

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.05.037

# 类 PSE 禽肉(肉鸡、火鸡)加工特性及蛋白质 功能性改善研究进展

Research progress on the improvement of processing properties and protein functionalities of PSE-like poultry meat (broiler and turkey)

刘爽<sup>1,2</sup> 李翔<sup>3</sup> 唐华丽<sup>4</sup>

LIU Shuang<sup>1,2</sup> LI Xiang<sup>3</sup> TANG Hua-li<sup>4</sup>

(1. 重庆市渝东北特色生物资源开发利用工程技术研究中心, 重庆 404100; 2. 重庆三峡学院, 重庆 404100; 3. 重庆三峡职业学院, 重庆 404155; 4. 重庆三峡学院生物与食品工程学院, 重庆 404100)

(1. *Engineering Technology Research Center of Characteristic Biological Resources in Northeast of Chongqing, Chongqing 404100, China*; 2. *Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China*; 3. *Chongqing Three Gorges Vocational College, Chongqing 404155, China*; 4. *College of Biology and Food Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China*)

**摘要:**综述了通过添加非肉成分(多糖类、蛋白类、油脂类、盐类)改善类 PSE 禽肉加工特性的方法,以及采用高压处理、高强度超声波处理、脉冲电场处理、非酶糖基化、谷氨酰胺转氨酶酶促糖基化、酸碱处理等改善类 PSE 禽肉蛋白质功能性质的技术手段,并对其未来发展方向进行了展望。

**关键词:**类 PSE 禽肉;加工特性;蛋白质功能性质;非肉成分;酸碱处理

**Abstract:** Summarized the lower processing properties of PSE like poultry meat by adding non meat ingredients including starches, carrageenans, soy protein concentrates, egg albumin, collagen, oils, salt and phosphate. The technologies which were used to improve the protein functional properties of PSE-like poultry meat were also discussed. The technologies included high pressure processing, high-intensity ultrasound processing, pulsed electric field treatment, nonenzymatic glycation with glucosamine, enzymatic glycosylation catalyzed by transglutaminase, and isoelectric solubilization/precipitation processing. And the development direction of these methods was prospected.

**Keywords:** PSE-like poultry meat; processing property; protein functionality; non-meat ingredients; isoelectric solubilization/

precipitation processing

目前,全球禽肉生产迅速增长<sup>[1]</sup>。其中,鸡肉以营养丰富,更适合人体营养需求和消化率高等优势,占家禽市场需求量的 90% 以上<sup>[2]</sup>。据 FAO<sup>[1]</sup> 数据显示,中国已成为继美国、巴西之后的世界第三大鸡肉生产国。然而,在生产中因基因选育等促使肌肉快速生长,鸡肉品质下降。其中,亮度值( $L^*$ )高、保水性低、凝胶特性差的类 PSE 禽肉(肉鸡、火鸡)的出现每年都会给世界各国带来严重的经济损失和资源浪费<sup>[3-5]</sup>。据报道<sup>[6-7]</sup>,中国类 PSE 鸡胸肉发生率可达 20% 以上。

类 PSE 禽肉主要发生在胸肌部位,基因特性、宰前应激和宰后高温环境均能导致类 PSE 禽肉的产生<sup>[8]</sup>。现阶段,尚未鉴定出控制类 PSE 禽肉发生的标记基因,大多通过营养喂养、运输管理、装卸方式、屠宰方法、宰后胴体冷却等措施降低类 PSE 禽肉的发生率<sup>[9]</sup>。但据调查研究<sup>[4]</sup>显示,至少有 5% 的发生率是任一时刻都存在的。在不考虑发病率和原因的情况下,如何利用技术手段最大程度降低类 PSE 禽肉产生的不良影响是研究者和加工企业最为关心的问题。文章拟对近 20 年国内外研究改善类 PSE 禽肉加工特性及蛋白质功能性质的文献报道进行综述,以期为提高类 PSE 禽肉的利用率和加工性能提供理论依据。

