

茶多酚同乳清蛋白的相互作用及其复合物的泡沫特性分析

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

(1. 许昌学院食品与药学院, 河南许昌 461000) (2. 河南省功能食品绿色制造协同创新中心, 河南许昌 461000)

摘要: 多酚同乳清蛋白的相互作用广泛存在于相关食品的加工过程, 其对乳清蛋白的泡沫特性产生较大影响。该研究以乳清分离蛋白 (Whey Protein Isolation, WPI) 和茶多酚 (Tea Polyphenols, TP) 为原料, 研究 TP 分别同 WPI 以及热处理 WPI (Heated WPI, HWPI) 的相互作用, 并探究 TP 质量浓度、pH 值、盐离子以及温度对 TP/WPI 和 TP/HWPI 复合物泡沫特性的影响。结果表明, 相对于 WPI, TP 同 HWP 具有更强的相互作用。TP 质量浓度较高时 (7.5 mg/mL), 其同 WPI 及 TP/HWPI 可形成不溶性复合物。当 TP 质量浓度为 2.5 和 1.25 mg/mL 时, TP/WPI 和 TP/HWPI 分别具有最好的泡沫特性, 发泡能力分别为 94.51% 和 95.11%, 泡沫稳定性分别为 272.32% 和 276.70%。当 pH 值分别为 5.0 和 4.0 时, TP/WPI 和 TP/HWPI 分别具有最好的泡沫特性, 发泡能力分别为 92.50% 和 97.82%, 泡沫稳定性分别为 276.73% 和 298.33%。盐离子浓度的增加使 TP/WPI 和 TP/HWPI 的泡沫特性变差, 但后者受到的影响程度更小。相对于 TP/WPI, 温度升高对 TP/HWPI 的发泡能力的影响较小。因此, 添加低浓度的 TP 可形成具有良好泡沫特性的 TP/HWPI 复合物。该研究为乳蛋白相关泡沫食品的加工提供了借鉴。

关键词: 乳清蛋白; 茶多酚; 起泡能力; 泡沫稳定性

文章编号: 1673-9078(2025)08-122-130

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.8.0994

Interaction of Tea Polyphenols with Whey Protein and Foam Properties of Resulting Complexes

WANG Yonghui^{1,2}, NIU Wenjing¹, GUO Weiyun^{1,2}, GAO Xueli^{1,2}, LI Guanghui^{1,2}, HE Shenghua^{1,2}, HUANG Jihong^{1,2}

(1. Food and Pharmacy College, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

(2. Collaborative Innovation Center of Functional Food Green Manufacturing, Xuchang 461000, China)

Abstract: In the processing of foods containing polyphenols and whey protein, both components interact, which has a great influence on the foam properties of whey protein itself. Using whey protein isolation (WPI) and tea polyphenols (TP) as raw materials, the interactions of TP with WPI and heated WPI (HWPI) were investigated, and the effects of the TP concentration, pH, salt ions, and temperature on the foam properties of the resulting TP/WPI and TP/HWPI complexes were

引文格式:

王永辉,牛文静,郭卫芸,等.茶多酚同乳清蛋白的相互作用及其复合物的泡沫特性分析[J].现代食品科技,2025,41(8):122-130.

WANG Yonghui, NIU Wenjing, GUO Weiyun, et al. Interaction of tea polyphenols with whey protein and foam properties of resulting complexes [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 122-130.

收稿日期: 2024-07-12

基金项目: 河南省中央引导地方科技发展项目 (Z20221341069); 许昌学院科研项目 (2024ZD012); 功能食品绿色制造河南省协同创新中心开放课题 (2024XTKF012)

作者简介: 王永辉 (1985-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品组分相互作用及食品功能因子稳态化, E-mail: yonghuione@126.com

evaluated. The interaction between TP and HWPI was stronger than that of the former with WPI. Insoluble complexes were formed between TP and WPI (or HWPI) when TP was present at a high concentration (7.5 mg/mL). At TP concentrations of 2.5 and 1.25 mg/mL, respectively, TP/WPI and TP/HWPI both exhibited the best foam properties, with a corresponding foam capacity of 94.51% and 95.11%, and foam stability of 272.32% and 276.70%. At pH 5.0 and 4.0, respectively, TP/WPI and TP/HWPI both showed the best foam properties, with a corresponding foam capacity of 92.50% and 97.82%, and foam stability of 276.73% and 298.33%. The foaming properties of TP/WPI and TP/HWPI degraded with increasing salt (ion) concentration, but those of TP/HWPI were less affected. Compared with TP/WPI, temperature had less effect on the foaming ability of TP/HWPI. Therefore, the addition of TP at a low concentration could form TP/HWPI complexes with good foam properties. This study provides a reference for processing milk-protein-related foamed food.

Key words: whey protein; tea polyphenols; foaming capacity; foam stability

乳清蛋白是牛奶生产酪蛋白或加工奶酪等过程中的副产物, 营养丰富, 并具有良好的加工特性^[1,2]。乳清蛋白富含人体必需氨基酸和多种活性成分, 是一种高效的人体蛋白质的补充来源, 其被广泛应用于功能食品配料^[3]。乳清蛋白还具有独特的功能特性, 如起泡性、乳化性和持水性等, 其在冰淇淋、奶油和蛋糕等泡沫食品的加工中发挥着重要作用。泡沫是重要的食品基质, 其直接决定着泡沫类食品的风味以及口感。作为重要的食品配料, 乳清蛋白被广泛应用于各类泡沫类食品, 以提升产品的品质。但是乳清蛋白的泡沫特性除了易受环境因素(如温度、pH 值以及离子强度等)的影响外, 还会受到其他食品成分(如多酚、多糖等)的影响^[4,5]。有研究指出, 对乳清蛋白的热处理可以提升其同花青素的相互作用, 并且两者形成的复合物具有更好的泡沫特性^[6]。还有研究表明, 乳清蛋白同原花青素形成的复合物的泡沫特性受 pH 以及温度的影响, 通过控制工艺参数可以对该复合物的功能特性进行调控^[5]。因此, 探讨乳清蛋白在不同环境体系下的功能特性对于指导生产实践具有重要意义。

