

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.81011

外源添加剂对小龙虾虾糜制品凝胶特性的影响及协同效应

房思维¹ 余进祥² 郭全友³ 包海蓉¹ 胡火根²

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 江西省水生生物保护救助中心, 江西 南昌 330029;

3. 中国水产科学院研究院东海水产研究所, 上海 200090)

摘要: [目的] 探究外源添加剂对小龙虾虾糜制品凝胶特性的作用。[方法] 试验设计了 3 种外源添加剂羟丙基二淀粉磷酸酯(hydroxypropyl distarch phosphate, HPDSP)、大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)和谷氨酰胺转氨酶(glutamine transaminase, TGase)不同添加量, 探究三者单独添加及三者的复配物(HST)对小龙虾虾糜凝胶强度、水分分布、流变学特性、蛋白质二级结构以及微观结构等的影响。[结果] 当 HPDSP、SPI 和 TGase 添加量分别为 2.0%, 7.0%, 0.6% 时, 小龙虾虾糜的凝胶特性最好($P < 0.05$)。与对照组相比, 添加 HPDSP、SPI 和 TGase 皆可以改善小龙虾虾糜的凝胶强度、质构特性和持水性($P < 0.05$); 同时, 3 种添加物均可帮助提升虾糜凝胶的储能模量(G'), 且 HST 组的 G' 值显著高于其他组($P < 0.05$); 蛋白质二级结构显示, 3 种添加物使虾糜中蛋白质的无规卷曲和 α -螺旋相对含量减小, β -折叠和 β -转角相对含量增大; 扫描电镜显示, HST 组具有致密有序的凝胶网络结构。[结论] 相比于单独添加一种添加剂, HPDSP、SPI、TGase 复配可以更好地改善小龙虾虾糜制品的凝胶特性与保水能力, 3 种外源添加剂的联合使用对小龙虾虾糜制品凝胶的改善具有协同作用。

关键词: 小龙虾; 虾糜; 羟丙基二淀粉磷酸酯; 大豆分离蛋白; 谷氨酰胺转氨酶; 凝胶特性; 协同效应

Effect and synergy of different exogenous additives on gel properties of the crayfish surimi products

FANG Siwei¹ YU Jinxiang² GUO Quanyou³ BAO Hairong¹ HU Huogen²

(1. College of Food Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Jiangxi Aquatic Biology Protection and Rescue Center, Nanchang, Jiangxi 330029, China;

3. East China Sea Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the effect of exogenous additives on gel properties of crayfish surimi products. [Methods] The experiment was designed with different amounts of hydroxypropyl distarch phosphate (HPDSP), soy protein isolate (SPI), and glutamine transaminase (TGase). After clarifying the addition amounts of the above three exogenous additives (HPDSP, SPI, TGase), the effects of the three additives alone and the combination of the three additives (HST) on the gel strength, water distribution, rheological properties, protein secondary structure, and microstructure of crayfish surimi were clarified, respectively. [Results] The results showed that the best gel characteristics of crayfish surimi were obtained when HPDSP, SPI, and TGase were added at 2%, 7%, and 0.6%, respectively ($P < 0.05$). Compared with the control group, the addition of HPDSP, SPI, and TGase all improved the gel strength, textural properties, and water-holding capacity of crayfish surimi ($P < 0.05$). Meanwhile, all three additives could help to enhance the energy storage modulus (G') of the surimi gels, and the G' value of the HST group was significantly higher than that of the rest of the groups ($P < 0.05$). The protein secondary structure of the surimi gel was the best ($P < 0.05$), and the protein secondary structure of the surimi gel was the best ($P < 0.05$). The secondary structure of proteins showed that the three additives decreased the relative content of random curls and α -helices, and increased the relative content of β -folds and β -turns of proteins in the surimi. The scanning electron

通信作者: 胡火根(1964—), 男, 江西省水生生物保护救助中心副主任, 硕士。E-mail: 1361147127@qq.com

收稿日期: 2023-10-12 改回日期: 2024-03-15

microscopy showed that the HST group had a dense and organized gel network structure. [Conclusion] Compared with adding a single additive, the combination of HPDSP, SPI and TGase can better improve the gel characteristics and water retention ability of crawfish surimi products. The combined use of the three exogenous additives has a synergistic effect on improving the gel of crawfish surimi products.

Keywords: crayfish; surimi; HPDSP; SPI; TGase; gel properties; synergistic effects

小龙虾又称克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*),是一种重要的淡水甲壳类动物。中国是世界上最大的小龙虾生产国^[1]。2022年,中国小龙虾养殖面积186.67万hm²、产量289.07万t,小龙虾养殖产量占全国淡水养殖总产量的8.79%,居全国淡水养殖品种第4位^[2]。深加工小龙虾产品的种类较少,仅包括制备好的调味小龙虾、冷冻小龙虾尾、小龙虾肉和调味料等。近年来,小龙虾肠、丸等产品也开始出现,目前市售的小龙虾肠、丸大多是以猪肉或者低值鱼糜等为主料加工而成,再加入少许小龙虾肉块或者根据小龙虾的外形特点进行造型^[3-4]。小龙虾虾糜具有口感鲜美、质地独特的优点,开发以小龙虾虾糜为主料,其他鱼糜为辅料的凝胶产品已成为研发重要方向。

小龙虾虾糜内源性蛋白酶活性高、谷氨酰胺转氨酶含量低^[5],这会加速虾糜蛋白质的降解,导致虾糜凝胶强度较低。为满足消费者对高品质虾糜的需求,常常采用非热处理技术和外源性添加物等手段。外源性添加物因其简单有效在食品加工工业中备受欢迎,淀粉是糜类制品中使用最广泛的外源性物质,与天然淀粉相比,变性淀粉引入了亲水基团,如乙酰基和羟丙基等,这些基团可以改变淀粉的内部结构,使其具有更好的吸水性和膨胀性,从而使虾糜凝胶的凝胶强度和持水性得到改善。Mi等^[6]研究发现,添加1%的木薯淀粉或2%的乙酸酯化淀粉对金线鱼鱼糜凝胶的质构以及凝胶强度的提升效果显著,同时也促进鱼糜中的 α -螺旋向其他3种二级结构转变,但超过3%会影响其质地及滋味。非肌肉蛋白可以提高虾糜的凝胶强度,大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)是最常用的非肌肉蛋白之一。Saroat等^[7]研究表明,添加非肌肉蛋白(乳清蛋白)可使鱼糜的凝胶特性及持水性显著提高,使其呈现致密的网络结构,还能抑制内源性热激活蛋白酶。谷氨酰胺转氨酶(glutamine transaminase, TGase)可使肌球蛋白重链上的赖氨酸和谷氨酸基团之间形成共价键,催化分子间互联,促进蛋白凝胶^[8-9]。Liang等^[10]研究表明,含有TGase的鱼糜/蟹肉蛋白会更有效地进行聚集,从而形成更紧凑、密集的网络结构,表明TGase有助于改善鱼糜/蟹肉混合凝胶的性能。