## 1 改善类 PSE 禽肉加工特性的方法

### 1.1 多糖类成分

添加多糖类成分有助于改善类 PSE 禽肉制品的质构

**基金项目:**重庆市教委科学技术研究项目(编号:KJ1601008);重庆市渝东北特色生物资源开发利用工程技术研究中心开放基金一般项目(编号:校 2020060)

**作者简介:**刘爽(1987—),女,重庆三峡学院助教,硕士。  
E-mail: a4028@163.com

**收稿日期:**2020-12-03

和保水性。Zhang 等<sup>[10]</sup>研究发现,添加马铃薯淀粉(普通和改性)、木薯淀粉(普通和改性)均可降低熟制类 PSE 鸡胸肉糜的蒸煮损失,其中改性木薯淀粉效果最好。这是因为淀粉颗粒加热后吸水糊化膨胀会均匀分布于蛋白质基质中,黏度增大,使凝胶网络结构变得更加紧密,保水性增强。其中,可能是由于木薯淀粉的改性作用以及本身颗粒较小,与蛋白质基质接触面积大,所以处理效果最好。其流变学结果显示添加淀粉的正常鸡胸肉糜的储能模量( $G'$ )均显著高于对照组,说明肉和淀粉间具有协同效应。Daigle 等<sup>[11]</sup>研究发现,与未添加  $\kappa$ -卡拉胶的类 PSE 火鸡胸肉处理组相比,添加 0.3%  $\kappa$ -卡拉胶的类 PSE 火鸡胸肉斩拌型产品的贮存损失显著降低( $P < 0.05$ ),但蒸煮损失、压榨汁液损失和蛋白结合无显著变化( $P > 0.05$ )。

### 1.2 蛋白类成分

蛋白类成分作为非肉蛋白质,蛋白含量高,能够提高类 PSE 禽肉制品的产率、凝胶性和保水性等。Daigle 等<sup>[11]</sup>研究发现,添加 1.5% 大豆浓缩蛋白的类 PSE 火鸡胸肉斩拌型产品的蒸煮损失和贮存损失显著降低( $P < 0.05$ ),蛋白结合强度极显著增大( $P < 0.005$ ),且与正常肉组在消费者接受性上无显著差异。Ozturk 等<sup>[12]</sup>研究发现,添加 1.0% 和 2.0% 鸡蛋白蛋白的类 PSE 火鸡胸肉斩拌型产品的蛋白含量均显著增大,贮存损失均有效降低。这主要是由于鸡蛋白蛋白具有较高的保水性和肉块结合力。Schilling 等<sup>[13]</sup>研究发现,添加 1.5% 胶原蛋白能显著提高类 PSE 鸡胸肉斩拌型产品的蛋白结合( $P < 0.05$ ),降低蒸煮损失( $P < 0.05$ ),与添加 1.5% 胶原蛋白的正常鸡胸肉处理组无显著差异。这主要是由于胶原蛋白可以与肌原纤维蛋白(MP)相互作用,固定自由水,防止加热和贮存处理造成水分流失<sup>[14]</sup>。这种作用在添加盐的浓度较大,原料肉为 PSE 肉时效果更为明显。

### 1.3 油脂类成分

油脂作为组成肉制品的重要原料之一,以游离或乳化状态分布于蛋白凝胶网络中,有助于减缓蛋白结构热收缩,提高肉制品热稳定性,对肉制品的口感、风味、质构、营养和经济价值均有积极作用。彭晓龙<sup>[15]</sup>研究发现,未添加油脂时,类 PSE 鸡胸肉凝胶微观呈聚集态,表现出较高  $L^*$ 、较低咀嚼性。当花生油添加量为 8%~12% 时,与正常肉处理组相比,类 PSE 鸡胸肉凝胶的  $L^*$ 、保水保油性、硬度、弹性和黏聚性均无显著差异,可明显改善类 PSE 鸡肉凝胶品质。拉曼光谱分析表明油脂可以通过影响类 PSE 鸡胸肉蛋白二级结构和微观环境改善类 PSE 鸡胸肉凝胶品质。

### 1.4 盐类成分

盐和磷酸盐是常用的禽肉腌制添加剂。盐可以增强

禽肉的风味,结合磷酸盐使用时有助于盐溶性蛋白提取至肌肉表面,提高保水性。磷酸盐可以通过提高肌肉 pH、离子强度以及蛋白质结构解折叠,整合与蛋白结合的某些金属离子,解离肌动球蛋白为肌球蛋白和肌动蛋白等作用来提高肌肉与水的结合<sup>[16-17]</sup>。注射和滚揉是禽肉腌制时经常配套使用的两种方法:禽肉生产和加工企业利用注射机向产品中均匀添加盐水,选择注射机时需要考虑针的单位面积数量、粗细、注射压力和传送速度等因素;滚揉具有增强肌肉保水性,提高肌肉风味、多汁性、嫩度和产率等优点。但小块肉体积与表面积比值较高,可以不经注射直接滚揉。目前,国内外学者研究盐和磷酸盐腌制对类 PSE 禽肉品质影响的试验结果存在差异,可能是由于腌制的配方、方法、设备参数、浓度和时间等不同。

