

黑果腺肋花楸多酚对鱼糜凝胶特性的影响

王亚菲¹, 马子龙¹, 李 军², 朱凤妹^{1*}

(¹河北科技师范学院 食品科技学院 河北昌黎 066600)

(²河北省果品加工技术创新中心 河北昌黎 066600)

摘要 为了提升淡水鱼鱼糜制品的品质及口感,采用傅里叶红外光谱、低场核磁共振及扫描电镜等方法探究黑果腺肋花楸多酚添加量对鱼糜凝胶特性的影响,并测定鱼糜凝胶持水性、全质构、化学作用力、总巯基含量、弛豫时间、蛋白质二级结构及扫描电镜等。结果表明,当多酚添加量为 0.375% 时,鱼糜凝胶的持水性、凝胶特性、弹性、咀嚼性最好;弛豫谱中该组谱峰最高,向左偏移最多,说明多酚添加量为 0.375% 的鱼糜凝胶中不易流动水最多,结构稳定。扫描电镜中,随着多酚添加量的增加,鱼糜凝胶结构逐渐致密,0.375% 组的鱼糜凝胶结构最致密,表面光滑;当多酚添加量增至 0.500% 时,鱼糜凝胶结构变得松散。化学作用力中二硫键逐渐增多且与总巯基含量呈反比,二硫键与疏水相互作用对鱼糜凝胶的形成起重要作用。傅里叶红外光谱表明 α -螺旋结构逐渐转变为 β -折叠结构,且 β -折叠峰面积逐渐增大,表明蛋白质二级结构变得规则、有序,使鱼糜凝胶特性增强。十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳中鱼糜凝胶肌球蛋白重链(MHC)和肌动蛋白(AC)条带逐渐减弱,表明形成稳定的鱼糜凝胶网络结构。

关键词 黑果腺肋花楸多酚; 鱼糜制品; 凝胶特性; 微观结构; 蛋白构象

文章编号 1009-7848(2024)11-0269-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.11.025

鱼糜制品是鱼糜添加调味料擂溃制得的精加工食品^[1],如鱼肠、鱼丸、鱼豆腐等。鱼糜制品口感鲜嫩、风味良好,具有较长的货架期,是消费者不错的选择。近年来,由食品添加剂引发的食品安全问题也日益凸显^[2]。减少添加剂用量,提高鱼糜制品营养价值,改善其风味十分重要。

鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)属鲤科、鲢属鱼类。白鲢鱼是中国四大淡水鱼之一,2021 年全国鲢鱼养殖产量为 383.66 万 t^[3]。鲢鱼肉具有高蛋白、低胆固醇^[4],维生素和矿物质丰富,价格低廉的优点,是菜肴烹饪、鱼糜制品的原材料。然而,白鲢鱼中内源性蛋白酶的含量较高^[5],导致鱼糜凝胶特性较差,容易劣化。此外,白鲢鱼本身土腥味较重,制约了其鱼糜制品的发展。

近年来,国内外学者改善鱼糜凝胶特性的研究主要集中在外源物质对鱼糜凝胶特性的影响方面,如蛋白类、淀粉、非淀粉多糖类物质、低饱和脂

肪酸和低固醇的植物油以及多酚类天然活性物质^[6]等。多酚类物质是天然的抗氧化剂,不仅可以抑制蛋白与质脂肪氧化,改善鱼糜制品的风味^[7],还可与鱼糜制品中的肌原纤维蛋白相互作用来提高鱼糜品质。多酚是一种苯环上含有一个或多个羟基的芳香族化合物^[8],多酚类物质通过降低鱼糜中的巯基促进二硫键的形成来促进蛋白质的交联,使蛋白质形成更为紧密的三维网状结构^[9],从而提高鱼糜凝胶特性。黑果腺肋花楸(*Aronia melanocarpa*)中含有丰富的多酚^[10],主要包括花青素、酚酸等^[11],具有抗氧化^[12]、抑菌、治疗脂肪肝^[13]、抗动脉粥样硬化^[14]等功效。目前,已有对黑果腺肋花楸多酚的抗氧化能力研究,而对鱼糜凝胶特性鲜有研究报道。本文将黑果腺肋花楸多酚加入鱼糜制品中,研究多酚对其凝胶特性、结构以及化学作用力的影响,为黑果腺肋花楸多酚在鱼糜制品中的应用提供参考。

收稿日期: 2023-11-24

基金项目: 河北省“三三三人才工程”资助项目(B20221006);

河北省果品加工技术创新中心绩效补助经费项目(225676115H)

第一作者: 王亚菲,女,硕士生

通信作者: 朱凤妹 E-mail: zhufengmei0714@163.com

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜白鲢购于秦皇岛市昌黎县水产市场;黑果腺肋花楸多酚:实验室提取后冻干所得;食盐、姜粉、料酒,秦皇岛市昌黎县广缘超市;氯化钠(分

析纯级),天津欧博凯化工有限公司;巯基测定试剂盒,北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

Brookfield CT3 质构仪,上海茂默科学技术有限公司;高速冷冻离心机,日本 Koki 控股有限公司;V-5100 可见分光光度计,武汉高精科学仪器有限公司;多功能酶标仪,南京华东电子科技有限公司;TENSOR27 傅里叶变换红外光谱仪,德国布鲁克公司;扫描电子显微镜,日本日立公司

1.3 方法

1.3.1 鱼糜凝胶的制备 将刚宰杀的新鲜鲢鱼用放有冰袋的泡沫箱运送至实验室,冰水洗去黑膜、血水。洗净后快速去皮剔骨取白肉部分,弃去肉筋及红肉^[5]。用冰水按比例清洗鱼肉,放入绞肉机中空斩 1 min,按料液比 20:1 的添加量添加料酒,加入 1% 的食盐,添加适量姜粉去除腥味,斩拌 1.5 min。分别添加不同质量分数的黑果腺肋花楸多酚(0.000%, 0.125%, 0.250%, 0.375%, 0.500%),斩拌 1 min。期间可加少量冰水,控制温度始终在 10 ℃ 以下,最终调整鱼糜水分含量在 80% 左右。灌入直径 25 mm 的塑料肠衣中,进行两段式加热,先在温度 40 ℃ 的恒温水浴锅中煮制 30 min,后在 90 ℃ 的恒温水浴锅中煮制 30 min,在冰水中冷却后放入 4 ℃ 冰箱中冷藏,24~48 h 之内测定各项指标。