茶多酚(Tea Polyphenols, TP)是从茶叶中提取的多酚类化合物, 具有优良的抗氧化活性以及对自由基的有效清除活性^[7], 其还能够预防抑郁症、糖尿病等慢性疾病^[8]。TP 还可以与其他食品成分, 如蛋白质、多糖、脂类、金属离子等相互作用, 改变食品的质地和风味^[9]。TP 同蛋白质可通过共价或非共价的方式发生结合而形成蛋白-多酚复合物, 并对蛋白质的功能性质产生影响^[10,11]。通常, 多酚与蛋白质之间的非共价相互作用通常是可逆的^[12], 两者结合后形成的复合物可以在一定程度上提高各自的理化性质和功能性质^[13-15]。研究表明, 低浓度 TP 同乳清蛋白形成的复合物同样具有提高乳清蛋白的

泡沫稳定性的能力^[16]。利用多酚对乳清蛋白进行物理修饰改性提升其泡沫特性, 是一种绿色、安全和富有前景的策略。但是, 当前对于 TP 和乳清蛋白复合物的研究, 主要采用未变性的天然乳清蛋白, 而对于高温变性后的乳清蛋白则较少关注。但在实践中, 乳清蛋白通常被高温加热处理后再进行后续的加工利用。因此, 探究热处理前后乳清蛋白同 TP 复合物的功能特性具有重要的实践意义。此外, 目前对于乳清蛋白和 TP 复合物泡沫特性的研究上尚缺乏在复杂环境体系中的进一步探究。

该研究以 TP 和乳清分离蛋白(Whey Protein Isolation, WPI)为原料, 首先通过光谱学分析 TP 同 WPI 及热处理的乳清蛋白(Heated WPI, HWPI)的相互作用, 并探究 TP 质量浓度对两者泡沫特性的影响, 以及 TP/WPI 和 TP/HWPI 复合物在不同环境条件下的泡沫特性。该研究可为基于 WP 的泡沫食品加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

乳清分离蛋白($\geq 90\%$), 陕西百川生物科技有限公司; 茶多酚($\geq 98\%$), 上海源叶生物科技有限公司; 无水氯化钙、氯化钠、氢氧化钠、盐酸(均为分析纯), 天津科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

BCE224-1CCN 型电子分析天平, 德国赛多利斯仪器有限公司; YSJ2809 型手持电动打蛋器, 上海琪思科技有限公司; DK-8D 型电热恒温水浴锅, 常州普天仪器制造有限公司; RT15 型多点磁力搅拌器, 德国艾卡仪器储备有限公司; PHSJ-3F 型台式 PH 计, 上海电科学仪器股份有限公司; Zetasizer

Lab 纳米粒度与电位分析仪, 英国马尔文帕纳科有限公司; UV-5100 型紫外分光光度计, 上海元析仪器有限公司; F4500 荧光光谱仪, 日本日立公司; BCD-638KWPZM 型冰箱, 美的电冰箱有限公司; BCE224-1CCN 型电子分析天平, 德国赛多利斯仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 茶多酚和不同乳清蛋白复合物的制备

常温下将 WPI 和 TP 分别溶于去离子水, 配制质量浓度为 50 mg/mL 的 WPI 和 50 mg/mL 的 TP 溶液。上述溶液在配制过程中均经过 30 min 磁力搅拌, 其中 WPI 溶液配制后置于 4 °C 冰箱, 12 h 后使用。取 10 mL 的 WPI 溶液, 分别加入不同体积的 TP 溶液, 再用去离子水将混合液稀释至 20 mL, 使最终 TP 的质量浓度分别为 0、0.25、0.75、1.25、2.0、2.5 和 7.5 mg/mL。另外, 将配制的 WPI 溶液在水浴锅中, 90 °C 下热处理 15 min, 冷却至室温后, 获得 HWPI。类似地, 在 HWPI 溶液中加入不同体积的 TP 溶液, 使 TP 的质量浓度也分别为 0、0.25、0.75、1.25、2.0、2.5 和 7.5 mg/mL。

1.3.2 复合物胶体稳定性的测定

通过对 TP/WPI 复合物及 TP/HWPI 复合物浊度及 Zeta 电位的测定对复合物的胶体稳定性进行表征。浊度和 zeta 电位的测定均在常温下进行。浊度的测定以复合物溶液在 600 nm 下的吸光值表示。Zeta 电位测定时将分散相(水)和连续相(复合物胶体)的折光率分别设定为 1.33 和 1.46。

1.3.3 内源荧光光谱测定

参考 Song 等^[17]的方法并稍作修改。在常温下, 用去离子水对新鲜制备的不同 TP 质量浓度(0、0.25、0.75、1.25、2.0、2.5 mg/mL) 的 TP/WPI 及 TP/HWPI 复合物溶液分别进行 50 倍稀释, 然后测定色氨酸荧光光谱。激发波长为 280 nm, 发射波长的扫描范围 290~450 nm, 狭缝均为 5 nm, 电压 700 V, 测定温度为 25 °C。

1.3.4 发泡能力和泡沫稳定性测定

参考 Li 等^[18]的方法, 并略有修改。分别取 20 mL WPI、HWPI 及 TP/WPI、TP/HWPI 复合物溶液, 并分别置于 50 mL 烧杯中。用打蛋器进行 1 min 的搅打, 随后立即测量并记录泡沫及液体总体积 V_1 (mL)。静置 30 min 后, 再次测量并记录其

总体积 V_2 (mL)。根据公式(1)和公式(2)分别计算发泡能力(Foaming Capacity, FC)和泡沫稳定性(Foam Stability, FS):

$$D_1 = \frac{V_1 - 20}{20} \times 100\% \quad (1)$$

$$D_2 = \frac{V_2 - 20}{V_1 - 20} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

