

乳清蛋白单宁酸复合物的泡沫特性

王永辉^{1,2}, 魏晨阳¹, 郭卫芸^{1,2}, 高雪丽^{1,2}, 李光辉^{1,2}, 何胜华^{1,2}, 黄继红¹

(1. 许昌学院 食品与药学院, 河南 许昌 461000; 2. 功能食品绿色制造河南省协同创新中心, 河南 许昌 461000)

摘要: 蛋白质和多酚可通过非共价相互作用形成复合物, 改善蛋白质自身的功能特性。该研究考察单宁酸浓度对乳清蛋白发泡能力和泡沫稳定性的影响, 并进一步探究乳清蛋白和单宁酸复合物在不同环境(温度、pH值及盐离子浓度)下的泡沫特性。结果表明, 随着单宁酸浓度的增加, 乳清蛋白的发泡能力先增加后降低, 而其泡沫稳定性持续增加。在4℃时, 乳清蛋白和单宁酸复合物表现出最佳的发泡能力和泡沫稳定性。当温度超过25℃时, 随着温度的升高, 复合物发泡能力和泡沫稳定性均明显降低。当pH值为2.0时, 复合物的发泡能力强, 但泡沫稳定性差, 而pH值为3.5时, 复合物的发泡能力差, 但泡沫稳定性高。随着钠离子浓度的增加, 复合物的发泡能力显著降低, 但钠离子的存在显著增加复合物的泡沫稳定性。因此, 在乳清蛋白中添加适量的单宁酸可有效改善其泡沫特性。

关键词: 单宁酸; 乳清蛋白; 泡沫特性; 发泡能力; 泡沫稳定性

Analysis of Foaming Properties of Whey Protein-Tannic Acid Complexes

WANG Yonghui^{1,2}, WEI Chenyang¹, GUO Weiyun^{1,2}, GAO Xueli^{1,2}, LI Guanghui^{1,2},
HE Shenghua^{1,2}, HUANG Jihong¹

(1. Food and Pharmacy College, Xuchang University, Xuchang 461000, Henan, China; 2. Collaborative Innovation Center of Functional Food Green Manufacturing, Xuchang 461000, Henan, China)

Abstract: Complexes of protein and polyphenol could be formed by non-covalent interactions, which could improve the functional properties of the protein. In this study, the effect of tannic acid concentration on the foaming capacity and foam stability of whey protein was studied, and the foaming properties of whey protein-tannic acid complexes under different conditions (temperature, pH, and sodium ion concentration) were further investigated. The results showed that the foaming capacity of whey protein firstly increased and then decreased with increasing tannic acid concentration, while the foam stability was continuously increased. The whey protein-tannic acid complexes exhibited best foaming capacity and foam stability at 4 °C. However, when the temperature was above 25 °C, the foaming capacity and foam stability of the complexes were both significantly reduced with the increment of temperature. The strongest foaming capacity and the worst foam stability of the complexes can be found at pH2.0. At pH3.5, the complexes presented the worst foaming capacity and the highest foam stability. The foaming capacity of the complexes decreased significantly with increasing sodium ion concentration. However, the presence of sodium ions significantly enhanced the foam stability of the complexes. Hence, an appropriate amount of tannic acid can effectively improve the foaming properties of whey protein.

Key words: tannic acid; whey protein; foaming properties; foaming capacity; foam stability

引文格式:

王永辉, 魏晨阳, 郭卫芸, 等. 乳清蛋白单宁酸复合物的泡沫特性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(6): 82-87.

WANG Yonghui, WEI Chenyang, GUO Weiyun, et al. Analysis of Foaming Properties of Whey Protein-Tannic Acid Complexes[J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 82-87.

