乳清蛋白-银耳多糖协同稳定机制及在饮料中的应用

刘丹丹[1]，徐佳薇[1]，姜迎迎[1]，钱磊[2]，张业尼[1*]

（1.天津农学院食品科学与生物工程学院，天津 300392）（2.天津农学院农学与资源环境学院，天津 300392）

摘要：为了探究银耳多糖（*Tremella* Polysaccharide, TP）与乳清蛋白（Whey Protein, WP）的分子互作机制，并基于此开发一款新型复合饮料，本研究通过构建不同质量比（1:4 至 4:1）的 TP-WP 复合体系，结合多尺度表征技术，发现随 pH 值从 7.0 降至 2.0，复合体系浊度呈先升后降趋势，WP 在 pH 值 5.0 时浊度达最大值（OD_{600}=0.433），而 TP 的加入使相变临界点由 pH 值 5.0 左移至 4.0。中性条件下，TP 与 WP 通过静电作用及氢键形成稳定复合物，当 TP:WP=4:1 时，复合物 Zeta 电位为 −19.12 mV，其绝对值略低于单一 WP 体系（−19.56 mV），但平均粒径（384.61 nm）较单一 WP（507.69 nm）显著降低 24.24%，且 PDI 由 0.94 改善至 0.51，表明复合体系稳定性显著提升。基于此机制，通过正交试验优化出含 60 wt.% 银耳提取液、2 wt.% 乳清蛋白水解液、5 wt.% 绵白糖、3 wt.% 乳粉及 0.2 wt.% 羧甲基纤维素的复合饮料，产品在 30 天内浊度变化率 <5%、离心沉淀率 <1%，风味协调且微生物指标符合国家标准。该研究为乳清蛋白高值化利用及银耳资源的功能性开发提供了理论依据与技术路径。

关键词：乳清蛋白；银耳多糖；协同稳定；蛋白质－多糖相互作用；营养饮料

文章编号：1673-9078(2026)10-290-298 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1171

Synergistic Stabilization Mechanism of Whey Protein-*Tremella* Polysaccharide and Its Application in Beverages

LIU Dandan[1], XU Jiawei[1], JIANG Yingying[1], QIAN Lei[2], ZHANG Yeni[1*]

(1.College of Food Science and Bioengineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

(2.College of Agronomy and Resources Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

Abstract: The molecular interaction mechanism between *Tremella* polysaccharide (TP) and whey protein (WP) was investigated, and a novel composite beverage was developed based on this mechanism. TP-WP composite systems with different mass ratios (ranging from 1:4 to 4:1) were constructed, and their characteristics were analyzed using multi-scale techniques. The results showed that as pH decreased from 7.0 to 2.0, the turbidity of the composite systems initially increased and then decreased. The maximum turbidity for WP alone was observed at pH value 5.0 (OD_{600}=0.433), while the addition of TP caused a leftward shift in the phase transition critical point from pH 5.0 to 4.0. Under neutral conditions, stable TP-WP complexes were formed primarily through electrostatic interactions and hydrogen bonding. At a TP:WP ratio of 4:1, the complexes exhibited a Zeta potential of −19.12 mV, which was slightly lower in absolute value than that of the WP-alone system (−19.56 mV). However, the average particle size was significantly reduced by 24.24% to 384.61 nm compared to WP alone (507.69 nm), and the polydispersity index (PDI) decreased from 0.94 to 0.51, indicating enhanced stability of the composite system. Based on this mechanism, the beverage formulation was optimized through orthogonal experiments. The optimized formulation was composed of 60 wt.% *Tremella* extract, 2 wt.% WP hydrolysate, 5 wt.% soft sugar, 3 wt.% milk powder, and 0.2 wt.% carboxymethyl cellulose. The final product demonstrated a turbidity change rate of <5% and a centrifugal precipitation rate of <1% over 30 days, with a coherent flavor. Its microbial indicators

收稿日期：2025-08-15；修回日期：2025-10-30；接受日期：2025-11-04

基金项目：天津市科技计划项目（23ZYCGSN00870；24ZYCGSN00070）；甘肃省科技计划项目（24CXNH009）；甘肃省中央引导地方科技发展资金项目（24ZYQH006）；天津市蔬菜现代农业产业技术体系创新团队（ITTVRS2024016）

作者简介：刘丹丹（1999-），女，硕士研究生，研究方向：功能性乳制品开发，E-mail：liudandan20001013@163.com

通讯作者：张业尼（1984-），女，博士，讲师，研究方向：功能性乳制品开发，E-mail：zhangyeni@tjau.edu.cn

were verified to comply with national standards. These findings provide a theoretical and technical foundation for the high-value utilization of WP and the development of functional *Tremella*-based products.

Key words: whey protein; *Tremella* polysaccharide; synergistic stabilization; protein-polysaccharide interaction; nutritional beverage

引文格式：

刘丹丹,徐佳薇,姜迎迎,等.乳清蛋白-银耳多糖协同稳定机制及在饮料中的应用[J].现代食品科技,2026,42(10):290-298.

LIU Dandan, XU Jiawei, JIANG Yingying, et al. Synergistic stabilization mechanism of whey protein-*Tremella* polysaccharide and its application in beverages [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 290-298.

