 G' ^[6]。

1.2 亲水胶体对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

亲水胶体是一种高分子聚合物(多糖/蛋白质),具有凝胶、增稠、稳定等功能,是鱼糜制品常见的填充剂,主要从两个方面改善鱼糜的凝胶特性和动态流变特性,一方面,在鱼糜热诱导形成凝胶的过程中,亲水胶体自身会形成稳定的三维网状结构;另一方面,亲水胶体可以与鱼糜蛋白分子相互交联,增强凝胶网络的强度。

亲水胶体按照化学结构可分为多糖类亲水胶体和多肽类亲水胶体。其中,多糖类亲水胶体作为增稠剂在鱼糜中的应用范围比较广泛。糖单体分子的不同特性都会对多糖类亲水胶体产生影响,如种类、键与键之间的聚合度、排列方式等,都会使这些胶体的特性发生变化,这些不同特性的亲水胶体参与鱼糜凝胶形成的机制也各有不同。

可得然胶是一种热凝胶,在高温下可以通过分子间的疏水相互作用和蛋白质协同作用形成热不可逆凝胶,提高鱼糜凝胶的热稳定性,改善高温下鱼糜凝胶的动态流变特性。韩静文等^[15] 发现添加 10 g/kg 的可得然胶可以使白鲢鱼鱼糜凝胶的 G' (120 °C) 从约 4 800 Pa 上升至约 6 900 Pa,该方法能够有效增强鱼糜凝胶化反应,使得鱼糜强度更高,更能迎合市场需求。Wei 等^[16] 研究也发现,对于经过高温杀菌处理的鳕鱼鱼糜来说,添加合适的可得然胶可以改善其流变和凝胶特性。

瓜儿豆胶是一种中性的非凝胶多糖,海藻酸钠是一种阴离子的钙凝型多糖,二者具有极高的黏度,但对鱼糜凝胶的形成无影响^[17]。鲍佳彤等^[18] 也发现瓜儿豆胶的添加会降低革胡子鲶鱼鱼糜凝胶强度,同时,瓜儿豆胶组的 G' 和 G'' 与对照组相比差异并不显著。

魔芋胶是一种水溶性膳食纤维,其胶凝性与所处体系的酸碱度有关,处于中性条件时,形成热可逆凝胶,而在碱性条件下,魔芋胶分子间的部分乙酰基在羟基的作用下被脱去,进而形成氢键,分子间的作用力进而增强,最终形成了热不可逆的凝胶网状结构。于加美等^[19]发现高脱乙酰程度的魔芋胶会改善鱼糜凝胶的动态流变特性,高脱乙酰度魔芋胶的添加使鲢鱼鱼糜最终 G' 高于对照组,并显著提高了鱼糜的硬度、弹性、咀嚼性。通过调节体系的 pH 值来对魔芋胶进行改性也是一个研究热点,不同 pH 值下魔芋胶的脱乙酰程度不同。王良玉等^[20]利用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 调节魔芋胶体系的 pH 值,发现 pH 值在 9.7 时,凝胶强度、持水性最佳,升温后的带鱼鱼糜的 G' 和 G'' 也是最高的。

卡拉胶、琼胶和羧甲基纤维素均属于阴离子多糖,具有冷致凝胶的特点,胶体受热在水中溶解,冷却后,通过分子间相互交联形成凝胶。这些冷致凝胶的添加对鱼糜凝胶的动态流变特性也具有明显的改善作用。鲍佳彤等^[18]则利用该特点,先使鱼糜在 90 °C 环境下均匀受热,而后置于冰水中冷却形成凝胶。结果显示,革胡子鲶鱼鱼糜在添加卡拉胶后,利用其冷却凝胶的特点,能够显著改善 G' 、 G'' 和凝胶特性。

K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 等阳离子会引起卡拉胶构象的变化从而对其胶凝性产生影响。卡拉胶是从红海藻中提取的多糖,主要以 3 种形式存在: κ -卡拉胶、 λ -卡拉胶、 ι -卡拉胶^[21]。 K^+ 使 κ -卡拉胶形成更加硬且脆的凝胶,提高鱼糜的 G' 。 κ -卡拉胶添加量相同时,添加了 KCl 的鱼糜 G' 在凝胶形成过程中始终高于对照组^[22]。但也有研究^[23]表明,KCl 对鱼蛋白的影响比对卡拉胶的影响更大,虽然与其他盐(NaCl 和 CaCl_2)相比,KCl 促进了 G' 的增加,但是不能最大限度地发挥卡拉胶对鱼蛋白凝胶 G' 的贡献。 Ca^{2+} 则可以与带有负离子的 ι -卡拉胶反应,改善鱼糜的凝胶和动态流变特性。于楠楠^{[24]68-69}发现 ι -卡拉胶和 Ca^{2+} 的复配处理降低了鱼糜的疏水作用,减少了蛋白的聚集程度,使得鱼糜的 G' 和 G'' 在凝胶过程中始终大于对照组。