Woelfel 等<sup>[18]</sup>在宰后 24 h 分别采用 pH 9 (0.6% NaCl+0.4% STPP)、pH 11 (0.35% NaCl+0.35% STPP-六偏磷酸盐混合物)腌制液滚揉腌制类 PSE 和正常鸡胸肉 30 min。结果显示:pH 9 处理组类 PSE 和正常鸡胸肉的盐吸收率、滴水损失相近,但类 PSE 鸡胸肉的蒸煮损失高于正常鸡胸肉;pH 11 处理组类 PSE 和正常鸡胸肉 pH、蒸煮损失无显著差异。Alvarado 等<sup>[19]</sup>在宰后 3 h 内分别采用质量分数为 7% 的 pH 9 (0.54% NaCl+0.42%  $PO_4$ )、pH 11 (0.54% NaCl+0.42%  $PO_4$ )、pH 12 (0.3 mol/L  $NaHCO_3$ ) 腌制液注射类 PSE 鸡胸肉后滚揉 30 min。结果发现:pH 9 处理组能够降低类 PSE 鸡胸肉的蒸煮损失,改善  $L^*_{24h}$ ; pH 11 处理组能够提高  $pH_{24h}$ ,改善  $L^*_{24h}$  和蒸煮损失;pH 12 处理组能够提高  $pH_{24h}$ ,改善  $L^*_{24h}$ ,但对压榨汁液损失、蒸煮损失无显著影响。说明尸僵前注射高 pH 磷酸盐可以改善类 PSE 鸡胸肉的部分品质。Zhuang 等<sup>[20]</sup>研究发现,宰后 2 h 采用质量分数 20% 腌制液(5% NaCl+3% STPP)滚揉腌制 20 min,能够降低宰后成熟过程中淡白鸡胸肉的  $L^*$ ,抑制正常鸡胸肉  $L^*$  升高。

综上,添加非肉成分在一定程度上能够改善类 PSE 禽肉的加工特性,但不符合天然肉制品的发展趋势。此外,人体摄入过多磷酸盐也会影响体内钙/磷比值,损害肾脏的磷稳态或骨骼钙化系统<sup>[21-22]</sup>。

## 2 改善类 PSE 禽肉蛋白质功能性质的技术手段

### 2.1 高压处理技术

高压处理(HPP)是改善肉制品食用品质与功能特性的一项重要技术。Chan 等<sup>[23]</sup>在 4 °C 条件下将低  $pH_{24h}$  类 PSE 火鸡胸肉(肉糜 89.5%、水 10.0%、食盐 0.5%)分别于 0, 50, 100, 150, 200 MPa 下处理 5 min,当处理压力

为50,100 MPa时,类PSE火鸡胸肉的总蛋白溶解度、MP表面疏水性、自由巯基含量和保水性均显著提高;流变学行为表明类PSE火鸡胸肉在这两种压力作用下能够形成更好的凝胶网络结构。说明50,100 MPa是提高低pH<sub>24h</sub>类PSE鸡胸肉保水性,降低食盐添加量,生产健康肉制品的适宜压力。

## 2.2 高强度超声波技术

高强度超声波(HIU)是指振动频率低(20~100 kHz),单位面积传递能量大(>5 W/cm<sup>2</sup>或10~1000 W/cm<sup>2</sup>)的一种纵向机械波。HIU因具备安全、节能、无污染、处理时间短等优点而备受关注,其可以通过修饰蛋白质的分子特征改善蛋白质的结构和功能性质<sup>[24-25]</sup>。

**2.2.1 对蛋白质功能性质的影响** Li等<sup>[26]</sup>研究发现,HIU处理可显著提高类PSE鸡胸肉浆的温度和pH,降低肉浆粒度,使体系变得更加均一。同时,HIU处理改变了类PSE鸡胸肉浆的流变学性质,储能模量(*G'*)和损失模量(*G''*)均显著增加,黏弹性提高,形成的热诱导凝胶强度和保水性也显著提高,且扫描电镜观察到HIU处理的类PSE鸡胸肉浆的凝胶微观网状结构更加均一、紧密。SDS-PAGE结果显示HIU处理降低了类PSE鸡胸肉浆盐溶性蛋白溶出量,引起肌球蛋白变性和聚集。HIU处理可以改变类PSE鸡胸肉浆蛋白的二级结构,显著降低 $\alpha$ -螺旋含量,增加 $\beta$ -折叠、 $\beta$ -转角和无规则卷曲含量,有助于蛋白聚集和凝胶形成。