乳清蛋白是牛奶加工奶酪、酪蛋白等过程中产生的副产物,含有丰富的必需氨基酸,容易被人体消化吸收,它是被广泛应用于功能食品和营养品的重要原料^[1]。乳清蛋白还具有良好的起泡性、乳化性以及凝胶特性等功能特性,在食品和化妆品等多个领域应用广泛^[2]。泡沫在食品基质中具有非常重要的作用,它能够赋予冰淇淋、奶油、蛋糕等泡沫食品独特的结构以及色泽^[3-4]。乳清蛋白经常被用作泡沫食品的原料,以提高产品的蛋白含量并改善其泡沫特性。乳清蛋白的发泡特性(如发泡能力和泡沫稳定性)受其自身结构的影响,而蛋白质的结构则受环境条件(如温度、pH值及离子强度)以及其他成分(如多酚、多糖等)的影响^[5]。利用多酚与蛋白质的相互作用形成的复合物,可以改变蛋白的表面疏水性和二级结构,进而改善乳清蛋白的发泡性能^[6-7]。

单宁酸是一类复杂的天然高分子多元酚类化合物,又称鞣酸,通常存在于多种树木的树皮和果实中^[8]。单宁酸具有较强的抗氧化活性,能够对蛋白质、脂质和维生素等营养物质提供氧化保护。单宁酸可用于食品的赋形、调味和辅色,以及作为稳定剂和澄清剂用于降低酒类和饮料的浊度等。单宁酸容易与食物中的碳水化合物、蛋白质或脂质等物质发生相互作用,形成复合物。单宁酸和蛋白质间的相互作用会自发在大多数食品体系中发生,产生的复合物会影响食品的感官、功能和营养特性^[9]。Li等^[10]将单宁酸和豌豆蛋白复合物作为乳化剂对亚麻籽油进行包埋,发现复合物能够显著增强亚麻籽油输送系统的氧化稳定性。Wang等^[11]研究发现玉米蛋白水解物和单宁酸形成的复合物,既拥有玉米蛋白水解物本身良好的发泡能力,又具有突出的泡沫稳定性。尽管研究表明蛋白质和单宁酸复合物的形成有助于提升蛋白本身的乳化以及泡沫等功能特性,但该复合物在不同环境因素下的稳定性并没有被系统研究。环境因素(如盐离子浓度、pH值、温度等)对蛋白质功能性性质具有重要影响,因此进一步研究蛋白质和单宁酸复合物在不同环境下的功能特性具有重要意义。本研究以单宁酸和乳清蛋白为原料,探究单宁酸对乳清蛋白泡沫特性的影响,进一步研究单宁酸和乳清蛋白复合物在不同温度、pH值、盐离子浓度等环境因素下的泡沫特性,旨在为相关食品加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

乳清蛋白(纯度≥90%):金诺生物科技有限公司;单宁酸(纯度≥98%);西格玛奥德里奇贸易有限公司;盐酸、氢氧化钠(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验设备

电子天平(FA 2014 B):上海越平科学仪器有限公司;数显四联磁力搅拌器(ZNCL-DL):爱博特科技有限公司;电热恒温水浴锅(DK-8D):常州普天仪器制造有限公司;酸度计(PB-10):德国 Sartorius 公司;冰箱(BCD-225SFM):上海双鹿上菱企业集团有限公司;手持电动打蛋器(YSJ2809):上海琪思科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 发泡能力及泡沫稳定性的测定

在常温下向 5.0 mL 乳清蛋白溶液(50 mg/mL)中加入 5.0 mL 去离子水,将总体积为 10 mL 的溶液转移至量筒中,用电动打蛋器搅打 2 min,立刻测定泡沫体积 V_1 (mL),30 min 后测定泡沫体积 V_2 (mL)。发泡能力($C, \%$)和泡沫稳定性($S, \%$)计算公式如下^[12]。

$$C = \frac{V_1 - 10}{10} \times 100$$

$$S = \frac{V_2 - 10}{V_1 - 10} \times 100$$

1.3.2 不同单宁酸浓度下乳清蛋白泡沫特性的测定

常温下向每份 5.0 mL 的乳清蛋白溶液(50 mg/mL)中分别加入不同体积的单宁酸溶液(50 mg/mL),再用去离子水稀释至 10 mL,使单宁酸的浓度分别为 0、0.5、2.5、5.0、10.0、15.0、20.0、25.0 mg/mL。测定不同单宁酸浓度下复合物溶液的发泡能力及泡沫稳定性。

1.3.3 不同温度下乳清蛋白泡沫特性的测定

在 5.0 mL 的乳清蛋白溶液(50 mg/mL)中加入 2 mL 的单宁酸溶液(50 mg/mL),分别用去离子水稀释至 10 mL,然后将混合溶液分别在 4、25、40、60、80 °C 处理 30 min。测定不同温度下复合物溶液的发泡能力及泡沫稳定性。