1.3.2 持水性的测定 参考聂勇涛等^[6]的方法稍作修改,称取 2.00 g 鱼糜凝胶用滤纸包裹放入 50 mL 离心管中离心(8 000×g, 4 ℃)10 min,取出称其质量,按公式(1)计算鱼糜凝胶持水性(W),每组样品平行测定 3 次,结果取平均值。

$$W(\%) = m_2/m_1 \times 100 \quad (1)$$

式中: m_1 为离心前鱼糜凝胶样品质量,g; m_2 为离心后鱼糜凝胶样品质量,g。

1.3.3 凝胶强度的测定 将鱼糜凝胶切成高 20 mm 的圆柱体,用质构仪按以下条件测试:测试速度 1 mm/s,触发力 3 N,形变量 40%,间隔时间 5 s。每组样品平行测定 6 次,结果取平均值。

1.3.4 全质构(TPA)的测定 参考杭瑜瑜等^[7]的方法稍作修改,将样品切成高 20 mm 的圆柱体,用 P/50 柱形探头进行测定。测定的质构参数为:测试速度 1 mm/s,触发力 3 N,形变量 40%,间隔时间 5 s。每组样品平行测定 6 次,结果取平均值。

1.3.5 化学作用力的测定 参考逢昕雨^[8]的方法,取 2 g 鱼糜凝胶样品,将样品切碎,分别加 S1 (0.05 mol/L NaCl)、S2 (0.6 mol/L NaCl)、S3 (0.6 mol/L NaCl, 1.5 mol/L 尿素)、S4 (0.6 mol/L NaCl, 8.0 mol/L 尿素)、S5 (0.6 mol/L NaCl, 8.0 mol/L 尿素, 0.5 mol/L β -巯基乙醇)溶液,4 ℃ 下静置 1 h 后离心 15 min,取上清液用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量,3 次平行,结果取平均值。

1.3.6 总巯基含量的测定 称取 0.1 g 鱼糜凝胶,加入 1 mL 提取液,常温离心 10 min,取上清液待测。梯度稀释标准液,绘制标准曲线。使用酶标仪在波长 412 nm 处测定吸光值,每组平行 3 次。总巯基含量按式(2)计算。

$$\text{总巯基含量}(\mu\text{mol/g}) = y \times V_{\text{样总}}/m \quad (2)$$

式中: y 为样品浓度, $\mu\text{mol/mL}$; $V_{\text{样总}}$ 为加入提取液体积,1 mL; m 为样品质量,g。

1.3.7 低场核磁共振分析 将鱼糜凝胶样品切成高 40 mm,直径 25 mm 的圆柱体置于核磁管内,利用核磁共振分析仪测定自旋-自旋弛豫时间(T_2)。试验参数:扫描次数 4 次,磁体温度 32 ℃,共振频率 12 MHz,等待持续时间 4 000 ms,回波持续时间 0.15 ms。

1.3.8 傅里叶红外光谱(FT-IR) 参考周永国等^[9]的方法稍作修改,称取 1.0 mg 冻干的鱼糜凝胶加入 100 mg 干燥的溴化钾研磨成细粉末后用油压机压成薄片,用傅里叶变换红外光谱仪在室温下扫描 4 000~40 cm^{-1} 范围内样品的吸收光谱,用 Origin 9.0 绘制红外光谱图^[20]。

1.3.9 扫描电镜 参考 Wang 等^[21]的方法稍作修改,将样品切成高 5 mm,直径 25 mm 的薄片,用 2.5% 戊二醛固定液固定 6 h 后先用磷酸缓冲溶液浸洗,然后依次用不同浓度乙醇脱水,用无水乙醇与乙酸异戊酯的混合液置换乙醇,样品冷冻干燥,经离子溅射喷金后用扫描电镜进行观察并拍照。

1.3.10 十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺(SDS-Page)凝胶电泳 称取 0.2 g 样品,加入 1 mL 预冷裂解液,加入磁珠放置预冷的冰盒上,振荡 3 次,每次振荡 6 次;17 000×g,4 ℃ 离心 15 min;分别取上清液 2 份,调整最终体积为 200 μL ;分别将分离胶(12%)与浓缩胶(5%)灌入电泳槽内,加入足够的电泳液后上样电泳。浓缩胶电压 100 V,分离胶电