**2.2.2 对蛋白质功能性质影响的机制** HIU技术的作用机制是依靠空化作用、机械应力、高速剪切等产生的热效应、理化和生化效应来改善类PSE鸡胸肉蛋白质的功能性质<sup>[27]</sup>。HIU产生的高速剪切能够进一步破坏肌原纤维和结缔组织完整性,促进肌原纤维小片化,提高MP提取量,同时类PSE鸡胸肉浆颗粒也会降低,变得更加均一。HIU处理能够产生高活性自由基和氢过氧化物,并与蛋白相互作用,导致肌肉酸性基团含量降低,pH增大,提高蛋白带电能力,增加与水结合的氢键位点。HIU处理的空化效应和机械振动产生的能量会导致类PSE鸡胸肉浆温度升高,温度升高和空化效应产生的气泡破裂力区域也会增加蛋白变性。HIU处理降低类PSE鸡胸肉浆盐溶性蛋白溶解度,增加盐溶性蛋白聚集、变性,促进类PSE肉浆样品蛋白解折叠,增加黏弹性。HIU处理产生的化学效应使类PSE鸡胸肉浆蛋白隐藏的活性基团暴露,改变蛋白结构或加强疏水基团交互作用,修饰蛋白质变性展开。以上这些作用均有助于类PSE鸡胸肉浆形成具有良好强度和保水性的凝胶。

## 2.3 脉冲电场技术

脉冲电场(PEF)是一种非热处理技术,可在几纳秒至

几毫秒的短持续时间内将脉冲电场(0.1~80.0 kV/cm)施加到两电极之间的物料上,具有短时、持续、环保、节能等优点,已被应用至修饰蛋白结构上<sup>[28]</sup>。

Dong等<sup>[1]</sup>研究发现,随着脉冲电场强度和脉冲频率的增加,类PSE鸡胸肉MP的溶解度、表面疏水性和活性巯基含量均稳定增加。这可能是由于疏水性基团和活性巯基的适度暴露有利于蛋白质与水相互作用,提高MP溶解度。但当电场强度超过18 kV/cm时,类PSE鸡胸肉MP溶解度、表面疏水性和活性巯基含量下降。这是由于极化的蛋白质分子之间相互吸引,重新形成的分子聚集体增加所致。PEF处理改变了类PSE鸡胸肉MP的流变学行为,最佳脉冲频率800 Hz时类PSE鸡胸肉MP形成的凝胶弹性较低。PEF处理的类PSE鸡胸肉MP一级结构未改变,而二级结构发生了改变, $\alpha$ -螺旋含量增加, $\beta$ -转角和无规则卷曲含量降低。因此,PEF处理能够改善类PSE鸡胸肉MP理化性质和结构,进一步提高类PSE鸡胸肉的经济价值。

## 2.4 非酶糖基化

蛋白质糖基化是指蛋白质与多糖通过美拉德反应形成共价键,反应实质为蛋白质的 $\epsilon$ -NH<sub>2</sub>与多糖分子上的还原末端羰基之间的反应<sup>[29]</sup>。蛋白质糖基化是一种安全、无危害的蛋白质化学改性方法,已被广泛用于改善肉类蛋白质的功能性质<sup>[30]</sup>。

Bian等<sup>[31]</sup>将正常和类PSE鸡胸肉MP悬浮液(4 mg/mL)与氨基葡萄糖(GlcN)按质量比1:6混合,然后在37℃磷酸盐缓冲液(0.6 mol/L KCl, 20 mmol/L K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>/KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0.02% Na<sub>3</sub>N<sub>3</sub>, pH 7.5)中反应12 h,未处理的正常和类PSE鸡胸肉MP悬浮液于4℃保存,分别作为阳性和阴性对照组。SDS-PAGE结果显示类PSE鸡胸肉MP通过糖基化与GlcN共价交联成功;糖基化处理显著提高了类PSE鸡胸肉MP的凝胶强度、保水性和黏弹性(*P*<0.05),与阳性对照组无显著差异;糖基化处理可以显著提高类PSE鸡胸肉MP的表面疏水性,降低pH值和活性巯基含量(*P*<0.05),表明蛋白质的三级结构发生了变化。由此来说,非酶糖基化是一种潜在的改善类PSE鸡胸肉中MP功能性质的方法。

## 2.5 谷氨酰胺转氨酶促糖基化

近年来,因谷氨酰胺转氨酶(Transglutaminase, EC 2.3.2.13,简称TGase或TG)催化的糖基化反应具有位点特异性、效率高、环境友好、反应条件温和等优点而受到广泛关注,已被应用于修饰多种类型的食品蛋白质<sup>[32]</sup>。TGase可以催化谷氨酰胺残基的 $\gamma$ -羧酰胺基与糖类的一级氨基(如GlcN)之间共价交联。Xu等<sup>[33]</sup>以TGase为生物催化剂,将类PSE鸡胸肉MP接枝到GlcN上,最佳接

