DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251112006
引用格式: 赵梦瑶, 李巧玲, 张雁, 等. pH 对高能量密度全营养配方乳剂食品稳定性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(7): 190–201.
ZHAO MY, LI QL, ZHANG Y, *et al*. Effects of pH on the stability of high-energy density total nutrient formula emulsion foods [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(7): 190–201. (in Chinese with English abstract).

pH 对高能量密度全营养配方乳剂食品稳定性的影响

赵梦瑶[1,2], 李巧玲[2], 张　雁[1*], 赵志浩[1], 刘　光[1], 周鹏飞[1], 邓媛元[1], 刘明浩[3]

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广州　510610; 2. 河北科技大学食品与生物学院, 石家庄　050018; 3. 广东宝华农业科技股份有限公司, 韶关　512700)

摘　要: 目的　分析不同 pH 高能量密度全营养配方乳剂食品的理化性质、物理稳定性与流变学特性及其在贮藏过程中的变化规律, 并探讨 pH 对其品质稳定性的影响。**方法**　鉴于肠内营养制剂接近中性更符合人体肠胃耐受性, 分别制备 pH 为 6.90、7.00、7.10、7.20、7.30 且能量密度为 2.0 kcal/mL 的全营养配方乳剂食品, 以离心沉淀率、粒径及其分布、Zeta 电位、动力学不稳定性指数(turbiscan stability index, TSI)、流变学特性、色度、感官评分及电子舌信息为评价指标, 并结合短期贮藏测试, 研究 pH 对高能量密度全营养配方乳剂食品稳定性的影响。**结果**　在 pH 6.90~7.30 范围内, 乳剂的离心沉淀率、平均粒径先减小后增大, 在 pH 7.10 时最小, 各组乳剂粒径分布均呈单峰, 粒径范围为 0.1~5.0 μm; 乳剂的 Zeta 电位绝对值均处于 36~37 mV, 组间无显著差异(P>0.05); TSI 逐渐增大, 在 pH 6.90 时最小; 表观黏度逐渐减小, 各组均呈剪切稀化的假塑性流体特性; 乳剂色度 a^*、b^*逐渐增大, L^*、E^*逐渐减小; 感官评价和电子舌分析结果表明, pH 7.10 的乳剂评分最高、味感最好。在 28 d 的贮藏期内, 随贮藏时间延长, 粒径分布均向大粒径方向偏移, pH 6.90 和 pH 7.30 的乳剂在贮藏后期出现双峰; 微观形貌显示大颗粒片段逐渐增多。**结论**　pH 对高能量密度全营养配方乳剂食品的稳定性影响显著, pH 为 7.10 的乳剂具有较小的平均粒径、离心沉淀率和 TSI, 适中的黏度, 感官评分最高, 短期贮藏期间粒径分布变化较小, 体系均匀、稳定性较好。本研究可为提升高能量密度全营养配方乳剂食品的稳定性提供参考。

关键词: pH; 高能量密度; 全营养配方食品; 乳剂; 稳定性

收稿日期: 2025-11-12
基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2023B0202070002); 广东省科协青年科技人才培育计划项目(SKXRC2025479); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目(2024CXTD06)

第一作者: 赵梦瑶(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全及其控制技术。E-mail: 2028744646@qq.com
***通信作者:** 张雁(1967—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品生物化学与农产品加工。E-mail: zhang__yan_@126.com

Effects of pH on the stability of high-energy density total nutrient formula emulsion foods

ZHAO Meng-Yao[1,2], LI Qiao-Ling[2], ZHANG Yan[1*], ZHAO Zhi-Hao[1], LIU Guang[1], ZHOU Peng-Fei[1], DENG Yuan-Yuan[1], LIU Ming-Hao[3]