1.3 蛋白类物质对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

作为鱼糜填充剂的蛋白类物质一般分为两类,一类是酶类物质,另一类是非酶类蛋白质。鱼糜加工中应用最广泛的酶类物质主要是转谷氨酰胺酶(TGase)。非酶类蛋白质主要有动植物蛋白和碱性氨基酸,碱性氨基酸作为低盐鱼糜制品的盐替代物近年来也有报道。

1.3.1 酶类物质对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

转谷氨酰胺酶(TGase)可以通过酰基转移反应、蛋白交联反应和脱酰胺基反应来改善蛋白的持水特性、凝胶特性以及乳化特性。在鱼糜凝胶形成过程中,TGase 可以通过蛋白交联反应催化肌球蛋白重链上的赖氨酸的

ϵ -氨基基团与谷氨酰胺的 γ -羧基基团形成 ϵ -(γ -Gln)-Lys 键,提高鱼糜凝胶网络的强度^[25]。由于鱼肉中内源性的 TGase 含量较少,TGase 一般通过外源添加物的形式添加。当 TGase 添加量为 28.08 U/100 g,鲢鱼鱼糜的最终 G' 达到最大值,凝胶强度最高、蒸煮损失最低^[26]。TGase 可以提高鱼糜蛋白的热稳定性,减少蛋白质二级结构的破坏。研究^[27]发现,在 121 °C 杀菌处理过程中,添加了 0.5% TGase 的白鲢鱼鱼糜的 G' 在 120 °C 时为 8 453.4 Pa,是空白组的 1.8 倍。一些金属离子会影响 TGase 与蛋白的交联作用, Ca^{2+} 是 TGase 的活性剂,合适的浓度范围内,可以增强 TGase 的活力。鲍佳彤等^[28]发现在 TGase 添加量为 0.4%, CaCl_2 添加量为 20 mmol/kg 时,革胡子鲶鱼鱼糜的 G' 增速快于对照组,质构特性也得到了明显改善。

1.3.2 非酶蛋白类物质对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

鱼糜制品中最常使用的植物蛋白添加剂是大豆蛋白。大豆分离蛋白填充在鱼糜网状结构的空隙中,改善鱼糜的凝胶和流变特性。革胡子鲶鱼鱼糜中添加 7% 的大豆分离蛋白后,革胡子鲶鱼鱼糜的 G' 、 G'' 、持水性和凝胶强度均得到了明显提高^[29]。经过预处理的大豆蛋白对鱼糜的动态流变性的改善效果更加明显。合适温度的预处理可以使大豆蛋白的疏水基团展开,进一步增强其与鱼糜蛋白分子基团的结合作用。杜洪振等^[30]通过改变大豆分离蛋白的添加量、预热温度等条件发现,经过合适的预热温度处理的大豆蛋白能够有效改善鲤鱼蛋白的凝胶和流变特性,具有良好的市场前景和应用价值。

蛋清蛋白和乳清蛋白是鱼糜制品中常见的动物蛋白添加剂。蛋清蛋白和乳清蛋白不仅可以与鱼糜蛋白分子相互交联形成更为坚固的网状结构,还可以抑制导致鱼糜发生凝胶劣化的内源酶活性。鲍佳彤等^[29]发现蛋清蛋白和乳清蛋白处理组的革胡子鲶鱼鱼糜 G' 和 G'' 始终高于对照组,同时,这两种蛋白的添加也改善了鱼糜的白度。

动物血浆蛋白也可以作为鱼糜制品的添加剂,血浆蛋白通过非二硫共价键、氢键、疏水作用等分子作用力,使鱼糜凝胶结构更加稳固,血浆蛋白中含有的半胱氨酸也具有抑制鱼糜蛋白降解的作用。羊血浆蛋白添加量为 0.5%~3.0% 时,鲢鱼鱼糜凝胶的 G' 和 G'' 显著升高,硬度、咀嚼性都得到改善^[31-32]。添加了猪血浆蛋白的鲢鱼鱼糜的氢键含量升高,疏水键含量降低,猪血浆蛋白通过分子间的作用力促使鱼糜形成更致密、稳固的凝胶^[33]。然而不是所有的血浆蛋白的添加对鱼糜凝胶的动态流变特性都是有利的。根据 Fowler 等^[34]的报道,太平洋鲑鱼鱼糜的最大弹性模量(G')随着添加更多的鲑鱼血浆蛋白而降低,血浆蛋白具有不同于鱼肌肉蛋白的热稳定性和凝胶特性,两种不同性质的凝胶网络的形成导致 G' 减少。