D_1 ——发泡能力(FC), %;

D_2 ——泡沫稳定性(FS), %;

V_1 ——泡沫及液体总体积, mL;

V_2 ——再次测量并记录其总体积, mL。

1.3.5 不同TP浓度下复合物泡沫特性的测定

将按照 1.3.1 中的方法制备的不同 TP 浓度的 TP/WPI 复合物溶液及 TP/HWPI 复合物溶液, 根据 1.3.4 中的方法进行 FC 和 FS 的测定。

1.3.6 不同pH下复合物的泡沫特性的测定

根据前期实验结果, 选择 TP 质量浓度为 2.5 mg/mL 的 TP/WPI 复合物溶液, 以及 TP 质量浓度为 1.25 mg/mL 的 TP/HWPI 复合物溶液进行实验(下同)。用 2.0 mol/L 的 NaOH 和 2.0 mol/L 的盐酸将 TP/WPI 复合物溶液的 pH 值分别调为 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0。测定各 pH 值下复合物的 FC 和 FS。类似地, 对 TP/HWPI 复合物溶液, 以及 WPI 和 HWPI 在上述相应 pH 值下的 FC 和 FS 进行测定。

1.3.7 不同盐离子浓度下复合物泡沫特性的测定

在 TP/WPI 和 TP/HWPI 两种复合物溶液中, 分别加入不同体积的 CaCl_2 溶液(0.5 mol/L), 使各复合物溶液中 Ca^{2+} 浓度分别为 0、5、10、15、20 mmol/L。测定不同 Ca^{2+} 浓度下各复合物溶液的 FC 和 FS。

类似地, 在上述两种复合物溶液中加入 NaCl (1.0 mol/L) 溶液, 使 Na^+ 浓度分别为 0、50、100、150、200 mmol/L。测定不同 Na^+ 浓度下各复合物溶液的 FC 和 FS。

1.3.8 不同温度下复合物泡沫特性的测定

将 TP/WPI 以及 TP/HWPI 复合物溶液分别在 40 °C 和 80 °C 下的水浴锅中保温 30 min, 然后按照 1.3.4 中的方法立即测定各复合物溶液的 FC 和 FS。另外, 将在 4 °C 冰箱隔夜放置的复合物溶液以及常温(20 °C)放置 2 h 的复合物溶液按照相同方法进行测定。

1.3.9 数据处理

实验过程中每个处理均进行三次独立实验,每次实验进行三次平行测定,测定结果取平均值。数据分析采用 SPSS 16.0 软件,作图采用 Origin 2021 软件。

2 结果与分析

2.1 TP质量浓度对TP/WPI及TP/HWPI复合物稳定性的影响

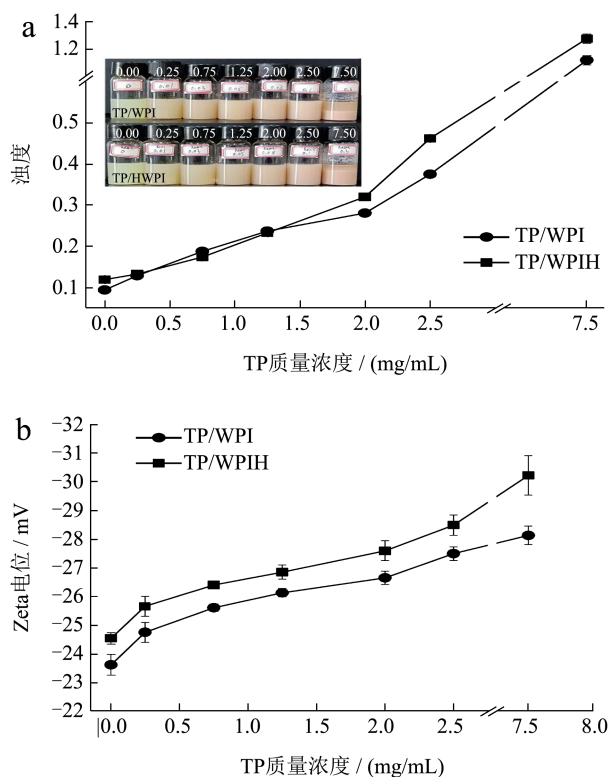


图1 TP质量浓度对TP/WPI和TP/HWPI复合物浊度(a)和zeta电位(b)的影响

Fig.1 Effect of TP mass concentration on turbidity (a) and zeta potential (b) of TP/WPI and TP/HWPI complexes

注: 插图不同 TP 质量浓度 (mg/mL) 下 TP/WPI 和 TP/HWPI 复合物溶液的外观。

蛋白质同多酚非共价结合后会对蛋白质的溶解性产生较大影响。由图 1a 可知, 随着 TP 质量浓度的增加, TP/WPI 和 TP/HWPI 复合物的浊度逐渐增加。结合两种复合物溶液的外观可以看出, 当 TP 的质量浓度在 2.5 mg/mL 及以下时, 复合物溶液的浊度均明显升高, 但并没有出现明显的不溶物。另外, 当 TP 质量浓度超过 1.25 mg/mL 时, 相对于 TP/WPI 复合物溶液, TP/HWPI 复合物溶液的浊度增加更快。当 TP 的质量浓度过高时 (如 7.5 mg/mL),

TP/WPI 和 TP/HWPI 复合物溶液中出现明显的不溶物, 产生大量沉淀, 尤其是 TP/HWPI 复合物溶液更为明显。浊度的改变可以认为是复合物形成的过程, 其受到多种因素的影响, 包括颗粒尺寸、样品色泽、折射率以及颗粒间的相互作用^[19]。当 TP 质量浓度较低时, 形成的复合物体积较小, 能够抵抗重力作用而不发生沉降, 而 TP 质量浓度较高时则形成了尺寸较大的复合物, 受重力作用而沉淀。相对于 WPI, HWPI 同 TP 具有更强的结合能力, 因此导致在 TP 质量浓度较高时, TP/HWPI 复合物溶液具有更高的浊度。有研究指出, WPI 经过热处理后, 其同原花青素的结合能力明显提高, 复合物溶液的浊度增加^[5,6]。