目前有关单一外源添加物对虾糜凝胶特性影响的研究较多,但有关多种添加物之间的相互作用及其对虾糜凝胶特性的综合影响的研究还较少。将不同种类的添加物进行复配,使得不同添加物的特性优势互补,可有效解决因添加单一添加物带来的负面影响,如:淀粉过多而造

成粉面口感、非肌肉蛋白添加过多导致异味(豆腥味、蛋腥味)及色泽变差,这也是今后的重要研究方向。Mi等^[11]研究了单一的羟丙基木薯淀粉、凝结多糖、 κ -卡拉胶及三者组合对鲢鱼糜凝胶特性的影响,发现复配组凝胶强度最高,通过增加鱼糜凝胶中的二硫键含量和疏水性进而有效提高鱼糜产品的质量,三者组合效果更明显。Zhang等^[12]研究发现同时添加4种不同的外源添加剂可将混合虾糜凝胶中的 α -螺旋结构转化为 β -折叠结构,引起了蛋白质二级结构的变化,凝胶强度更高和微观结构更致密有序,持水性也更好。目前,关于羟丙基二淀粉磷酸酯(hydroxypropyl distarch phosphate, HPDSP)、SPI和TGase添加到小龙虾虾糜中的应用尚未见报道。研究拟以HPDSP、SPI和TGase为外源添加剂,明确三者在小龙虾虾糜中的最优添加量,并分析三者对小龙虾虾糜凝胶性质、水分分布、流变特性、蛋白质二级结构以及微观结构的影响,探讨三者对小龙虾虾糜凝胶品质增强的机理及协同效应。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试剂

小龙虾:市售(购买新鲜虾后运回实验室-80℃冷冻贮存);

阿拉斯加狭鳕鱼糜:于-18℃冻藏,漯河益邦商贸有限公司;

羟丙基二淀粉磷酸酯(木薯):上海仟味实业有限公司;

大豆分离蛋白、谷氨酰胺转氨酶(100 U/g):浙江一诺生物科技有限公司;

精制食用盐(昆明盐矿):云南省盐业有限公司;

胶原蛋白肠衣:柳州市宏升胶原蛋白肠衣有限公司。

1.2 试验仪器与设备

斩拌机:Q SJ-B02R1型,小熊电器股份有限公司;

电子天平:ATX224型,日本岛津公司;

数显恒温水浴锅:HH-6型,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

色彩色差计:CR-400型,日本柯尼卡美能达(中国)仪器有限公司;

流变仪:MCR301型,奥地利安东帕公司;

质构仪:TA.XT Plus型,英国Stable Micro Systems公司;

高速冷冻离心机:CR 21G型,日立工机商业(中国)有

限公司;

傅里叶变换红外分光光谱仪:L1050050 Spotlight 400 型,珀金埃尔默仪器有限公司;

核磁共振成像仪:PQ001-20-25V 型,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;

热场发射扫描电镜:SU5000 型,日立(中国)有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 小龙虾虾糜凝胶的制备工艺

小龙虾、阿拉斯加狭鳕鱼糜 4℃解冻 8 h(经前期试验得虾肉鱼糜比例 4:3)→前处理(小龙虾去头剥壳、去虾线、清洗备用;阿拉斯加狭鳕鱼糜切小块备用)→小龙虾斩拌 30 s→加入鳕鱼糜斩拌 30 s→3% 食盐斩拌 1 min→加入添加剂(HPDSP、SPI、TGase),斩拌 4 min→成型→二段式加热(40℃水浴 30 min,90℃水浴 20 min)→冰水混合物冷却(50 min)→4℃冰箱放置过夜→待测定

1.3.2 外源添加剂添加量优化

(1) HPDSP 添加量选择:以虾鱼主料质量为基准,在 SPI 添加量 5%、TGase 添加量 0.4% 条件下,研究 HPDSP 添加量(0%,1%,2%,3%,4%)对小龙虾虾糜凝胶感官评价、凝胶强度和持水性的影响,确定 HPDSP 添加量的最优条件。

(2) SPI 添加量选择:以主料质量为基准,在 HPDSP 添加量 2%、TGase 添加量 0.4% 条件下,研究 SPI 添加量

(0%,3%,5%,7%,9%)对小龙虾虾糜凝胶感官评价、凝胶强度和持水性的影响,确定 EWP 添加量的最优条件。

(3) TGase 添加量选择:以主料质量为基准,在 HPDSP 添加量 2%、SPI 添加量 5% 条件下,研究 TGase 添加量(0%,0.2%,0.4%,0.6%,0.8%)对小龙虾虾糜凝胶感官评价、凝胶强度和持水性的影响,确定 TGase 添加量的最优条件。

(4) 不同外源添加物的正交试验设计:以凝胶强度和持水性作为评价指标,根据单因素试验得出的结果,选取 HPDSP 添加量、SPI 添加量、TGase 添加量 3 个因素的 3 个水平进行正交试验。

1.3.3 不同外源添加剂对虾糜凝胶特性的影响

(1) 样品制备:根据单因素和正交试验的结果,为探究 3 种外源添加剂对小龙虾虾糜凝胶品质增强的机理及协同效应,以小龙虾和鳕鱼混合凝胶为对照组;以虾鱼主料的质量为基准,添加羟丙基二淀粉磷酸酯最优量的为 HPDSP 组;添加大豆分离蛋白最优量的为 SPI 组;添加谷氨酰胺转氨酶最优量的为 TGase 组;分别添加羟丙基二淀粉磷酸酯、大豆分离蛋白和谷氨酰胺转氨酶最优量的为 HST 组。虾糜凝胶制备流程参照 1.3.1。

