王安坤, 罗钰, 高群, 等. 小球藻蛋白质加工特性分析及其在冰淇淋产品中的应用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 31−42. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040358

WANG Ankun, LUO Yu, GAO Qun, et al. Analysis of *Chlorella* Protein Processing Characteristics and Its Application in Ice Cream Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 31−42. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040358

·特邀主编专栏—植物基食品原料基础研究、前沿技术创新及其健康绿色产品开发（客座主编：于寒松、张健、李健）·

小球藻蛋白质加工特性分析及其在冰淇淋产品中的应用

王安坤[1], 罗　钰[1], 高　群[2], 李亦欢[3], 张　晨[1,*]

（1.福州大学生物科学与工程学院, 福建福州 350108;
2.福州青肽领航生物科技有限公司, 福建福州 350000;
3.泰兴市东圣生物科技有限公司, 江苏泰兴 225400）

摘　要: 本研究旨在解析小球藻蛋白的加工特性及其在冰淇淋中的应用。通过 25 kpsi 高压破碎制备小球藻高压提取物，经超滤（100 kDa 膜）和酶解-乙醇沉淀法分别获得 72% 纯度的纯化蛋白（*Chlorella* purified protein, CPP72）及 81% 纯度的纯化蛋白（*Chlorella* purified protein, CPP81），系统对比其起泡性、乳化性及流变性与乳清蛋白的差异，并评估 CPP72 替代脱脂奶粉对冰淇淋品质的影响。结果表明，CPP72 表现出显著功能优势，当蛋白质浓度为 4% 时，其起泡性（76%）和乳化活性指数（64 m^2/g）分别较乳清蛋白提高 33% 和 14%，黏度达 52242 mPa·s（乳清蛋白的 270 倍）。在冰淇淋应用中，CPP72 替代 20% 脱脂奶粉可减少 33% 黄原胶/单甘酯用量，同时维持产品核心品质，其硬度（7.8 N）、膨胀率（69%）及感官评分（93.1 分）与普通冰淇淋无显著差异（$P>0.05$），首次滴落时间延长至 10 min（对照组 5 min）。本研究表明，CPP72 具备良好的泡沫稳定性和乳化持久性，可协同替代乳清蛋白并降低添加剂依赖，为植物基冰淇淋开发提供新方案。

关键词: 小球藻蛋白质, 乳清蛋白, 冰淇淋, 起泡性, 乳化性, 流变性, 感官特性

中图分类号: TS202.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0031−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040358

本文网刊:

Analysis of *Chlorella* Protein Processing Characteristics and Its Application in Ice Cream Products

WANG Ankun[1], LUO Yu[1], GAO Qun[2], LI Yihuan[3], ZHANG Chen[1,*]

（1.College of Biological Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2.Fuzhou Qingtai Linghang Biotechnology Co., Ltd., Fuzhou 350000, China;
3.Taixing Dongsheng Biotechnology Co., Ltd., Taixing 225400, China）

Abstract: This study aimed to investigate the processing characteristics of *Chlorella* proteins and their application in ice cream. *Chlorella* high-pressure extract was prepared using 25 kpsi cell disruption, followed by ultrafiltration (100 kDa membrane) or enzymatic hydrolysis-ethanol precipitation to obtain *Chlorella* purified proteins with 72% (CPP72) and 81% (CPP81) purity. Their foaming, emulsifying, and rheological properties were systematically compared with those of whey protein, and the effects of replacing skimmed milk powder with CPP72 on ice cream quality were evaluated. Results showed that CPP72 exhibited significant functional advantages: at a protein concentration of 4%, its foaming capacity (76%) and emulsifying activity index (64 m^2/g) were 33% and 14% higher than those of whey protein, respectively, and its

收稿日期: 2025−04−30

基金项目: 新蛋白资源的探索与开发项目（2021042601）。

作者简介: 王安坤（2004−）, 男, 大学本科, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: 2906038118@qq.com。

*** 通信作者:** 张晨（1982−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 生物资源再利用、绿色加工技术等, E-mail: chen.zhang@fzu.edu.cn。

viscosity reached 52242 mPa·s (270 times that of whey protein). In ice cream applications, replacing 20% of skimmed milk powder with CPP72 enabled a 33% reduction in xanthan gum and monoglyceride usage, while maintaining core product quality. The hardness (7.8 N), overrun (69%), and sensory score (93.1 points) showed no significant difference from the control ice cream (P>0.05), and the initial drip time extended from 5 to 10 minutes. This study demonstrates that CPP72 has excellent foam and emulsion stability, offering a promising alternative to whey protein and reducing dependency on additives in plant-based ice cream development.

Key words: *Chlorella* protein; whey protein; ice cream; foaming properties; emulsifying properties; rheological properties; sensory characteristics

随着可持续发展理念的推进，植物基蛋白因其来源广泛、营养价值高、生产环境友好而成为乳制品替代的重要研究方向。其中，小球藻作为一种生长于淡水环境的球形单细胞绿藻，具有高蛋白含量（干重中蛋白占比超过 50%），远高于大豆、核桃等传统植物蛋白来源[1]。此外，小球藻可通过异养方式在发酵罐中规模化培养，避免耕地资源占用，展现出极强的产业化潜力[2]。近年来，小球藻蛋白因其优良的起泡性、乳化性和流变性等加工特性，逐渐受到食品领域研究者关注，被视为具有广泛应用前景的新型植物基蛋白[3]。

当前研究表明，小球藻蛋白的结构与提取纯度对其功能特性具有重要影响。高压处理可有效破碎细胞壁，促进蛋白质释放并保留较完整的亚基结构，从而提升其界面活性，使其在起泡性和乳化性方面表现出优势[1]。然而，蛋白质中杂质的存在会增加蛋白质溶液的粘度或形成空间位阻，阻碍蛋白质分子间的相互作用或与其它大分子的结合，超滤、酶解-乙醇沉降技术可以有效去除小球藻蛋白中的多糖、脂质、色素等杂质，进一步提高其纯度[3]。近年来，有研究尝试将小球藻蛋白应用于发泡剂、乳化剂等功能食品材料中[4−5]，但关于其不同纯度蛋白的系统加工性能评估及在复杂食品体系（如冰淇淋）中的具体应用仍研究较少。在冰淇淋体系中，蛋白质、乳化剂（如单甘酯）和稳定剂（如黄原胶）是关键成分，对产品的质地、膨胀率和融化特性至关重要[6]。目前广泛使用的乳清蛋白（Whey protein, WP）面临成本较高及潜在过敏风险的问题，而单甘酯和黄原胶的使用也存在成本压力[6−8]。凭借其优异的功能特性和可持续性，小球藻蛋白展现出替代 WP 并减少乳化剂/稳定剂用量的潜力。然而，实现这一替代面临挑战，小球藻蛋白可能与单甘酯竞争吸附位点而削弱乳化效果[9]，其高粘度也可能干扰黄原胶的稳定网络结构[10]。因此，确定小球藻蛋白的最佳替代比例并优化添加剂用量，是开发高品质植物基冰淇淋的关键。

基于此，本研究聚焦于不同纯度小球藻蛋白的加工特性及其在冰淇淋产品中替代 WP 的应用潜力。通过 25 kpsi 高压细胞破碎获得小球藻高压提取物（*Chlorella* high-pressure extract, CHPE），并分别采用超滤（100 kDa）及酶解-乙醇沉淀法制备纯度为 72%（*Chlorella* purified protein, CPP72）和 81%（*Chlorella* purified protein, CPP81）的小球藻蛋白，系统比较其起泡性、乳化性和流变性，并在不同替代比例下评估其对冰淇淋质构、感官、融化率等品质特性的影响。本研究不仅明确了蛋白纯度对功能性能的调控作用，还探讨了小球藻蛋白在减少乳化剂与稳定剂使用中的可行性，为植物基冰淇淋的低添加、高品质开发提供理论支撑与技术路径。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

蛋白核小球藻　福建省东圣生物科技有限公司；无水乙醇、十二烷基硫酸钠（SDS）　分析纯，上海国药集团化学试剂有限公司；乳清蛋白（纯度>80%）、壳聚糖酶（20 U/mg）　上海源叶生物有限公司；大豆油　益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司；脱脂奶粉（雀巢）　北京高瀚国际贸易有限公司；黄原胶、单甘酯　河南万邦化工科技有限公司；棕榈油　良芝生物科技；白砂糖　市售。

F6/10 均质机　上海净信实业发展有限公司；WKB-100-4 恒温振荡器　上海净信实业发展有限公司；One shot 高压细胞破碎仪　英国 Constant Systems 公司；ZD-2 pH 计　上海精科仪器有限公司；Paar Physica MCR 302 旋转流变仪　安东帕（上海）商贸有限公司；Vivaflow200 超滤设备　德国赛多利斯（Sartorius）；TA.XT Plus 质构仪　英国 Stable Micro Systems 公司；BCD-332W 冰箱　博西华家用电器有限公司；TNM-L ROHS 总氮/总有机碳分析仪　日本京都岛津制作所。