Zeta 电位是对溶液中胶体颗粒固-液界面电荷强弱的度量, 其绝对值愈高, 胶体复合物之间的静电斥力越强, 复合物的稳定性就愈高^[20]。由图 1b 可知, WPI、HWPI 及两者同 TP 形成的胶体复合物的表面均带负电荷。当不添加 TP 时, HWPI 的 Zeta 电位绝对值明显高于 WPI。这是由于热处理引起蛋白分子去折叠, 在蛋白质或其聚集体表面暴露出更多带有电荷的基团^[6,17]。TP 的添加使两种复合物的电位绝对值升高, 并且随 TP 质量浓度的增加, Zeta 电位绝对值均呈上升趋势。这是因为多酚同蛋白质发生非共价相互作用形成复合物后, 导致蛋白的球形结构更为紧密, 胶体颗粒尺寸变小, 从而提高了 Zeta 电位绝对值^[21]。但是随着多酚浓度的增加, 蛋白质分子同多酚发生作用而形成聚集体, 导致蛋白溶解度的降低。尽管在较高 TP 质量浓度时, 复合物具有最高的 Zeta 电位绝对值, 但并不意味着此时的复合物稳定性更高。这是因为 Zeta 电位所测定的是能够均匀分散在液体中的胶体颗粒, 而非不溶性蛋白聚集体。

2.2 WPI及HWPI的内源荧光光谱分析

色氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸等氨基酸的残基都是蛋白中具有荧光的基团。就 WPI 而言, 色氨酸对其内源性荧光特性起到了关键作用^[22]。由图 2 可知, 随着 TP 质量浓度的增加, WPI 及 HWPI 发射的荧光强度逐渐减弱。这是由于多酚同蛋白质的相互作用, 导致蛋白中的荧光基团发生了荧光猝灭现象^[17]。此外, 可以发现随着 TP 质量浓度的增加, WPI 和 HWPI 的最大发射波长均出现轻微的红移。这说明 TP 同 WPI 和 HWPI 的结合导致了色氨酸和酪氨酸残基所处的微环境发生改变。当 TP 同乳清

蛋白发生相互作用后,导致蛋白结构发生改变,色氨酸所处的微环境疏水性下降,极性增强,产生了不能发射荧光的基态配合物^[1]。

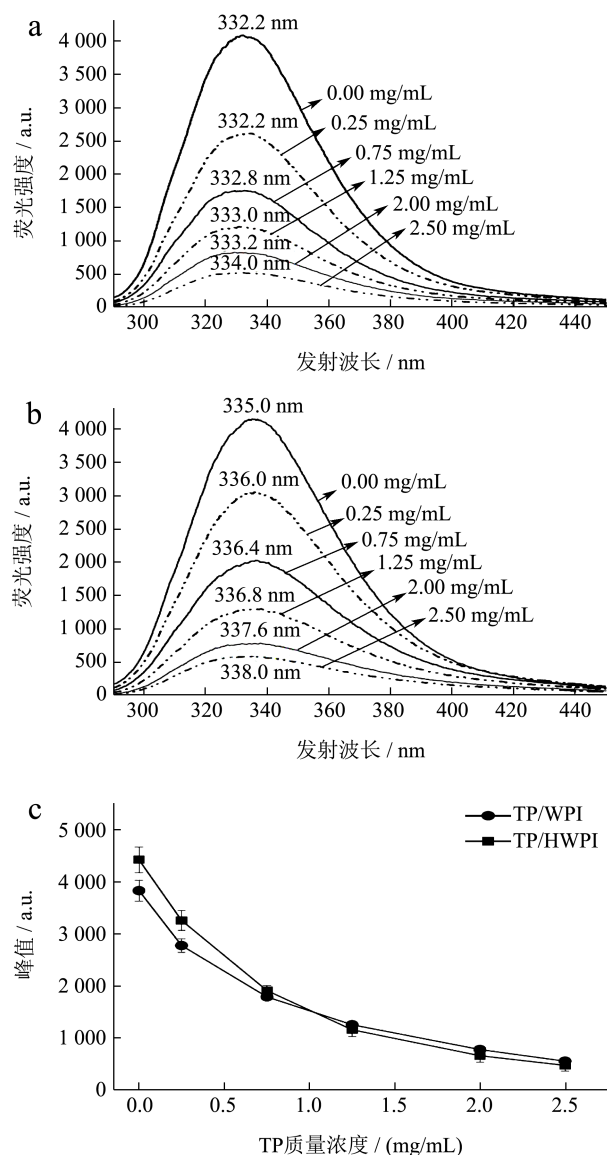


图2 TP质量浓度对TP/WPI (a) 和TP/HWPI (b)

固有荧光光谱及两者荧光峰值 (c) 的影响

Fig.2 Effect of TP mass concentration on intrinsic fluorescence spectra of TP/WPI (a) and TP/HWPI (b) and fluorescence peak values (c)

由图2c可知,相对于WPI,HWPI在最大发射波长下的荧光强度更高。类似研究也表明,热处理过程中会导致乳清蛋白中的荧光基团暴露,从而使荧光强度在一定程度上增加^[6]。此外,可以发现当TP质量浓度低于0.75 mg/mL时,TP对HWPI的荧光淬灭作用更强,而当TP高于该质量浓度时,TP对WPI和HWPI的猝灭作用没有明显差异。这可能是由于热处理后蛋白表面暴露出来的疏水位点较

多,TP在低质量浓度下即可高效的同蛋白发生作用,导致其荧光淬灭作用增强。当TP质量浓度较高时,蛋白表面的未被结合的疏水位点数量已经大幅减少,因此荧光淬灭强度趋于平缓。