碱性氨基酸是指等电点大于 7 的氨基酸,常用作低盐食品添加剂的碱性氨基酸包括精氨酸(Arg)和赖氨酸(Lys)。碱性氨基酸通过提高体系的 pH 值,抑制肌球蛋白的聚集,增强分子间的作用力这 3 个方面改善低盐鱼糜凝胶过程中的动态流变特性^[35-36]。关宏等^[37]发现添加 0.65% L-精氨酸的草鱼鱼糜中的最终 G' 达 2.5×10^4 Pa,高于对照组的,而经过 HCl 调节的精氨酸处理组的最终 G' 和 G'' 远低于对照组的,这也证明了 L-精氨酸可以通过自身的强碱性调节体系的 pH 值从而改善鱼糜的动态流变特性。低盐条件下,L-精氨酸和 L-赖氨酸的添加可以提高鱼糜肌球蛋白的溶解度,起到增溶作用,形成性能较好的凝胶。朱潘红^[38]发现低离子强度下精氨酸和赖氨酸处理的罗非鱼肌球蛋白的溶解度、疏水作用、巯基含量、储能和损耗模量明显增加。

1.4 其他物质对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

除了淀粉、亲水胶体、蛋白类物质这几大类外源添加物外,还有一些研究表明盐类物质、脂类物质、膳食纤维,也可以对鱼糜凝胶过程中动态流变特性产生影响。

1.4.1 盐类物质对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

在鱼糜制品加工中,NaCl 是最不可或缺的,NaCl 可以使鱼糜中的盐溶性蛋白溶出,并在加热过程中形成凝胶。盐浓度的高低会对鱼糜凝胶的动态流变特性产生影响,低浓度的盐会使肌原纤维蛋白不能充分溶出,高浓度的盐使肌球蛋白尾部发生变性,削弱了预凝胶结构的弹性成分,对动态流变性产生不利影响。氯化物类替代盐也可以发挥 NaCl 的作用,常见的商用氯化物类替代盐有 CaCl_2 、 MgCl_2 和 KCl。其中,KCl 由于理化性质与 NaCl 极为相近,是最常用的盐替代物。0.17 mmol 的 NaCl 和 KCl 处理的阿拉斯加鳕鱼鱼糜的最终 G' 均大于对照组,且其 G' 曲线十分相似,都是典型的肌球蛋白的动态流变曲线^[39]。一些二价金属离子的添加如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 也会改变鱼糜蛋白的构象,这些离子会结合蛋白质多肽链上的负电荷,使蛋白质分子之间的静电相互作用被减弱,蛋白质分子间的非共价作用以及水合作用也因此发生变化^[40]。于楠楠^{[24]31-39}发现 Ca^{2+} 的添加使白鲢鱼鱼糜凝胶过程中的 G' 曲线发生显著性变化,表征肌球蛋白轻链变性的临界温度因 CaCl_2 的加入明显降低,由于 Ca^{2+} 的添加,氢键和二硫键含量开始升高,疏水作用增强,促进了蛋白的变性聚集,对鱼糜凝胶的动态流变特性产生显著影响。

1.4.2 脂类物质对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

由于鱼糜漂洗会带走鱼糜大量的油脂,在后续斩拌过程中,添加一些油脂可以改善鱼糜的风味。油脂对鱼糜凝胶的动态流变特性的影响是双向的,这与油脂、蛋白之间的比例有关。一方面,油脂的添加降低了鱼糜蛋白的相对浓度。另一方面,乳化的油滴被肌原纤维蛋白包

围并占据了蛋白质的疏水区,可以允许有效地形成共价键。同时,油脂可能起到填充鱼糜肌原纤维蛋白凝胶网络空隙的共聚物的作用。李慧等^[41]发现分别添加了猪油、大豆油、橄榄油的虾糜在凝胶过程中的 G' 低于对照组,凝胶强度、持水性也随着油脂添加量的增加而降低。油脂代替了水的部分作用,使得蛋白变性需要更少的水,蛋白质被多余的水稀释,蛋白浓度降低,模量下降。Pietrowski 等^[42]为了消除油脂的添加使得蛋白质浓度下降带来的不利影响,通过调节水分含量来保证各组之间蛋白浓度的一致,发现分别添加了玉米油、亚麻籽油、鲱鱼油、磷虾油和藻油的阿拉斯加鳕鱼鱼糜的最终 G' 均高于空白对照组。在保持蛋白浓度一致时,油脂对鱼糜凝胶的动态流变特性是有改善作用的。肌原纤维蛋白层面上的研究也证明了这一点。王莉莎^[43]发现添加了玉米油和橄榄油的金枪鱼肌原纤维蛋白 G' 在凝胶形成过程中始终高于对照组。油脂添加到鱼糜中,不仅改善了风味,还增加了营养,但为了避免对鱼糜凝胶的动态流变特性及凝胶特性产生不利影响,在鱼糜及其制品生产过程中,要确定好油脂添加量。