1.2 实验方法

1.2.1　蛋白质的提取纯化　通过单因素实验优化料液比、pH、压力、CHPE 与乙醇的体积比、酶种类等条件，本论文探究前期最佳工艺条件下制备得到的蛋白的加工特性。配制料液比为 1∶10（w/v）、pH 为 7 的小球藻水溶液，于 25 kpsi 的压力下高压处理一次，获得 CHPE。取 CHPE 200 mL，使用 100 kDa 的超滤膜对其进行分离纯化，待浓缩 10 倍至 20 mL，添加 200 mL 去离子水进行二次超滤，浓缩 10 倍，保留 100 kDa 浓缩液，于室温下离心（7300 r/min, 15 min）获得 CPP72；配制含有壳聚糖酶（24 U/g, 55 ℃, pH8）的 CHPE 溶液，于恒温振荡器中反应，采用 DNS 法测定反应体系中还原糖浓度的变化趋势，反应至 3 h

时无显著变化，碳水化合物基本水解完全。沸水浴 10 min 灭酶活，加入同等体积的无水乙醇，于室温下放置 1 h 后离心（7300 r/min，15 min）获得 CPP81。于铝盘中放置三种样品的冻干粉 150 mg，在 80 ℃条件下烘 24 h，测定样品干燥后的重量以确定样品的干物质质量，并通过总有机碳分析仪测定样品的蛋白质质量。样品蛋白质纯度根据以下公式计算：

$$蛋白质纯度(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \qquad 式（1）$$

式中：m_2 为样品蛋白质质量，g；m_1 为样品干物质质量，g。

1.2.2　蛋白质起泡产品制备　参考 Lyu 等[11] 的方法，取小球藻蛋白质（CHPE、CPP72 和 CPP81）和乳清蛋白配制浓度为 1%、2% 和 4%（w/v）的蛋白质溶液 4 mL，均质 40 s（20000 r/min），连续 3 次，共计 2 min，制得蛋白质发泡产品，测定起泡性能和起泡稳定性。

1.2.3　蛋白质乳状液制备　参考 Guo 等[12] 的方法，以大豆油为油相，配制油水比 7∶3（v/v），蛋白质浓度分别为 2 mg/mL 和 4 mg/mL 的蛋白质油水混合溶液，均质 2 min（10000 r/min），获得蛋白质乳状液，静置于常温下（10 min，1 d、15 d），观察直观形态并测定乳化指数和乳化活力指数。

1.2.4　蛋白质凝胶制备　参考 Grossmann 等[13] 的方法，分别配制浓度为 5%、10% 和 15%（w/v）的小球藻蛋白质和乳清蛋白溶液，于 90 ℃ 下加热 30 min，置于室温 30 min 后转移至冰箱（4 ℃），充分冷却 12 h，即为蛋白质凝胶，对其流变性进行表征。

1.2.5　小球藻蛋白质冰淇淋制备　参考侯团伟等[14] 的方法并稍作修改进行冰淇淋的制备。在蛋白质替代实验中，基础配方为脱脂奶粉（10%）、白砂糖（14%）、棕榈油（10%）、黄原胶（0.15%）、单甘酯（0.15%）和水（65.2%），实验组使用小球藻蛋白（CHPE 或 CPP72）按特定比例（0%、10%、20%、40%、60%、80%、100%）替代脱脂奶粉提供的蛋白质，保持总蛋白质含量不变。具体制备步骤：首先将黄原胶与白砂糖混合溶于水中，加入脱脂奶粉（或脱脂奶粉与小球藻蛋白的混合物）于 60 ℃ 搅拌溶解；随后将单甘酯加入棕榈油中，加热至 50 ℃ 搅拌至完全融化，并与上述物料混合均匀。采用巴氏灭菌法将混合物料在 75 ℃ 下加热 15 min 进行灭菌处理，随后用均质机以 10000 r/min 的速度均质 3 次，每次 2 min。均质后的物料在室温下冷却 30 min，置于 4 ℃ 冰箱中老化 4 h 后于−2 ℃ 至−6 ℃ 的条件下凝冻 30 min，最后在−20 ℃ 下硬化 24 h，完成冰淇淋的制备。对冰淇淋进行感官评价，并测定黏度、硬度、膨胀率和融化率。在添加剂替代实验中，评估在固定小球藻蛋白（CPP72）替代比例下，减少稳定剂（黄原胶）和乳化剂（单甘酯）用量的可行性。固定 CPP72 替代脱脂奶粉蛋白质的比例为 20% 或 60%。添加剂（黄原胶、单甘酯）用量在基础配方（100%）中各为 0.15%。实验组中，将黄原胶和单甘酯用量均减少至基准量（0.15%）的 67%、33% 或 0%。冰淇淋制备步骤同“蛋白质替代实验”部分。

1.2.6　起泡能力与泡沫稳定性测定

1.2.6.1　起泡性能（Foaming Capacity，FC）　样品起泡性能按以下公式计算[11]：

$$FC(\%) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100 \qquad 式（2）$$

式中：V_0 为初始体积，mL；V_1 为均质后样品体积，mL。

1.2.6.2　起泡稳定性（Foam Stability，FS）　样品起泡稳定性按以下公式计算[11]：

$$FS(\%) = \frac{V_{30} - V_0}{V_1 - V_0} \times 100 \qquad 式（3）$$

式中：V_0 为初始体积，mL；V_1 为均质后的样品体积，mL；V_{30} 为静置 30 min 后的泡沫体积，mL。

1.2.7　直观状态与乳化指数测定　乳状液制备完成后，通过拍照记录乳状液外观及形态。乳化指数（Creaming index，CI）通过以下公式计算[15]：

$$CI = \frac{Hs}{Ht} \qquad 式（4）$$

式中：Hs 为乳状液体积，mL；Ht 为总体积，mL。

1.2.8　乳化活力指数测定　参考 Aziz 等[16] 的方法，取 20 μL 乳状液于 SDS（0.1%，w/v）溶液中，在 500 nm 波长下测定吸光度（A_{500}）。乳状液的乳化活力指数（Emulsifying Activity Index，EAI）计算公式如下：

$$EAI(m^2/g) = \frac{2 \times 2.303 \times A_{500} \times N \times 10^{-4}}{\theta C} \qquad 式（5）$$

式中：N 为稀释倍数；θ 为油相在溶液中占比，%；C 为蛋白质浓度，g/mL，计算值固定为 1 g/mL。

1.2.9　流变性表征　小球藻蛋白质的流变性质（黏度和储能模量（G'）、损耗模量（G"））通过旋转流变仪测定[13]。测定黏度时，以 1~100 1/s 的剪切速率对样品进行稳定剪切（25 ℃）。为确定储能模量和损耗模量，在 25 ℃ 条件下以振荡频率扫描凝胶。在样品的线性黏弹性区域中，选择 1% 应变，通过扫频确定 G'和 G"的角频率依赖性（1~1000 rad/s）。

1.2.10　感官特性评价　参考刘丽等[17] 的方法，根据表 1 进行冰淇淋感官评价，由 10 名食品专业学生（经感官评价培训）依据感官评价表，按各项指标进行三次独立重复评分。评价过程中采用双盲法，样品编号随机化，评价员未知具体配方及处理组别，以确保结果客观性。

1.2.11　黏度测定　参考 1.2.9 测定老化后冰淇淋混料的黏度。

表 1 冰淇淋感官评价标准

Table 1 Ice cream sensory evaluation criteria

指标	标准	得分
色泽	色泽均匀, 颜色自然	14~20
	色泽较均匀, 绿色偏重	7~13
	色泽不均匀, 绿色过重	0~6
气味	奶香味纯正, 香草味适中	14~20
	奶香味不明显, 海草味有点重	7~13
	海腥味过浓	0~6
组织	细腻, 润滑, 无明显粗糙冰晶, 无气孔	14~20
	存在小冰晶或细微颗粒感	7~13
	较大冰晶, 组织粗糙	0~6
滋味	甜味适中, 可口, 具有良好的滑腻感	14~20
	甜味不足或过甜, 滑腻感偏差	7~13
	有酸败味, 口感粗糙	0~6
质地	黏稠度好, 入口即化	14~20
	黏稠度较差, 口感偏差	7~13
	质地过黏稠, 难以融化	0~6

1.2.12 硬度测定 参考 Roy 等[18] 的方法, 冰淇淋的硬度通过质构仪测定。测试条件: 预测试速度为 2 mm/s, 测试速度为 3 mm/s, 后测速度为 10 mm/s。探头类型为 p/6, 探头距离样品距离为 15 mm, 样品高度约为 20 mm, 样品形变量为 40%。

1.2.13 膨胀率测定 参考姜雪[19] 的方法, 使用以下公式确定冰淇淋的膨胀率:

$$膨胀率(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad 式（6）$$

式中: W_1 为凝冻前冰淇淋的质量, g; W_2 为凝冻后同体积冰淇淋的质量, g。

1.2.14 融化率测定 参考 Lomolino 等[20] 的方法, 称取 5 g 冰淇淋样品于金属网上(孔直径为 0.85 mm), 将金属网置于天平上方, 天平内部由烧杯收集从上方滴落的冰淇淋。记录冰淇淋第一次滴落的时间和重量, 并每间隔 2 min 记录一次。融化率由以下公式确定:

$$融化率(\%) = \frac{W_3}{W_4} \times 100 \quad 式（7）$$

式中: W_3 为一定时间下融化且滴落的冰淇淋质量, g; W_4 为冰淇淋取样质量, 为 5 g。

1.3 数据处理

采用 Microsoft excel 2016 软件进行数据统计与分析, 若无特别说明, 每个样品重复测定 3 次, 其结果表示为平均值±标准差(Means±SD)。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan's 法多重比较分析各组的差异显著性, 显著性水平为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 小球藻蛋白加工特性分析