2.3 TP质量浓度对WPI及HWPI泡沫特性的影响

由图3可知,热处理能够明显影响WPI的发泡能力和泡沫稳定性。热处理导致WPI的发泡能力大幅下降,而其泡沫的稳定性却大幅提升。类似研究表明,当WPI经过60℃以上热处理时,由于 β -乳球蛋白的展开暴露了游离-SH,促进了S-S的形成,蛋白质发生交联从而造成起泡性变差,然而伴随着S-S数量的增多,增加了泡沫的强度^[23]。

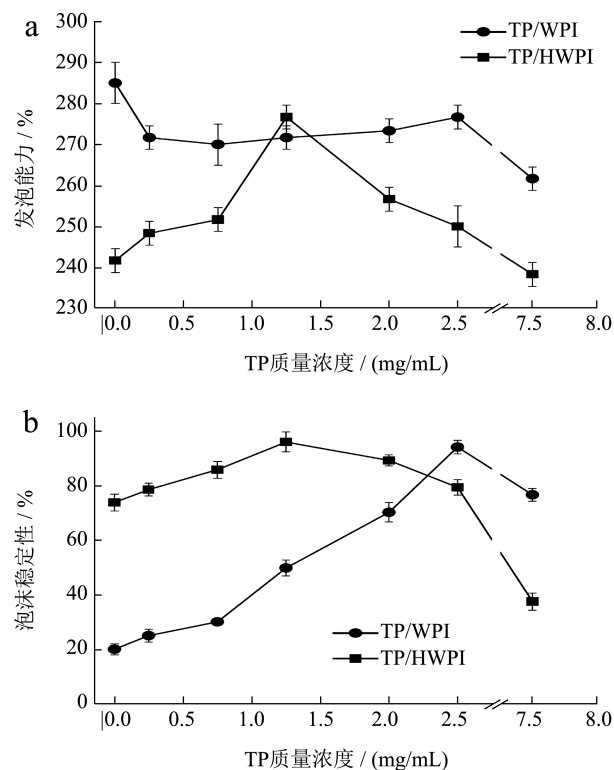


图3 TP质量浓度对TP/WPI和TP/HWPI发泡能力 (a) 泡沫稳定性 (b) 的影响

Fig.3 Effect of TP mass concentration on foaming ability (a) and foaming capacity (b) of TP/WPI or TP/HWPI complexes

图3还表明,TP的添加对于WPI和HWPI的泡沫特性均具体较大的影响。当TP质量浓度在2.5 mg/mL以下时,随着TP质量浓度的增加,TP/WPI的发泡能力经历了小幅下降的过程,而其泡沫稳定性则呈现一直上升的趋势。但是,TP质量浓度较高时(7.5 mg/mL),TP/WPI的发泡能力和泡沫稳定性均明显下降。当TP的质量浓度为2.5 mg/mL

时, TP/WPI 的泡沫稳定性较高, 达到 94.51%, 此时其发泡能力也相对较好, 达到 272.32%。随着 TP 质量浓度的增加, TP/HWPI 的发泡能力和泡沫稳定性均呈现先增加后下降的趋势。当 TP 质量浓度为 1.25 mg/mL 时, TP/HWPI 的起泡能力和泡沫稳定性均最好, 分别高达 276.70% 和 95.11%。类似研究指出, TP 质量分数在 0.4% 以下时, 能够使鸡蛋蛋白的起泡能力和泡沫稳定性明显提升, 但是当其质量分数高于 0.5% 时, 起泡能力和泡沫稳定性均会下降^[24]。多酚对蛋白泡沫特性的影响较为复杂, 受到多酚浓度等多重因素的影响。当多酚类物质所提供的酚羟基和疏水基团数量恰到好处时, 会使乳清蛋白分子的柔韧性达到理想平衡, 进而促使蛋白质能够在水/空气界面上迅速且有效地展开, 形成韧性较强的界面膜, 从而使泡沫特性达到最佳状态^[18]。另外, 多酚的浓度还会影响蛋白质在界面的浓度。研究表明, 当 EGCG 质量浓度低于 60 mg/L 时, 随多酚浓度增加, 气/水界面负载的蛋白浓度升高, 界面弹性模量增大, 但是当 EGCG 质量浓度高于 60 mg/L 时, 界面负载的蛋白浓度会降低^[25]。

2.4 pH对TP/WPI及TP/HWPI泡沫特性的影响

如图 4 所示, 当 pH 值从 2.0 增加到 5.0 时, TP/WPI 的发泡能力及泡沫稳定性均逐渐增加。当 pH 值超过 5.0 时, TP/WPI 的发泡能力则出现下降趋势, 但其泡沫稳定性则呈现了下降后再次增加的趋势。当 pH 值为 5.0 时, TP/WPI 的发泡能力及泡沫稳定性均达到了峰值, 分别为 276.73% 和 92.50%。相对于 TP/WPI, TP/HWPI 的泡沫特性随 pH 值的升高呈现出类似的变化趋势。pH 值在 4.0 以下时, TP/HWPI 的起泡能力和泡沫稳定性随 pH 值增加而升高, pH 值从 4.0 增加到 7.0 时, 其起泡能力快速下降后趋于平稳, 而泡沫稳定性呈下降后再增加的趋势。当 pH 值为 4.0 时, TP/HWPI 的起泡能力和泡沫稳定性均出现最大值, 分别为 298.33% 和 97.82%。因此, 在最佳 pH 条件下, TP/HWPI 具有更好的泡沫特性。以上现象可归因于 pH 对多酚和蛋白质相互作用的影响。在远离蛋白等电点时, 多酚同蛋白的结合能力会降低, 蛋白和多酚的结合不稳定, 进而影响复合物的泡沫特性^[26,27]。在 pH 值为 5.0 时, 因最为接近 WPI 的等电点, TP 和 WPI 相互作用最强, TP/WPI 的泡沫特性最好。由于 HWPI 是热变性蛋白, 其 Zeta 电位绝对值相对于 WPI 有所升高 (图 1b), 因此其等电点可能有