1.4.3 膳食纤维对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

膳食纤维指的是不能被人体消化吸收的碳水化合物的总称,可以从两个方面改善鱼糜的动态流变特性:一方面,膳食纤维会滞留水分,导致部分蛋白质脱水,蛋白质浓度升高,更容易形成凝胶;另一方面,添加的膳食纤维在蛋白质凝胶基质中形成了子网络。不溶性膳食纤维添加量在 2%~6% 时,阿拉斯加鳕鱼鱼糜的 G' 随着膳食纤维添加量的增加而呈比例增加^[44]。与常见的淀粉类、亲水胶体类、蛋白类外源添加物不同,膳食纤维和肌原纤维蛋白不会发生交联反应,两者在热力学上是不相容的体系。庄昕波等^[45]则发现这一特点,改性甘蔗膳食纤维并不会影响蛋白的网络结构,只是简单地以填充方式存在其缝隙中。对膳食纤维改性获得不同溶解度或粒径的膳食纤维也是近年来一个研究热点,但不同粒径或溶解度的膳食纤维对鱼糜凝胶的动态流变特性和凝胶特性的影响机制还需要进一步阐述,这可能是未来的一个研究方向^[46]。

2 辅助加工技术对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

近年来,一些新型辅助加工技术如超声处理、电子束辐照、超高压技术被广泛应用于鱼糜制品加工中,这些技术也会对鱼糜制品的凝胶和动态流变特性产生影响。

2.1 超声辅助加工技术对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

超声波是指频率范围可达 20~1 000 kHz 的声波,在固体介质中传播可产生空穴效应^[47-48]。超声辅助加工

处理一般用在鱼糜加热前处理或一段加热过程中,低频高强度超声具有较高的能量,对物料具有明显的改善作用^[49]。超声处理过程中,鱼糜内部瞬时产生数量少且大的气泡,这种“空穴效应”使鱼糜蛋白二级结构中的 α -折叠转化为结构更为舒展的无规则卷曲和 β -折叠,活性基团暴露与水分子相互结合,增强分子间的作用力^[50]。超声处理的时间和强度会对物料以及超声效果产生影响,超声强度太低,则蛋白质不能充分展开,强度过大的超声处理会降解部分肌球蛋白,对肌球蛋白动态流变特性产生不利影响。谢亚如等^[51]发现 150 W 的超声处理下可以使鲢鱼肌球蛋白的最终 G' 达到最大,凝胶形成能力也得到了改善。冯佳雯等^[52]发现 360 W 下处理 12 min 的鲈鱼肌原纤维蛋白的动态流变特性最佳。因此,在生产过程中选择合理的超声强度和 시간은十分必要的。

2.2 电子束辐照辅助加工技术对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

电子束辐照技术是一种新兴的食品杀菌技术,常用于食品的保鲜^[53]。电子束辐照对鱼糜品质也有改善作用,一方面,电子束辐照可以破坏鱼肉内源组织蛋白酶结构,减轻其对盐溶蛋白的降解作用。罗华彬等^[54]的研究也证实了这一点,通过电子束辐照,抑制了对带鱼鱼糜凝胶过程影响最大的酶的活力,从而提高了带鱼鱼糜品质。另一方面,电子束辐照使得鱼糜蛋白中的活性基团充分暴露,增强分子间的作用力。张晗等^[55]发现鲈鱼肌原纤维蛋白经电子束辐照后,二硫键含量上升、疏水作用增加,二级结构中的 α -螺旋向结构更为舒展的 β -折叠转变,分子间作用力增强。

2.3 超高压辅助加工技术对鱼糜凝胶动态流变中温度扫描的影响

超高压处理能够使蛋白的二级结构展开,分子间的相互作用力增强,可以保留食物大部分的营养和风味。李钊等^[56]发现 200 MPa 处理的鲤鱼鱼糜 G' 和凝胶强度始终高于 100 MPa 和 300 MPa 处理组的,300 MPa 处理组的 G' 曲线无特征峰,鱼糜中的部分肌原纤维蛋白在过高的压力下发生变性,对鱼糜凝胶化过程产生不利影响。

3 总结与展望

鱼糜凝胶形成是热诱导的过程,升温过程中储能模量和损耗模量的变化可以反映鱼糜凝胶形成过程中黏弹性的变化,动态地反映鱼糜凝胶形成过程中品质的变化。目前改善鱼糜凝胶和动态流变特性的方法主要是传统的外源添加物以及采用一些新型辅助加工技术处理鱼糜。研究综述了淀粉类、亲水胶体和蛋白类等外源添加物及常见的新型辅助加工技术对鱼糜凝胶过程中储能模量和损耗模量的影响,从动态流变学角度,更好地阐述了鱼糜凝胶形成的机制。