枝条件为 37 ℃、pH 7.5 下反应 6 h,  $m_{MP} : m_{GlcN}$  为 1 : 3。二级结构分析结果显示经 GlcN 糖基化处理的类 PSE 鸡胸肉 MP 的  $\alpha$ -螺旋水平降低,  $\beta$ -折叠、 $\beta$ -转角和无规则卷曲水平增加。经 GlcN 糖基化处理后类 PSE 鸡胸肉 MP 的表面疏水性显著降低, 等电点时的溶解度明显改善 ( $P < 0.05$ )。说明 TGase 酶促糖基化处理是提高类 PSE 鸡胸肉 MP 溶解度的一种可行方法。

## 2.6 酸碱处理技术

酸碱处理技术 (pH-shifting method), 又称 ISP 技术 (Isoelectric solubilization/precipitation method), 是一种蛋白提取、加工技术, 适合应用于低值肉类蛋白分离以及劣质蛋白改性方面。ISP 技术的原理主要是基于在酸碱处理过程中蛋白变性、复性中的结构变化<sup>[34]</sup>。研究<sup>[35-37]</sup>表明, 蛋白经极端酸碱条件处理后, 包含大多数疏水性基团的肌球蛋白头部变为“熔融态球体”, 结构变得松散, 内部疏水性残基充分暴露, 蛋白-蛋白分子之间疏水作用增强, 以及巯基氧化生成二硫键, 有助于增强蛋白的凝胶强度。传统 ISP 技术主要包括 3 个步骤: ① 极端 pH 条件下 (通常  $< 3.5$  或  $> 10.5$ ) 溶解蛋白; ② 等电点处回收蛋白; ③ 将分离蛋白调至需要 pH (最终 pH)<sup>[38]</sup>。因此, ISP 技术可能是改善类 PSE 禽肉蛋白功能性质的一种方法。

2.6.1 对蛋白凝胶特性的影响 Zhao 等<sup>[2]</sup>研究发现, 当溶解 pH 为 3.5, 11.0 时, 类 PSE 鸡胸肉 ISP 分离蛋白的凝胶硬度、保水性和白度显著提高 ( $P < 0.05$ )。Zhao 等<sup>[39]</sup>结果显示: 当回收 pH 为 6.2 时, 类 PSE 鸡胸肉 ISP 分离蛋白的凝胶硬度和蒸煮损失均显著高于 pH 5.5 和其他未经 ISP 处理组 ( $P < 0.05$ ); 最终 pH 为 7.0 时能显著降低类 PSE 鸡胸肉 ISP 分离蛋白 (特别是回收 pH 为 6.2 时) 凝胶的蒸煮损失 ( $P < 0.05$ )。动态流变学结果表明类 PSE 鸡胸肉 ISP 分离蛋白热诱导凝胶的形成机制不同于未经 ISP 处理组, 其形成的凝胶硬度大, 但弹性小。

2.6.2 对蛋白氧化稳定性的影响 Zhao 等<sup>[40]</sup>利用  $Fe^{3+}/H_2O_2$  体系模拟类 PSE 鸡胸肉 ISP 分离蛋白体外氧化稳定性试验, 发现经酸 (溶解 pH 为 3.5)、碱 (溶解 pH 为 11.0) 处理均能有效降低类 PSE 鸡胸肉蛋白中脂肪、色素、肌红蛋白 3 种促氧化成分的含量。经碱处理的类 PSE 鸡胸肉蛋白氧化前、后弹性凝胶的形成能力均好于对照组。同时提出了 ISP 分离蛋白在  $Fe^{3+}/H_2O_2$  体系中氧化稳定性提高主要有两方面原因: ① 处理组含硫蛋白更易氧化生成二硫键。蛋白展开过程也诱发了严重的蛋白聚集, 蛋白聚集在水溶液中的分散程度较低, 不利于氧化反应发生; ② ISP 分离蛋白活性位点减少, 不易被氧化, 形成的羰基衍生物和席夫碱较少。总之, 从氧化稳定性上来看, ISP 分离蛋白比 PSE 蛋白更适合作为一种新