(2) 感官评定:由评价小组根据表 1 的感官评定标准进行打分。

表 1 小龙虾虾糜凝胶制品感官评分标准

Table 1 Criteria for sensory evaluation of crayfish surimi product

组织形态	色泽	滋味	气味	分值/分
组织松散,弹性较差,不能完整切片,气孔大	无虾红色,颜色呈微黄,无光泽	无小龙虾风味,有较重的腥味及其他异味的腥味或其他异味	腥味及异味强烈,无小龙虾本身的香气	0~25
组织一般致密,切片小气孔较多	虾红色一般,轻微偏白色	小龙虾风味较淡,稍有腥味或其他异味	虾香气不够浓郁,有腥味及其他异味	26~50
组织较致密,切片小气孔较少	色泽比较均匀,虾红色一般,略有光泽	小龙虾风味适宜,无其他异味	有较明显虾鲜味,无其他异味	51~75
组织致密,切片光滑整齐,无小气孔	色泽均匀,自然的虾红色,有光泽	小龙虾风味明显,无其他异味	虾鲜味浓郁,无其他异味	76~100

(3) 凝胶强度测定:参照文献[13]。

(4) 持水性测定:参照文献[13]。

(5) 蒸煮损失测定:参照文献[14]。

(6) 色泽测定:将样品切成薄片,使用 CR-400 型色差计测量 L^* 、 a^* 和 b^* 值。

(7) 质构测定:测前将样品室温下静置 30 min,采用质构仪进行测量,探头 P/50,测前、测中和测后速度 1 mm/s,压缩比 50%,触发力 0.05 N。

(8) 动态流变性测定:参照文献[14]。

(9) 水分分布测定:将样品切成长宽高不超过 20 mm 的块状,采用核磁共振成像仪选取 CPMG 脉冲序列进行

测定。具体参数设定参照文献[15]。

(10) 蛋白质二级结构测定:参照文献[14]。

(11) 微观结构测定:参照文献[16]。

1.4 数据统计与分析

结果以 2~6 次重复测定的平均值±标准差表示。采用 SPSS 软件进行单因素方差分析。采用 Originpro 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 HPDSP 添加量对虾糜凝胶凝胶强度、持水性及感

官评价的影响 由图 1(a)可知,当 HPDSP 添加量为 2% 时,凝胶强度和持水性均达到最大值,此时凝胶强度为 3.39 N·cm,持水性为 90.57%,显著高于对照组 ($P < 0.05$)。这可能是由于 HPDSP 引入了羟丙基基团,它可以在淀粉吸水时防止淀粉分子之间的交联,让淀粉与水

分子更好地结合,进而使淀粉颗粒的膨胀和水合作用得到改善^[17]。郭璇等^[18]研究发现,HPDSP 等几种变性淀粉在添加量达到 2% 时,虾糜凝胶强度和持水性开始显著升高。王睿纯等^[19]研究发现 HPDSP 和乙酰化双淀粉己二酸酯的添加均可使鲮鱼鱼糜凝胶的持水性显著增加。

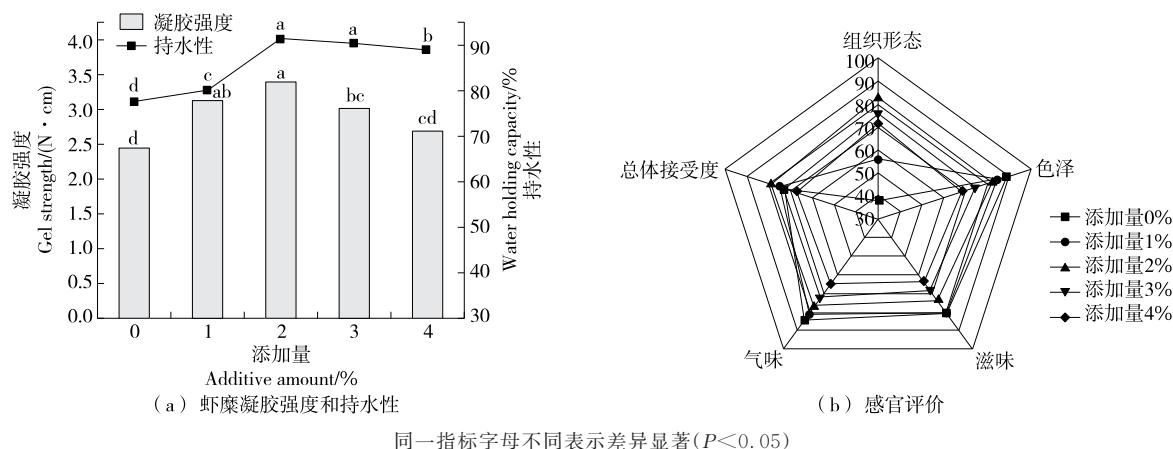


图 1 HPDSP 添加量对小龙虾虾糜凝胶强度、持水性及感官评价的影响

Figure 1 Effects of HPDSP addition on the gel strength, water holding capacity and sensory evaluation of crayfish surimi product

由图 1(b)可知,当 HPDSP 添加量为 2%,此时的总体接受度达最高值 79.15 分,显著高于对照组 ($P < 0.05$)。HPDSP 添加量为 1%~3% 时,持水性和总体接受度评分显著高于其他组 ($P < 0.05$),说明在此添加量下的虾糜凝胶具有更好的保水能力,感官评分也更高。

综上,HPDSP 添加量宜选择 2% 左右。

2.1.2 SPI 添加量对虾糜凝胶凝胶强度、持水性及感官评价的影响 由图 2(a)可知,添加了 SPI 组与未添加 SPI 组

相比,凝胶强度和持水性均显著提高 ($P < 0.05$);SPI 添加量与凝胶强度成正比,在添加量达到 7% 时趋于稳定;持水性在 7% 时达到最大值。SPI 本身具有良好的吸附、膨胀和热变性形成凝胶的能力,因此在凝胶基质中添加 SPI 后,蛋白分子会以物理填充的方式存在于凝胶网络中,从而增强凝胶结构^[20]。