1.3.4 不同 pH 值下乳清蛋白和单宁酸复合物泡沫特性的测定

在 5.0 mL 的乳清蛋白溶液(50 mg/mL)中加入 2.0 mL 的单宁酸溶液(50 mg/mL),再用去离子水分别稀释至 10 mL。然后用盐酸溶液(1.0 mol/L)和氢氧化钠溶液(1.0 mol/L)将混合液的 pH 值依次调整为 2.0、3.5、5.0、6.5、8.0,测定不同 pH 值下复合物溶液的发泡能力及泡沫稳定性。

1.3.5 不同钠离子浓度下乳清蛋白和单宁酸复合物泡沫特性的测定

在 5.0 mL 的乳清蛋白溶液(50 mg/mL)中加入 2.0 mL 的单宁酸溶液(50 mg/mL),用去离子水分别稀释至 10 mL。然后分别向混合溶液中加入一定量的氯化钠,使钠离子浓度分别为 0、25、50、75、100、200、300 mmol/L,测定不同钠离子浓度下复合物溶液的发泡能力及泡沫稳定性。

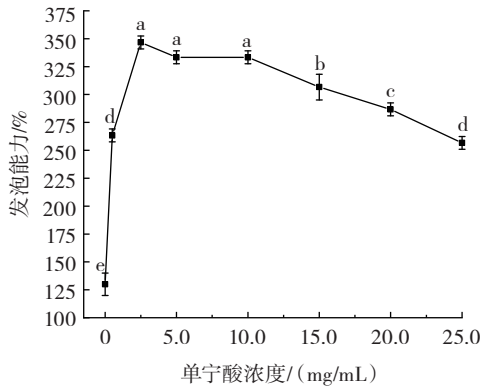
1.4 数据处理与分析

试验过程中每个处理均进行3次独立试验,每次试验进行3个平行测定。测定结果取平均值,并通过SPSS 16.0软件进行单因素方差分析($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同单宁酸浓度对乳清蛋白泡沫特性的影响

不同单宁酸浓度下乳清蛋白的发泡能力见图1。



不同字母表示存在显著性差异($p < 0.05$)。

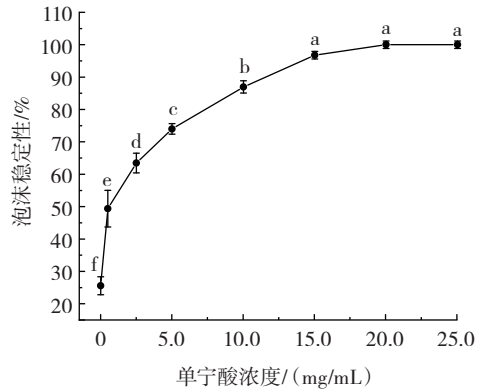
图1 不同单宁酸浓度下乳清蛋白的发泡能力

Fig.1 Foaming capacity of whey protein at different tannic acid concentrations

由图1可知,单宁酸的添加能够明显改善乳清蛋白的发泡能力。当单宁酸浓度在0~2.5 mg/mL时,乳清蛋白的发泡能力随着浓度的增加而快速增强。当单宁酸浓度在2.5~25.0 mg/mL时,乳清蛋白的发泡能力则随着单宁酸浓度的增加而缓慢下降。当单宁酸浓度为2.5 mg/mL时,乳清蛋白复合物的发泡能力达到最大值(346.7%),此时复合物的发泡能力是单纯乳清蛋白的2.67倍。乳清蛋白泡沫特性的改善可归因于其与单宁酸之间的疏水作用、氢键等非共价相互作用对蛋白自身结构的影响^[13]。从单宁酸的结构上来说,单宁酸能够提供足够的疏水基和活性羟基,其能够与乳清蛋白的残基非共价键结合,而蛋白质分子内部结合了这些同性基团后,乳清蛋白内部因发生排斥而展开,使蛋白分子柔性增强,乳清蛋白能较快地在界面上展开,从而能够提升蛋白的发泡能力^[14]。而后进一步提高单宁酸浓度(>2.5 mg/mL)使乳清蛋白的发泡能力降低,这可归因于气水界面被过多的活性基团占据,阻碍了乳清蛋白在界面快速展开,从而无法形成更多的泡沫^[15]。