型功能性食品添加剂。

2.6.3 对蛋白电泳图谱的影响 Zhao 等<sup>[2]</sup>研究发现, 类 PSE 鸡胸肉 ISP 分离蛋白的总蛋白电泳图谱 (特别是肌球蛋白重链, MHC) 变化不显著, 而盐溶性蛋白电泳图谱中 MHC 显著降低。这可能是因为经 ISP 处理导致 MHC 发生不同程度酶解, 或者聚合 (不溶于盐溶液)<sup>[2, 41]</sup>。Zhao 等<sup>[41]</sup>研究发现溶解 pH 对 ISP 分离蛋白的盐溶性和水溶性影响显著。其 SDS-PAGE 结果显示: 与酸处理组 (溶解 pH 为 3.5) 相比, 碱处理组 (溶解 pH 为 11.0) 水溶性蛋白、盐溶性蛋白的电泳图谱更接近对照组。这可能是因为酸处理组 MHC、肌动蛋白等高分子量蛋白较碱处理组更易酶解生成小分子蛋白, 且水溶性蛋白酶解程度高于盐溶性蛋白。

2.6.4 对蛋白分子构象的影响 Zhao 等<sup>[42]</sup>研究发现, 当溶解 pH 为 11.0, 回收 pH 为 6.2, 最终 pH 为 7.0 时, 类 PSE 鸡胸肉 ISP 分离蛋白的黏度、热诱导凝胶弹性和结合水能力显著增强。这些变化均与蛋白质结构改变有关, 类 PSE 鸡胸肉 ISP 分离蛋白分子  $\alpha$ -螺旋转变为  $\beta$ -折叠和无规则卷曲结构, 内部色氨酸等疏水性残基充分暴露, 巯基部分氧化成二硫键, 蛋白分子在低温下发生聚合, 黏度增大, 一定程度上抑制了加热作为凝胶形成的初始步骤。Zhao 等<sup>[43]</sup>研究了不同极端碱性溶解 pH (11.0, 11.5, 12.0) 条件下, 类 PSE 鸡胸肉蛋白结构展开、聚集的情况。不对称流场分馏结合多角度光散射和紫外线检测器 (AF4-MALS-UV) 结果显示, 3 种极端碱性 pH 条件下制备的蛋白质悬液较对照组表现出明显的分离图谱。AF4-MALS-UV 和原子力显微镜 (AFM) 结果显示, 溶解 pH 为 12.0 时类 PSE 鸡胸肉蛋白发生小部分聚集, 这可能与  $\alpha$ -螺旋结构减少、色氨酸强度降低 (蛋白质解折叠、变性) 有关。

2.6.5 对蛋白热诱导凝胶形成过程中化学作用力的影响

Zhao 等<sup>[41]</sup>研究发现, 经 ISP 处理后类 PSE 鸡胸肉蛋白的离子强度增加 (静电相互作用减弱), 非特异性相互作用显著低于对照组。随着温度的升高, 对照组非特异性相互作用降低, 而 ISP 处理组保持稳定。回收 pH 为 6.2 时类 PSE 鸡胸肉 ISP 分离蛋白的疏水相互作用高于 pH 5.5 的。对照组蛋白初态的主要作用力是静电相互作用, 而类 PSE 鸡胸肉 ISP 分离蛋白因变性导致疏水性基团暴露, 因而疏水相互作用是其初态主要作用力。所有 ISP 处理组蛋白疏水相互作用最高点均在 65 ℃, 随着温度的升高疏水相互作用有所下降。对照组蛋白在 55 ℃ 及以上时, 疏水相互作用才成为主要作用力, 并随着温度的升高而增大。

## 3 结论与展望

添加非肉成分 (多糖类、蛋白类、油脂类、盐类) 在一

一定程度上能够改善类PSE禽肉的加工特性,采用HPP、HIU、PEF、非酶糖基化、TGase酶促糖基化、ISP技术等物理、化学手段在一定程度上可以改善类PSE禽肉蛋白质的功能性性质,但也存在诸多局限性。如HPP技术设备维护成本较高;HIU技术在肉品加工中的应用主要还处于实验室阶段,未得到广泛应用<sup>[44]</sup>;PEF技术对食品组分结构、功能性性质以及质量安全的影响等还需进一步研究<sup>[28]</sup>;非酶糖基化技术存在反应过程易失控、形成有害化合物、意外褐变、难以实现规模化应用等问题<sup>[32,45]</sup>;TGase酶促糖基化技术反应过程控制有待加强,TGase在食品加工中应用的精准性有待提高<sup>[45]</sup>;ISP技术分离蛋白的基础理论还有待完善,ISP分离蛋白的风味评定、动物消化试验、冻藏稳定性以及对人体健康的影响还需深入研究<sup>[32]</sup>。禽肉加工企业使用添加非肉成分改善类PSE禽肉加工性能时,需从生产实际出发,结合成本、市场、效益、健康等多种因素综合考量添加剂使用量。后续可从分子水平揭示物理、化学技术调控类PSE禽肉蛋白质功能性性质的利与弊,以及如何实现规模化工业应用仍将是研究的热点。