由图 2(b)可知,随着 SPI 添加量的增加,感官评分先升高后降低;SPI 添加量为 5% 时,总体接受度最高,添加

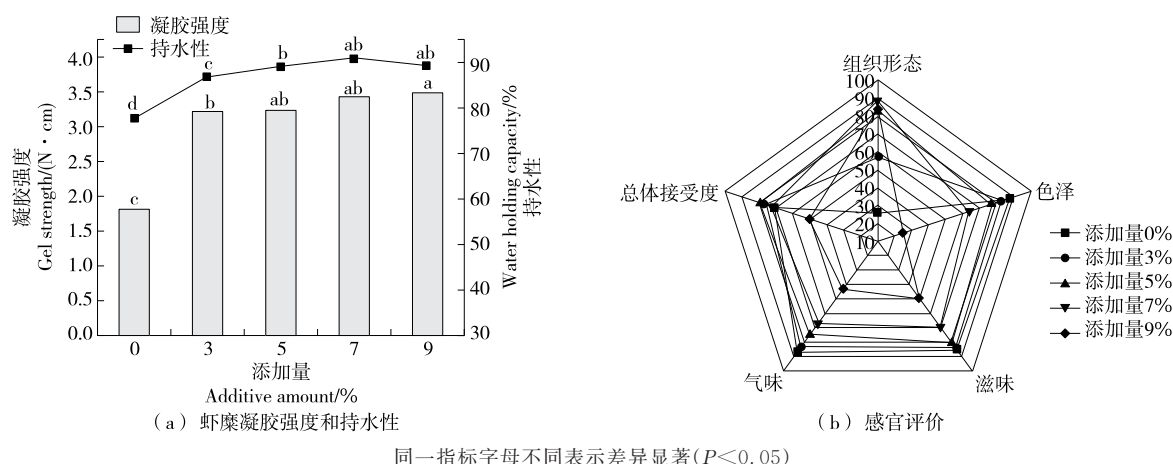


图 2 SPI 添加量对小龙虾虾糜凝胶强度、持水性及感官评价的影响

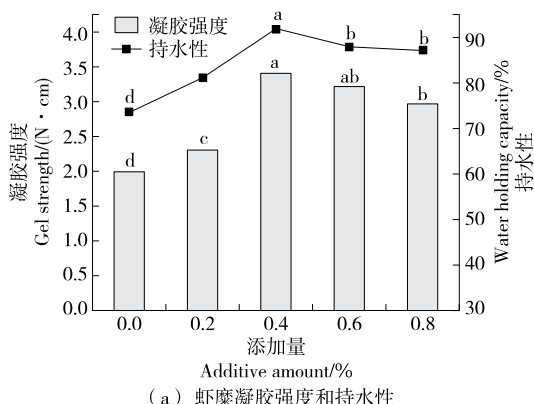
Figure 2 Effects of SPI addition on the gel strength, water holding capacity and sensory evaluation of crayfish surimi product

量为9%时,总体接受度显著降低($P<0.05$)。其中,当SPI添加量为3%~7%时,虾糜凝胶的总体接受度高于其他组($P<0.05$),在此添加范围内,虾糜凝胶强度较高,质地紧密,口感较好,色泽鲜艳明亮,小龙虾风味适宜,大众接受度较高;当添加量超过7%后,虾糜凝胶的总体可接受度降低,与王冬妮等^[21]和张晓慧等^[15]的研究结果一致。这主要由于SPI添加量过多会出现豆腥味,掩盖住了虾糜凝胶本身所具有的鲜美虾味,同时SPI自身也具有色泽,当其添加量超出一定范围后也会给虾糜凝胶的色泽带来

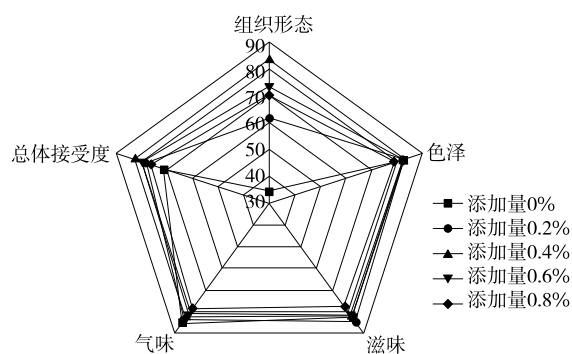
负面影响。

综上,SPI添加量宜选择5%左右。

2.1.3 TGase添加量对虾糜凝胶凝胶强度、持水性及感官评价的影响 由图3(a)可知,持水性在添加量为0.4%时达到最大值,为91.54%,与其他组差异显著($P<0.05$);此时凝胶强度也为最大值(3.41 N·cm)。添加TGase能够有效地催化虾鱼蛋白分子间的交联,形成更加致密的空间网状结构,这种结构有助于提高复合小龙虾虾糜的质构特性。



(a) 虾糜凝胶强度和持水性



(b) 感官评价

同一指标字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图3 TGase添加量对小龙虾虾糜凝胶强度、持水性及感官评价的影响

Figure 3 Effects of TGase addition on the gel strength, water holding capacity and sensory evaluation of crayfish surimi product

由图3(b)可知,随着TGase添加量的增加,虾糜凝胶的色泽和气味不会发生明显改变,评分比较接近,但在组织状态和总体接受度方面呈先升高后降低的趋势,这可能是由于过量的TGase使凝胶太脆并降低弹性,产生负面的影响。

综上,TGase添加量宜选择0.4%左右。

2.2 正交试验

以凝胶强度和持水性为评价体系,权重均为5,因素水平见表2,试验方案及结果见表3。

由表3直观分析,得到小龙虾虾糜凝胶的最优组合为A₂B₃C₁,综合评分为7.27分;根据极差分析计算,得到小龙虾虾糜凝胶最优组合为A₂B₃C₃。由于二者不一致,需进行验证实验。经3次验证,在HPDSP添加量为2%,

SPI添加量为7%,TGase添加量为0.6%的条件下,虾糜凝胶强度为(4.11±0.26) N·cm,持水性为92.02%,优于直观分析组A₂B₃C₁的凝胶强度[(3.62±0.62) N·cm]和持水性(90.07%)。

2.3 外源添加剂对小龙虾虾糜凝胶特性的影响及协同效应

2.3.1 凝胶强度 如图4所示,与对照组相比,添加不同外源物质的虾糜凝胶强度显著增加,HST组的凝胶强度最高($P<0.05$),可能是由于HPDSP、SPI、TGase三者进行组合后产生了提高虾糜凝胶强度的协同作用。HPDSP中存在的羟丙基催化分子间氢键的形成;SPI分子间有大量的二硫键,加热形成凝胶时,这些二硫键填充了虾糜凝胶的三维网状结构从而增强其凝胶性^[22],TGase对内源酶诱导的蛋白水解有抑制作用^[23]。因此,HST组的虾糜蛋白间交联度更高,结构更致密,凝胶强度也更大。该结果表明,三者的结合可有效提高虾糜凝胶的凝胶强度。

2.3.2 质构 如表4所示,与对照组样品相比,SPI、TGase和HST组鱼糜凝胶的硬度、弹性、胶黏性、内聚性和回复性都显著增加($P<0.05$),对照组与添加HPDSP组的弹性和内聚性差异不显著($P>0.05$),且HST组弹性、内聚性、胶黏性和回复性参数都最高。这与HST组具