乳清蛋白（Whey Protein, WP）是以球状蛋白为主，含有丰富的营养价值，具有起泡性、成膜性、持水性、乳化性的含有生物活性成分的蛋白质[1]，常作为抗氧化剂、抗菌剂、香料和着色剂应用于产品中[2]。但是，乳清蛋白的稳定性较差，在 pH 值、离子强度和温度等理化环境发生变化时极易发生聚集[3]，这限制了其在食品工业中的更广泛应用。

多糖是一类广泛存在于动植物和微生物组织中的天然高分子化合物，具有抗氧化、抗凝血和血栓、降血糖等多种活性[4]，研究表明，当蛋白质与多糖溶液相互混合时，两种溶液存在相反的电荷，使两种物质之间存在相互吸引的作用力，在静电作用下，多糖与蛋白质共存时能形成复合物，进而对食品的稳定性、营养特性、表观特征等造成不同程度的影响[5,6]。在众多多糖中，银耳多糖（TP）因其独特的线性（1→3）-*α*-甘露聚糖主链和高度分支的结构而备受关注，其分子链柔韧、水合能力强，可在溶液中形成巨大的水化层，从而赋予其卓越的空间稳定效应[7]。与海藻酸钠、阿拉伯胶等高电荷密度多糖在环境中主要依赖强静电作用、易导致敏感蛋白体系失稳相比，TP 所带净电荷适中，其与蛋白质的相互作用更为温和可控，不易引发过度絮凝或相分离[8]，这使其在复合饮料等复杂体系中展现出独特的应用价值。蛋白质－多糖复合物种类多样，其制备方法包括干热、湿热、超声波与微波法等[9]，影响复合物形成的因素较为复杂，所得复合物的结构与功能也呈现出丰富的多样性。多糖与乳清蛋白的相互作用将成为未来饮料加工的新趋势。但目前关于乳清蛋白与银耳多糖的分子互作机制及其对复合体系功能特性的协同增效研究尚存空白，更缺乏基于该复合体系的产业化应用探索。

本研究通过多尺度表征技术系统解析 WP-TP 复合物的形成机制：利用浊度－粒径分析揭示复合物相行为规律，通过 zeta 电位测定明确静电作用主导地位，结合流变学特性与傅里叶红外光谱（FT-IR）解析复合物的结构特征及分子构象变化。通过单因素试验优化与正交设计开发新型营养饮料，解决了蛋白－多糖复合体系在饮料加工中的相稳定性、感官品质控制等技术问题。本研究不仅为深入理解蛋白－多糖分子互作机制提供理论依据，更为开发兼具营养功能与市场潜力的银耳深加工产品开辟创新路径，有助于拓展乳清蛋白的高值化利用途径。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

银耳、乳粉，天津市红旗农贸综合批发市场；乳清蛋白（蛋白质含量≥90%）、乳清蛋白水解物、黄原胶、卡拉胶、羧甲基纤维素（CMC）、瓜尔豆胶，天津海思默国际贸易有限公司；绵白糖，河北省沧州古丰食品有限公司；化学试剂均采用国产分析纯。

1.2 主要仪器与设备

FlexA-200 酶标仪，杭州奥盛仪器有限公司；ZS-90 纳米粒度分析仪，上海魁元科学仪器有限公司；MCR92 旋转流变仪，上海恪瑞仪器科技有限公司；FT-IR Nicolet iS 5 傅里叶变换红外光谱仪，赛默飞世尔科技（中国）有限公司；YJY-70-60 型高压均质机，上海申鹿均质机有限公司。

1.3 方法

1.3.1 TP-WP（银耳多糖-乳清蛋白）共混体系的制备

TP 的制备：先将干银耳粉碎并过 40 目筛，再按实验设计的料液比 1:68 ($g \cdot mL^{-1}$)、提取温度 121 ℃、提取时间 1.0 h，离心（4 000 $r \cdot min^{-1}$，20 min），取上清液浓缩，无水乙醇醇沉，4 ℃静置 12 h，离心（4 000 $r \cdot min^{-1}$，10 min），去除上清液后，收集沉淀物，真空冻干即得 TP，于干燥皿中保存，最终多糖得率为（41.31±1.02）%。

TP 溶液的制备：将 1.0 g 干燥保存的 TP 加入超纯水溶解，用 100.0 mL 容量瓶定容，制备成质量分数为 1.0 wt.% 的 TP 溶液，经磁力搅拌至充分混匀，于 4 ℃静置 12 h。随后恢复至室温，以 5 000 $r \cdot min^{-1}$ 离心 10 min，收集上清液备用。

WP 溶液的制备：将 10.0 g 干燥保存的 WP 加入超纯水溶解，用 100.0 mL 容量瓶定容，制备成质量分数为 10 wt.% 的 WP 溶液，经磁力搅拌至充分混匀，于 4 ℃静置 12 h。恢复室温后用 1 mol·L^{-1} NaOH 调节溶液的 pH 值至中性。

TP-WP 共混体系的制备：将 TP 溶液与 WP 溶液按不同质量比（1:0、4:1、3:2、1:1、2:3、1:4、0:1）混合，于 25±1 ℃恒温水浴中搅拌 30 min，用 1 mol·L^{-1} HCl 和 1 mol·L^{-1} NaOH 调节溶液的 pH 值（7.0~2.0），备用。

1.3.2 浊度的测定

按 1:100 的比例稀释不同质量比的 TP-WP 共混体系，采用分光光度法测定样品溶液在 600 nm 处的吸光度值，超纯水做对照。

1.3.3 Zeta电位和粒度

用超纯水将不同质量比的 TP-WP 共混体系稀释 100 倍，将待测样品的 pH 值调至 7.0，超声振荡 3 min，取适量样品溶液，用纳米粒度分析仪（ZS-90）测量 Zeta 电位、平均粒径及分布情况，测定三次取平均值。

1.3.4 流变特性

使用旋转流变仪（MCR 92）分析了样品的流变特性。用超纯水将不同质量比的 TP-WP 共混体系稀释 100 倍，将待测样品的 pH 值调至 7.0，混匀。取适量 TP-WP 共混物于样品台，选用 50 mm 平行板，以 1 mm 的间隙进行测试，选择粘度－剪切速度扫描模式和粘度温度扫描模式，设置温度为 25 ℃，升温速度 5 ℃·min^{-1}，在 50~2 000 s^{-1} 剪切速率下检测样品的粘度。

1.3.5 红外光谱的测定

用超纯水将不同质量比的 TP-WP 共混体系稀释 100 倍，将待测样品的 pH 值调至 7.0，真空冷冻干燥为粉末。将样品与溴化钾（KBr）混合均匀并压制成片后，在 400~4 000 cm^{-1} 波数区间内扫描其红外光谱。