未来的研究方向可以集中在以下方面:① 开拓新型的外源添加物。如多酚类物质不仅有保鲜功能,还可以改善鱼糜的凝胶和流变特性,目前关于多酚类物质改善鱼糜流变特性的研究还是比较少的。② 注重新型辅助加工技术的应用,如 3D 打印技术、食品挤压技术、高密度 CO_2 诱导技术,在工业上具有很大潜力。③ 低盐鱼糜制品是未来的发展方向,将外源添加物与辅助加工技术相结合,可以更好地改善低盐鱼糜制品的质地。

参考文献

- [1] 米红波,王聪,仪淑敏,等.淀粉在鱼糜制品中的应用研究进展[J].食品与发酵工业,2018,44(1):291-295.
MI H B, WANG C, YI S M, et al. Research progress on starch use in surimi seafood[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(1): 291-295.
- [2] LEFEVRE F, FAUCONNEAU B, OUALI A, et al. Thermal gelation of brown trout myofibrils from white and red muscles: Effect of pH and ionic strength[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2002, 82(4): 452-463.
- [3] CAO M J, WU L L, HARA K J, et al. Purification and characterization of a myofibril-bound serine proteinase from the skeletal muscle of silver carp[J]. Journal of Food Biochemistry, 2010, 29(5): 533-546.
- [4] WEI W, HU W, ZHANG X Y, et al. Analysis of protein structure changes and quality regulation of surimi during gelation based on infrared spectroscopy and microscopic imaging [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 5 566.
- [5] HDING H C, LI X P, LI R Z, et al. Changes of water state and gel characteristics of hairtail (Trichiurus lepturus) surimi during thermal processing[J]. Journal of Texture Studies, 2019, 50(4): 332-340.
- [6] 米红波,王聪,苏情,等.变性淀粉对白鲢鱼鱼糜凝胶特性和蛋白构象的影响[J].中国食品学报,2021,21(1):72-80.
MI H B, WANG C, SU Q, et al. Effect of modified starch on gel properties and protein conformation of surimi from silver carp[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(1): 72-80.
- [7] KONG W J, ZHANG T, FENG D D, et al. Effects of modified starches on the gel properties of alaska pollock surimi subjected to different temperature treatments[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 56(5): 20-28.
- [8] 胡爱军,于辉,郑捷,等.木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J].天津科技大学学报,2020,35(4):21-25,30.
HU A J, YU H, ZHENG J, et al. Effect of cassava starch on gel properties of loach myofibrillar protein [J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2020, 35(4): 21-25, 30.
- [9] LUO H, GUO C, LIN L, et al. Combined use of rheology, LF-NMR, and MRI for characterizing the gel properties of hairtail surimi with potato starch[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(4):