### 参考文献

- [1] DONG Ming, XU Yu-juan, ZHANG Yu-mei, et al. Physicochemical and structural properties of myofibrillar proteins isolated from pale, soft, exudative (PSE)-like chicken breast meat: Effects of pulsed electric field (PEF) [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 59: 1-9.
- [2] ZHAO Xue, CHEN Xing, HAN Min-yi, et al. Application of isoelectric solubilization/precipitation processing to improve gelation properties of protein isolated from pale, soft, exudative (PSE)-like chicken breast meat[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 72: 141-148.
- [3] OWENS C M, ALVARADO C Z, SAMS A R. Research developments in pale, soft, and exudative turkey meat in North America[J]. *Poultry Science*, 2009, 88(7): 1 513-1 517.
- [4] 康壮丽, 赵颖颖, 李可, 等. 类PSE禽肉的品质特征探讨及研究进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(7): 284-289.
- [5] KARUNANAYAKA D S, JAYASENA D D, JO C. Prevalence of pale, soft, and exudative (PSE) condition in chicken meat used for commercial meat processing and its effect on roasted chicken breast[J]. *Journal of Animal Science and Technology*, 2016, 58(27): 1-8.
- [6] ZHU Xue-shen, XU Xing-lian, MIN Hui-hui, et al. Occurrence and characterization of pale, soft, exudative-Like broiler muscle commercially produced in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(8): 1 384-1 390.
- [7] JIANG N, WANG P, XING T, et al. An evaluation of the effect of water-misting sprays with forced ventilation on the occurrence of pale, soft, and exudative meat in transported broilers during summer: Impact of the thermal microclimate[J]. *Journal of Animal Science*, 2016, 94(5): 2 218-2 227.
- [8] 孙皓, 徐幸莲, 黄继超. 禽肉类PSE肉的形成与加工特性研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(9): 107-111.
- [9] BARBUT S. Pale, soft, and exudative poultry meat-Reviewing ways to manage at the processing plant[J]. *Poultry Science*, 2009, 88(7): 1 506-1 512.
- [10] ZHANG L, BARBUT S. Effects of Regular and modified starches on cooked pale, soft, and exudative; normal; and dry, firm, and dark breast meat batters[J]. *Poultry Science*, 2005, 84(5): 789-796.
- [11] DAIGLE S P, SCHILLING M W, MARRIOTT N G, et al. PSE-like turkey breast enhancement through adjunct incorporation in a chunked and formed deli roll [J]. *Meat Science*, 2005, 69(2): 319-324.
- [12] OZTURK B, SERDAROGLU M. The effects of egg albumin incorporation on quality attributes of pale, soft, exudative (PSE-like) turkey rolls[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2017, 54(6): 1 384-1 394.
- [13] SCHILLING M W, DAIGLE S P, ALVARADO C Z, et al. Effects of collagen addition on the functionality of PSE-like and normal broiler breast meat in a chunked and formed deli roll[J]. *Journal of Muscle Foods*, 2005, 16(1): 46-53.
- [14] PRABHU G, DOERSCHER D, HULL D. Poultry collagen-product characteristics and applications in poultry-based products [J]. *Poultry Science*, 2004, 83(10): 1 765.
- [15] 彭晓龙. 油脂对类PSE鸡肉肉肠品质的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 80.
- [16] ZHUANG Hong, BOWKER B, SAMUEL D. Effect of postmortem aging on marination performance of broiler breast pectoralis major categorized by color lightness[J]. *Poultry Science*, 2014, 93(12): 3 123-3 129.
- [17] 朱学伸. 家禽“类PSE肉”的品质特性及其改善因素研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011: 91.
- [18] WOELFEL R L, SAMS A R. Marination performance of pale broiler breast meat[J]. *Poultry Science*, 2001, 80(10): 1 519-1 522.
- [19] ALVARADO C Z, SAMS A R. Injection marination strategies for remediation of pale, exudative broiler breast meat[J]. *Poultry Science*, 2003, 82(8): 1 332-1 336.
- [20] ZHUANG Hong, BOWKER B. Effect of marination on lightness of broiler breast fillets varies with raw meat color attributes[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 69: 233-235.
- [21] TANI Y, SATO T, YAMANAKA-OKUMURA H, et al. Effects of prolonged high phosphorus diet on phosphorus and calcium balance in rats[J]. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 2007, 40(3): 221-228.
- [22] TAKEDA E, TAKETANI Y, SAWADA N, et al. The regulation and function of phosphate in the human body[J]. *Biofactors*, 2004, 21:

- 345-355.
- [23] CHAN J T Y, OMANA D A, BETTI M. Application of high pressure processing to improve the functional properties of pale, soft, and exudative (PSE)-like turkey meat[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2011, 12(3): 216-225.
- [24] ALARCON-ROJO A D, CARRILLO-LOPEZ L M, REYES-VILLAGRANA R, et al. Ultrasound and meat quality: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 55: 369-382.
- [25] HIGUERA-BARRAZA O A, DEL TORO-SANCHEZ C L, RUIZ-CRUZ S, et al. Effects of high-energy ultrasound on the functional properties of proteins [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 31: 558-562.
- [26] LI Ke, KANG Zhuang-li, ZHAO Ying-ying, et al. Use of high-intensity ultrasound to improve functional properties of batter suspensions prepared from PSE-like chicken breast meat[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(12): 3 466-3 477.
- [27] 李可. 类 PSE 鸡胸肉蛋白质凝胶特性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015: 105-121.
- [28] 董铭, 白云, 李月秋, 等. 脉冲电场对食品蛋白质改性作用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(2): 293-299.
- [29] 季慧. 低温等离子快速提高糖基化花生分离蛋白溶解性及乳化性[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 289-295.
- [30] NISHIMURA K, MURAKOSHI M, KATAYAMA S, et al. Antioxidative ability of chicken myofibrillar protein developed by glycosylation and changes in the solubility and thermal stability[J]. *Bio-science Biotechnology and Biochemistry*, 2011, 75(2): 247-254.
- [31] BIAN Guang-liang, XUE Si-wen, XU Yu-juan, et al. Improved gelation functionalities of myofibrillar protein from pale, soft and exudative chicken breast meat by nonenzymatic glycation with glucosamine[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53(8): 2 006-2 014.
- [32] 冯燕英, 牟代臣, 祁文磊, 等. 蛋白质糖基化接枝改性研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(2): 190-195.
- [33] XU Yu-juan, ZHAO Xue, BIAN Guang-liang, et al. Structural and solubility properties of pale, soft and exudative (PSE)-like chicken breast myofibrillar protein: Effect of glycosylation [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 95: 209-215.
- [34] 赵雪, 邹玉峰, 韩敏义, 等. 酸碱处理技术在肌肉蛋白质分离加工中的应用[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(11): 395-399.
- [35] KRISTINSSON H G, HULTIN H O. Changes in conformation and subunit assembly of cod myosin at low and high pH and after subsequent refolding[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(24): 7 187-7 196.
- [36] RAGHAVAN S, KRISTINSSON H G. Conformational and rheological changes in catfish myosin during alkali-induced unfolding and refolding[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(1): 385-398.
- [37] KIM Y S, PARK J W, CHOI Y J. New approaches for the effective recovery of fish proteins and their physicochemical characteristics [J]. *Fisheries Science*, 2003, 69(6): 1 231-1 239.
- [38] NOLSOE H, UNDELAND I. The acid and alkaline solubilization process for the isolation of muscle proteins: State of the art[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2009, 2(1): 1-27.
- [39] ZHAO Xue, XING Tong, CHEN Xing, et al. Precipitation and ultimate pH effect on chemical and gelation properties of protein prepared by isoelectric solubilization/precipitation process from pale, soft, exudative (PSE)-like chicken breast meat[J]. *Poultry Science*, 2017, 96(5): 1 504-1 512.
- [40] ZHAO Xue, XING Tong, WANG Peng, et al. Oxidative stability of isoelectric solubilization/precipitation-isolated PSE-like chicken protein[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283: 646-655.
- [41] ZHAO Xue, XING Tong, CHEN Xing, et al. Changes of molecular forces during thermo-gelling of protein isolated from pse-like chicken breast by various isoelectric solubilization/precipitation extraction strategies[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(7): 1 240-1 247.
- [42] ZHAO Xue, BAI Yun, XING Tong, et al. Use of an isoelectric solubilization/precipitation process to modify the functional properties of PSE (pale, soft, exudative)-like chicken meat protein: A mechanistic approach[J]. *Food Chemistry*, 2018, 248: 201-209.
- [43] ZHAO Xue, XING Tong, XU Xing-lian, et al. Influence of extreme alkaline pH induced unfolding and aggregation on PSE-like chicken protein edible film formation [J]. *Food Chemistry*, 2020, 319: 1-10.
- [44] 康大成, 刘云国, 张万刚. 高功率超声波对蛋白质功能特性的影响及其在肉品加工中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 289-297.
- [45] 李明奇, 贺雅非, 李洪军. 微生物源谷氨酰胺转胺酶修饰蛋白质机理及其在食品方面的应用进展[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(12): 274-280.