2.1.1 起泡性能 测定三种小球藻蛋白质(CHPE、CPP72 和 CPP81)在 1%、2%、4%(w/v)浓度下的起泡性和起泡稳定性, 并以 WP 作为参照, 结果如图 1 所示。所有测试蛋白质(CHPE、CPP72、CPP81、WP)的起泡性和起泡稳定性均随蛋白质浓度的升高而显著提高($P<0.05$)。当蛋白质浓度从 1% 增加至 4% 时, 乳清蛋白(WP)的起泡性从 39% 显著上升至 57%, 起泡稳定性从 42% 显著增加至 64%($P<0.05$)。相比之下, 在相同浓度梯度下, CPP72 的提升幅度更为显著: 其起泡性从 44% 显著上升至 76%, 起泡稳定性从 64% 显著增加至 91%($P<0.05$)。这一现象可能归因于蛋白质浓度的增加, 使其在空气/水界面的吸附能力增强, 进而提升了其形成界面膜的能力, 从而使泡沫结构更加稳定[21]。此外, CPP72 相较于乳清蛋白表现出更高的起泡性能, 可能与其蛋白结构完整性和界面构型有关。CPP72 由高压破碎细胞壁并经超滤去除了部分非蛋白杂质, 其亚基结构较为完整、柔顺性更高, 能够更快地迁移至气液界面并在界面处展开形成致密稳定的蛋白膜, 从而使泡沫结构更加稳定[22]。相较之下, 乳清蛋白虽具良好表面活性, 但其亚基中含有 β-乳球蛋白等致密结构, 展开速率较慢, 泡沫膜强度略逊于 CPP72[23], 从而导致其起泡性和泡沫稳定性均低于 CPP72。

CPP81 相比 CPP72 虽具有更高的蛋白质纯度, 但在中高浓度下, 其起泡性和稳定性却显著低于 CPP72($P<0.05$)。这可能与其结构变化及功能组分缺失有关。CPP81 经酶解-乙醇沉淀获得, 乙醇处理可能改变其三级结构, 暴露疏水基团, 削弱氢键与离子键作用, 导致蛋白质过度展开, 降低其在界面处形

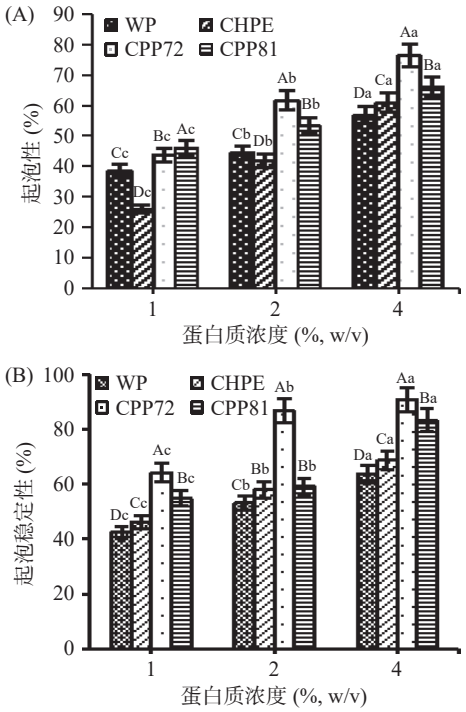


图 1 蛋白质浓度和纯度对其起泡性的影响

Fig.1 Effects of protein concentration and purity on its foaming properties

注: (A)起泡性; (B)起泡稳定性; 不同大写字母表示同一浓度下不同蛋白质样品间差异显著($P<0.05$); 不同小写字母表示不同浓度下同一蛋白质样品间差异显著($P<0.05$), 图 3 同。

成致密膜的能力，从而不利于泡沫形成与稳定[24−25]；相比之下，CPP72 通过超滤纯化，保留了部分多糖、多肽等高分子杂质，这些成分可能协同蛋白质增强界面膜黏弹性和泡沫稳定性[26]。

2.1.2　乳化特性　测定 CHPE、CPP72、CPP81 和乳清蛋白乳状液在静置 10 min、1 d 和 15 d 后的直观状态和乳化指数（CI），以及乳化活力指数（EAI），结果如图 2 和图 3 所示。与乳清蛋白乳状液相比，小球藻蛋白乳状液在乳化状态和乳化程度上均表现出显著优势。在相同蛋白质浓度下，不同纯度的小球藻蛋白表现出差异化的乳化性能，提示蛋白纯度与乳化效果之间可能存在相关性，尤其在 CPP72 组表现最为突出。当蛋白质浓度为 2 mg/mL 且静置时间为 10 min 时，三种小球藻蛋白乳状液和乳清蛋白乳状液均处于完全乳化状态，CI 值均为 1。然而，随着静置时间延长至 1 d 和 15 d，乳清蛋白乳状液开始出现分层现象，其 CI 值分别降至 0.91 和 0.53；相比之下，CPP72 乳状液的分层现象不明显，CI 值分别为 1 和 0.92。这可能是因为乳清蛋白的疏水性较大，导致其在油水界面上的结合能力较弱[27−28]，从而降低了乳化量。在 2 mg/mL 条件下，静置 15 d 后，CPP81 乳状液的 CI 值显著低于 CHPE（P<0.05），这可能与 CPP81 在纯化过程中经过乙醇沉降处理有关。相关研究表明，乙醇可能改变蛋白质三级结构，破坏疏水与静电相互作用，影响其在油水界面上的吸附构型与紧密程度，进而降低乳化膜的稳定性[24−25]。在蛋白质浓度为 4 mg/mL 时，三种小球藻蛋白乳状液的乳化指数仍与乳清蛋白相当，即使在静置 15 d 后，其 CI 值仍接近 1。这可能是由于小球藻蛋白质浓度的增加增强了蛋白质分子间的相互作用[29]，从而形成了更为稳定的蛋白质膜，有效维持了乳状液的稳定性。相比之下，乳清蛋白的 CI 值在静置 15 d 后降至 0.66，进一步说明了小球藻蛋白在乳化稳定性方面的优势。

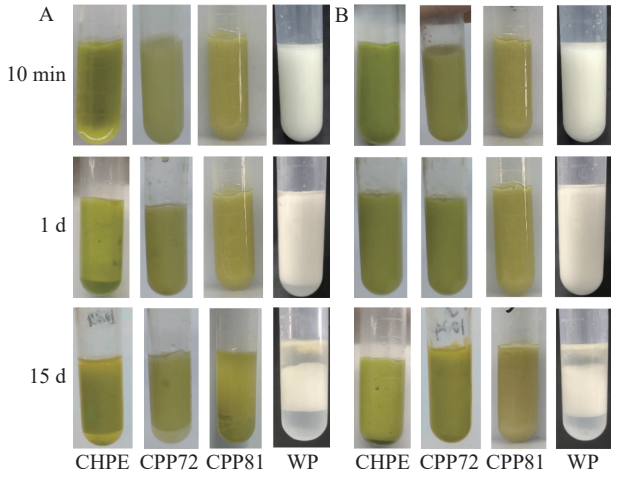


图 2　小球藻蛋白质乳状液直观图

Fig.2　*Chlorella* protein emulsion visual diagram

注：A：乳状液直观图（蛋白质浓度：2 mg/mL）；B：乳状液直观图（蛋白质浓度：4 mg/mL）。

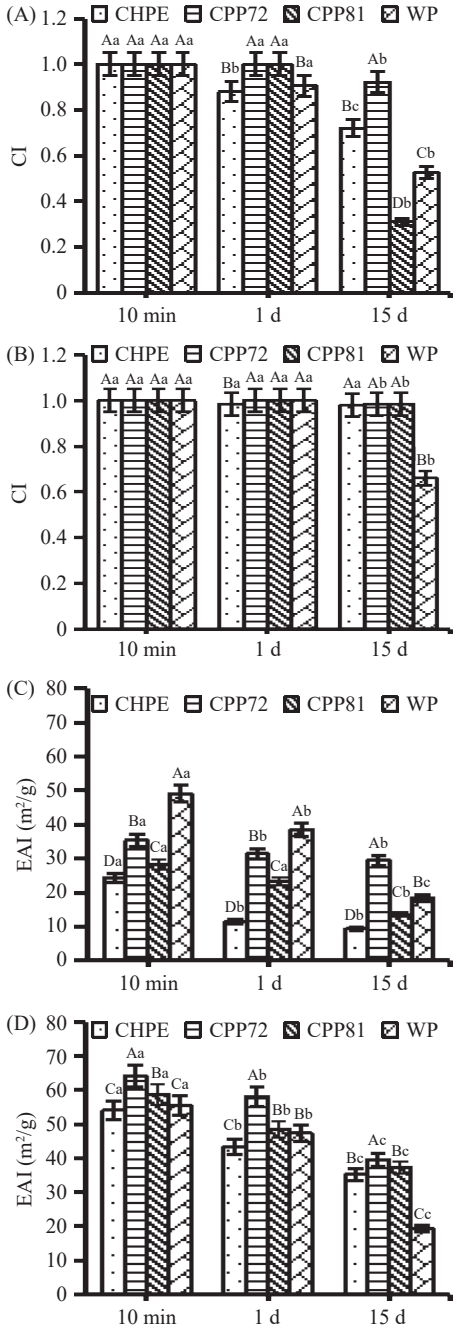


图 3　小球藻蛋白质乳化指数和乳化活力指数

Fig.3　*Chlorella* protein emulsifying index and emulsifying activity index

注：（A）乳状液乳化指数（蛋白质浓度：2 mg/mL）；（B）乳状液乳化指数（蛋白质浓度：4 mg/mL）；（C）乳状液乳化活力指数（蛋白质浓度：2 mg/mL）；（D）乳状液乳化活力指数（蛋白质浓度：4 mg/mL）。