表2 不同外源添加物的正交试验因素水平表

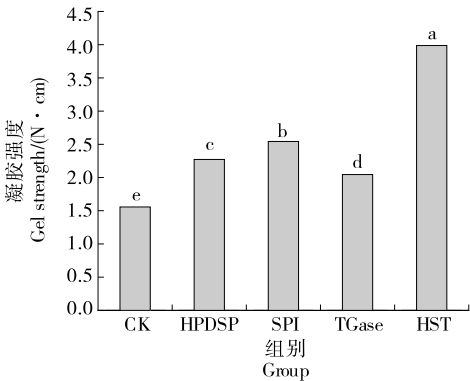
Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	A HPDSP 添加量/%	B SPI 添加量/%	C TGase 添加量/%
1	1	3	0.2
2	2	5	0.4
3	3	7	0.6

表 3 虾糜凝胶制品特性正交试验方案及结果

Table 3 Orthogonal experiment scheme and result analysis of crayfish surimi product

试验号	A	B	C	凝胶强度/ (N·cm)	持水性/ %	凝胶强度 隶属度	持水性 隶属度	综合评分
1	1	1	1	2.79	87.70	0.12	0.18	1.46
2	1	2	2	3.88	88.06	0.83	0.21	5.21
3	1	3	3	3.51	89.19	0.58	0.34	4.59
4	2	1	2	2.88	89.30	0.17	0.35	2.60
5	2	2	3	3.96	91.20	0.88	0.55	7.15
6	2	3	1	4.15	90.30	1.00	0.45	7.27
7	3	1	3	2.62	95.40	0.00	1.00	5.00
8	3	2	1	3.57	86.05	0.62	0.00	3.11
9	3	3	2	3.39	88.20	0.51	0.23	3.68
K_1	11.26	9.06	11.84					
K_2	17.02	15.46	11.49					
K_3	11.79	15.55	16.74					
R	5.76	6.49	5.24					



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 4 外源添加剂对虾糜制品凝胶强度的影响

Figure 4 Effects of different exogenous additives on gel strength of crayfish surimi product

有最高的凝胶强度和持水性保持一致。添加变性淀粉可以使凝胶产生更致密的网络结构并改善虾糜凝胶的质构特性。SPI使虾糜中肌原纤维蛋白分子内的相互作用更

紧密,加速了SPI与肌原纤维蛋白的结合,进而提高了虾糜的质构特性^[24]。TGase可以催化虾糜中肌原纤维蛋白进行交联,形成更紧密的凝胶网络结构,使虾糜凝胶获得更优的质构特性^[25]。

2.3.3 持水性和蒸煮损失 由图 5(a)可知,加入外源添加剂的 4 组持水性较对照组均显著升高($P<0.05$);其中 HST 组最高,达到 89.73%,但与 SPI 组差异不显著($P>0.05$)。对照组的持水性低可能是由于小龙虾虾糜自身的内源酶活性高,形成凝胶的能力差,无法较好地锁住虾糜凝胶网络中的水分。HST 组持水性最高,同时,该组凝胶强度也最好,3 种外源添加剂促使蛋白与蛋白间更好地交联,凝胶网络更致密,水分难以析出。

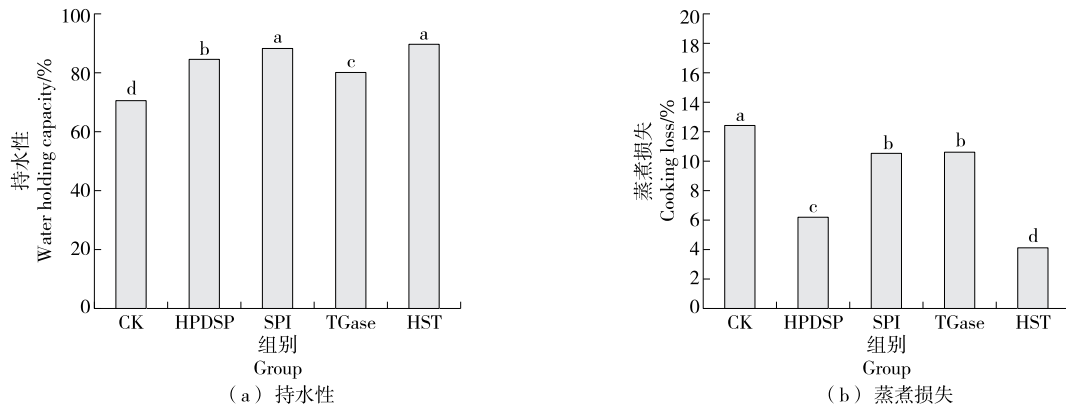
蒸煮损失与凝胶结构和水结合能力有关,是决定最终质量和产量的重要参数。水分流失是虾糜凝胶产生蒸煮损失的主要原因。蒸煮损失越小,说明水分流失越少,由图 5(b)可知,HST 组蒸煮损失显著低于其他 4 组($P<0.05$),该组的样品凝胶持水性也就越好,说明 3 种添加剂对降低虾糜凝胶的蒸煮损失具有协同作用。

表 4 外源添加剂对虾糜制品凝胶质构的影响[†]

Table 4 Effects of different exogenous additives on the structure of crayfish surimi product

组别	硬度/N	弹性/mm	内聚性/mJ	胶黏性/N	咀嚼性/N	回复性
CK	21.37±2.86 ^d	0.89±0.01 ^b	0.58±0.04 ^c	12.32±1.76 ^d	10.97±1.54 ^d	0.31±0.03 ^d
HPDSP	28.69±0.34 ^c	0.90±0.01 ^{ab}	0.68±0.02 ^b	19.39±0.62 ^c	17.42±0.54 ^c	0.36±0.01 ^c
SPI	35.19±2.49 ^b	0.90±0.01 ^{ab}	0.70±0.11 ^{ab}	24.48±4.46 ^b	21.98±4.18 ^b	0.41±0.07 ^{bc}
TGase	28.10±3.77 ^c	0.91±0.01 ^{ab}	0.77±0.01 ^a	21.62±2.95 ^{bc}	19.65±2.66 ^{bc}	0.45±0.01 ^{ab}
HST	42.81±2.49 ^a	0.91±0.01 ^{ab}	0.77±0.02 ^a	32.79±2.38 ^a	29.83±2.22 ^a	0.46±0.01 ^a

[†] 同一指标字母不同表示差异显著($P<0.05$)。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图5 外源添加剂对虾糜制品凝胶持水性及蒸煮损失的影响

Figure 5 Effects of different exogenous additives on water holding capacity and cooking loss of crayfish surimi product