1.4 在饮料中的应用

1.4.1 工艺流程

制备银耳提取液与乳清蛋白水解液→按比例混合调配→分阶段均质处理→灌装→杀菌→冷却得到成品。

具体步骤如下：

银耳提取液制备：将银耳粉与纯净水按 1:68 混合，121 ℃提取 1 h，冷却后以 4 000 r·min^{-1} 离心 20 min，取上清液作为提取液，4 ℃贮存备用。

乳清蛋白水解液制备：将乳清蛋白水解物用超纯水配制成 10 wt.% 溶液，磁力搅拌至完全溶解，4 ℃水合 12 h 后备用。

混合调配：将上述银耳提取液与乳清蛋白水解液混合，加入乳粉、绵白糖及已溶解稳定剂，搅拌均匀。

均质：混合液于 55 ℃、15 MPa 条件下进行一次均质，再升温至 60 ℃、25 MPa 下进行二次均质。

杀菌与成品：灌装封口后，经 85 ℃、15 min 巴氏杀菌，流水冷却至 25 ℃，即得终产品。

1.4.2 单因素试验

选择添加不同质量分数的银耳提取液（40、50、60、70、80 wt.%）、乳清蛋白水解液（1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 wt.%）、绵白糖（3.0、4.0、5.0、6.0、7.0 wt.%）及乳粉（1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 wt.%）四个因素进行试验，以感官评价为指标，比较四个单因素对饮料感官评分的影响。

1.4.3 正交试验

根据单因素试验所得结果，选出银耳提取液、乳清蛋白水解液、绵白糖、乳粉的适宜添加量，并采用正交试验设计对其配比进行优化，以确定最佳饮料配方。具体试验设计见表 1。

表 1 配方正交因素水平设计表（wt.%）

Table 1 Design of orthogonal test (wt.%)

水平	A 银耳提取液添加量	B 乳清蛋白水解液添加量	C 白砂糖添加量	D 乳粉添加量
1	50	1	4	2
2	60	2	5	3
3	70	3	6	4

1.4.4 稳定性试验设计

称取干燥离心管质量（m_0），加入样品后称总质量（m_1），4 000 r·min^{-1} 离心 20 min，弃去上清液后将离心管倒置 1 min，随后称量沉淀物的质量（m_2）。按公式计算。重复测定 3 次，取平均值。

$$P=\frac{m_2-m_0}{m_1-m_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

P——离心沉淀率，%；

m_0——干燥离心管质量，g；

m_1——离心管＋样品总质量，g；

m_2——离心管＋沉淀质量，g。

在饮料的加工与贮藏过程中，受环境因素影响，体系易发生蛋白质变性聚集及脂肪相上浮等不稳定现象[10]，研究证实，添加适量的稳定剂能有效改善上述问题，显著提升饮料体系的稳定性。瓜尔豆胶、黄原胶、

CMC 和卡拉胶这四种常见稳定剂被应用于本饮料体系的稳定性研究。

1.4.5 饮料的感官评分方法

产品的感官评价由 10 名经过培训的品评员完成。该小组参照表 2 的标准，对饮料的色泽、滋味、风味和组织状态四项指标进行打分，并计算其平均分。

表 2 感官评分标准

Table 2 The quality evaluation standard of sensory

项目	评分标准	得分
风味（20 分）	具有奶香味和银耳特有的清香，无异味	16~20
	奶香味过浓或过淡，银耳特有的清香味较淡，无异味	11~15
	无奶香味，无银耳特有的清香味，有异味	≤10
组织状态（20 分）	均一的乳浊液，无明显分层，无沉淀	16~20
	较为均一的乳浊液，略有分层，含少量沉淀，摇匀即失	11~15
	具有明显分层，存在大量沉淀	≤10
色泽（20 分）	白色或乳白色，色泽均一	16~20
	白色偏黄，色泽较为均一	11~15
	黄白色，色泽不均	≤10
滋味（40 分）	甜度适中，口感细腻顺滑	36~40
	甜度偏高或偏低，略有颗粒感	31~35
	过甜，具有明显的颗粒感	≤30

1.4.6 理化指标的测定

各项指标测定方法如下：可溶性固形物含量—阿贝折光计法；总糖含量—苯酚－硫酸法；蛋白质含量—凯氏定氮法。

1.4.7 微生物指标的测定

菌落总数、大肠菌群及沙门氏菌等微生物指标分别依据 GB 4789.2-2022、GB 4789.3-2025 和 GB 4789.4-2024 规定的方法进行测定。

1.5 数据分析

实验中各样品均经三次重复测定后取均值，数据以平均值 ± 标准偏差表示。采用单因素方差分析（ANOVA）进行组间比较，并用不同小写字母表示不同处理组间存在显著性差异（$P<0.05$）。数据的归纳与制表由 Excel 2019 完成，图谱则由 Origin 2021 绘制。

2 结果与讨论

2.1 浊度分析

多糖－蛋白质混合体系的浊度是评价溶液中复合物形成和解离的重要指标[11]。不同质量比的银耳多糖－乳清蛋白（TP-WP）溶液在不同 pH 值（7.0~2.0）下浊度的变化如图 1 所示。TP 溶液在 pH 值 7.0~2.0 时，浊度保持相对恒定，原因是强静电斥力抑制 TP 阴离子多糖分子产生聚集。WP 溶液的浊度随 pH 值变化，这是由 WP 的聚集引起的，并在 pH 值为 5.0（等电点附近）达到最大值（OD_{600}=0.433）。TP-WP 混合溶液在 pH 值 7.0~6.0 时，TP 和 WP 均带负电荷，因静电排斥作用难以结合形成复合物，体系浊度因此维持在较低水平且变化平稳，两者在水相中保持溶解状态，未发生相分离；在 pH 值 6.0~5.0 区间内，TP 与 WP 之间产生显著相互作用，从而导致可溶性的多糖－蛋白质复合物生成。在 pH 值 5.0 至 4.0 的范围内，开始形成不溶性 TP-WP 复合物，引发固－液相分离并产生沉淀；在 pH 值 4.0 条件下，WP 携带正电荷，通过静电引力与带负电的 TP 结合，进而发生聚集，这与近 WP 溶液的等电点（pI）有关。当 pH 值由 4.0 降至 2.0 时，静电斥力的增强促进了蛋白质的溶解，导致 TP-WP 复合物发生解离，体系浑浊度随之迅速降低。刘秋蝶等[12]研究酪蛋白酸钠－多糖复合物的物化特性及其乳液稳定性时，也发现了浊度先升到等电点再下降的相同趋势，与本研究结果相似。