压 120 V, 电泳至溴酚蓝离玻璃板底部还有大约 1 cm 时即可终止电泳。用考马斯亮染色液染色 180 min, 洗胶脱色^[22], 对条带拍照。

2 结果与分析

2.1 黑果腺肋花楸多酚的添加量对鱼糜凝胶持水性的影响

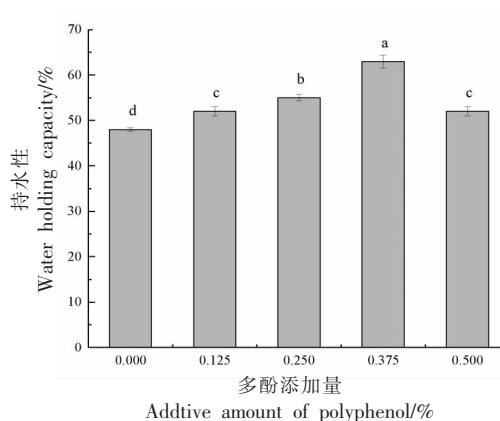
持水性又称系水力^[23], 它代表着鱼糜凝胶保水性大小, 进而表现出鱼糜凝胶特性的强弱, 持水性越大说明鱼糜凝胶锁水性越强。不仅直接影响鱼糜的颜色、多汁性、弹性等食用品质, 而且具有重要的经济意义。如图 1 所示, 随着多酚添加量逐渐上升, 持水性先增加后减小 ($P < 0.01$), 在多酚添加量为 0.375% 时持水性达到最大, 为 63%, 较对照组提升了 15%。这可能是因为黑果腺肋花楸中多酚类物质含有大量的活性羟基, 随着多酚添加量的增加活性羟基与鱼糜凝胶中的蛋白质结合, 形成了更为稳定的结构, 截留了水分^[24]。当多酚添加量为 0.5% 时持水性虽略有下降, 但也高于对照组, 这可能是因为过量的多酚会与鱼糜凝胶蛋白质结合过度, 反而破坏了凝胶结构导致持水性下降^[25]。

2.2 黑果腺肋花楸多酚的添加量对鱼糜凝胶强度的影响

凝胶强度是反映凝胶特性的重要指标 (凝胶强度=破断力×破断距离), 鱼糜凝胶特性越好其凝胶强度越大, 其结构越紧密。如图 2 所示, 随着多酚添加量的增加, 鱼糜凝胶特性先增大后减小, 且多酚组凝胶特性整体显著高于对照组 ($P < 0.01$)。多酚添加量为 0.375% 时, 鱼糜凝胶强度最大, 相比对照组增加了 48.22%。这可能是由于多酚促进了蛋白质中氨基酸的氧化交联, 使鱼糜凝胶结构稳定。当多酚添加量为 0.500% 时, 鱼糜凝胶强度有下降的趋势, 这可能是因为多酚质量分数过大发生自我交联, 反而阻碍了其与其与鱼糜凝胶蛋白质之间的相互交联作用, 导致凝胶强度降低。

2.3 黑果腺肋花楸多酚的添加量对鱼糜凝胶质构(TPA)特性的影响

TPA 又称全质构, 是通过特定的探头对样品进行穿刺、挤压, 测定样品硬度、弹性、咀嚼性、内聚性等指标。其中, 硬度是探头第 1 次压缩时的最



注: 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图 1 多酚添加量对鱼糜持水性的影响

Fig.1 Effects of polyphenol addition amount on water retention of fish mince

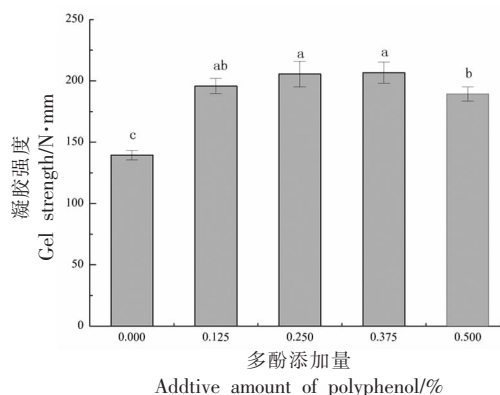


图 2 多酚添加量对鱼糜凝胶强度的影响

Fig.2 The effects of polyphenol addition amount on the strength of surimi gel

大峰值, 硬度与凝胶强度成正比。从图 3a 中可以看出添加黑果腺肋花楸多酚后, 多酚组鱼糜凝胶的硬度显著高于对照组 ($P < 0.05$), 多酚添加量为 0.375% 时鱼糜凝胶硬度最大, 为 27.39 N, 比对照组高出 32.83%, 这表明多酚添加量为 0.375% 的样品的凝胶强度最大。

弹性模拟了鱼糜凝胶样品在口腔中再恢复的程度, 是全质构测定的重要指标之一。如图 3b 所示, 添加黑果腺肋花楸多酚后, 弹性先增大后降低, 且多酚组弹性显著高于对照组 ($P < 0.01$)。多酚添加量为 0.25% 的鱼糜凝胶样品弹性最大, 为 5.61 mm, 较对照组提高了 19.87%。添加多酚后鱼糜凝胶的弹性有所提升, 可能是因为多酚中的羟基促进了与蛋白质的交联使其结构稳定。

胶黏性表示鱼糜凝胶附着于舌、牙齿等接触面的能力,对食用口感有一定的影响。图 3c 中,添加多酚后鱼糜凝胶的胶黏性显著提升 ($P<0.05$),多酚添加量为 0.375% 的样品中胶黏性为 13.28,比对照高出 59.04%。随着样品中多酚含量的增加,多酚凝胶强度越大,其胶黏性也相应的增加,这说明多酚能够改善鱼糜凝胶的凝胶强度,促进结构更稳定。

咀嚼性是模拟口腔咀嚼食物的指标,常用胶黏性与弹性的乘积表示。如图 3d 所示,随着样品中多酚含量的增大,鱼糜凝胶的咀嚼性先增大减小 ($P<0.05$),多酚组鱼糜凝胶咀嚼性显著高于对照组。多酚添加量为 0.375% 样品组的咀嚼性最

大,为 74.65,比对照组高出 79.84%。鱼糜凝胶的咀嚼性与硬度变化趋势一致,呈线性相关,都与鱼糜凝胶强度表现出相似的趋势,可以作为鱼糜凝胶强度变化的补充,证明添加多酚后鱼糜凝胶结构更稳定。

内聚性在一定程度上能够反映鱼糜凝胶结构的致密程度,如图 3e 所示,多酚组间内聚性虽然不显著 ($P>0.05$),但多酚组显著高于对照组 ($P<0.05$)。随着样品多酚含量的增加,其内聚性先增大后减小,与弹性变化一致,说明多酚在一定程度上增大了与蛋白质的交联作用,促进了鱼糜凝胶结构更紧密稳定。