所降低。因此, 在 pH 值为 4.0 时, 因 TP 和 HWPI 的相互作用最强, TP/HWPI 复合物的泡沫特性最好。

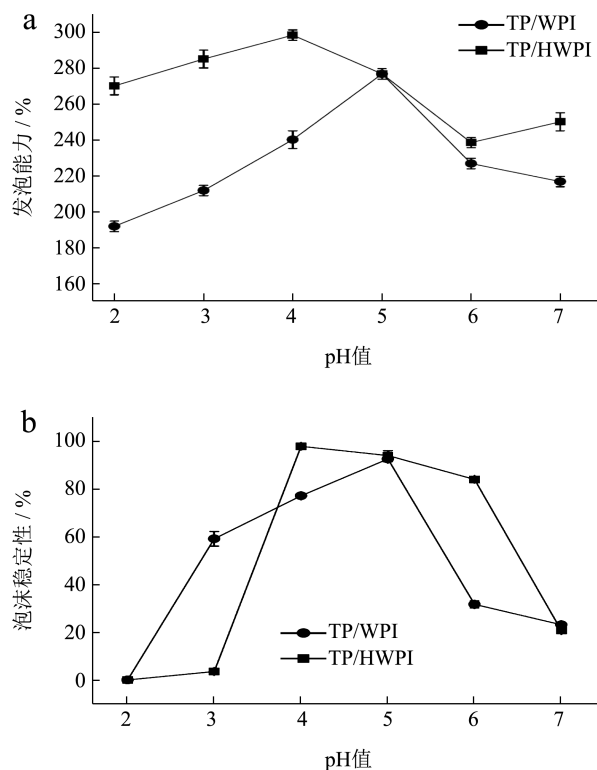


图 4 不同 pH 值下 WPI、HWPI、以及 TP/WPI 和 TP/HWPI 的发泡能力 (a) 和泡沫稳定性 (b)

Fig.4 Foaming capacity (a) and foam stability (b) of WPI, HWPI, TP/WPI and TP/HWPI under different pH

2.5 盐离子对TP/WPI及TP/HWPI泡沫特性的影响

盐离子种类及浓度的变化对多酚和蛋白之间的相互作用产生较大影响。随着离子强度的逐步增强, 乳清蛋白的疏水氨基酸残基逐渐显现, 从而能够增加多酚与蛋白之间的亲和力^[28]。在钙离子的存在下, 产生较强的电荷屏蔽作用, 容易使蛋白和多酚形成大量的不溶性复合物^[29]。蛋白多酚不溶性复合物的形成对蛋白的功能特性产生较大影响。由图 5 可知, TP/WPI 和 TP/HWPI 的发泡性能力和泡沫稳定性均随着 Ca^{2+} 浓度的增加而逐渐降低。当 Ca^{2+} 的浓度达到 20 mmol/L 时, TP/WPI 的发泡能力和泡沫稳定性分别下降至 231.01% 和 87.64%, 而 TP/HWPI 的发泡能力和泡沫稳定性仅下降到 250.22% 和 92.30%。显然, 在不同 Ca^{2+} 浓度下, TP/HWPI 的泡沫特性始终优于 TP/WPI。造成这一结果的原因在于 TP/HWPI 复合物具有更多的表面电荷, 其对 Ca^{2+} 静电屏蔽的耐受性更强。

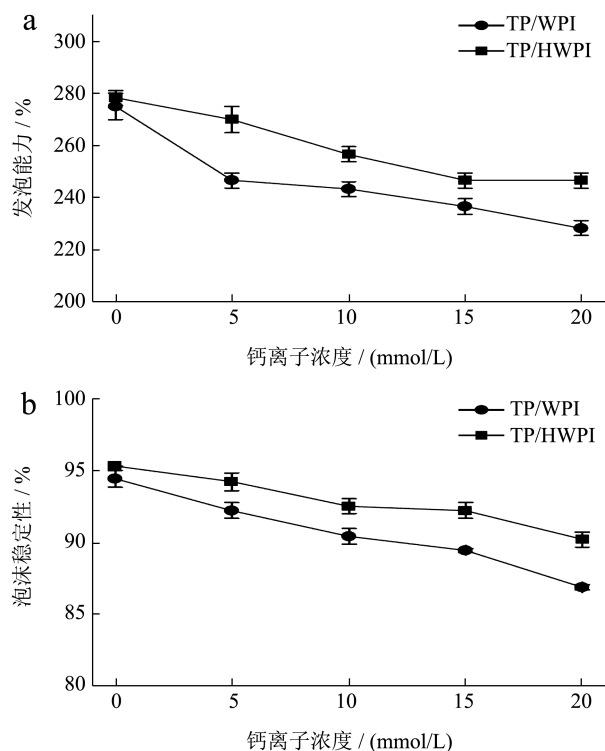


图5 钙离子浓度对 TP/WPI 和 TP/HWPI 发泡能力 (a) 和泡沫稳定性 (b) 的影响

Fig.5 Effect of Ca^{2+} concentration on foaming capacity (a) and foam stability (b) of TP/WPI and TP/HWPI