2.3.4 色泽 虾糜与虾糜制品的色泽与品质息息相关, 虾糜凝胶的色泽在很大程度上取决于外源添加剂的种类和添加量。表5列出了添加不同添加物后虾糜 L^* 、 a^* 、 b^* 值的变化。HPDSP、TGase和HST的加入会使虾糜凝胶的 a^* 值和 b^* 值升高($P < 0.05$), L^* 值变化不显著($P > 0.05$); SPI自身具有淡黄色, 所以会对虾糜凝胶的色泽带来负面影响, 造成 L^* 、 a^* 值降低, b^* 值升高; 与对照组相比, HPDSP、SPI、TGase和HST的添加增加了光散射从而使虾糜的 a^* 、 b^* 值显著改变($P < 0.05$), 但对 L^* 值的影响不显著($P > 0.05$)。总体而言, 复配添加剂可以减轻因单一添加剂加入量过多导致虾糜色泽下降带来的负面影响, 提高消费者对虾糜色泽接受度。

表5 外源添加剂对虾糜制品凝胶色泽的影响[†]

Table 5 Effects of different exogenous additives on color of crayfish surimi product

组别	L^*	a^*	b^*
CK	78.62±0.47 ^{ab}	3.85±0.06 ^b	-0.90±0.12 ^c
HPDSP	78.42±0.10 ^{ab}	4.87±0.05 ^a	0.75±0.14 ^b
SPI	71.35±0.95 ^c	3.29±0.01 ^c	5.54±0.21 ^a
TGase	79.39±1.51 ^a	4.85±0.23 ^a	0.76±0.02 ^b
HST	76.95±0.01 ^b	2.05±0.07 ^d	5.26±0.21 ^a

[†] 同一指标字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3.5 流变性 如图6所示, 温度从20℃增加到40℃的过程中各组 G' 值逐渐降低, 这可能与小龙虾虾糜自溶酶降解导致肌纤维蛋白尾部膨胀以及蛋白网络和氢键在加热过程中被破坏有关^[26]。随着温度的进一步升高(50~90℃), G' 值迅速升高, 这是肌球蛋白交联的表现, 即弹性凝胶的生成过程。与对照组相比, 添加HPDSP、SPI、TGase和HST组虾糜凝胶的 G' 值均较高, 说明加入添加

剂后虾糜凝胶的网络更加牢固; 所有试验组中, HST组的 G' 值最高, 说明该组凝胶形成能力更强, 可以推测3种添加剂与虾糜蛋白之间具有协同作用, 这与该组凝胶强度最高相互印证。熊泽语等^[27]研究发现, 吸水膨胀后的SPI和淀粉通过深入地压缩凝胶基质, 可以有效提升凝胶的 G' , 同时增强凝胶网络结构的复杂性。

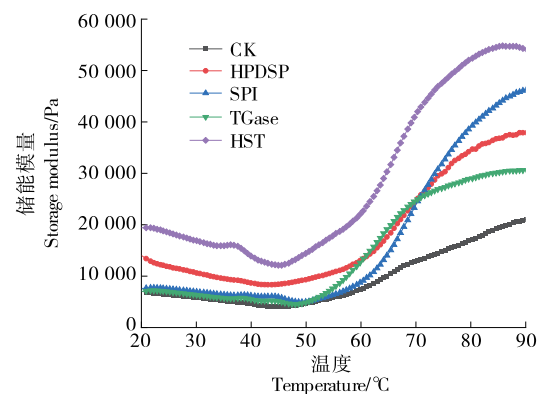


图6 外源添加剂对虾糜制品凝胶流变性的影响

Figure 6 Effects of different exogenous additives on rheological properties of crayfish surimi product

2.3.6 水分分布 由图7可知, 所有试验组中, 不易流动水所占的面积最大, 占总水量的83%以上, 在虾糜样品中添加单一的外源添加剂和复配物后凝胶体系的不易流动水含量均有所增多; 其中, HPDSP组自由水含量较对照组显著增加($P < 0.05$), 这可能是由于HPDSP中引入了大量的亲水基团——羟丙基基团, 当淀粉开始吸水时, 能提高淀粉与氢键的结合能力, 进一步增强淀粉颗粒的溶胀性及与蛋白质水合的作用。同时, HST组虾糜的凝胶性增强, 有更多水分子被蛋白质束缚, 不易流动水相对含量也最高, 达到了91%, 与其他组具有显著性差异($P <$

0.05)。有研究^[28]表明,样品中不易流动水的相对含量与持水性往往呈正相关,这与 HST 组具有最高持水性和不易流动水的相对含量结果相印证。

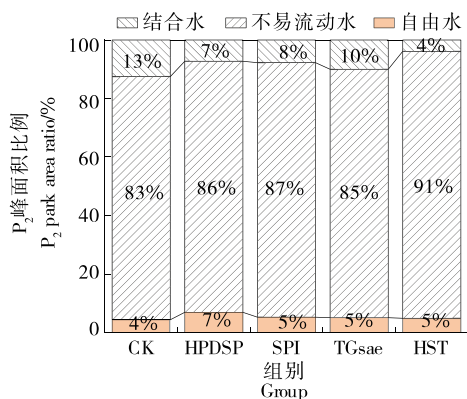


图7 外源添加剂对虾糜凝胶制品弛豫时间 T_2 峰面积比例的影响

Figure 7 Effects of different exogenous additives on the relaxation time T_2 areas proportion of surimi product

2.3.7 蛋白质二级结构 蛋白质二级结构变化如图8所示。对照组与 HPDSP 组蛋白质无规卷曲结构差异不显著 ($P>0.05$),说明添加变性淀粉对虾糜蛋白构象影响不大。但与对照组相比,单一添加剂组及复配组的 α -螺旋结构相对含量都显著降低 ($P<0.05$), β -折叠和 β -转角结构相对含量显著升高 ($P<0.05$)。结果表明,外源添加剂的加入改变了小龙虾虾糜凝胶的蛋白构象,促进了蛋白质分子间相互作用。Lin 等^[29]研究表明, α -螺旋相对含量的降低和 β -折叠相对含量升高会提升鱼糜的凝胶及质构特性, β -折叠的稳定性高于 α -螺旋,所以 β -折叠含量较高的凝胶性能要优于 α -螺旋含量高的。由图8可以看出,

HST 组的 α -螺旋相对含量最少,与对照组相比相对含量降低了 21.05%,这也与该组具有最好的凝胶性能相对应,表明三者组合更显著地改变了虾糜凝胶的蛋白质构象。