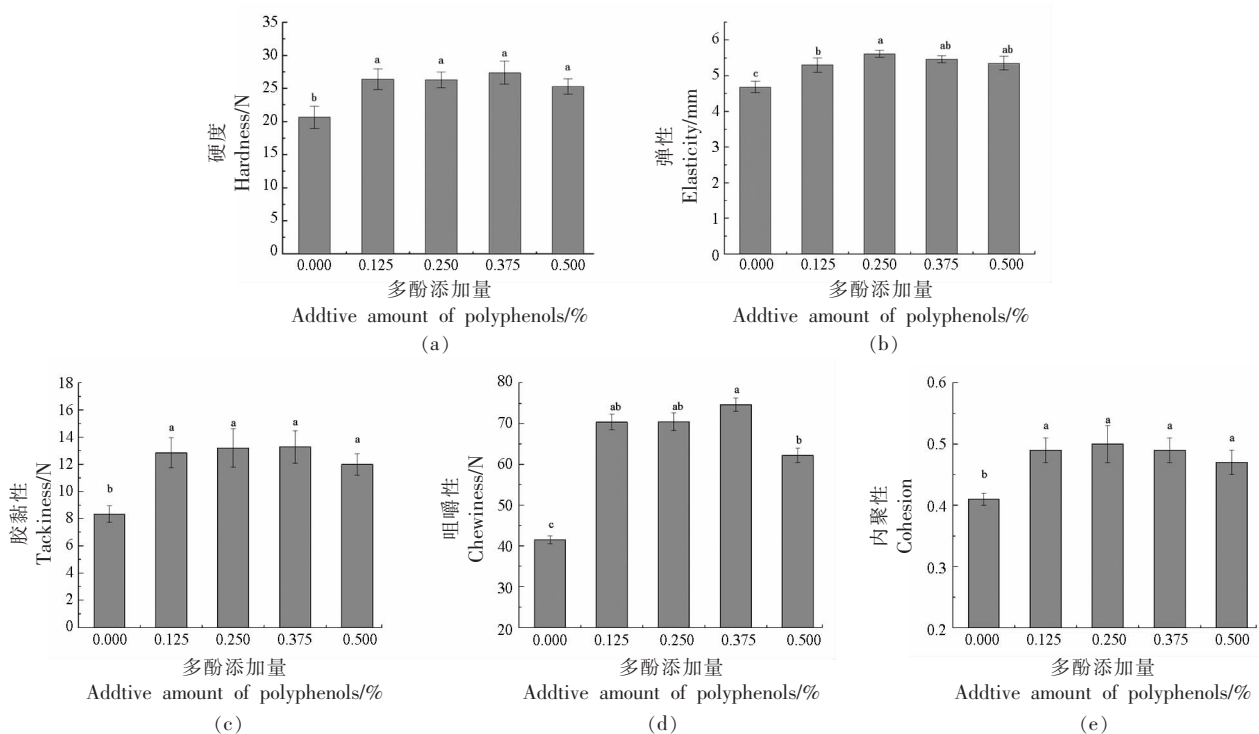


图 3 多酚添加量对鱼糜凝胶质构 (TPA) 特性的影响

Fig.3 Effects of polyphenol addition on texture (TPA) characteristics of surimi gel

2.4 黑果腺肋花楸多酚的添加量对鱼糜凝胶化学作用力的影响

加热鱼糜凝胶使蛋白质变性形成稳定的空间网络结构离不开化学作用力,主要包括:氢键、离子键、疏水相互作用和二硫键等。氢键是维持蛋白质二级结构主要作用力,它会影响鱼糜凝胶的硬度和持水性,其含量越高,鱼糜凝胶质构与持水性

越好。疏水相互作用是肌原纤维蛋白侧链上疏水氨基酸暴露形成的^[26],能促进蛋白质重新排序,形成孔隙均匀的空间网络结构^[27]。疏水基团过度暴露,会使蛋白质过度延展,破坏鱼糜凝胶蛋白质的交联,使结构松散,截留水的能力下降。离子键是肽链上谷氨酸与天冬氨酸羧基基团和赖氨酸与精氨酸氨基基团之间形成的价键,叫作盐桥。离子键

主要维持蛋白质的三级结构,起到辅助增强鱼糜凝胶结构稳定和持水性的作用^[28]。肌原纤维蛋白内的巯基暴露,游离的巯基氧化形成二硫键,二硫键的含量与巯基含量呈负相关关系。二硫键对鱼糜凝胶特性具有重要的影响,在一定范围内二硫键含量升高能够提高凝胶强度^[29]。由图 4 可知,离子键与氢键含量都呈先增大后降低趋势($P<0.05$),当样品多酚添加量达到 0.375% 时,离子键含量最高。疏水相互作用与二硫键的含量总体高于离子键与氢键,这可能是由于疏水相互作用与二硫键在鱼糜凝胶特性中发挥主要作用。二硫键的含量呈上升趋势($P<0.05$),鱼糜凝胶样品中游离巯基被氧化的越多,形成的二硫键越多,鱼糜凝胶结构越稳定。

2.5 黑果腺肋花楸多酚的添加量对鱼糜凝胶总巯基含量的影响

巯基(-SH)是一种含有硫原子的基团,它可以存在于氨基酸中或者作为辅助因子参与某些生物化学反应。总巯基主要包括游离巯基和包裹在蛋白质分子内部的巯基基团^[30],游离巯基被氧化后形成二硫键,使总巯基含量降低。形成的二硫键可以促进蛋白质结构稳定,进而提高鱼糜凝胶特性。如图 5 所示,对照组总巯基含量显著高于多酚组($P<0.05$),多酚组间总巯基含量变化不显著。总巯基含量下降趋势与图 4 中二硫键增长的趋势相对应,总巯基含量与二硫键含量成反比,游离巯基被氧化形成二硫键,总巯基含量下降,进一步表明添加多酚会影响鱼糜凝胶二硫键的形成。