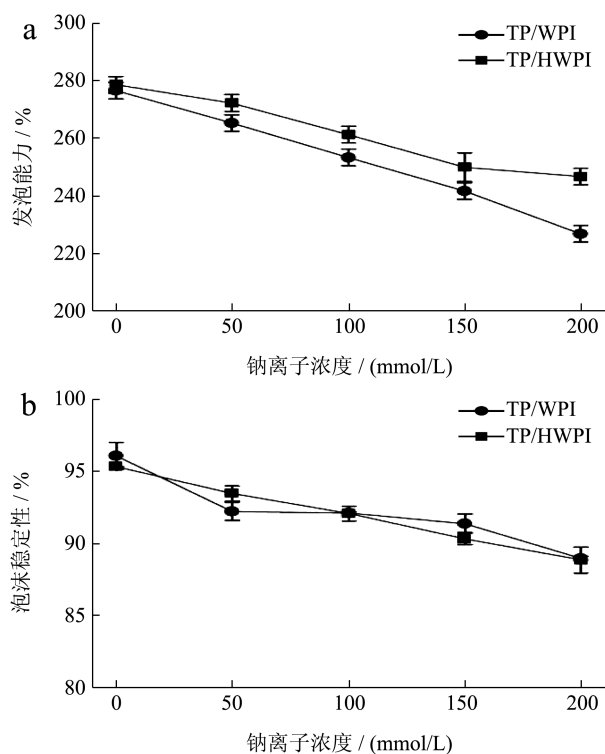


图6 钠离子浓度对 TP/WPI 和 TP/HWPI 发泡能力 (a) 和泡沫稳定性 (b) 的影响

Fig.6 Effect of Na^+ concentration on foaming capacity (a) and foam stability (b) of TP/WPI and TP/HWPI

类似地, 随着 Na^+ 浓度的增加, TP/WPI 和 TP/HWPI 的发泡性能力和泡沫稳定性也均呈下降趋势 (图 6)。当 Na^+ 浓度为 200 mmol/L 时, TP/WPI 发泡能力和泡沫稳定性分别降低至 227.43% 和 87.52%, TP/HWPI 发泡能力和泡沫稳定性分别降低至 250.10% 和 87.62%。造成这一结果的原因可能在于随着盐离子浓度的增加, 降低了复合物之间的静电斥力, 从而加剧了复合物的进一步聚集, 造成 TP/WPI 以及 TP/HWPI 发生絮凝沉淀, 破坏了体系的稳定性。但需要指出的是, 尽管随着盐离子浓度逐渐增加, 复合物的起泡能力及其泡沫的稳定性均呈现下降趋势, 但整体幅度不大。因此, TP/WPI 和 TP/HWPI 在较高的盐离子浓度下仍具有较好的泡沫特性, 尤其是 TP/HWPI, 其具有更高的盐离子耐受性。

2.6 温度对 TP/WPI 及 TP/HWPI 泡沫特性的影响

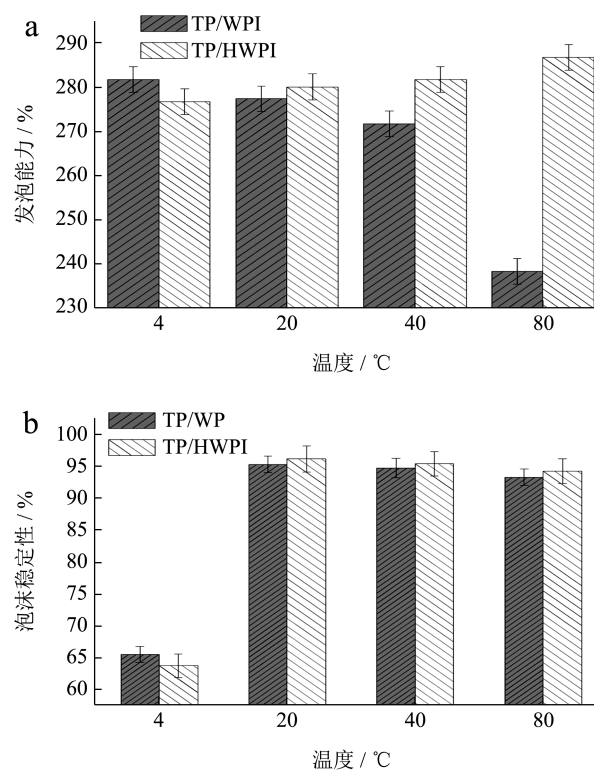


图7 温度对 TP/WPI 和 TP/HWPI 发泡能力 (a) 和泡沫稳定性 (b) 的影响

Fig.7 Effect of temperature on foaming capacity (a) and foam stability (b) of TP/WPI and TP/HWPI

酚类化合物与蛋白质结合时的亲和力受温度影响较大。当温度升高时, 会引起蛋白质构象的改变, 并暴露埋藏的疏水位点, 增强蛋白与酚类化合物上非极性基团的疏水相互作用^[30]。由图 7 可知,

TP/WPI 和 TP/HWPI 的起泡能力随着温度的升高出现明显不同的变化趋势,TP/WPI 起泡能力不断下降,而 TP/HWPI 的起泡能力变化趋势不明显。但是 TP/WPI 和 TP/HWPI 的泡沫稳定性则随温度改变呈现相同的趋势。4 ℃ 的保温处理使两者的泡沫稳定性大幅下降,而温度升高后泡沫稳定性变化不明显。造成这一结果的原因可能在于两个方面,一方面是温度的增加会促进蛋白同多酚的相互作用,另一方面是高温下 WPI 中的 β -乳球蛋白分子进一步伸展,暴露出更多多酚的结合位点,从而容易形成较大的聚合物,造成蛋白溶解能力的下降,导致起泡能力的降低。但对于经过高温变性的 HWPI 而言,因其暴露的疏水位点已被 TP 占据,高温对其同 TP 相互作用的影响较为有限,TP/HWPI 的起泡能力变化较小。温度较低时,TP 同 WPI 及 HWPI 相互作用减弱,其结合形成的复合物刚性变差,从而影响界面膜的稳定,造成泡沫稳定性变差。