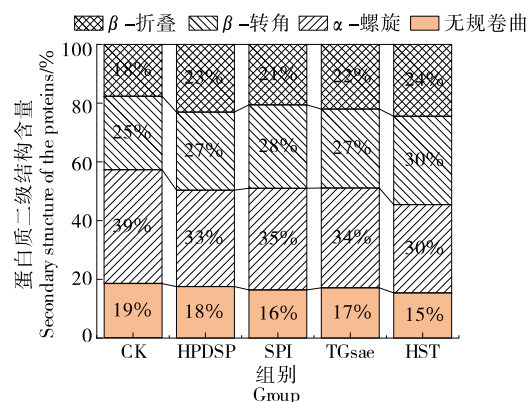


图8 外源添加剂对虾糜凝胶制品蛋白质二级结构的影响

Figure 8 Effects of different exogenous additives on the protein secondary structure of surimi product

由图9可知,对照组的虾糜凝胶网络结构疏松,孔洞较多、大且分布不均,这也是虾糜凝胶在未添加外源添加剂的情况下凝胶强度和持水性较差的原因。加入 HPDSP、SPI、TGase 的虾糜网络结构变得比较均匀致密,但有一些孔洞和凹槽。HST 组的虾糜凝胶网络结构最致密有序,这与该组最高的凝胶强度和持水性息息相关。微观结构结果表明,HPDSP、SPI 或 TGase 的加入可改善虾糜凝胶的凝胶性能;此外,当三者结合使用时,效果更明显。这可能是外源添加剂通过疏水作用与蛋白质聚集形成分子间交联,在加热过程中形成了二硫键,从而导致凝胶网络可以锁住更多的水,从而提高了持水性与凝胶强度^[30]。

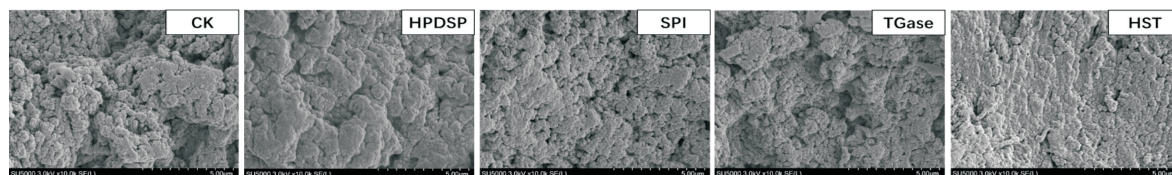


图9 外源添加剂对虾糜凝胶制品微观结构的影响

Figure 9 Effects of different exogenous additives on the microstructure of surimi product

3 结论

探究了3种外源添加剂(羟丙基二淀粉磷酸酯、大豆分离蛋白和谷氨酰胺转氨酶)对小龙虾虾糜制品凝胶特性的影响,确定了3种外源添加剂的最优添加量,并探究了三者协同作用的机理。结果表明,羟丙基二淀粉磷酸酯、大豆分离蛋白和谷氨酰胺转氨酶添加量分别为2%,

7%,0.6%时对小龙虾虾糜凝胶品质有明显改善,三者的单独及联合使用对小龙虾虾糜的凝胶性质、质构、持水性、蛋白质二级结构等有显著影响 ($P<0.05$)。三者联用改变了小龙虾虾糜凝胶的蛋白质二级结构,诱导虾糜蛋白构象从 α -螺旋向 β -折叠和 β -转角结构转变,促进了疏水基团暴露,这种结构变化使虾糜凝胶的储能模量 G' 值

增大,从而增强了虾糜凝胶特性,微观结构显示,添加HST组的样品具有最致密有序的凝胶网络结构,进而增加了持水性。说明三者复配可以更好地改善小龙虾鱼糜制品的凝胶特性与保水能力,3种外源添加剂的联合使用对小龙虾鱼糜制品凝胶的改善具有协同作用。

参考文献

- [1] MONICA T, CONTE M, TESTAI L, et al. Supplementation of enriched polyunsaturated fatty acids and CLA cheese on high fat diet: effects on lipid metabolism and fat profile[J]. *Foods*, 2022, 3(11): 398.
- [2] 于秀娟, 郝向举, 杨霖坤, 等. 中国小龙虾产业发展报告(2023) [J]. *中国水产*, 2023(7): 26-31.
YU X J, HAO X J, YANG L K, et al. Report on development of crayfish industry in China (2023) [J]. *China Fisheries*, 2023(7): 26-31.
- [3] 杨祺福, 徐文思, 危纳强, 等. 小龙虾壳酶解液制备及其在小龙虾丸加工中的应用[J]. *食品与机械*, 2023, 39(4): 170-177.
YANG Q F, XU W S, WEI N Q, et al. Preparation of enzymatic hydrolysate from crayfish shells and its application in the processing of crayfish whole balls[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(4): 170-177.
- [4] 李兴华, 黄韬睿, 王鑫, 等. 小龙虾肉添加对牛肉丸品质影响研究[J]. *中国调味品*, 2019, 44(6): 73-76.
LI X H, HUANG T R, WANG X, et al. Study on the effect of crayfish addition on the quality of beef meatballs[J]. *Chinese Condiment*, 2019, 44(6): 73-76.
- [5] WANG L, SHI L, JIAO C H, et al. Effect of ultrasound combined with ozone water pretreatment on the bacterial communities and the physicochemical properties of red swamp crayfish meat (*Procambarus clarkii*) [J]. *Food and Bioprocess Technology: An International Journal*, 2020, 13(10): 1 778-1 790.
- [6] MI H B, WANG C, SU Q, et al. The effect of modified starches on the gel properties and protein conformation of *Nemipterus virgatus* surimi[J]. *Journal of Texture Studies*, 2019, 50(6): 571-581.
- [7] SAROAT R, SOOTTAWAT B. Whey protein concentrate: autolysis inhibition and effects on the gel properties of surimi prepared from tropical fish[J]. *Food Chemistry*, 2007, 106(3): 1 077-1 084.
- [8] 马静蓉, 杨贤庆, 马海霞, 等. 谷氨酰胺转氨酶及辅料对南海鳗乌贼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(9): 29-33.
MA J R, YANG X Q, MA H X, et al. Effects of transglutaminase and additive agents on gel properties of Ryukyu squid surimi[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2015, 41(9): 29-33.
- [9] 鲍佳彤, 宁云霞, 杨淇越, 等. TGase和Ca²⁺联合作用对未经漂洗的革胡子鲶鱼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 Ca²⁺ on gel properties of unwashed *clarias gariepinus* surimi[J]. *Food Science*, 2020, 41(14): 50-57.
- [10] LIANG F, LIN L, HE T H, et al. Effect of transglutaminase on gel properties of surimi and precocious Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) meat[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105261.
- [11] MI H B, LI Y, WANG C, et al. The interaction of starch-gums and their effect on gel properties and protein conformation of silver carp surimi[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106290.
- [12] ZHANG B, GUO X, LIN J X, et al. Effect and synergy of different exogenous additives on gel properties of the mixed shrimp surimi (Antarctic krill and white shrimp) [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(8): 5 338-5 348.
- [13] 李慧. 虾糜凝胶品质的研究及应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 11-12.
LI H. Study and application on the quality of shrimp surimi gel [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022: 11-12.
- [14] 张奇秀, 郭全友, 陈婷婷, 等. 3种鱿鱼鱼糜凝胶品质比较[J]. *食品与机械*, 2023, 39(2): 31-36.
ZHANG Q X, GUO Q Y, CHEN T T, et al. Comparison of the quality of surimi gels from three squid species[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(2): 31-36.
- [15] 张晓慧, 郭全友, 郑尧, 等. 变性淀粉协同非肌肉蛋白对鱿鱼鱼糜制品凝胶特性及其蛋白构象的影响[J]. *食品科学*, 2023, 40(20): 43-52.
ZHANG X H, GUO Q Y, ZHENG Y, et al. Effects of combined addition of modified starch and non-muscle protein on gel properties and protein conformation of squid surimi products[J]. *Food Science*, 2023, 40(20): 43-52.
- [16] 熊泽语, 谢晨, 陈百科, 等. 海藻糖复配蔗糖和山梨醇对未漂洗大黄鱼鱼糜的抗冻效果研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(4): 109-115.
XIONG Z Y, XIE C, CHEN B K, et al. The antifreeze effect of trehalose compounded with sucrose and sorbitol on unrinsed large yellow croaker surimi[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(4): 109-115.
- [17] SHEN Y, ZHANG N, XU Y R, et al. Physicochemical properties of hydroxypropylated and cross-linked rice starches differential in amylose content[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 128: 775-781.
- [18] 郭璇, 张彪, 韩佳彤, 等. 淀粉对南极磷虾复合虾糜凝胶品质