2.6 低场核磁共振分析

低场核磁共振可以检测鱼糜凝胶的水分组成及其分布状态,主要通过弛豫时间(T_2)反映,弛豫谱中 T_{21} 表示结合水 (0.09~0.8 ms), T_{22} 表示不易流动水 (11~200 ms), T_{23} 表示易流动的自由水 (600~3 000 ms)^[23]。结合水一般与鱼糜凝胶鱼蛋白质分子结合紧密,不易流动水随着鱼糜凝胶空间结构的稳定致密而被截留,不易流动水与结合水含量越高表明鱼糜凝胶结构越稳定。如图 6 所示,随着多酚添加量的增加,不易流动水 T_{22} 逐渐向左边迁移且峰面积逐渐增高,当多酚含量达到 0.375% 时,峰面积最高。这可能是因为随着多酚含量的增加,鱼糜凝胶的空间网状结构逐渐趋于

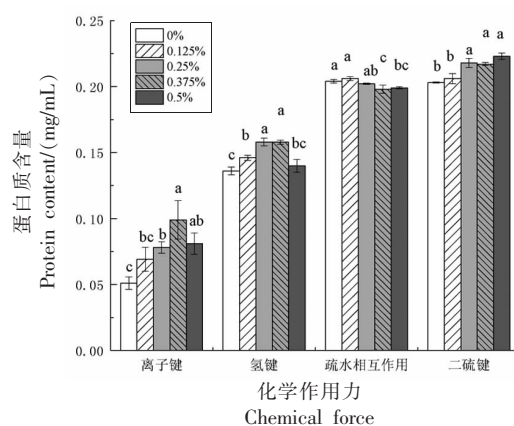


图 4 多酚添加量对鱼糜凝胶化学作用力的影响

Fig.4 Effects of polyphenol addition amount on chemical force of surimi gel

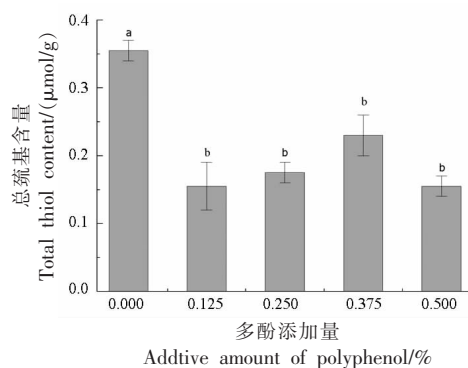


图 5 多酚添加量对鱼糜凝胶总巯基含量的影响

Fig.5 Effects of polyphenol addition amount on total sulfhydryl content of surimi gel

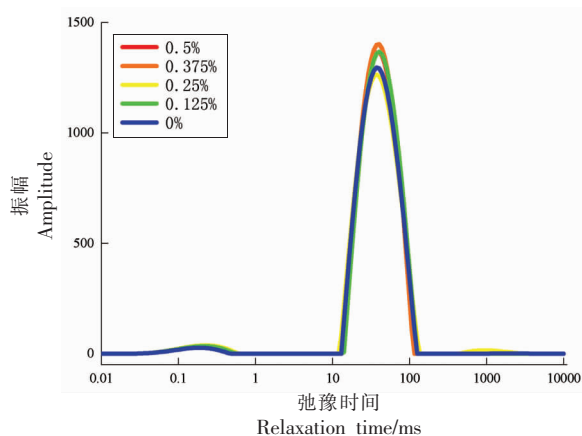


图 6 多酚添加量对鱼糜凝胶弛豫时间 (T_2) 的影响

Fig.6 Effect of polyphenol addition amount on relaxation time (T_2) of surimi gel

紧密,截留了更多水,鱼糜凝胶中的不易流动水与网络结构联系更加牢固。

2.7 傅里叶红外光谱(FT-IR)分析

傅里叶红外光谱法是原子通过吸收光子能量发生能级跃迁并通过红外光谱记录的一种鉴别蛋白质二级结构与官能团的方法。红外光谱主要包括酰胺 I 带(1 600~1 700 cm^{-1})、酰胺 II 带(1 500~1 600 cm^{-1})、酰胺 III 带(1 220~1 330 cm^{-1})、酰胺 IV、酰胺 V、酰胺 VI、酰胺 VII、酰胺 A 带及酰胺 B 带^[31],其中酰胺 I 带具有重要作用。蛋白质二级结构主要包括: α -螺旋、 β -折叠、无规则卷曲、 β -转角,其中 α -螺旋与 β -折叠对蛋白质二级结构的稳

定性具有重要作用。如图 7 所示,酰胺 I 带的范围内, α -螺旋结构范围是 1 658~1 651 cm^{-1} ,且峰面积逐渐减小。 β -折叠的范围是 1 639~1 600 cm^{-1} ,峰面积逐渐增大,最低峰由 1 654 cm^{-1} 移至 1 639 cm^{-1} 处,说明 α -螺旋逐渐转变为 β -折叠结构,随着 β -折叠结构的峰面积增大,蛋白质二级结构更规则有序,进而使鱼糜凝胶结构稳定。酰胺 II 带与酰胺 III 带无明显变化,表明多酚主要促使鱼糜凝胶由 α -螺旋结构向 β -折叠结构转变,进而形成更加规则有序的空间网络结构。