不同单宁酸浓度下乳清蛋白的泡沫稳定性见图2。

由图2可知,乳清蛋白的泡沫稳定性在单宁酸的存在下明显改善,随着单宁酸浓度的增加而明显增强。当单宁酸浓度大于15.0 mg/mL时,乳清蛋白的泡沫稳定性不再显著增加($p < 0.05$),此时的泡沫稳定性是空白对照组的3.91倍。研究表明,乳清蛋白分子在气水



不同字母表示存在显著性差异($p < 0.05$)。

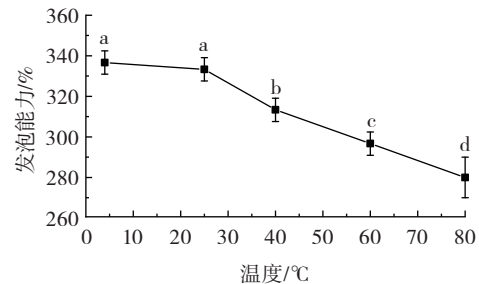
图2 不同单宁酸浓度下乳清蛋白的泡沫稳定性

Fig.2 Foam stability of whey protein at different tannic acid concentrations

界面所形成的界面膜的刚性和弹性决定了泡沫稳定性,界面膜上活性羟基越多,膜的弹性和刚性越佳^[16-17]。因此,乳清蛋白的泡沫稳定性和单宁酸的浓度呈现明显的正相关。

2.2 温度对乳清蛋白和单宁酸复合物泡沫特性的影响

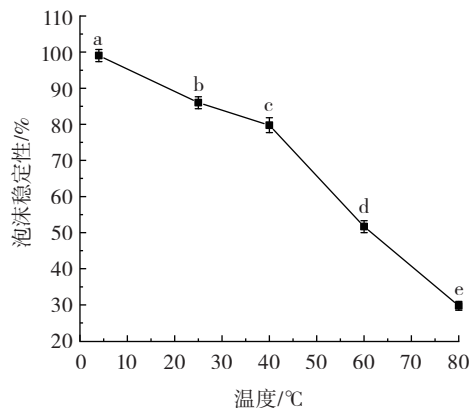
不同温度下乳清蛋白和单宁酸复合物的发泡能力和泡沫稳定性如图3和图4所示。



不同字母表示存在显著性差异($p < 0.05$)。

图3 不同温度下乳清蛋白和单宁酸复合物的发泡能力

Fig.3 Foaming capacity of whey protein-tannic acid complexes at different temperatures



不同字母表示存在显著性差异($p < 0.05$)。

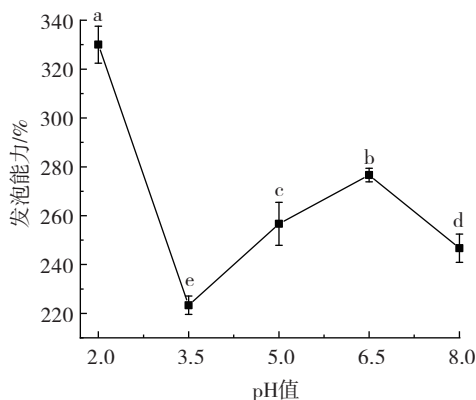
图4 不同温度下乳清蛋白和单宁酸复合物的泡沫稳定性

Fig.4 Foam stability of whey protein-tannic acid complexes at different temperatures

由图3和图4可知,温度对于乳清蛋白和单宁酸复合物的发泡能力和泡沫稳定性均具有明显影响。当温度为4℃时,乳清蛋白和单宁酸复合物表现出良好的发泡能力(336.7%)和泡沫稳定性(99.0%)。温度超过25℃时,随着温度的升高,乳清蛋白和单宁酸复合物的发泡能力和泡沫稳定性均显著降低($p<0.05$)。相对于4℃的低温环境,当温度上升到80℃时,复合物的发泡能力和泡沫稳定性分别下降了16.8%和70.0%。有研究表明,乳清蛋白的泡沫特性在60~70℃时表现最佳^[12]。但在单宁酸存在的情况下,这一结果明显不同。原因在于单宁酸和乳清蛋白的结合能力受温度的影响较大。温度升高后,引起蛋白质构象的改变,暴露出更多的疏水位点,单宁酸和蛋白质疏水作用增强,而氢键作用减弱^[13]。另外,当温度超过60℃时,乳清蛋白变性加剧,会进一步促进复合物的聚集,蛋白质聚集程度增加,导致蛋白分子刚性增强,从而影响到复合物的泡沫特性^[5]。因此,乳清蛋白和单宁酸复合物在泡沫食品中的应用应保持在低温环境。