- 637-647.
- [10] ZHANG F H, FANG L, WANG C J, et al. Effects of starches on the textural, rheological, and color properties of surimi-beef gels with microbial transglutaminase[J]. *Meat Science*, 2013, 93(3): 533-537.
- [11] 陈海华, 薛长湖. 淀粉对竹荚鱼鱼糜流变性质和凝胶特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 293-298.
CHEN H H, XUE C H. Effect of starch on rheological properties and gel properties of horse mackerel surimi[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(5): 293-298.
- [12] 张静静. 羟丙基木薯淀粉在鱼丸中应用的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2014: 31.
ZHANG J J. Study of the application of hydroxypropyl tapioca starch in fish ball [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2014: 31.
- [13] 曹立伟, 熊善柏, 李莎莎, 等. 变性淀粉对鲢鱼糜冻结速率及凝胶特性的影响[J]. *水产学报*, 2014, 38(9): 1 592-1 600.
CAO L W, XIONG S B, LI S S, et al. Effects of modified starches on the freezing rate and gel characteristics of surimi from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(9): 1 592-1 600.
- [14] 鲍佳彤, 宁云霞, 杨淇越, 等. 不同淀粉种类对未漂洗革胡子鲶鱼糜凝胶特性的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(4): 27-33.
BAO J T, NING Y X, YANG Q Y, et al. Effects of different starch types on gel properties of unrinsed *Clarias gariepinus* surimi[J]. *Meat Research*, 2020, 34(4): 27-33.
- [15] 韩静文, 姜启兴, 许艳顺, 等. 可得然胶对高温杀菌鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(4): 37-41, 98.
HAN J W, JIANG Q X, XU Y S, et al. Effects of curdlan on gel properties of high-temperature sterilization surimi [J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(4): 37-41, 98.
- [16] WEI Y, ZHANG T, YU F, et al. Effects of curdlan on the texture and structure of Alaska pollock surimi gels treated at 120 °C [J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 1 778-1 788.
- [17] 陈海华, 薛长湖. 亲水胶体对竹荚鱼鱼糜流变特性的影响[J]. *食品科学*, 2009, 30(17): 52-55.
CHEN H H, XUE C H. Effect of various kinds and amounts of hydrocolloid on rheological properties of horse mackerel surimi[J]. *Food Science*, 2009, 30(17): 52-55.
- [18] 鲍佳彤, 杨淇越, 宁云霞, 等. 亲水胶体对未漂洗革胡子鲶鱼糜凝胶特性的影响[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(3): 118-124.
BAO J T, YANG Q Y, NING Y X, et al. Effects of hydrophilic colloid on gel properties of unrinsed catfish (*Clarias gariepinus*) Surimi[J]. *Storage and Process*, 2021, 21(3): 118-124.
- [19] 于加美, 高瑞昌, 石彤, 等. 高脱乙酰度魔芋葡甘聚糖对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(8): 48-54.
YU J M, GAO R C, SHI T, et al. Effects of konjac glucomannan with a high degree of deacetylation on the gelling properties of silver carp surimi[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(8): 48-54.
- [20] 王良玉, 何明祥, 庞杰, 等. 魔芋葡甘聚糖凝胶体系对带鱼鱼糜流变及质构特性的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(6): 88-94.
WANG L Y, HE M X, PANG J, et al. Effects of konjac glucomannan gel system on the rheological and gel properties of *Trichiurus haumela* Surimi [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2013, 35(6): 88-94.
- [21] ROBAL M, BRENNER T, MATSUKAWA S, et al. Monocationic salts of carrageenans: Preparation and physico-chemical properties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63(2): 656-667.
- [22] 汤嘉慧, 郭全友, 邹咪, 等. κ -卡拉胶/ K^+ 凝胶体系对鱼糜凝胶特性和流变的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(16): 86-92.
TANG J H, GUO Q Y, ZOU M, et al. Effects of κ -carrageenan/ K^+ gel system on gel properties and rheology of surimi[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(16): 86-92.
- [23] HUNT A, PARK J W. Alaska Pollock fish protein gels as affected by refined carrageenan and various salts [J]. *Journal of Food Quality*, 2013, 36(1): 51-58.
- [24] 于楠楠. 盐和多糖对鱼糜凝胶形成的影响与机制[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
YU N N. Effect of salts and polysaccharides on the formation of surimi gel and the mechanism [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [25] FANG Q, SHI L, REN Z, et al. Effects of emulsified lard and TGase on gel properties of threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) surimi [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 146(9): 111513.
- [26] 贾丹, 刘茹, 刘明菲, 等. 转谷氨酰胺酶对鲮鱼糜热诱导凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(9): 37-41.
JIA D, LIU R, LIU M F, et al. Effect of transglutaminase on heat-induced gel properties of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) surimi[J]. *Food Science*, 2013, 34(9): 37-41.
- [27] 于楠楠, 王卫东, 陈学红, 等. TG酶对高温杀菌鱼糜凝胶特性影响[J]. *食品工业*, 2020, 41(4): 98-101.
YU N N, WANG W D, CHEN X H, et al. Effects of glutamine transaminase on gel properties of high-temperature sterilization surimi[J]. *Food Industry*, 2020, 41(4): 98-101.
- [28] 鲍佳彤, 宁云霞, 杨淇越, 等. TGase 和 Ca^{2+} 联合作用对未经漂洗的革胡子鲶鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(14): 50-57.
BAO J T, NING Y X, YANG Q Y, et al. Combined effects of TGase and Ca^{2+} on gel properties of unwashed *Clarias gariepinus* surimi[J]. *Food Science*, 2020, 41(14): 50-57.
- [29] 鲍佳彤, 杨淇越, 宁云霞, 等. 非肌肉蛋白对未漂洗革胡子鲶鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(20): 46-53, 71.
BAO J T, YANG Q Y, NING Y X, et al. Effects of non-muscle protein on gel properties of unwashed *Clarias gariepinus* surimi[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(20): 46-53, 71.
- [30] 杜洪振, 陈倩, 杨振, 等. 预热处理大豆蛋白对鲤鱼肌原纤维