EAI 实验结果表明，在 2 mg/mL 浓度下，除静置 15 d 后 CPP72 的 EAI 值显著大于 WP 外（P<0.05），其余时间段小球藻蛋白质的乳化性均不如 WP，这可能是因为 WP 本身具有较高的表面疏水性与柔性结构，有利于其快速迁移至油水界面并形成初始乳化膜，但在存放过程中更容易因蛋白聚集或界面膜破裂导致乳液分层[30]，EAI 随时间下降显著；而 CPP72 含有一定量可增强界面稳定性的非蛋白杂质（如糖类或小分子多肽），在延长储存过程中协同维持乳液稳定

性。当蛋白质浓度从 2 mg/mL 增加到 4 mg/mL，各蛋白质 EAI 值均上升，其中 CPP72 的 EAI 值在静置 10 min 后高达 64 m^2/g，CPP72 和 CPP81 的乳化性显著高于 WP（$P<0.05$），表明其在高浓度下具有更优异的乳化性能和稳定性。这种现象可归因于蛋白浓度的增加导致界面蛋白浓度相应提高，油滴表面被蛋白分子完全包裹，形成一层致密的蛋白膜[31]，随着蛋白膜的厚度的增加，油滴粒径逐渐减小，乳液的稳定性也随之增强。此外，高纯度的小球藻蛋白质（CPP72、CPP81）在界面上能够形成更稳定的乳化膜，其乳化性能显著优于低纯度样品（CHPE），这可能是由于高纯度的蛋白质中多糖类物质含量较低，更易于形成均匀的分散体系[32]，从而进一步增强乳液的稳定性。

2.1.3 流变性

2.1.3.1 黏性 测定 CHPE、CPP72 和 CPP81 在 5%、10% 和 15% 蛋白质浓度下的黏度，结果如图 4 所示。除 5% 的 CHPE 外，小球藻蛋白质溶液的黏度均高于乳清蛋白，且表现出典型的剪切稀化现象，符合非牛顿流体特征。

在 15% 的蛋白质浓度下，乳清蛋白的初始黏度为 193 mPa·s，CHPE、CPP72 和 CPP81 的初始黏度分别达到 12467、52242 和 52366 mPa·s，分别是乳清蛋白的 65、270 和 271 倍，这一显著差异可能源于小球藻蛋白质中富含天冬氨酸、谷氨酸等酸性氨基酸[33]，这些氨基酸能够形成更多的氢键和离子键，从而增强蛋白质溶液的黏度。此外，小球藻蛋白质溶液的黏度随蛋白质浓度的增加而上升。当蛋白质浓度从 5% 增加到 15% 时，CHPE 的初始黏度从 44 mPa·s 上升至 12476 mPa·s，增加了约 280 倍。这种黏度的显著提升可归因于蛋白质浓度的增加导致分子间距离缩短，进而增强了分子间的相互作用力，最终显著提高了溶液的黏度[29]。

小球藻蛋白质溶液的黏度还随蛋白质纯度的增加而增加。在蛋白质浓度为 5% 时，CHPE、CPP72 和 CPP81 的初始黏度分别为 44、160 和 238 mPa·s，在 10% 和 15% 浓度下，其黏度仍呈现出随纯度的提升而增加的趋势。这可能是由于小球藻蛋白质纯化过程中去除了更多的离子或其他杂质，增强了蛋白质分子之间的相互作用，使其形成更为稳定的空间网状结构，从而导致黏度提升[34]。

2.1.3.2 凝胶性 测定 CHPE、CPP72 和 CPP81 在不同蛋白质浓度下随角频率变化的储能模量（G'）和损耗模量（G"），并以乳清蛋白（15%）作为对照，结果如图 5 所示。实验结果表明，在中、高蛋白质浓度下，小球藻蛋白质展现出比乳清蛋白更优异的凝胶性能。在 15% 蛋白质浓度下，CHPE、CPP72、CPP81 的 G'值分别是乳清蛋白的 33、267 和 554 倍。此外，小球藻蛋白质的凝胶转换点向角频率增大的方向移动，表明其凝胶结构更为紧密，且具有更高的稳定性，不易被破坏。

小球藻蛋白质凝胶性随蛋白质浓度的增加而增强。以 CPP72 为例，当蛋白质浓度从 5% 增加至 15% 时，其 G'值从 40 Pa 增加至 9241 Pa，增幅达 231 倍。这一现象可能归因于蛋白质浓度的增加促进了蛋白质分子之间的相互作用，形成了更为紧密的三维网状结构，从而显著提升了凝胶性能[13]。

此外，小球藻蛋白质凝胶性随蛋白质纯度的增加而显著增强。在 15% 蛋白质浓度下，CHPE、CPP72 和 CPP81 的 G'值分别为 1141、9241 和 19161 Pa。这可能是由于纯度的提高减少了蛋白质组成和结构的差异，使得蛋白质分子之间更容易形成稳定的相互作用，进而构建出更为紧密且均匀的凝胶网络[35]。

2.2 小球藻蛋白质作为冰淇淋中蛋白质替代品的应用潜力分析

2.2.1 感官特性 通过对小球藻蛋白质冰淇淋的色泽、气味、组织、滋味和质地等特性进行感官评定，综合评定结果如图 6 和表 2 所示。普通冰淇淋色泽均匀，质地细腻润滑，感官评价得分为 90.5 分。当

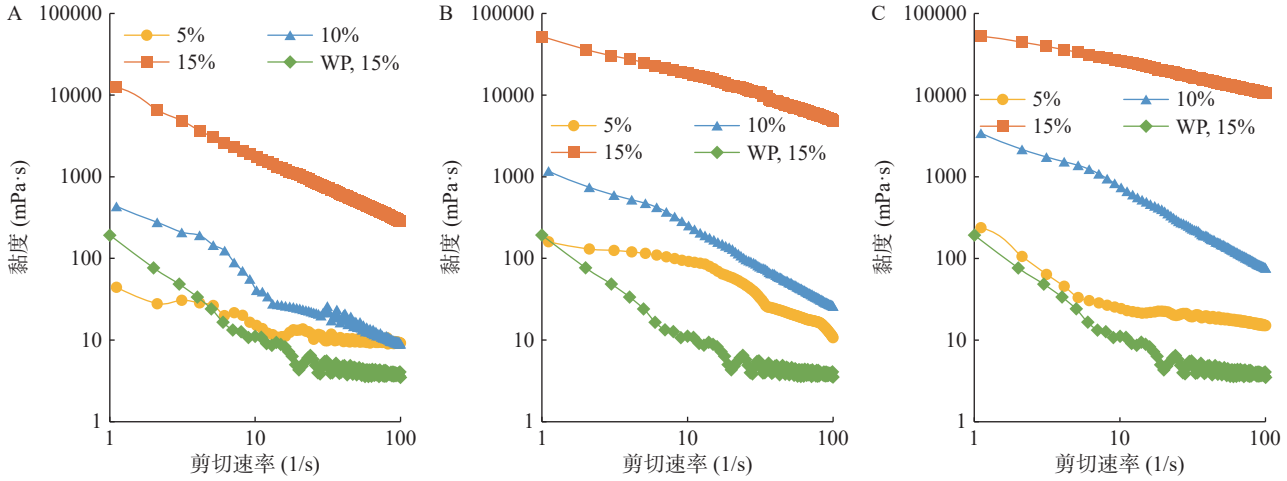


图 4 小球藻蛋白质浓度和纯度对其黏性的影响

Fig.4 Effects of concentration and purity of *Chlorella* protein on its viscosity