2.3 pH值对乳清蛋白和单宁酸复合物泡沫特性的影响

不同pH值下乳清蛋白和单宁酸复合物的发泡能力变化趋势见图5。



不同字母表示存在显著性差异($p<0.05$)。

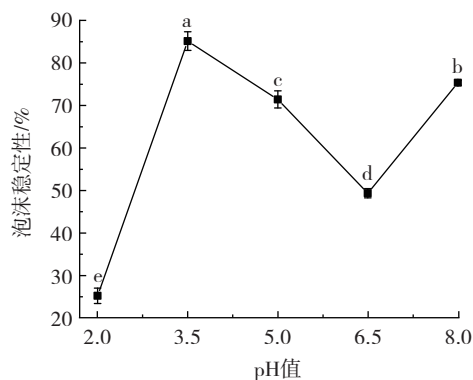
图5 不同pH值下乳清蛋白和单宁酸复合物的发泡能力

Fig.5 Foaming capacity of whey protein-tannic acid complexes at different pH

由图5可知,乳清蛋白和单宁酸复合物的发泡能力随pH值的增加整体呈先降低后升高的趋势。pH值在2.0~3.5范围内,发泡能力随着pH值增加而下降;pH值在3.5~6.5范围内,发泡能力随着pH值增加而增强;pH值在6.5~8.0范围内,发泡能力随着pH值增加而下降。当pH值为2.0时发泡能力达到最大值(330.0%),pH值为3.5时发泡能力最小(223.3%)。

pH值对乳清蛋白和单宁酸复合物泡沫特性的影响见图6。

由图6可知,pH值在2.0~3.5范围内,泡沫稳定性随着pH值增加而增强;pH值在3.5~6.5范围内,泡沫



不同字母表示存在显著性差异($p<0.05$)。

图6 pH值对乳清蛋白和单宁酸复合物泡沫稳定性的影响

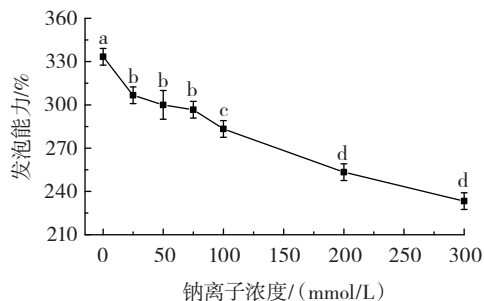
Fig.6 Foam stability of whey protein-tannic acid complexes at different pH

稳定性随着pH值增加而下降;pH值在6.5~8.0范围内,泡沫稳定性随着pH值增加而增强。当pH值为3.5时,泡沫稳定性达到最大值(85.1%),pH值为2.0时泡沫稳定性达到最小值(25.2%),最大值为最小值的3.38倍。造成这一结果的原因在于pH值影响溶液的离子化程度,进而影响乳清蛋白质的溶解度以及泡沫特性^[18]。在乳清蛋白的等电点附近,单宁酸与其结合和形成沉淀的程度最强^[13],导致乳清蛋白的发泡能力下降。但是,乳清蛋白和单宁酸复合物刚性的增加对于其泡沫稳定性的增加是有利的,这可能是由于复合物在界面形成网络增强了界面的稳定性^[19]。