- 蛋白凝胶和流变学特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(12): 55-61.
- DU H Z, CHEN Q, YANG Z, et al. Effect of preheated soy proteins on gelling and rheological properties of common carp myofibrillar protein[J]. Food Science, 2019, 40(12): 55-61.
- [31] 李景敏, 于楠楠, 李芮洋, 等. 羊血浆蛋白对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(19): 84-89.
- LI J M, YU N N, LI R Y, et al. Effect of sheep plasma protein on gel properties of silver carp surimi[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(19): 84-89.
- [32] 于楠楠, 李景敏, 汤楚琦, 等. 羊血浆蛋白对高温杀菌鱼糜制品凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(16): 32-36, 42.
- YU N N, LI J M, TANG C Q, et al. Effect of sheep plasma protein on gel properties of pasteurized surimi products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(16): 32-36, 42.
- [33] 雷雨, 夏文水, 姜启兴, 等. 猪血浆蛋白对鲢鱼鱼糜品质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(14): 103-106, 113.
- LEI Y, XIA W S, JIANG Q X, et al. Effect of porcine plasma protein on the quality of silver carp surimi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(14): 103-106, 113.
- [34] FOWLER M R, PARK J W. Effect of salmon plasma protein on Pacific whiting surimi gelation under various ohmic heating conditions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(2): 309-315.
- [35] GUO X Y, PENG Z Q, ZHANG Y W, et al. The solubility and conformational characteristics of porcine myosin as affected by the presence of L-lysine and L-histidine[J]. Food Chemistry, 2015, 170(5): 212-217.
- [36] LI S, LI L, ZHU X, et al. Conformational and charge changes induced by L-arginine and L-lysine increase the solubility of chicken myosin[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89(5): 330-336.
- [37] 关宏, 丁玉琴, 尤娟, 等. pH 值对添加 L-精氨酸的草鱼糜凝胶特性的影响[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2018, 37(5): 110-116.
- GUAN H, DING Y Q, YOU J, et al. Effects of pH on gel properties of grass carp surimi added with L-arginine[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 37(5): 110-116.
- [38] 朱潘红. 氨基酸增溶对罗非鱼肌球蛋白热诱导凝胶形成的影响及机理[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2018: 64-65.
- ZHU P H. Effect of amino acid on the formation and mechanism of heat-induced gel of tilapia myosin[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2018: 64-65.
- [39] TAHERGORABI R, JACZYNSKI J. Physicochemical changes in surimi with salt substitute [J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1 281-1 286.
- [40] DING Y, LIU Y, HONG Y, et al. Effects of CaCl₂ on chemical interactions and gel properties of surimi gels from two species of carps [J]. European Food Research & Technology, 2011, 233(4): 569.
- [41] 李慧, 陈百科, 金素莱曼, 等. 油脂对虾糜凝胶品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 143-149.
- LI H, CHEN B K, JIN S L M, et al. Effect of grease and oil on the quality of minced shrimp gel[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(8): 143-149.
- [42] PIETROWSKI B N, TAHERGORABI R, JACZYNSKI J. Dynamic rheology and thermal transitions of surimi seafood enhanced with ω -3-rich oils[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(2): 384-389.
- [43] 王莉莎. 植物油与肌原纤维蛋白乳化复合凝胶的结构特性[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 36.
- WANG L S. Structural properties of vegetable oil and myofibrillar emulsified composite gel [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019: 36.
- [44] DEBUSCA A, TAHERGORABI R, BEAMER S K, et al. Physicochemical properties of surimi gels fortified with dietary fiber[J]. Food Chemistry, 2014, 148(7): 70-76.
- [45] 庄昕莎, 陈银基, 周光宏. 改性甘蔗膳食纤维对猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3 320-3 330.
- ZHUANG X B, CHEN Y J, ZHOU G H. The mechanism of myofibrillar protein gel functionality influenced by modified sugarcane dietary fiber[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(15): 3 320-3 330.
- [46] 孟爽爽. 麸皮膳食纤维的提取及其对鱼糜凝胶特性影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016: 57-58.
- MENG S S. Study on the extraction of dietary fiber from wheat bran and its effect on the gel properties of surimi [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016: 57-58.
- [47] 熊瑶, 李倩如, 刘云祎, 等. 超声波在鱼糜制品中的应用进展[J]. 农产品加工, 2019(6): 55-58, 61.
- XIONG Y, LI Q R, LIU Y Y, et al. A review of the effect of ultrasound on the surimi products[J]. Farm Products Processing, 2019(6): 55-58, 61.
- [48] SOMJID P, PANPIPAT W, PETCHARAT T, et al. Biochemical property and gel-forming ability of mackerel (*Auxis thazard*) surimi prepared by ultrasonic assisted washing[J]. RSC Adv, 2021, 11(57): 36 199-36 207.
- [49] GAO X, YONGSAWATDIGUL J, WU R L, et al. Effect of ultrasound pre-treatment modes on gelation properties of silver carp surimi[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 150: 111945.
- [50] ATAB C, EA C, AI A, et al. Ultrasonic emulsification: An overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105(11): 363-377.
- [51] 谢亚如, 刘庆, 熊善柏, 等. 高强度超声作用下鲢鱼肌球蛋白的结构及流变学特性变化[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 77-84.
- XIE Y R, LIU Q, XIONG S B, et al. Effect of high intensity ultrasound on structural and rheological properties of myosin from silver carp[J]. Food Science, 2019, 40(5): 77-84.