注：A：CHPE；B：CPP72；C：CPP81；图 5 同。

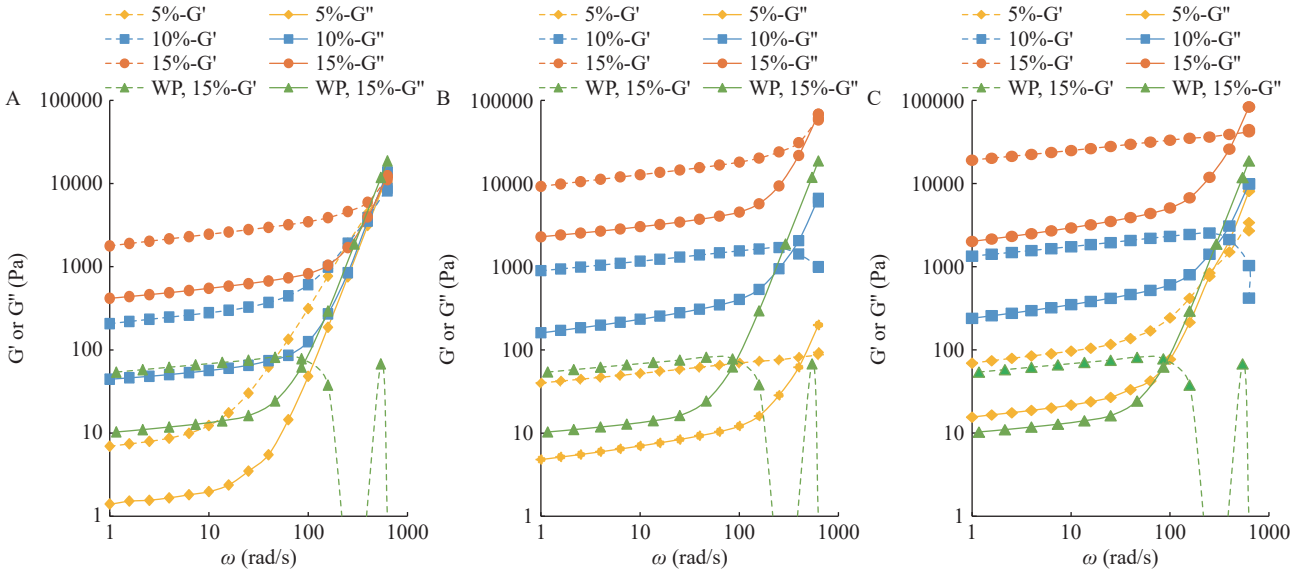


图 5　小球藻蛋白质浓度和纯度对其凝胶性的影响

Fig.5　Effects of protein concentration and purity of *Chlorella* on its gel properties

以 CHPE 替代冰淇淋中的脱脂奶粉时，替代率为 10% 和 20% 的冰淇淋均呈现出绿色，组织细腻绵密，其感官评价得分分别为 90.4 分和 91.2 分，与普通冰淇淋相比无显著差异（P>0.05）。然而，当蛋白质替代率超过 20% 时，冰淇淋颜色过绿，出现小冰晶，并带有轻微的海草味，导致感官评分显著下降（P<0.05）。这表明，当蛋白质替代率不超过 20% 时，小球藻蛋白质可作为替代普通冰淇淋中脱脂奶粉的潜在选择，具有良好的应用前景。此外，小球藻蛋白质的纯度对其在冰淇淋中的感官表现具有一定程度的影响。在蛋白质替代率为 10% 时，CPP72 冰淇淋的颜色较 CHPE 浅，感官评价得分更高，达到 93.1 分。这可能是因为

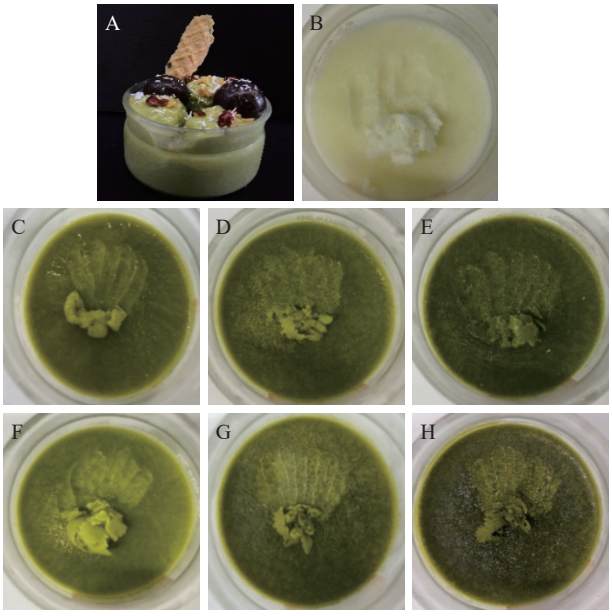


图 6　小球藻蛋白质冰淇淋外观

Fig.6　Appearance of *Chlorella* protein ice cream

注：A：小球藻蛋白质冰淇淋产品（CPP72-10%）；B：普通冰淇淋；C：CHPE-10%；D：CHPE-20%；E：CHPE-40%；F：CPP72-10%；G：CPP72-20%；H：CPP72-40%。

表 2　冰淇淋感官评价得分

Table 2　Ice cream sensory evaluation score

样品	奶粉替代率(%)						
	0	10	20	40	60	80	100
CHPE	90.5±2.6^{a}	90.4±2.8^{a}	91.2±2.2^{a}	74.5±1.8^{b}	65.3±1.3^{c}	49.2±1.5^{d}	47.5±1.6^{d}
CPP72	90.5±2.6^{a}	93.1±1.8^{a}	92.3±0.8^{a}	74.4±1.6^{b}	68.3±1.5^{b}	51.8±2.8^{c}	43.3±1.5^{d}

注：同行不同字母表示差异显著（P<0.05），表3~表5同。

高纯度的小球藻蛋白质（如 CPP72）能够更好地与冰淇淋体系中的脂肪膜重新排列，促进蛋白质与其他成分在脂肪球膜中共存[18]，从而使冰淇淋的质地更加细腻、柔软，口感更佳。

2.2.2　黏度　测定 CHPE 和 CPP72 作为蛋白质替代品时冰淇淋混合料经老化后溶液（冰淇淋老化液）的黏度，结果如图 7 所示。冰淇淋老化液表现出明显的剪切稀化现象。当蛋白质替代率为 20% 时，冰淇淋老化液的黏度约为 7500 mPa·s，与普通冰淇淋（7000 mPa·s）相近。这可能是因为小球藻蛋白质能够与脱脂奶粉中的酪蛋白和乳蛋白发生相互作用[36]，从而使冰淇淋老化液的黏性与普通冰淇淋相似。蛋白质替代率较高时，冰淇淋老化液的黏度随替代率的增加而增强。随着 CHPE 的蛋白质替代率从 40% 增加到 100%，CHPE 和 CPP72 的冰淇淋老化液的黏度分别从 11660、10500 增加到 63058、91000 mPa·s。此外，蛋白质纯度的提高也会显著增加冰淇淋老化液的黏度。在蛋白质替代率从 20% 增长至 100% 时，CHPE 的黏度从 7500 mPa·s 增长至 63058 mPa·s，而 CPP72 的黏度则从 7806 mPa·s 增长至 91000 mPa·s。这一现象可能归因于蛋白质纯度的增加，使得小球藻蛋白质与溶液中的脂质等物质之间的相互作用更加高效，物质结合更加紧密[37]，从而显著增强了老化液的黏度。

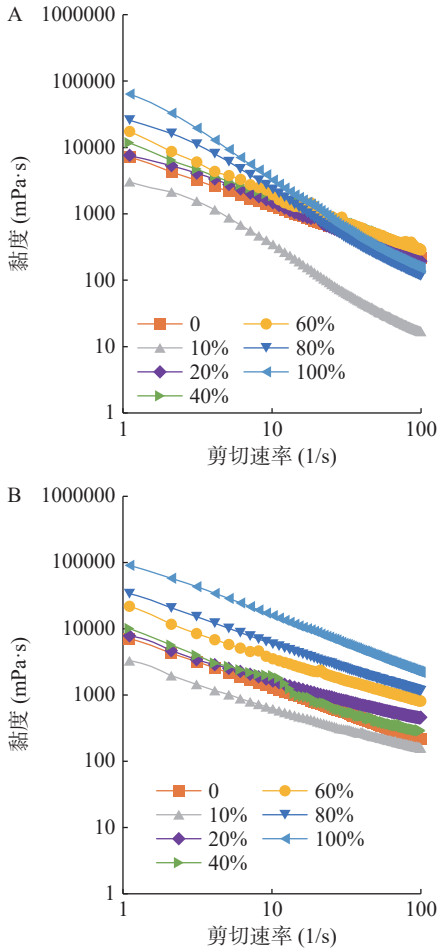


图 7　小球藻蛋白质对冰淇淋黏度的影响

Fig.7　Effect of *Chlorella* protein on the viscosity of its ice cream

注: A: CHPE; B: CPP72。

2.2.3　硬度　测定小球藻蛋白质冰淇淋的硬度, 并以普通冰淇淋为参照, 结果如表 3 所示。当蛋白质替代率为 0% 到 40% 之间时, 小球藻蛋白质冰淇淋的硬度与普通冰淇淋相比无显著差异(P>0.05)。此外, 在此替代率范围内, 小球藻蛋白质纯度的提高对冰淇淋硬度的影响亦无显著差异(P>0.05)。然而, 随着蛋白质替代率的进一步增加, 冰淇淋的硬度显著提高。替代率由 40% 增加至 100% 时, CPP72 冰淇淋硬度由 8.3 N 显著增加至 17.6 N(P<0.05)。这一现象可能是因为少量的小球藻蛋白质与奶粉中的蛋白质发生相互作用, 吸附冰淇淋乳化液中的游离水分子, 从而减少冰晶的形成[38], 使冰淇淋硬度较小。然而, 当小球藻蛋白质含量增高时, 其与冰淇淋配料中的多糖等物质发生更广泛的相互作用, 形成更强的凝胶网络结构[39]。这种结构能够固定更多的游离水分子, 增加冰淇淋的黏稠度, 从而导致硬度显著增强。