此外,结果还表明在pH值为6.5时,复合物的发泡能力和泡沫稳定性均较为理想。因此乳清蛋白和单宁酸复合物加工泡沫食品时应在中性和弱酸性环境下进行。

2.4 盐离子浓度对乳清蛋白和单宁酸复合物泡沫特性的影响

不同钠离子浓度下乳清蛋白和单宁酸复合物的发泡能力和泡沫稳定性如图7所示。



不同字母表示存在显著性差异($p<0.05$)。

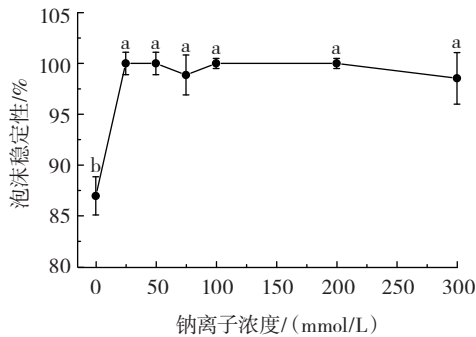
图7 不同钠离子浓度下乳清蛋白和单宁酸复合物的发泡能力

Fig.7 Foaming capacity of whey protein-tannic acid complexes at different sodium ion concentrations

由图7可知,乳清蛋白和单宁酸复合物的发泡能力随着钠离子浓度增加而下降。当钠离子浓度在

200 mmol/L 以上时,相对于未添加钠离子的对照组,复合物的发泡能力降低了约 30%。钠离子降低复合物发泡能力的原因在于盐离子的静电屏蔽效应。钠离子的存在降低了复合物之间的静电斥力,从而加剧了复合物的聚集,形成可溶性和不可溶性聚集体,造成发泡能力的降低。但是盐离子对于泡沫稳定性具有积极的影响。

不同钠离子浓度下乳清蛋白和单宁酸复合物的泡沫稳定性见图 8。



不同字母表示存在显著性差异($p < 0.05$)。

图 8 不同钠离子浓度下乳清蛋白和单宁酸复合物的泡沫稳定性
Fig.8 Foam stability of whey protein-tannic acid complexes at different sodium ion concentrations

由图 8 可知,复合物的泡沫稳定性因钠离子的添加而快速提高。但随着钠离子浓度的继续增加,泡沫稳定性基本上保持不变。产生这一现象的原因可能是钠离子的盐析作用,使溶解的乳清蛋白减少,从而使发泡能力下降,但因为溶液中以固体形式存在的乳清蛋白增加,形成的泡沫更具有刚性和黏性,使乳清蛋白的泡沫稳定性增强^[20-21]。

3 结论

通过单宁酸和乳清蛋白的非共价相互作用可以有效改善乳清蛋白的泡沫特性。当单宁酸的浓度为 2.5 mg/mL 时乳清蛋白的发泡能力最强,浓度大于 15.0 mg/mL 时乳清蛋白的泡沫稳定性最强。乳清蛋白和单宁酸复合物的发泡能力和泡沫稳定性均随着环境温度的上升而下降。pH 值对复合物的发泡能力和泡沫稳定性的作用是相反的,pH 值为 6.5 时,复合物具有较好的泡沫特性。钠离子浓度的增加会使复合物的发泡能力下降,但对泡沫稳定性有改善作用。因此,添加适量的单宁酸可以提高乳清蛋白的泡沫特性,而不同的环境条件对乳清蛋白和单宁酸复合物的泡沫特性具有较大影响。本研究为乳清蛋白的相关研究及应用提供了良好的借鉴。

参考文献:

[1] 刘培玲,张晴晴,高增丽,等.乳清蛋白改性研究进展[J].食品科学,2021,42(23):333-348.

LIU Peiling, ZHANG Qingqing, GAO Zengli, et al. Advances in modification of whey proteins[J]. Food Science, 2021, 42(23): 333-348.

[2] TULIPANO G. Whey proteins and enteric hormones Interplay between food components and the enteroendocrine system[J]. Agro Food Industry Hi-Tech, 2015, 26(2): 15-19.

[3] AMAGLIANI L, SILVA J V C, SAFFON M, et al. On the foaming properties of plant proteins: Current status and future opportunities [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 261-272.

[4] MURRAY B S. Recent developments in food foams[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2020, 50: 101394.

[5] LI N, GIRARD A L. Impact of pH and temperature on whey protein-proanthocyanidin interactions and foaming properties[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108100.

[6] MENG Y Y, LI C. Conformational changes and functional properties of whey protein isolate-polyphenol complexes formed by non-covalent interaction[J]. Food Chemistry, 2021, 364: 129622.

[7] YE J P, DENG L P, WANG Y R, et al. Impact of rutin on the foaming properties of soybean protein: Formation and characterization of flavonoid - protein complexes[J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130238.