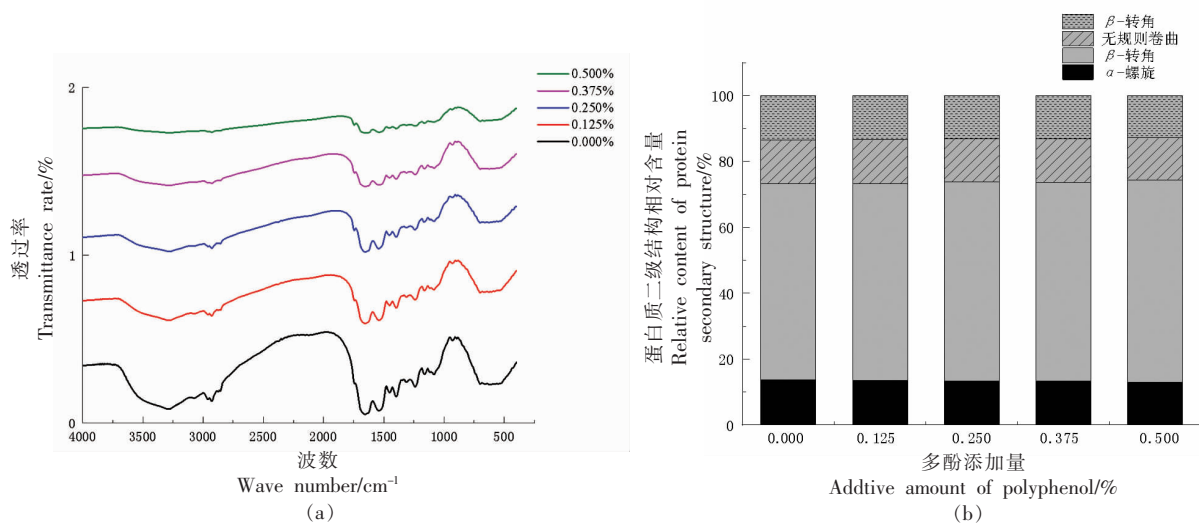


图 7 红外光谱及蛋白质二级结构相对含量图

Fig.7 Infrared spectrum and relative content of protein secondary structure

2.8 扫描电镜(SEM)

扫描电镜是研究物体表面形貌的一种工具,常用于食品、生物等领域。如图 8 所示,随着多酚含量的增加,鱼糜凝胶表面孔径越小,结构越致密,鱼糜凝胶表面纹理越光滑细腻,图 8e 中由于多酚添加量过多,导致孔隙增大增多,结构疏松,说明适量添加多酚会促进鱼糜凝胶形成稳定的结

构,而过量添加多酚会使鱼糜凝胶结构变得松散无序,这可能是由于多酚会与蛋白质发生交联使鱼糜凝胶结构稳定,而过量的多酚与鱼糜凝胶蛋白质交联过度进而破坏了鱼糜凝胶有序的空间网络结构。同时,扫描电镜图显示出多酚添加量为 0.375% 的鱼糜凝胶结构最稳定,这与前面测定的相关指标显示出相同的结论。

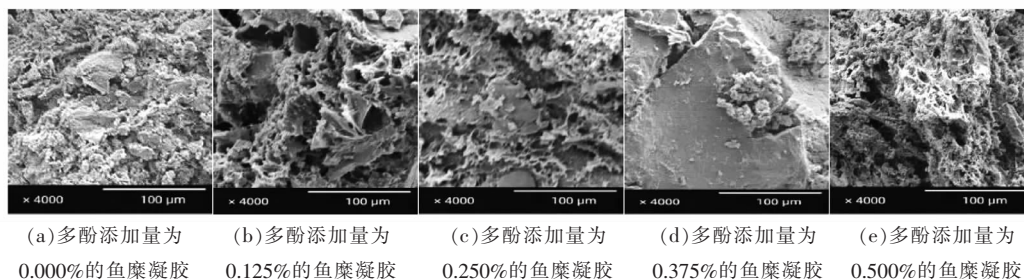
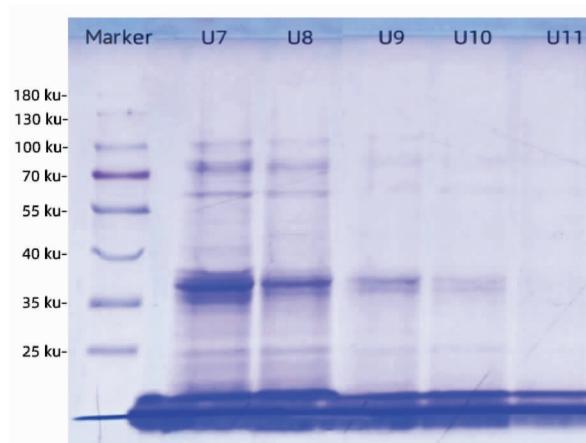


图 8 不同多酚添加量的鱼糜凝胶扫描电镜图

Fig.8 SEM of surimi gel with different addition amounts of polyphenols

2.9 十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-Page)分析

SDS-Page 凝胶电泳利用分子筛效应,通过电泳分离蛋白质并定量。如图9所示,肌球蛋白重链(Myosin heavy chain, MHC)在70 ku附近,肌动蛋白(Actin, AC)在35~40 ku范围内,随着多酚添加量的增加,鱼糜凝胶的MHC明显减弱,AC带也逐渐减弱。这可能是由于鱼糜凝胶在二段式加热(40℃ 30 min, 90℃ 30 min)过程中,MHC通过分子间共价键交联而聚集,分子质量过大无法进入分离胶^[32]。AC随着多酚添加量增加逐渐减弱,说明黑果腺肋花楸多酚不仅促使MHC之间相互交联,同时也可以使AC发生交联,形成具有稳定的空间网络结构,这与持水性结果基本一致。



注:Marker. 蛋白标准样品;U7. 多酚添加量为0.000%的鱼糜凝胶;U8. 多酚添加量为0.125%的鱼糜凝胶;U9. 多酚添加量为0.250%的鱼糜凝胶;U10. 多酚添加量为0.375%的鱼糜凝胶;U11. 多酚添加量为0.500%的鱼糜凝胶。

图9 不同多酚添加量鱼糜凝胶的SDS-PAGE凝胶电泳图

Fig.9 SDS Page gel electrophoresis of surimi gel with different addition amount polyphenols

3 结论

黑果腺肋花楸多酚的添加对持水性、凝胶强度、弹性、咀嚼性、化学作用力、水分分布、微观结构及蛋白质二级结构具有显著影响,多酚添加量为0.375%时,持水性、凝胶强度最高,不易流动水含量最多,鱼糜凝胶结构最致密。化学作用力中二硫键与疏水相互作用整体高于离子键和氢键,随着多酚添加量的增加,促使二硫键增多,使鱼糜凝