表 3　小球藻蛋白质对冰淇淋硬度的影响(N)

Table 3　Effect of *Chlorella* protein on the hardness of its ice cream (N)

样品	蛋白质替代率(%)						
	0	10	20	40	60	80	100
CHPE	8.1±0.5^{bc}	7.3±0.4^{c}	8.2±0.4^{bc}	8.9±0.5^{b}	9.9±0.5^{b}	9.2±0.3^{b}	11.5±0.6^{a}
CPP72	8.1±0.5^{d}	7.5±0.4^{d}	8.3±0.2^{d}	8.5±0.4^{d}	10.2±0.5^{c}	15.3±0.5^{b}	17.6±0.5^{a}

2.2.4　膨胀率　测定小球藻蛋白质冰淇淋的膨胀率, 并以普通冰淇淋为参照, 结果如图 8 所示。普通冰淇淋的膨胀率为 61%, 当 CHPE 的替代率低于 60% 或 CPP72 的替代率低于 40% 时, 小球藻蛋白质冰淇淋的膨胀率与普通冰淇淋无显著差异(P>0.05)。其中, CHPE 替代率为 10% 时, 其冰淇淋膨胀率与普通冰淇淋最为接近, 约为 59%。然而, 当蛋白质替代率从 20% 上升至 100% 时, CHPE 和 CPP72 冰淇淋的膨胀率分别从原来的 63%、65% 降至 35%、31%。这一现象可能与乳蛋白在冰淇淋体系中的作用机制有关。乳蛋白能够在脂肪球表面形成黏弹性蛋白膜, 这种膜能够稳定搅打过程中产生的气泡, 从而对冰淇淋的膨胀率起到一定的促进作用[40], 随着乳蛋白含量的降低, 这种稳定的蛋白膜结构减少, 导致冰淇淋的膨胀率降低。

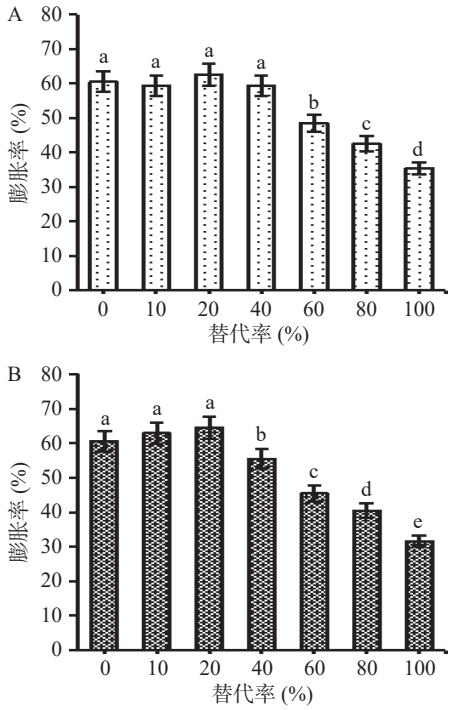


图 8　小球藻蛋白质对冰淇淋膨胀率的影响

Fig.8　Effect of *Chlorella* protein on ice cream expansion

注: A: CHPE; B: CPP72; 不同字母表示差异显著(P<0.05)。

2.2.5　融化率　测定小球藻蛋白质冰淇淋的融化率, 结果如图 9 所示。在较低的蛋白质替代率下, 小球藻蛋白质冰淇淋的融化速率与普通冰淇淋相似。普通冰淇淋在静置 10 min 后首次滴落, 且在 28 min 时完全融化。相比之下, 当 CHPE 的替代率为 10% 和 20% 时, 小球藻蛋白质冰淇淋的首次滴落时间分别为 8 min 和 10 min, 融化速率与普通冰淇淋相当。

随着蛋白质替代率的增加, 小球藻蛋白质冰淇淋的融化速率逐渐降低。当蛋白质替代率从 10% 增加到 100% 时, CHPE 冰淇淋的首次滴落时间从 8 min 延长至 20 min, 且完全融化所需的时间也显著

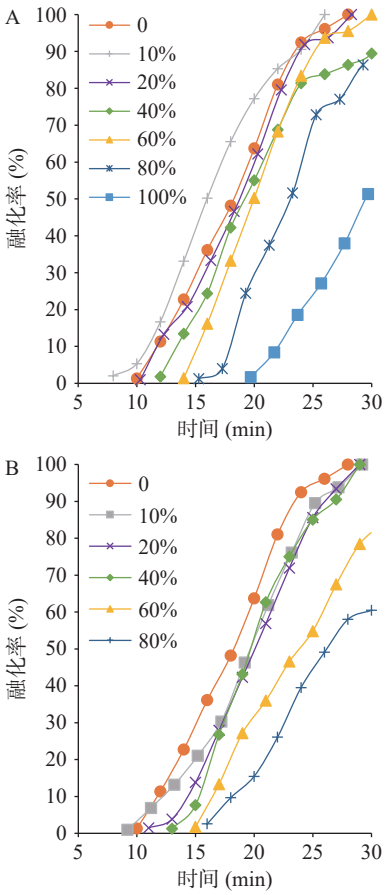


图 9　小球藻蛋白质对冰淇淋融化率的影响

Fig.9　Effect of *Chlorella* protein on the melting rate of its ice cream

注：A：CHPE；B：CPP72。

延长。特别地，当替代率达到 100% 时，冰淇淋的融化速率极为缓慢，在 30 min 内仍未完全融化。

此外，蛋白质纯度的提高也减缓了冰淇淋的融化速率。与 CHPE 冰淇淋相比，CPP72 冰淇淋的首次滴落时间和滴落速率更慢。当蛋白质替代率为 20% 时，CHPE 和 CPP72 冰淇淋的首次滴落时间分别出现在 10 min 和 11 min。这一现象可能归因于蛋白质含量的增加导致冰淇淋浆料的黏稠度显著提高[41]，从而显著降低了融化速度。

2.3　小球藻蛋白质作为冰淇淋中稳定剂和乳化剂替代品的潜力分析

2.3.1　感官特性　对小球藻蛋白质冰淇淋的感官特性进行了综合评定，包括色泽、气味、组织结构、滋味和质地等方面。结果如表 4 所示。当蛋白质替代率为 20% 且黄原胶和单甘酯添加量从 100% 降至 67% 时，感官评分为 93.1 分，与普通冰淇淋（90.5 分）无显著差异（$P>0.05$），表明小球藻蛋白在此条件下能有效维持品质。但当替代率升至 60% 时，即使保持 100% 添加量，评分显著降至 68.3 分（$P<0.05$），这主要源于高添加量积累的藻类风味物质（如叶绿素衍生物）产生青草味，而非蛋白功能缺陷。在完全不添加稳定剂时，20% 替代率样品评分仍达 85.5 分，证实小球藻蛋白具有替代潜力。因此，小球藻蛋白在 20% 替代率时完全适用于冰淇淋，但需控制添加量以避免风味劣化。

表 4　小球藻蛋白质冰淇淋感官评价得分

Table 4　Sensory evaluation score of *Chlorella* protein ice cream

样品	黄原胶和单甘酯添加量（%，g/100 g添加剂）			
	100	67	33	0
CPP72-20%	92.3±0.8^{a}	93.1±0.8^{a}	89.6±1.1^{b}	85.5±1.2^{c}
CPP72-60%	68.3±1.5^{a}	69.3±0.7^{a}	64.1±1.4^{b}	60.3±1.5^{c}

2.3.2　黏度　测定添加不同含量黄原胶和单甘酯的小球藻蛋白质混合液（老化液）的黏度，分析其对小球藻蛋白质冰淇淋黏度的影响，结果如图 10 所示。20% 和 60% 蛋白质替代率的冰淇淋老化液黏度均随着黄原胶和单甘酯添加量的减少而降低。黄原胶和单甘酯添加量从 100% 降至 0 时，蛋白质替代率为 20% 的冰淇淋老化液黏度从 7806 mPa·s 降低至 1695 mPa·s；蛋白质替代率为 60% 的冰淇淋老化液的黏度从 21847 mPa·s 降低至 2579 mPa·s。这可能是因为黄原胶能够通过其长链多糖的网状结构增强体系的黏度和稳定性，而单甘酯能够有效降低界面张力，促进脂肪和水相的均匀分散[42]。当这两种添加剂