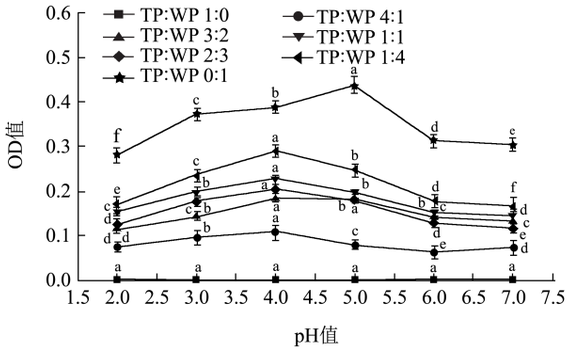


图 1 不同 pH 值和质量比下 TP-WP 混合溶液的浊度

Fig.1 Turbidity of TP-WP mixed solution at different pH values and mass ratios

注：图中不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。下同。

当 TP-WP 质量比低于 1（如 1:4、2:3）时，体系中过量的 WP 与 TP 充分结合，浊度较高（pH 值为 4.0 时 $OD_{600}>0.228$）；当比例高于 1（如 4:1、3:2）时，由于阴离子多糖较多，负电荷过量，静电斥力抑制凝聚，故浊度较低（同条件下 $OD_{600}<0.189$）。当 TP 比例增加，聚合的最适 pH 值由 5.0 降低为 4.0 左右，形成此现象的原因可能是当 TP 比例较低时，体系整体负电荷较少，当 pH 值＜pI 时，WP 提供的正电荷得以有效与 TP 的负电荷结合，进而形成复合物，当 TP 比例

逐渐增加，负电荷含量同步提升，蛋白质提供的正电荷不足以中和体系内的负电荷，故需要偏移至更低的pH值以弥补正电荷的缺失[13]。研究表明，中性条件下，TP与WP的相互作用更为复杂。因此，本章选择中性条件下，继续对TP与WP相互作用进行探索。

2.2 Zeta电位

作为表面电荷密度的测量指标，Zeta电位既能揭示TP与WP的静电相互作用情况，也与整个溶液体系的稳定性密切相关[14]。Zeta电位绝对值的升高与体系稳定性的增强呈正相关，这归因于更强的静电斥力有效抑制了颗粒间的絮凝作用[15]。中性条件下不同质量比TP-WP混合溶液的Zeta电位值由图2所示，TP和WP均带有负电荷，其中TP的Zeta电位（−24.41 mV）绝对值显著高于WP（−19.56 mV），这表明TP溶液具有更强的静电稳定作用。随着TP比例的提升，复合物Zeta电位的绝对值随之增大（例如TP:WP=4:1时达−19.12 mV），溶液稳定性也相应增强。张婷等[16]在研究卵白蛋白与岩藻多糖的相行为及流变学性质时，同样发现了Zeta电位绝对值随多糖质量比增加而增大的规律，与本研究结果一致。这可能是因为更多的多糖通过静电作用与蛋白结合，使Zeta电位绝对值升高，液滴间斥力随之增强，体系稳定性得到进一步提升。

不同比例下的TP-WP混合溶液的电位绝对值比它们单独存在时要低，例如在TP:WP=1:4时，体系的Zeta电位为−17.29 mV，该现象在此比例下最为明显。结果表明中性条件下均带负电荷的TP和WP，在混合体系中仍可能发生静电相互作用，致使复合物形成。产生这一现象的原因可能是蛋白质局部正电荷的位点与TP相互作用，即在中性条件下，WP所带的正电荷和TP所带负电荷之间的相互作用使分子构象改变。该现象与Chun等[17]的研究结果相似。

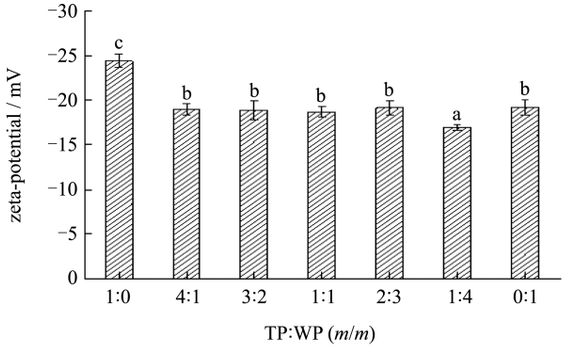


图2 不同质量比下TP-WP混合溶液的Zeta电位值

Fig.2 Zeta potential values of TP-WP mixed solution under different mass ratios

2.3 粒径分析

平均粒径及其分布情况（Polydispersity index, PDI）是衡量溶液稳定性的重要因素[18]。PDI用于描述粒度分布的宽度，当PDI＜0.3时表明粒径分布均匀，稳定性好[19]。中性条件下，不同质量比TP-WP混合溶液的粒径及其分布情况如图3所示，WP溶液的PDI为0.94，说明WP溶液中的粒径分布不均匀，稳定性差。