[8] 常丽,陈安国,黄思齐,等.单宁酸在抗菌及伤口愈合中的研究进展[J].中国麻业科学,2022,44(1):63-68.
CHANG Li, CHEN Anguo, HUANG Siqi, et al. Research progress of tannic acid in antibacterial and wound healing[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2022, 44(1): 63-68.

[9] 曲敏,陈强,孙冰玉,等.多酚的功能性质及与蛋白质、多糖相互作用研究进展[J].食品工业科技,2021,42(11):405-413.
QU Min, CHEN Qiang, SUN Bingyu, et al. Advances in studies on the functional properties of polyphenols and their interactions with proteins and polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 405-413.

[10] LI R Y, DAI T T, TAN Y B, et al. Fabrication of pea protein-tannic acid complexes: Impact on formation, stability, and digestion of flaxseed oil emulsions[J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125828.

[11] WANG Y H, LIN Y, YANG X Q. Foaming properties and air-water interfacial behavior of corn protein hydrolyzate - tannic acid complexes[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(2): 905-913.

[12] 孙欣瑶,赵晓,倪艳,等.热处理对浓缩乳清蛋白起泡性的影响及其在咖啡奶盖中的应用[J].中国乳品工业,2023,51(3):35-40.
SUN Xinyao, ZHAO Xiao, NI Yan, et al. Effect of heat treatment on the foaming properties of whey protein concentrate and its application in coffee milk cover[J]. China Dairy Industry, 2023, 51(3): 35-40.

[13] 石长波,孙昕萌,赵钜阳,等.单宁酸和蛋白质相互作用机制及其对蛋白质理化及功能特性影响的研究进展[J].食品工业科技,2022,43(14):453-460.
SHI Changbo, SUN Ximeng, ZHAO Juyang, et al. Interaction mechanism between tannic acid and protein and its effects on physicochemical and functional properties of protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 453-460.

[14] 赵钜阳,姚恒喆,石长波.多酚与蛋白质相互作用及其对蛋白质影响[J].食品与生物技术学报,2020,39(12):14-20.
ZHAO Juyang, YAO Hengzhe, SHI Changbo. Advances in interaction between phenols and proteins and their effects on proteins[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(12): 14-20.

[15] NAGY K, COURTET-COMPONDU M C, WILLIAMSON G, et al. Non-covalent binding of proteins to polyphenols correlates with their amino acid sequence[J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1333-

- 1339.
- [16] YANG J, LAMOCHI ROOZALIPOUR S P, BERTON-CARABIN C, et al. Air-water interfacial and foaming properties of whey protein-sinapic acid mixtures[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106467.
- [17] 伊莉, 吴锁柱, 张晓晓, 等. 茶多酚对胡麻粕蛋白表面性质的影响[J]. *包装与食品机械*, 2020, 38(3): 13-17.
- YI Li, WU Suozhu, ZHANG Xiaoxiao, et al. Study on the effect of tea polyphenols on the surface properties of flax protein[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2020, 38(3): 13-17.
- [18] BENELHADJ S, GHARSALLAOUI A, DEGRAEVE P, et al. Effect of pH on the functional properties of *Arthrospira (Spirulina) platensis* protein isolate[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 1056-1063.
- [19] DACHMANN E, NOBIS V, KULOZIK U, et al. Surface and foaming properties of potato proteins: Impact of protein concentration, pH value and ionic strength[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 107: 105981.
- [20] 张小影, 齐宝坤, 孙禹凡, 等. 盐离子对大豆-乳清混合蛋白乳液的稳定性及界面特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(6): 22-28.
- ZHANG Xiaoying, QI Baokun, SUN Yufan, et al. Effect of salt ion on the stability and interfacial adsorption characteristics of soybean-whey mixed protein emulsion[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(6): 22-28.
- [21] 覃思, 吴卫国, 刘焱, 等. 茶多酚及其单体和加工环境对蛋清蛋白起泡性能影响的研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(1): 90-94.
- QIN Si, WU Weiguo, LIU Yan, et al. Study on effects of tea polyphenols and monomers as well as environmental factors on foaming property of egg albumen protein[J]. *Food Science*, 2009, 30(1): 90-94.

加工编辑: 刘艳美
收稿日期: 2023-12-05