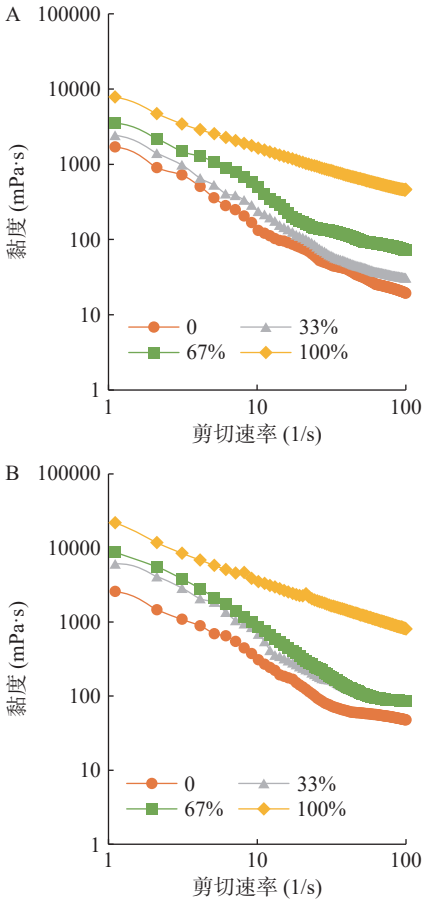


图 10　小球藻蛋白质冰淇淋的黏度

Fig.10　Viscosity of *Chlorella* protein ice cream

注：A：CPP72-20%；B：CPP72-60%。

的含量降低时，冰淇淋乳化体系的稳定性受到破坏，导致老化液的黏度显著下降。

2.3.3 硬度 测定添加不同含量黄原胶和单甘酯的小球藻蛋白质冰淇淋的硬度，结果如表 5 所示。黄原胶和单甘酯的添加量降低至原来的 67% 时，蛋白质替代率为 20% 和 60% 的冰淇淋硬度均与原来无显著性差异（P>0.05）。然而，随着黄原胶和单甘酯添加量的进一步减少，其硬度呈现出降低的趋势。黄原胶和单甘酯添加量从 100% 降至 0 时，蛋白质替代率为 20% 的冰淇淋硬度从 8.3 N 下降至 4.8 N，蛋白质替代率为 60% 的冰淇淋硬度从 10.2 N 下降至 6.4 N。这可能是因为黄原胶和单甘酯含量较多时，它们在油/水界面与蛋白质分子发生相互作用，导致蛋白质亲水性增加并从界面解吸，迫使弱吸附的蛋白质进入水相，从而降低脂肪球的空间稳定性使物质聚结，导致硬度较大。然而，单甘酯和黄原胶添加量的减小，使脱脂奶粉中的蛋白质和小球藻蛋白质在油/水界面形成物理屏障，导致乳液更加稳定，从而阻止脂肪滴的絮凝和聚结[43]，降低冰淇淋的硬度。

表 5 小球藻蛋白质冰淇淋的硬度（N）

Table 5 Hardness of *Chlorella* protein ice cream (N)

样品	黄原胶和单甘酯添加量（%, g/100 g添加剂）			
	100	67	33	0
CPP72-20%	8.3±0.2^{a}	7.8±0.3^{ab}	7.3±0.3^{b}	4.8±0.3^{c}
CPP72-60%	10.2±0.5^{a}	9.5±0.2^{a}	8.3±0.3^{b}	6.4±0.2^{c}

2.3.4 膨胀率 测定添加不同黄原胶和单甘酯含量冰淇淋的膨胀率，结果如图 11 所示。随着黄原胶和单甘酯添加量的降低，冰淇淋膨胀率呈现先升后降的趋势。蛋白质替代率为 20% 时，未添加黄原胶和单甘酯的冰淇淋的膨胀率仅为 51%，而黄原胶和单甘酯的添加量为 67% 时，冰淇淋膨胀率达到了最高值 69%。进一步分析发现，当蛋白质替代率为 60% 时，冰淇淋膨胀率在黄原胶和单甘酯添加量为 67% 时达到最高值 51%，而当添加量为 100% 时，膨胀率则降至最低值 45%。从机理上分析，随着黄原胶和单甘酯添加量的降低，冰淇淋中的气泡更容易扩散和膨胀，从而导致膨胀率升高；然而，当添加量过高时，冰淇淋中的气泡变得不稳定并容易聚集在一起[42]，这使得冰淇淋的膨胀率下降。

2.3.5 融化率 测定添加不同含量黄原胶和单甘酯冰淇淋的融化率，结果如图 12 所示。随着黄原胶和单甘酯添加量的降低，冰淇淋融化速率显著加快。蛋白质替代率为 20% 时，黄原胶和单甘酯的添加量从 100% 降至 0，冰淇淋的初始滴落时间从 11 min 提前至 5 min，完全滴落时间从 30 min 提前至 23 min。而当蛋白质替代率为 60% 时，黄原胶和单甘酯添加量从 100% 降至 0，冰淇淋的初始融化时间从 14 min 缩短至 7 min，但完全滴落所需的时间差异较小。这主要是因为随着稳定剂和乳化剂添加量的减少，冰淇淋体系的保水能力减弱，使冰淇淋质地变得松散且不稳定[44]，从而导致冰淇淋的融化速率加快。

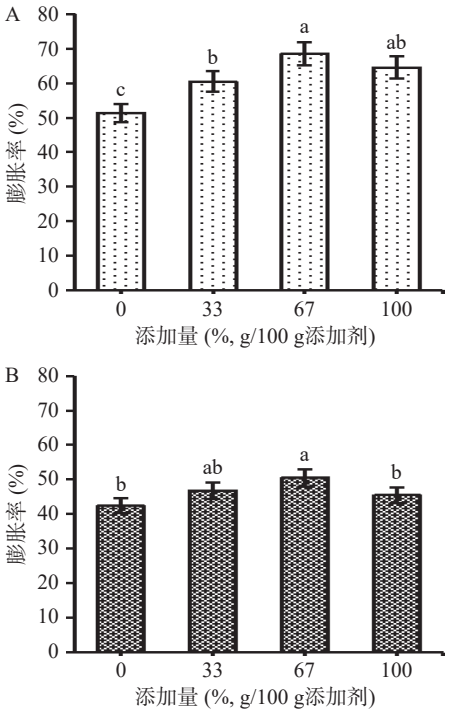


图 11 小球藻蛋白质冰淇淋的膨胀率

Fig.11 Expansion rate of *Chlorella* protein ice cream

注：A：CPP72-20%；B：CPP72-60%。

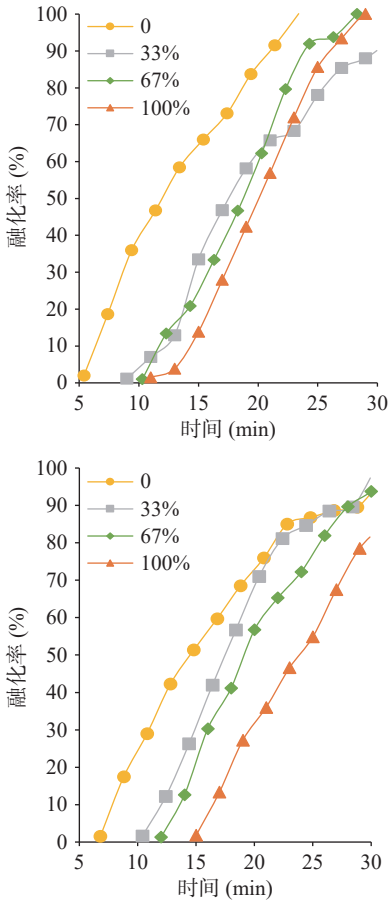


图 12 小球藻蛋白质冰淇淋融化率

Fig.12 Melting rate of *Chlorella* protein ice cream

注：A：CPP72-20%；B：CPP72-60%。

3　结论

小球藻蛋白质在起泡性、乳化性和流变性方面均显著优于乳清蛋白（$P<0.05$），其中 CPP72 表现最为出色，当蛋白质浓度为 4% 时，起泡性高达 76%，EAI 值在静置 10 min 后可达 64 m^2/g，初始黏度是乳清蛋白的 270 倍，且在 15 d 后的 CI 值接近 1，显示出优异的长期稳定性。在冰淇淋应用中，当小球藻蛋白的替代率为 20%，黄原胶和单甘酯的添加量可减少至 67% 且不对感官产生显著影响（$P>0.05$）。

本研究全面评估了小球藻蛋白质作为植物基蛋白替代乳清蛋白在冰淇淋中的应用潜力，为小球藻蛋白质的实际应用提供理论基础。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ 陈峰, 杨帅伶, 刘宾. 微藻蛋白质及其在食品中的应用研究进展[J]. 中国食品学报, 2022, 22(6): 21−32. ［CHEN Feng, YANG Shuailing, LIU Bin. Microalgal protein and research progress on application in foods[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(6): 21−32.］

［2］ 蔡易辉. 碎米水解液异养培养小球藻过程控制及其蛋白质富集机制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023. ［CAI Y H. Process control of heterotrophic cultivation of *Chlorella* in broken rice hydrolysate and mechanism of protein enrichment[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.］

［3］ 郭瑞雪, 杨友, 张诗雯, 等. 小球藻高价值活性物质研究现状及展望[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2020, 36(3): 54−60. ［GUO Ruixue, YANG You, ZHANG Shiwen, et al. Research status and prospect of high-value active substances from *Chlorella vulgaris*[J]. Journal of Hebei North University (Natural Science Edition), 2020, 36(3): 54−60.］

［4］ KUMAR R, HEGDE A S, SHARMA K, et al. Microalgae as a sustainable source of edible proteins and bioactive peptides–Current trends and future prospects[J]. Food Research International, 2022, 157: 111338.

［5］ LADJAL-ETTOUMI Y, DOUIK L H, HAMADI M, et al. Physicochemical and functional properties of *Spirulina* and *Chlorella* proteins obtained by iso-electric precipitation[J]. Food Biophysics, 2024, 19(2): 439−452.