当TP在TP-WP混合溶液中的比例增加时，体系的粒径变化呈现出先下降、后上升、再下降的趋势，例如TP:WP=0:1时粒径为519.91 nm（PDI=0.95），1:4时降至257.29 nm（PDI=0.99），1:1时升至768.15 nm（PDI=0.50），4:1时再降至383.74 nm（PDI=0.34）。郑环宇等[20]研究大豆蛋白-多糖复合物结构与性能及其稳定性研究时，也发现随着多糖的增多大豆蛋白-多糖混合乳液的粒径呈现相同的趋势，与本研究结果相似。这可能是因为适量TP的加入能够通过空间位阻或静电稳定作用抑制聚集，从而减小液滴粒径[21]；但当TP添加量过量时，过强的静电斥力反而诱发液滴间发生絮凝，导致粒径回升；若继续增加TP比例，过量存在的TP难以与WP有效结合，转而自行形成尺寸较小的自身聚集体，宏观上表现为粒径的再次下降[22]。

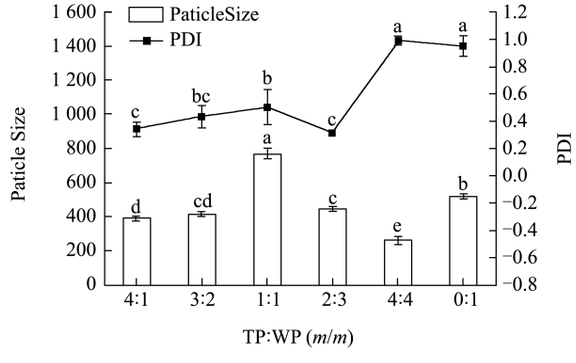


图3 不同质量比下TP-WP混合溶液的粒径大小和多分散性指数

Fig.3 Particle size and polydispersity index of TP-WP mixed solution under different mass ratios

2.4 流变特性分析

中性条件下，不同质量比的TP-WP混合溶液的表观粘度如图4所示，TP-WP混合溶液在0.1~100 S^{-1}的剪切速率范围内均表现出剪切稀化行为，为非牛顿流体行为[23]。

当TP在TP-WP混合溶液中的比例增加时，表观粘度也相应增大，例如TP:WP=4:1时粘度较单一WP提高约3.5倍（剪切速率0.1 s^{-1}下从112.45 mPa·s增

至 400.13 mPa·s）。龙慧等[24]研究银耳多糖－大豆分离蛋白的相互作用及流变性能时，也发现随着银耳多糖添加比例的增大，银耳多糖－大豆分离蛋白混合液的表观黏度逐渐升高，与本研究结果相似。这是由于 TP 溶液比例提高，分子链间的相互作用增强，从而导致混合溶液的表观黏度增加[25]。

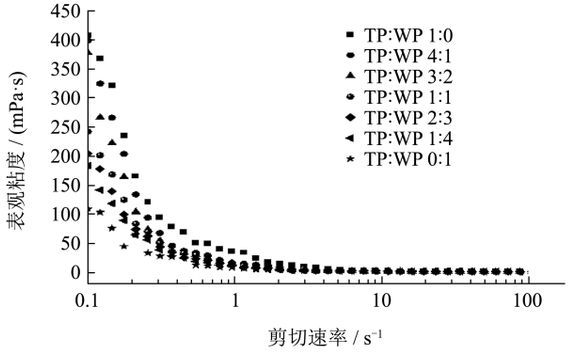


图 4 TP-WP 共混体系的表观粘度随剪切速率变化曲线

Fig.4 Apparent viscosity variation curve with shear rate of TP-WP blend system

2.5 红外光谱分析

不同质量比的 TP-WP 复合物的红外光谱如图 5 所示。WP 和 TP 具有不同的典型特征峰。对于 WP，3 288.71 cm^{-1} 处的宽而强谱带与 O-H 与 N-H 伸缩振动有关，酰胺 I 峰值在 1 644.02 cm^{-1} 处，酰胺 II 峰值在 1 550.48 cm^{-1}，1 400~1 200 cm^{-1} 处的特征吸收峰为酰胺 III 区和由 C-N 拉伸振动产生[26]。TP 在 3 380.27 cm^{-1} 处的谱带与 O-H 伸缩振动有关，其在 1 643.19 cm^{-1} 处的强谱带与 -C=O 伸缩振动有关，而 1 415.77 cm^{-1} 附近的谱带则归属于 $-COO^-$ 对称伸缩振动[27]。

随着 TP 的加入，红外谱带的吸收和位置发生变化[28]。TP-WP 复合物在 3 700~3 000 cm^{-1} 的特征吸收峰可能是由非游离 O-H 与 N-H 伸缩振动产生，这表明 TP、WP 两者可能存在分子间氢键和静电相互作用。同时，TP-WP 复合物在 1 260~1 000 cm^{-1} 范围内的特征吸收峰增强，表明静电相互作用诱导了分子构象变化和氢键网络重组[29]。

进一步分析发现，随着 TP 比例增加，WP 在 1 644.02 cm^{-1} 处的酰胺 I 带与 TP 在 1 643.19 cm^{-1} 处的强吸收峰发生重叠与融合，形成一个宽的复合吸收带，其峰形与强度发生显著改变。这表明两者之间存在紧密的分子相互作用，但 WP 的酰胺 I 带本身未观察到系统性的波数位移。与此同时，TP 的特征峰 $-COO^-$ 对称伸缩振动（1 415.77 cm^{-1}）强度随复合比例增加而显著增强，直接证实了 TP 的羧酸根离子与 WP 的质子化氨基（$-NH_3^+$）之间产生了强烈的静电相互作用[12]。这些分子间作用力的增强共同构成了复合物的稳定性基础：强化的氢键网络提升了复合物的热稳定性，而静电相互作用则作为物理交联点增强了结构的完整性，最终使复合物表现出更优的宏观稳定性[30]。