胶结构稳定,是因为蛋白质内部巯基基团暴露,发生氧化,促使二硫键增多,同时疏水相互作用也起到了一定的稳定蛋白质结构的作用。由弛豫时间 T_2 图可知,多酚与蛋白质之间相互交联使蛋白质截留水的能力增强,促使蛋白质内固定水和不易流动水增多。傅里叶红外光谱中也表明随着多酚含量的增加, α -螺旋逐渐转变为 β -折叠结构,且 β -折叠峰面积逐渐增大,蛋白质二级结构更规则有序。SDS-Page凝胶电泳中也体现了随着多酚添加量的增加,MHC逐渐形成聚集体而使重链条带变浅,AC带也逐渐变浅,表明了形成了稳定的鱼糜凝胶网络结构。

参 考 文 献

- [1] 郭梦, 武瑞赟, 马俐珍, 等. 鱼糜制品及其凝胶特性研究进展[J]. 中国水产, 2020(2): 83-85.
GUO M, WU R Y, MA L Z, et al. Research progress on surimi products and their gel properties [J]. China Fisheries, 2020(2): 83-85.
- [2] 李其晔. 食品添加剂在我国食品加工中的应用现状[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(4): 68-73.
LI Q H. Application status of food additives in food processing in China[J]. Preservation and Processing, 2023, 23(4): 68-73.
- [3] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022: 1-158.
Fisheries and Fisheries Administration Bureau of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Fishing industry in China statistical yearbook [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2022: 1-158.
- [4] 施咏淇, 王攀, 周思瑞, 等. 芋头粉对白鲢鱼糜制品品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 63-71.
SHI Y Q, WANG P, ZHOU S R, et al. The effect of taro powder on the quality of silver carp minced products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 63-71.
- [5] 王悦松, 刘香玲, 李学鹏, 等. 白藜芦醇对鲢鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 42-49.
WANG Y S, LIU X L, LI X P, et al. The effect of resveratrol on the characteristics of silver carp myofibrillar protein gel[J]. Food Science, 2023, 44

- (12): 42–49.
- [6] 叶月华, 钱敏, 刘晓艳, 等. 不同外源物质对淡水鱼鱼糜热诱导凝胶特性增效作用的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(12): 285–293.
YE Y H, QIAN M, LIU X Y, et al. Research progress on synergism of different exogenous substances on heat induced gel properties of freshwater fish surimi [J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(12): 285–293.
- [7] 励建荣, 王忠强, 仪淑敏, 等. 天然抗氧化剂对鱼糜及鱼糜制品抗氧化能力及品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(21): 1–7.
LI J R, WANG Z Q, YI S M, et al. Research progress on the effect of natural antioxidants on the antioxidant capacity and quality of surimi and surimi products[J]. Food Science, 2021, 42(21): 1–7.
- [8] 崔宝月. 草莓和草莓叶多酚提取物的抗糖化活性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
CUI B Y. Study on the anti glycation activity of polyphenol extracts from strawberries and strawberry leaves[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023
- [9] YAMPAKDEE 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 Chemistry, 2014, 142(1): 210–216.
- [10] DENEV P, LOJEK A, CIZ M, et al. Antioxidant activity and polyphenol content of Bulgarian fruits[J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2013, 19(1): 22–27.
- [11] 孙智谋, 周旭, 张佳霖, 等. 黑果腺肋花楸花青素抗氧化功能的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(16): 220–224.
SUN Z M, ZHOU X, ZHANG J L, et al. Research progress on antioxidant function of anthocyanidin in *Sorbus nigra*[J]. Food Studies and Development, 2017, 38(16): 220–224.
- [12] 郑丽娜, 赵大庆, 赵文学, 等. 黑果腺肋花楸水提取物对果蝇抗衰老活性的研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(9): 165–169.
ZHENG L N, ZHAO D Q, ZHAO W X, et al. Study on the anti -aging activity of *Drosophila melanogaster* by the *Aronia melanocarpa* aqueous extract[J]. Food Research and Development, 2018, 39(9): 165–169.
- [13] PARK C H, KIM J H, LEE E B, et al. *Aronia melanocarpa* extract ameliorates hepatic lipid metabolism through PPAR γ 2 downregulation[J]. PLoS One, 2017, 12(1): e0169685.
- [14] ZHANG Y W, ZHAO Y C, LIU X L, et al. Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) as a new functional food relationship with health: An overview[J]. Journal of Future Foods, 2021, 1(2): 168–178.
- [15] SUN L, SUN J, THAVARAJ P, et al. Effects of thinned young apple polyphenols on the quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi during cold storage [J]. Food Chemistry, 2017, 224(1): 372–381.
- [16] 聂勇涛, 鲁玉凤, 杨冰, 等. 3种改性纤维素对低盐鱼糜-蟹肉混合凝胶品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(11): 1–8.
NIE Y T, LU Y F, YANG B, et al. The effect of three kinds of modified cellulose on the quality of low salt surimi crab mixed gel[J]. Journal of Food Safety Quality Inspection, 2023, 14(11): 1–8.
- [17] 杭瑜瑜, 于淑池, 商文慧, 等. 百香果皮粉对非漂洗罗非鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 92–97.
HANG Y Y, YU S C, SHANG W H, et al. The effect of passion fruit peel powder on the quality of non washed *Tilapia* surimi gel[J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(19): 92–97.
- [18] 逢昕雨. 鱼皮添加对鱼糜凝胶强度及结构的影响[D]. 大连: 大连海洋大学, 2022.
PANG X Y. Effect of fish skin addition on strength and structure of surimi gel[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2022.
- [19] 周永国, 侯文龙, 杨越冬, 等. 傅里叶变换红外光谱法同时测定奶粉中蛋白质和脂肪含量[J]. 理化检验(化学分册), 2009, 45(1): 66–69, 72.
ZHOU Y G, HOU W L, YANG Y D, et al. Simultaneous determination of protein and fat content in milk powder using Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Physical and Chemical Inspection (Chemical Division), 2009, 45(1): 66–69, 72.
- [20] LI B, DU W K, JIN J C, et al. Preservation of (-)-epigallocatechin-3-gallate antioxidant properties loaded in heat treated β -lactoglobulin nanoparticles [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(13): 3477–3484.
- [21] WANG Y, WANG D, LIU J, et al. Effects of rice