- 的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 215-222.
- GUO X, ZHANG B, HAN J T, et al. Study on effect of starch on quality of Antarctic krill (*Euphausia superba*) mixed shrimp surimi gel[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(5): 215-222.
- [19] 王睿纯, 李义, 林松毅, 等. 不同类型变性淀粉对鲑鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 85-92.
- WANG R C, LI Y, LIN S Y, et al. Effects of different types of modified starch on gel properties of spanish mackerel surimi [J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(20): 85-92.
- [20] KANG Z, CHEN F, MA H. Effect of pre-emulsified soy oil with soy protein isolate in frankfurters: a physical-chemical and Raman spectroscopy study[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 74: 465-471.
- [21] 王冬妮, 范馨茹, 祁立波, 等. 淀粉和蛋白类添加剂对鲑鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 中国食品学报, 2018, 18(4): 65-71.
- WANG D N, FAN X R, QI L B, et al. Effect of starch and non-muscle protein on gel properties of squid (*Illex argentinus*) surimi[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(4): 65-71.
- [22] FENG J, XIONG Y L. Interaction of myofibrillar and preheated soy proteins[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(8): 2 851-2 856.
- [23] ZHANG N N, YANG N, YU W Y, et al. Effects of microbial transglutaminase on textural, water distribution and microstructure of frozen-stored longtail southern cod (*Patagonotothen ramsayi*) fish mince gel[J]. Journal of Texture Studies, 2021, 53(6): 844-853.
- [24] LI Y P, KANG Z L, VALERII S, et al. Effects of soy protein isolate on gel properties and water holding capacity of low-salt pork myofibrillar protein under high pressure processing[J]. Meat Science, 2021, 176: 108471.
- [25] LI J L, MUNIR S, YU X Y, et al. Double-crosslinked effect of TGase and EGCG on myofibrillar proteins gel based on physicochemical properties and molecular docking[J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128655.
- [26] HUANG J L, YE B B, WANG W, et al. Incorporation effect of inulin and microbial transglutaminase on the gel properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(1): 1-11.
- [27] 熊泽语, 谢晨, 陈百科, 等. 不同添加剂对未漂洗大黄鱼鱼糜品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 151-158.
- XIONG Z Y, XIE C, CHEN B K, et al. Effects of different additives on the quality of non-rinsed large yellow croaker surimi[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(10): 151-158.
- [28] MA X S, YI S M, YU Y M, et al. Changes in gel properties and water properties of *Nemipterus virgatus* surimi gel induced by high-pressure processing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(2): 377-384.
- [29] LIN W L, ZENG Q X, ZHU Z W, et al. Relation between protein characteristics and tpa texture characteristics of crisp grass carp (*Ctenopharyngodon idellus* c. et v) and grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. Journal of Texture Studies, 2012, 43(1): 1-11.
- [30] HU Y Q, LIU W J, YUAN C H, et al. Enhancement of the gelation properties of hairtail (*Trichiurus haumela*) muscle protein with curdlan and transglutaminase[J]. Food Chemistry, 2015, 176: 115-122.

信息窗

《食品与机械》被 Scopus 数据库正式收录

2023 年 10 月以来,《食品与机械》依托“湖南省培育世界一流湘版科技期刊建设工程”项目,着力提升期刊学术质量,引领学科发展,助力经济建设,期刊的国际学术影响力显著增强。近日接获通知,《食品与机械》已顺利通过 Scopus 数据库内容遴选与审查委员会(Content Selection & Advisory Board, CSAB)的多重评审,被 Scopus 数据库正式收录!

Scopus 是目前全球规模最大的文摘和引文数据库,由 Elsevier 公司于 2004 年创立。该数据库收录内容全面、涉及学科广泛,且具有严格的评审标准。涵盖自

然科学、技术、工程、医学、社会科学、艺术与人文等学科。Scopus 数据库功能强大,其数据在世界大学排行榜、中国高被引学者榜单、高校学科评估等得到了广泛应用。

本次收录是继本刊被 CSCD、DOAJ、EBSCO 等国内外权威数据库收录后,再度被全球顶尖学术数据库收录,这标志着《食品与机械》的学术水平和出版质量得到了国际学术界和出版界的认可,对期刊扩大国际影响力具有重要意义。

(《食品与机械》编辑部)