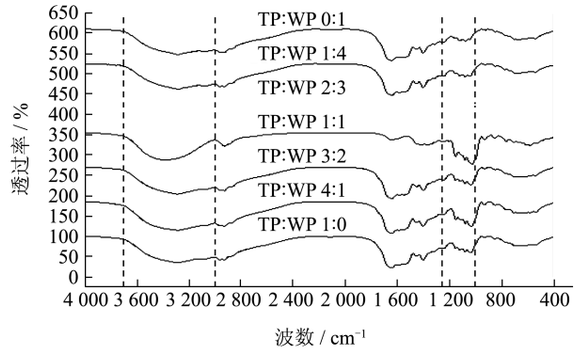


图 5 TP-WP 共混体系的红外光谱

Fig.5 Infrared spectroscopy of TP-WP blend system

2.6 银耳提取液添加量对饮料感官品质的影响

由图 6 可知，银耳提取液添加量为 60 wt.% 时，所制得饮料的感官评分达到最大值，具有银耳及乳香味，口感顺滑，因此选择银耳提取液添加量 50、60、70 wt.% 进行正交试验。

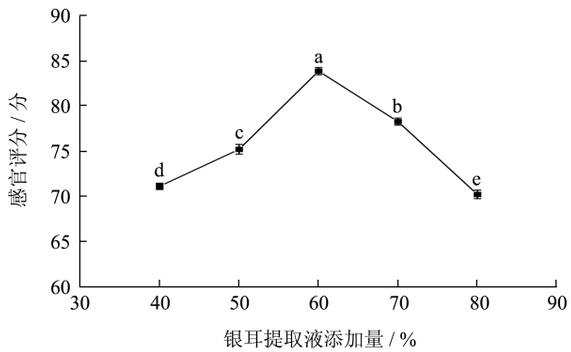


图 6 银耳提取液添加量对饮料感官品质的影响

Fig.6 Effects of the addition of extracts from *Tremella fuciformis* on the sensory score of beverage

2.7 乳清蛋白水解液添加量对饮料感官品质的影响

如图 7 所示，乳清蛋白水解液的添加量对饮料感官品质的影响不大。乳清蛋白水解液添加量在 2 wt.% 时，口感最佳；乳清蛋白水解液添加量在 3 wt.% 时，饮料的感官评分较高；乳清蛋白水解液添加量在 5 wt.% 时，整体口感下降，有沉淀产生。因此选择乳清蛋白水解液添加量 1、2、3 wt.% 进行正交试验。

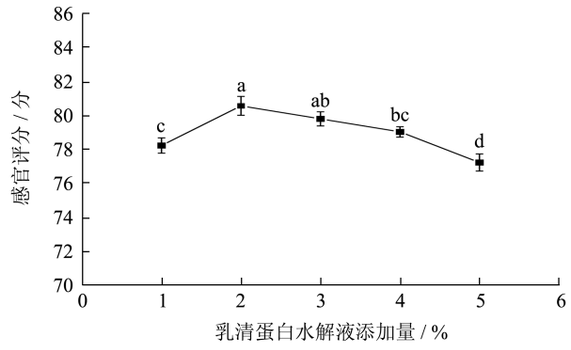


图 7 乳清蛋白水解液添加量对饮料感官品质的影响

Fig.7 Effects of the addition of whey protein hydrolysate on the sensory score of beverage

2.8 绵白糖添加量对饮料感官品质的影响

绵白糖颗粒细小，有 2.5% 的转化糖浆，甜度及质地均优于白砂糖[31]。由表 8 可知，当绵白糖添加量为 5 wt.% 时，饮料甜味适中，整体风味与口感达到最佳。因此，正交试验选取的绵白糖添加量水平确定为 4、5、6 wt.%。

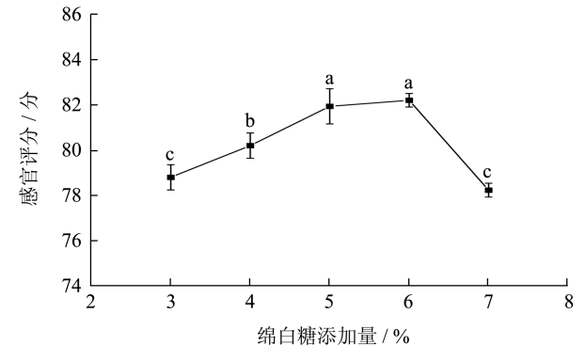


图 8 绵白糖添加量对饮料感官品质的影响

Fig.8 Effects of the addition of white sugar on the sensory score of beverage

2.9 乳粉添加量对饮料感官品质的影响

由图 9 可看出，当乳粉添加量在 3 wt.% 时，具有明显的乳香味，口感最佳，感官评分最高，因此选择乳粉添加量 2、3、4 wt.% 进行正交试验。

2.10 正交试验结果及分析

正交试验结果及极差分析如表 3 所示，由极差 *R* 值可知，各因素对饮料感官评分的影响主次顺序为 A＞B＞C＞D，即银耳提取液添加量为最主要影响因素。根据 *k* 值分析确定较优工艺组合为 $A_2B_3C_1D_2$。该配方下所得饮料组织状态均匀，口感细腻顺滑，乳香与甜味协调适中。

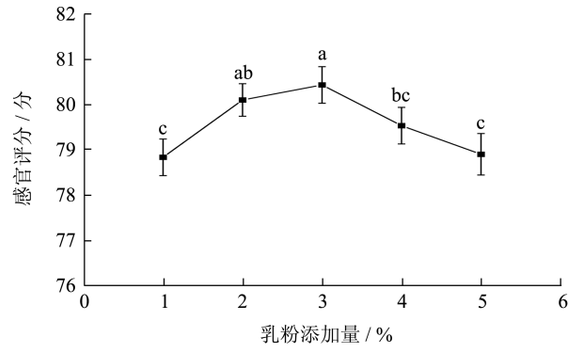


图 9 乳粉添加量对饮料感官品质的影响

Fig.9 Effects of milk powder addition on the sensory score of beverage

表 3 正交试验结果及极差分析表

Table 3 Test result and orthogonal range analysis

序号	添加量/(wt.%)				感官评分均值/分
	A 银耳提取液	B 乳清蛋白水解液	C 绵白糖	D 乳粉	
1	50	1	4	2	78.90 ± 2.00
2	50	2	5	3	79.20 ± 0.50
3	50	3	6	4	82.20 ± 2.00
4	60	1	5	4	84.20 ± 1.00
5	60	2	6	2	86.90 ± 2.00
6	60	3	4	3	90.20 ± 3.00
7	70	1	6	3	85.30 ± 0.50
8	70	2	4	4	86.60 ± 0.50
9	70	3	5	2	86.20 ± 1.00
K_1	240.30	248.40	255.70	252.00	
K_2	261.30	252.70	249.60	254.70	
K_3	258.10	258.60	254.40	253.00	
k_1	80.10	82.80	85.20	84.00	
k_2	87.10	84.20	83.20	84.90	
k_3	86.00	86.20	84.80	84.30	
极差 *R*	7.00	3.40	2.00	0.90	
较优水平	A_2	B_3	C_1	D_2	
因素主次	A>B>C>D				
较优组合	$A_2B_3C_1D_2$				