- bran feruloyl oligosaccharides on gel properties and microstructure of grass carp surimi[J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135003.
- [22] SHARMA S, MAJUMDAR R K, MEHTA N K. Gelling properties and microstructure of the silver carp surimi treated with pomegranate (*Punica granatum* L.) peel extract[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(11): 4210-4220.
- [23] 邹怡茜, 陈海强, 潘卓官, 等. 超高压耦合热处理对鳊鱼鱼糜凝胶特性和水分迁移的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(12): 272-280.
- ZOU Y Q, CHEN H Q, PAN Z G, et al. Effects of ultra-high pressure coupled heat treatment on gel properties and water migration of bighead carp surimi[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 272-280.
- [24] 韦海秋, 杨明柳, 周迎芹, 等. 花椒水提取物对鳊鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 113-120.
- WEI H Q, YANG M L, ZHOU Y Q, et al. Effect of Chinese prickly ash water extract on the characteristics of mandarin fish surimi gel[J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(6): 113-120.
- [25] 陈媚依. 鹌鹑茶提取物对鱼糜制品凝胶特性及保藏品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- CHEN M Y. Effects of partridge tea extract on gel properties and preservation quality of surimi products [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [26] YANG Y C, QU Q, LI W M, et al. Preparation of a silica-based high-performance hydrophobic interaction chromatography stationary phase for protein separation and renaturation.[J]. Journal of separation science, 2016, 39(13): 2481-2490.
- [27] CHEN J X, DENG T Y, WANG C, et al. Effect of hydrocolloids on gel properties and protein secondary structure of silver carp surimi[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(5): 2252-2260.
- [28] YAN B W, JIAO X D, ZHU H P, et al. Chemical interactions involved in microwave heat-induced surimi gel fortified with fish oil and its formation mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105(12): 1-27.
- [29] 梁恽红, 卢涵, 张香美. 蛋白二、三级结构对鱼糜凝胶质构和持水力的影响及其测定方法研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(10): 87-96.
- LIANG Y H, LU H, ZHANG X M. The effect of protein secondary and tertiary structures on the texture and water holding capacity of surimi gel and the research progress of its determination methods[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(10): 87-96.
- [30] 陈旭, 余璐涵, 蔡茜茜, 等. 低温冷链贮藏对鱼糜凝胶化学作用力和肌原纤维蛋白结构及功能特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(23): 194-201.
- CHEN X, YU L H, CAI X X, et al. Effects of low-temperature cold chain storage on the chemical force of surimi gel and the structure and functional properties of myofibrillar protein[J]. Food Science, 2022, 43(23): 194-201.
- [31] 刘镭琳, 何悦珊, 王钊, 等. 傅里叶红外光谱法与拉曼光谱法测定蛋白质二级结构研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(10): 293-298.
- LIU Z L, HE Y S, WANG Z, et al. Research progress in the determination of protein protein secondary structure by fourier transform infrared spectroscopy and raman spectroscopy[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(10): 293-298.
- [32] 徐安琪, 杨镕, 朱煜康, 等. 紫菜粉添加对鱿鱼鱼糜凝胶特性及其蛋白结构的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 46-52.
- XU A Q, YANG R, ZHU Y K, et al. Effects of laver powder addition on the gel properties and protein structure of squid surimi [J]. Food Science, 2021, 42(2): 46-52.

Effect of Polyphenols of *Aronia melanocarpa* on the Gel Properties of Fish Surimi

Wang Yafei¹, Ma Zilong¹, Li Jun², Zhu Fengmei^{*}

¹College of Food Science and Technology, Hebei Normal University of Science and Technology, Changli 066600, Hebei

²Hebei Fruit Processing Technology Innovation Center, Changli 066600, Hebei)

Abstract In order to improve the quality and taste of freshwater fish surimi products, fourier transform infrared spectroscopy, low field nuclear magnetic resonance and scanning electron microscopy were used to explore the effects of different levels of *Aronia melanocarpa* polyphenols on surimi gel properties, and the water retention, whole texture, chemical force, total sulfhydryl content, relaxation time, protein secondary structure and scanning electron microscopy of surimi gel were measured. The results showed that when the content of polyphenols was 0.375%, surimi gel had the best water holding capacity, gel properties, elasticity, and chewability. In the relaxation spectrum, the peak of the group with 0.375% of polyphenols was the highest and shifted to the left the most, indicating that the surimi gel with 0.375% of polyphenols had the most difficult flowing water and promoted structural stability. In the scanning electron microscope, the structure of surimi gel became denser with the increase of polyphenol addition. The surimi gel in 0.375% group was the densest with smooth surface. When the amount of polyphenol added increased to 0.500%, the structure of surimi gel became loose again. The disulfide bond in the chemical force gradually increased and was inversely proportional to the total sulfhydryl content. The disulfide bond hydrophobic interaction played an important role in surimi gel. Fourier transform infrared spectroscopy indicated that alpha helical structure gradually transformed into a beta folded structure, and the area of the beta folded peak gradually increased indicating that the protein secondary structure of the protein was more regular and orderly, which promoted the enhancement of surimi gel properties. In SDS-PAGE, myosin heavy chain (MHC) and actin (AC) of surimi gel gradually weakened, indicating that a stable surimi gel network structure was formed.

Keywords polyphenols of *Aronia melanocarpa*; surimi products; gel properties; microstructure; protein conformation