［6］ 李曼, 刘立增, 刘爱国, 等. 蛋白质对冰淇淋品质影响及其在冰淇淋中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 416−426. ［LI Man, LIU Lizeng, LIU Aiguo, et al. Research progress on the influence of protein on ice cream quality and its application in ice cream[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 416−426.］

［7］ 李春强. 婴儿配方奶粉中乳清蛋白替代品的开发[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008. ［LI Chunqiang. Development of substitutes of whey protein in infant formula[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008.］

［8］ 罗永康, 沈小琴, 李朝慧. 牛乳蛋白过敏原改性的研究[J]. 中国乳品工业, 2005, 33(10): 4−8. ［LUO Yongkang, SHEN Xiaoqin, LI Zhaohui. Studies on modification of milk protein allergens[J]. China Dairy Industry, 2005, 33(10): 4−8.］

［9］ 胡勇刚, 邓静. 分子蒸馏单甘酯的分子结构对低脂冰淇淋质构的影响[J]. 食品工业科技, 2007, 28(11): 196−198,201. ［HU Yonggang, DENG Jing. Effect of interior-molecular structure of molecular distilled monoglyceride on qualitative and component of low-fat ice cream[J]. Science and Technology of Food Industry, 2007, 28(11): 196−198,201.］

［10］ 何强, 江波. 黄原胶和瓜尔豆胶的复配稳定剂对冰淇淋品质和流变性的影响[J]. 无锡轻工大学学报, 2004, 23(3): 46−50. ［HE Qiang, JIANG Bo. Influecce of xanthan gum and guar gum blends on the quality and rheological properties of ice cream[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2004, 23(3): 46−50.］

［11］ LYU Siwen, CHEN Meiru, WANG Ying, et al. Foaming properties of egg white proteins improved by enzymatic hydrolysis: The changes in structure and physicochemical properties[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 141: 108681.

［12］ GUO Jiaxin, CUI Lujie, HUANG Yizhou, et al. *Spirulina platensis* protein isolate nanoparticle stabilized O/W Pickering emulsions: Interfacial adsorption and bulk aggregation[J]. Food Research International, 2022, 161: 111815.

［13］ GROSSMANN L, HINRICHS J, GOFF H D, et al. Heat-induced gel formation of a protein-rich extract from the microalga *Chlorella sorokiniana*[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 56: 102176.

［14］ 侯团伟, 张虹, 毕艳兰, 等. 大豆粉取代奶粉对冰淇淋品质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(4): 219−223. ［HOU Tuanwei, ZHANG Hong, BI Yanlan, et al. Effect of soybean powder on the quality characteristics of ice cream[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(4): 219−223.］

［15］ BENELHADJ S, DOUIRI S, GHOUILLI A, et al. Extraction of *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) proteins via Osborne sequential procedure: Structural and functional characterizations[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 115: 104984.

［16］ AZIZ A, KHAN N M, ALI F, et al. Effect of protein and oil volume concentrations on emulsifying properties of acorn protein isolate[J]. Food Chemistry, 2020, 324: 126894.

［17］ 刘丽, 程建军, 石琳, 等. 大豆分离蛋白种类及取代量对冰淇淋品质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(9): 137−141,145. ［LIU Li, CHENG Jianjun, SHI Lin, et al. Effect of SPI on the quality characteristics of ice cream[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(9): 137−141,145.］

［18］ ROY S, HUSSAIN S A, PRASAD W G, et al. Quality attributes of high protein ice cream prepared by incorporation of whey protein isolate[J]. Applied Food Research, 2022, 2(1): 100029.

［19］ 姜雪. 软冰淇淋奶浆稳定性的研究[J]. 食品科技, 2019, 44(12): 61−65. ［JIANG Xue. Study on stability of soft ice cream milk slurry[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(12): 61−65.］

［20］ LOMOLINO G, ZANNONI S, ZABARA A, et al. Ice recrystallisation and melting in ice cream with different proteins levels and subjected to thermal fluctuation[J]. International Dairy Journal, 2020, 100: 104557.

［21］ MALDONADO-VALDERRAMA J, PATINO J M R. Interfacial rheology of protein-surfactant mixtures[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2010, 15(4): 271−282.

［22］ BUCHMANN L, BERTSCH P, BÖCKER L, et al. Adsorption kinetics and foaming properties of soluble microalgae fractions at the air/water interface[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105182.

［23］ DICKINSON E. Adsorbed protein layers at fluid interfaces:

Interactions, structure and surface rheology[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 1999, 15(2): 161−176.
[24] IMMONEN M, CHANDRAKUSUMA A, HOKKANEN S, et al. The effect of deamidation and lipids on the interfacial and foaming properties of ultrafiltered oat protein concentrates[J]. LWT, 2022, 169: 114016.
[25] FENG Yangyang, MA Xiaoli, KONG Baohua, et al. Ethanol induced changes in structural, morphological, and functional properties of whey proteins isolates: Influence of ethanol concentration[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106379.
[26] DICKINSON E. Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems[J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(1): 25−39.
[27] 胡坤, 赵谋明, 彭志英. 乳化剂和多糖对蛋白质乳浊液的稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(6): 61−65. [HU Kun, ZHAO Mouming, PENG Zhiying. Effects of surfactants and polysaccharides on protein-stabilized emulsions[J]. Food and Fermentation Industries, 2002, 28(6): 61−65.]
[28] 曾茂茂, 王霄, 陈洁. 蛋白质疏水性测定方法的相关性及适用性[J]. 食品科学, 2011, 32(15): 117−120. [ZENG Maomao, WANG Xiao, CHEN Jie. Correlation and applicability of different methods for determining protein hydrophobicity[J]. Food Science, 2011, 32(15): 117−120.]
[29] NICOUD L, LATTUADA M, YATES A, et al. Impact of aggregate formation on the viscosity of protein solutions[J]. Soft Matter, 2015, 11(27): 5513−5522.
[30] McCLEMENTS D J, GUMUS C E. Natural emulsifiers: Biosurfactants, phospholipids, biopolymers, and colloidal particles: Molecular and physicochemical basis of functional performance[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2016, 234: 3−26.
[31] LEERMAKERS F A M, ATKINSON P J, DICKINSON E, et al. Self-consistent-field modeling of adsorbed β-casein: Effects of pH and ionic strength on surface coverage and density profile[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1996, 178(2): 681−693.
[32] OZTURK B, MCCLEMENTS D J. Progress in natural emulsifiers for utilization in food emulsions[J]. Current Opinion in Food Science, 2016, 7: 1−6.
[33] LIU Shuli, GIFUNI I, MEAR H, et al. Recovery of soluble proteins from *Chlorella vulgaris* by bead-milling and microfiltration: Impact of the concentration and the physicochemical conditions during the cell disruption on the whole process[J]. Process Biochemistry, 2021, 108: 34−47.
[34] BARNETT G V, QI Wei, AMIN S, et al. Aggregate structure, morphology and the effect of aggregation mechanisms on viscosity at elevated protein concentrations[J]. Biophysical Chemistry, 2015, 207: 21−29.
[35] SHKOLNIKOV LOZOBER H, OKUN Z, SHPIGELMAN A. The impact of high-pressure homogenization on thermal gelation of *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) protein concentrate[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102857.
[36] LAJNAF R, PICART-PALMADE L, ATTIA H, et al. Foaming and air-water interfacial properties of camel milk proteins compared to bovine milk proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 126: 107470.
[37] YE Yalin, HUO Xingli, YIN Zongning. Protein-protein interactions at high concentrations: Effects of ArgHCl and NaCl on the stability, viscosity and aggregation mechanisms of protein solution[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2021, 601: 120535.
[38] NARALA V R, ORLOVS I, JUGBARDE M A, et al. Inulin as a fat replacer in pea protein vegan ice cream and its influence on textural properties and sensory attributes[J]. Applied Food Research, 2022, 2(1): 100066.
[39] 周娱. 蛋白溶液中粒子间相互作用及其在食品中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020. [ZHOU Yu. Study on the interactions between particles in protein solution and their applications in food[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2020.]
[40] LOI C C, EYRES G T, BIRCH E J. Effect of milk protein composition on physicochemical properties, creaming stability and volatile profile of a protein-stabilised oil-in-water emulsion[J]. Food Research International, 2019, 120: 83−91.
[41] MOSTAFAVI F S, TEHRANI M M, MOHEBBI M. Rheological and sensory properties of fat reduced *Vanilla* ice creams containing milk protein concentrate (MPC)[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2017, 11(2): 567−575.
[42] 孙梦雅, 刘珊, 顾文娟, 等. 不同类型稳定剂和乳化剂对冰淇淋品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 75−80. [SUN Mengya, LIU Shan, GU Wenjuan, et al. Effect of different types of stabilizers and emulsifiers on the quality and characteristics of ice cream[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 75−80.]
[43] CHEN Wenpu, LIANG Guijiang, LI Xiang, et al. Effects of soy proteins and hydrolysates on fat globule coalescence and meltdown properties of ice cream[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 279−286.
[44] BAHRAMPARVAR M, MAZAHERI TEHRANI M, RAZAVI S M A. Effects of a novel stabilizer blend and presence of κ-carrageenan on some properties of *Vanilla* ice cream during storage[J]. Food Bioscience, 2013, 3: 10−18.