2.11 稳定性试验结果

离心沉淀率法是饮料稳定性检测的常用方法，离心沉淀率越小，饮料越稳定，当离心沉淀率＜1% 时，则说明此款饮料具有良好的稳定性[32]。

由图 10 所示，分别选择瓜尔豆胶、卡拉胶、CMC、黄原胶作为饮料的稳定剂，添加量均设定为 0.05 wt.%，实验表明，添加 CMC 后饮料在口感上变

化不明显，离心沉淀率接近 1%，整体稳定性表现良好；因此选择 CMC 作为饮料的最佳稳定剂。

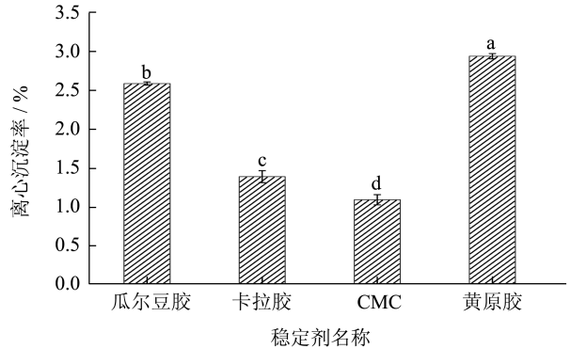


图 10 稳定剂种类对饮料稳定性的影响

Fig.10 Influence of stabilizer varieties on stability of beverage

CMC 因其稳定的化学性质和优良的功能特性，常作为稳定剂应用于饮料中。由图 11 可知，添加量为 0.2 wt.% 的 CMC 可使饮料的离心沉淀率控制在 1% 以下，此时饮料体系稳定性较高，不易出现分层现象，故确定 0.2 wt.% 为最佳添加量。

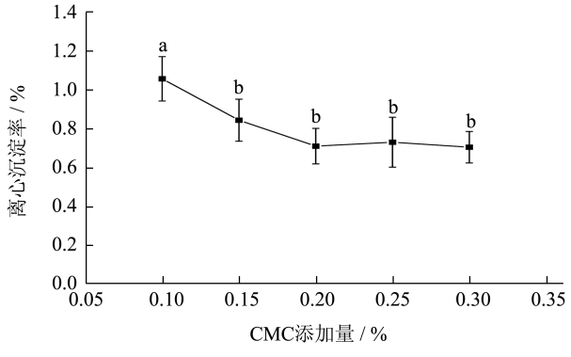


图 11 CMC 添加量对饮料稳定性的影响

Fig.11 Influence of CMC dosage on stability of beverage

2.12 理化指标测定结果

使用阿贝折光计测定可溶性固形物含量≥6.5 g/100 g；苯酚－硫酸法测定总糖含量≥2.38 g/100 g；凯氏定氮法测定蛋白质含量≥0.53 g/100 g。

2.13 微生物指标测定结果

表 4 产品微生物指标检测结果

Table 4 Detection results of product microbiological indicators

检测指标	检测结果	国家标准限值	结论
菌落总数/(CFU/mL)	3.0	≤100	合格
大肠菌群/(MPN/mL)	未检出	≤0.03	合格
致病菌（沙门氏菌）	未检出	不得检出	合格

3 结论

本研究系统探究了银耳多糖（TP）与乳清蛋白（WP）的相互作用机制及其在营养饮料中的应用效果。实验发现，TP 的加入显著改善了 WP 的稳定性表现：复合体系的相变临界点从 pH 值 5.0 改变至 4.0；在中性环境下，TP 与 WP 通过静电作用和氢键形成稳定复合物，当 TP:WP 质量比为 4:1 时，复合物粒径（384.61 nm）较单一 WP 体系（507.69 nm）显著降低 24.24%，PDI 由 0.94 改善至 0.51，Zeta 电位绝对值略有下降但体系稳定性显著提升。通过红外光谱分析进一步证实，TP 与 WP 之间存在静电引力和氢键作用，并伴随分子构象变化和氢键网络重组。流变学测试显示，适量添加 TP 可有效增强体系的表观粘度，改善其剪切稀化行为。

基于机理研究结果，通过正交试验优化出一款新型营养饮料配方：60 wt.% 银耳提取液、2 wt.% 乳清蛋白水解液、5 wt.% 绵白糖、3 wt.% 乳粉，并添加 0.2 wt.% 羧甲基纤维素（CMC）作为稳定剂。该产品不仅具有细腻顺滑的口感和均衡的风味特征，还展现出优异的储存稳定性（30 天内浊度变化率小于 5%，离心沉淀率低于 1%），且微生物指标符合国家安全标准。本研究为复合饮料的开发提供了新思路，同时拓展了银耳资源的高值化利用途径。未来可进一步探索 TP-WP 复合物在乳化体系、泡沫稳定性及活性成分递送等方面的应用潜力，推动蛋白－多糖协同体系在食品工业中的创新应用。

参考文献

[1] MARTÍN-DEL-CAMPO S T, MARTÍNEZ-BASILIO P C, SEPÚLVEDA-ÁLVAREZ J C, et al. Production of antioxidant and ACEI peptides from cheese whey discarded from Mexican white cheese production [J]. Antioxidants, 2019, 8(6): 158-167.