(下转第 235 页)

- [35] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中氯丙醇及其脂肪酸酯含量的测定: GB 5009.191—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, China Food and Drug Administration. National food safety standards determination of chloropropanols and its fatty acid esters in foods: GB 5009.191—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [36] HAKME E, HERRMANN S S, POULSEN M E. Chlorate and perchlorate residues in food products on the Danish market[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2021, 39(3): 551-559.
- [37] 詹胜群, 张浩, 周钧, 等. 超高效液相色谱—串联质谱法测定婴幼儿配方乳粉中氯酸盐和高氯酸盐[J]. 食品科技, 2022, 47(1): 312-318.
- ZHAN S Q, ZHANG H, ZHOU Y, et al. Determination of chlorate and perchlorate in infant formula milk powder by UPLC-MS/MS [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(1): 312-318.
- [38] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中指示性多氯联苯含量的测定: GB 5009.190—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National Food Safety Standards determination of indicative polychlorinated biphenyls in foods: GB 5009.190—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [39] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中丙烯酰胺的测定: GB 5009.204—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standards determination of acrylamide in food: GB 5009.204—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [40] 杨琳, 于欣平, 王梦, 等. 中国 12 个省份母乳中全氟化合物前体物质含量分析[J]. 中华预防医学杂志, 2015, 49(6): 529-535.
- YANG L, YU X P, WANG M, et al. Analysis of perfluoroalkyl substances precursors in human milk from 12 provinces of china [J]. Chinese Preventive Medicine, 2015, 49(6): 529-535.
- [41] MACHEKA L R, OLOWOYO J O, MUGIVHISA L L, et al. Determination and assessment of human dietary intake of per and polyfluoroalkyl substances in retail dairy milk and infant formula from South Africa[J]. Science of the Total Environment: Part 2, 2021, 755(10): 142697.

(上接第 220 页)

- [52] 冯佳雯, 郑云芳, 张芳, 等. 超声处理对鲈鱼肌原纤维蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 95-103.
- FENG J W, ZHENG Y F, ZHANG F, et al. Effects of ultrasonic treatment on structural and functional properties of myofibrillar protein in sea bass[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 95-103.
- [53] DENG S, LU L, YANG W, et al. Effect of electron irradiation on the gel properties of *Collichthys lucidus* surimi [J]. Radiation Physics & Chemistry, 2017, 130(1): 316-320.
- [54] 罗华彬, 林露, 高星, 等. 电子束辐照对带鱼鱼糜内源性蛋白酶活性及其构象单元的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 23-28.
- LUO H B, LIN L, GAO X, et al. Effect of electron beam irradiation on the activity and conformational unit of endogenous proteases from hairtail surimi [J]. Food Science, 2019, 40(9): 23-28.
- [55] 张晗, 高星, 宣仕芬, 等. 电子束辐照对鲈鱼肉肌原纤维蛋白生化特性及其构象的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 81-86.
- ZHANG H, GAO X, XUAN S F, et al. Effect of electron beam irradiation on biochemical properties and structure of myofibrillar protein from *Lateolabrax japonicus* meat[J]. Food Science, 2019, 40(13): 81-86.
- [56] 李钊, 秦荣, 袁孝瑞, 等. 超高压对鲤鱼肉糜-MgCl₂凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 53-58.
- LI Z, QIN R, YUAN X R, et al. Effects of high pressure processing on gel properties of carp surimi containing magnesium chloride[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 53-58.

(上接第 226 页)

- [42] 杜耿记, 金珠, 吴小慧, 等. 流式细胞仪快速检测酸奶中乳酸菌含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(7): 2 810-2 814.
- DU G J, JIN Z, WU X H, et al. Determination the content of lactic acid bacteria in yogurt by flow cytometry [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(7): 2 810-2 814.
- [43] 王杰, 郑亦舟, 姜凯, 等. 乳酸菌计数结果的比较研究[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2018, 47(6): 713-718.
- WANG J, ZHENG Y Z, JIANG K, et al. Comparative study on counting results in *Lactobacillus* counting method [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2018, 47(6): 713-718.
- [44] CHIRON C, TOMPKINS T A, BURGUIÈRE P. Flow cytometry: A versatile technology for specific quantification and viability assessment of microorganisms in multi-strain probiotic products[J]. Journal of Applied Microbiology, 2018, 124(2): 572-584.
- [45] BARROS C, FULAZ S, VITALE S, et al. Interactions between functionalised silica nanoparticles and *Pseudomonas fluorescens* biofilm matrix: A focus on the protein corona[J]. PLoS One, 2020, 15(7): e0236441.
- [46] 张云, 邓彬. 幽门螺杆菌生物膜的形成及其在抗生素耐药中的作用[J]. 国际医药卫生导报, 2020, 26(22): 3 375-3 378.
- ZHANG Y, DENG B. Biofilm formation by *Helicobacter pylori* and its role in antibiotic resistance[J]. International Medicine and Health Guidance News, 2020, 26(22): 3 375-3 378.