3 结论

TP 能分别同 WPI 及 HWPI 发生相互作用,形成 TP/WPI 及 TP/HWPI 复合物。两种复合物的稳定性受 TP 质量浓度的影响较大,TP 质量浓度较高时均可产生不溶性复合物。当 TP 质量浓度在 0.75 mg/mL 以下时,其同 HWPI 的相互作用较 WPI 强。TP 和 WPI 及 HWPI 形成复合物后可改善两者的泡沫特性,尤其是对 HWPI 具有更佳的改善效果。相对于 WPI,TP 在更低质量浓度(1.25 mg/mL)下即可使 TP/HWPI 具有优良的泡沫特性。另外,TP/WPI 及 TP/WPIH 的泡沫特性均受环境 pH 值、盐离子以及温度的影响较大,但相对于 TP/WPI,TP/WPIH 表现出更好的环境耐受性,其不同环境下具有更好的泡沫特性。综上,低质量浓度的 TP 可同 HWPI 形成具有良好泡沫特性的 TP/HWPI 复合物。本研究为乳蛋白相关泡沫食品的加工及产品开发提供了借鉴。

参考文献

- [1] 耿子蔚,丁玉婕,童群义.不同茶汤与乳清蛋白相互作用的研究[J].食品与发酵工业,2023,49(4):230-236.
- [2] 樊子萱,孙爽爽,单媛媛.乳清蛋白和瓜尔豆胶复合物作为低脂蛋挞脂肪替代品的评价[J].现代食品科技,1-10[2025-03-28].
- [3] PAULA I, MESA N, CONTIM L, et al. The applicability of microparticulated whey protein as an ingredient in different types of foods and its functionalities: a current patent review [J]. European Food Research and Technology, 2024, 250 (2): 633-647.
- [4] KONG F, KANG S, ZHANG J, et al. The non-covalent interactions between whey protein and various food functional ingredients [J]. Food Chemistry, 2022, 394: 133455.
- [5] LI N, GIRARD A. Impact of pH and temperature on whey protein-proanthocyanidin interactions and foaming properties [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108100.
- [6] YU Z, CUI Y, ZHANG A, et al. The effect of preheated WPI interaction with AN on its complexes based on protein structure and function [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17 (4): 3272-3282.
- [7] FAN W, DU G, ZHANG X, et al. Effect of tea polyphenols as an antioxidant on pork for frying at different temperatures and times [J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12 (3): 2029-2036.
- [8] KHAN H, SUREDA A, BELWAL T, et al. Polyphenols in the treatment of autoimmune diseases [J]. Autoimmunity Reviews, 2019, 18 (7): 647-657.
- [9] NIU J, SHANG M, LI X, et al. Health benefits, mechanisms of interaction with food components, and delivery of tea polyphenols: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(33): 12487-12499.
- [10] DJUARDIA A, YULIANA N, OGAWA M, et al. Emulsifying properties and antioxidant activity of soy protein isolate conjugated with tea polyphenol extracts [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57: 3591-3600.
- [11] YANG J, ZHAO Y, SHAN B, et al. Study on the interaction and functional properties of Dolichos lablab L. protein-tea polyphenols complexes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 250: 126006.
- [12] 陈颖,万海峰,陈小强,等.蛋白质-多酚相互作用及在食品开发中的应用进展[J].食品科技,2023,48(1):90-97.
- [13] LI Y, HE D, LI B, et al. Engineering polyphenols with biological functions via polyphenol-protein interactions as additives for functional foods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110 (1): 470-482.
- [14] CHEN YL, CHEN Y, JIANG L, et al. Improvement of emulsifying stability of coconut globulin by noncovalent interactions with coffee polyphenols [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100954.
- [15] DIAZ J, FOEGEDING E, STAPLETON L, et al. Foaming and sensory characteristics of protein-polyphenol particles in a food matrix [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107148.
- [16] RODRIGUEZ S, VON S, PILOSO A, et al. Green tea polyphenols-whey proteins nanoparticles: Bulk, interfacial

- and foaming behavior [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 50: 108-115.
- [17] SONG Y, ZHAO Y, YAO G, et al. Heat treatment effect on whey protein-epigallocatechin gallate interaction: A fluorescence spectroscopic analysis [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100917.
- [18] LI C, DAI T, CHEN J, et al. Protein-polyphenol functional ingredients: The foaming properties of lactoferrin are enhanced by forming complexes with procyanidin [J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128145.
- [19] PATEL A, TEN-HOORN J, HAZEKAMP J, et al. Colloidal complexation of a macromolecule with a small molecular weight natural polyphenol: implications in modulating polymer functionalities [J]. Soft Matter, 2013, 9 (5): 1428-1436.
- [20] BEN-FADHEL Y, JAISWAL L, MARTINEZ C, et al. Encapsulation, protection, and delivery of natural antimicrobials: Comparison of nanoemulsion, gelled emulsion, and nanoliposomes for food application [J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103720.
- [21] DAI Y, WEI J, CHEN X, et al. Interactions between tea polyphenols and nutrients in food [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(4): 3130-3150.
- [22] XIE D, DENG F, SHU J, et al. Impact of the frying temperature on protein structures and physico-chemical characteristics of fried surimi [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57 (7): 4211-4221.
- [23] PHILLIPS L, SCHULMAN W, KINSELLA J, et al. pH and heat treatment effects on foaming of whey protein isolate [J]. Journal of Food Science, 1990, 55 (4): 1116-1119.
- [24] WU W, CLIFFORD M, HOWELL N, et al. The effect of instant green tea on the foaming and rheological properties of egg albumen proteins [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2007, 87 (10): 1810-1819.
- [25] CAO Y, TRUE A, CHEN J, et al. Dual role (anti-and pro-oxidant) of gallic acid in mediating myofibrillar protein gelation and gel *in vitro* digestion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64 (15): 3054-3061.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] KASPCHAK E, GOEDERT A, IGARASHI-MAFRA L, et al. Effect of divalent cations on bovine serum albumin (BSA) and tannic acid interaction and its influence on turbidity and *in vitro* protein digestibility [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 136: 486-492.
- [29] CARNOVALE V, BRITTEN M, COUILLARD C, et al. Impact of calcium on the interactions between epigallocatechin-3-gallate and β -lactoglobulin [J]. Food Research International, 2015, 77: 565-571.
- [30] 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.