[2] LIN Y, DU H, ROOS Y, et al. Binary complexes of whey protein fibers/isolates and fish gelatins for emulsion stabilization [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 143: 108880.

[3] QIAN C, DECKER E A, XIAO H, et al. Comparison of biopolymer emulsifier performance in formation and stabilization of orange oil-in-water emulsions [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2011, 88(1): 47-55.

[4] 王国霞,牛祎琳,程莹莹,等.银杏不同部位多糖提取、结构及生物活性研究进展[J].食品科技,2024,49(6):204-212.

[5] SCHMITT C, TURGEON S L. Protein/polysaccharide complexes and coacervates in food systems [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2011, 167(1-2): 63-70.

[6] ZAMANI H, ZAMANI S, ZHANG Z, et al. Exceptional colloidal stability of acidified whey protein beverages stabilized by soybean soluble polysaccharide [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(4): 989-997.

[7] 许欢怡,李泉岑,郑明锋,等.银耳多糖的结构、功能性及应用研究进展[J].食品工业科技,2024,45(4):362-370.

[8] TIAN L L, ROOS Y H, MIAO S. Phase behavior and complex coacervation of whey protein isolate-*Tremella fuciformis* polysaccharide solution [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 143: 108871.

[9] 张迪,付美玲,费丛璇,等.多糖-植物蛋白复合物的制备及特性研究进展[J].食品与机械,2024,40(4):227-232.

[10] RYAN K N, VARDHANABHUTI B, JAVANMARD M, et al. Formation of soluble whey protein aggregates and their stability in beverages [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 236-243.

[11] CUEVAS-BERNARDINO J C, LEYVA-GUTIERREZ F M A, VERNON-CARTER E J, et al. Formation of biopolymer complexes composed of pea protein and mesquite gum-Impact of quercetin addition on their physical and chemical stability [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 736-745.

[12] 刘秋蝶,曹杨,张燕鹏,等.酪蛋白酸钠-多糖复合物的物化特性及其乳液稳定性[J].食品研究与开发,2024,45(11):54-61.

[13] 项楚越.卵白蛋白与多糖复合物的制备及对VD3的包载和缓释作用研究[D].杭州:浙江工商大学,2020.

[14] SONG X, ZHOU C, FU F, et al. Effect of high-pressure homogenization on particle size and film properties of soy protein isolate [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 43: 538-544.

[15] ZHOU L, FENG X, YANG Y, et al. Effects of high-speed shear homogenization on properties and structure of the chicken myofibrillar protein and low-fat mixed gel [J]. LWT, 2019, 110: 19-24.

[16] 张婷,袁一心,嵇竞弘,等.基于静电相互作用的卵白蛋白与岩藻多糖相行为分析及流变学分析[J].食品科学,2024,45(9):51-59.

[17] CHUN J Y, HONG G P, SURASSMO S, et al. Study of the phase separation behaviour of native or preheated WPI with polysaccharides [J]. Polymer, 2014, 55(16): 4379-4384.

[18] ZHOU Y, YUE W, LUO Y, et al. Preparation and stability characterization of soybean protein isolate/sodium alginate complexes-based nanoemulsions using high-pressure homogenization [J]. LWT, 2022, 154: 112607.

[19] FENG S, WANG Z, ZHAO J, et al. Fabrication and characterization of water-soluble phytosterol ester nanodispersion by emulsification-evaporation combined ultrasonic method [J]. Journal of Food Engineering, 2020, 276: 109895.

[20] 郑环宇,孔洋,郑丽,等.大豆蛋白-多糖复合物结构与性能及其稳定性研究[J].农业机械学报,2022,53(6):406-415.

[21] VOCI S, FRESTA M, COSCO D. Gliadins as versatile biomaterials for drug delivery applications [J]. Journal of Controlled Release, 2021, 329: 385-400.

[22] SU J Q, GUO Q, CHEN Y L, et al. Characterization and formation mechanism of lutein Pickering emulsion gels stabilized by *β*-lactoglobulin-gum arabic composite colloidal nanoparticles [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105276.

[23] 杨诗沅,邹宇晓,黎尔纳,等.桑枝多糖与桑枝低聚糖的流变学特性[J].食品研究与开发,2021,42(8):1-6.

[24] 龙慧,李祎,朱叶力,等.银耳多糖与大豆分离蛋白的相互作用及流变性能[J].食品科学,2022,43(16):160-168.

[25] 谷祥权.山楂果胶低聚糖与牛血清蛋白的相互作用研究[D].沈阳:辽宁大学,2023.

[26] HUSSAIN R, GAIANI C, JEANDEL C, et al. Combined effect of heat treatment and ionic strength on the functionality of whey proteins [J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95(11): 6260-6273.

[27] SINGH B, SHARMA V, CHAUHAN D. Gastroretentive floating sterculia-alginate beads for use in antiulcer drug delivery [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2010, 88(8): 997-1012.

[28] CARPENTIER J, CONFORTO E, CHAIGNEAU C, et al. Complex coacervation of pea protein isolate and tragacanth gum: Comparative study with commercial polysaccharides [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 69: 102641.

[29] XU Y, YANG N, YANG J, et al. Protein/polysaccharide intramolecular electrostatic complex as superior food-grade foaming agent [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105474.

[30] CHEN S, WU L, WU Z C, et al. Highly efficient removal of Sr^{2+} from aqueous solutions using a polyacrylic acid/crown-ether/graphene oxide hydrogel composite [J]. RSC Adv, 2024, 14(11): 7825-7835.

[31] GUO J X, XU P, GAO H. Sugar-the most basic sweetness in life [J]. Standard Living, 2013(2): 82-94.

[32] JIN F S, ZHAO X, WANG D W. Orthogonal experimental optimization of the production process of *Auricularia auricula* milk beverage [J]. Dairy Science and Technology, 2016, 39(2): 11-16.