(1. *Sericultural & Agri-food Research Institute*, *Guangdong Academy of Agricultural Sciences*, *Key Laboratory of Functional Foods*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing*, *Guangzhou* 510610, *China*; 2. *College of Food Science and Biology*, *Hebei University of Science and Technology*, *Shijiazhuang* 050018, *China*; 3. *Guangdong Baohua Agricultural Technology Co*., *Ltd.*, *Shaoguan* 512700, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of pH on high-energy density total nutrient formula emulsion foods stability by analyzing the physicochemical properties, physical stability, rheological characteristics and changes during storage. **Methods** Based on near-neutral enteral nutritional preparations could better ensure human gastrointestinal tolerance, total nutrient formula emulsion foods with energy density of 2.0 kcal/mL in pH of 6.90, 7.00, 7.10, 7.20 and 7.30 were prepared respectively. The stability of emulsions were assessed in terms of such evaluation indexes as centrifugal sedimentation rate, particle size distribution, Zeta potential, turbiscan stability index (TSI), steady-shear rheological properties, chromaticity, sensory scores and electronic tongue information. Combined with short-term storage tests, the effects of pH on the stability of high-energy density total nutrient formula emulsion was studied. **Results** The results showed that in the pH range of 6.90–7.30, the centrifugal sedimentation rate and average particle size of the emulsions decreased initially and then increased, reaching a minimum respectively at pH 7.10. All particle size distributions appeared as a unimodal curve accompanied by particle size ranged from 0.1 to 5.0 μm. The absolute values of Zeta potential were between 36-37 mV with no significant difference among emulsion samples (P>0.05). The TSI was minimum at pH 6.90 and gradually increased with the increase of pH. Apparent viscosity decreased with the increase of pH, showing a shear-thinning pseudoplastic flow behavior. The chromaticity results showed that both a^* and b^* increased gradually, while L^* and E^* decreased gradually. Sensory evaluation and electronic tongue analysis showed that the emulsion at pH 7.10 had the highest score and the best taste. During the 28 day storage period, with the increase of storage time, the particle size distribution peak of all emulsions moved towards the larger particle size direction and double peaks appeared in the particle size distribution of the emulsions at pH 6.90 and pH 7.30. The microscopic morphology also indicated the large particle fragments increased gradually. **Conclusion** The stability of high-energy density total nutrient formula emulsion foods is significantly influenced by pH, emulsion at pH of 7.10 gets a small average particle size, low centrifugal sedimentation rate and TSI, as well as moderate viscosity, highest sensory score, little change in particle size distribution during short-term storage, making it a uniform system and keeping it good stability. This study provides a reference to improve the stability of high-energy density total nutrient formula emulsion foods.

KEY WORDS: pH; high-energy density; total nutrient formula food; emulsion; stability

0　引　言

全营养配方食品属于特医食品中的一类, 可作为单一营养来源满足进食受限、消化吸收障碍和代谢紊乱等特殊人群的膳食需要[1], 主要有粉剂和乳剂两种产品形态, 乳剂型特医食品是由水与宏量、微量营养素通过混合、均质和灭菌等工艺制备的水包油(oil in water, O/W)型乳化体系[2], 凭借其即食特性与稳定的营养供给受到消费市场青睐[3]。相较于能量密度为 0.9~1.2 kcal/mL 的传统特医乳剂食品[4], 高能量密度特医乳剂食品的能量密度不小于 1.5 kcal/mL[5], 可显著减少营养制剂的输注量与时间, 尤其适用于部分特定人群进食受限或液体摄入量需严格控制的情况, 同时还可节约运输与贮藏成本。目前, 国内特医食品市场同类产品以进口为主, 自主研发的高能量密度特医乳剂食品少见。

特医乳剂食品是一种热力学不稳定体系, 通过调节 pH 可增大液滴间静电斥力阻止液滴聚集[6], 还可改善蛋白质构象和界面特性、提高蛋白质溶解度与乳化性能, 因此提高其稳定性[7]。WU 等[8]将 O/W 型 Pickering 乳剂 pH 从 4.70 调至 7.00, 发现细菌纤维素固体颗粒的表面电荷密度从 0.34 mmol/g 提高到 1.16 mmol/g, 乳剂液滴间静电斥力

增加、稳定性提高; LI 等[9]发现在 pH 7.00~11.00 区间内随 pH 增加, 肌原纤维蛋白三级结构逐渐展开, 促使更多亲水与疏水基团暴露, 有效增强其溶解度及油-水界面吸附能力, 从而提升肌原纤维蛋白-大豆油乳剂的稳定性; CHAI 等[10]研究表明, 随 pH 升高, 糖基化肌原纤维蛋白乳剂的界面蛋白吸附量从 50.10%增大至 97.22%, 乳剂物理稳定性逐渐提高, 同时由于液滴界面膜厚度增加可进一步阻隔氧气、自由基及促氧化金属离子等与油滴接触, 增强了乳剂 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和 2,2-联氮-二(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)[2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS]阳离子自由基清除能力, 提高了氧化稳定性。刘媛等[11]和张楠等[2]研究表明, pH 为 7.00 的特医乳剂离心沉淀率最低、粒径最小、黏度适宜, 乳剂稳定性显著优于其他 pH 条件。已有的研究表明, 调节 pH 有助于提高乳剂体系稳定性, 不同乳剂体系的成分构成差异导致其最适 pH 不同。

相较于传统特医乳剂, 高能量密度全营养配方乳剂食品的宏量、微量营养素占比大幅提高, pH 对其稳定性的影响更加突出。目前, 特医乳剂食品的稳定性研究多集中于原料配方、加工工艺及贮藏条件优化, pH 对高能量密度全营养配方乳剂食品稳定性的研究报道较少。由于肠内营养制剂 pH 接近中性更符合人体胃肠道耐受性[12], 本研究以离心沉淀率、粒径分布、Zeta 电位、流变学特性、动力学不稳定性指数(turbiscan stability index, TSI)、感官评分、微观形貌为指标多维度综合分析 pH 6.90~7.30 对高能量密度全营养配方乳剂稳定性的影响, 并对贮藏过程中乳剂稳定性变化跟踪评价, 确定其适宜的 pH, 为提升高能量密度全营养配方乳剂食品的稳定性和国内自主产品研发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

茶油(广东宝华农业科技股份有限公司); 大豆油(新孚食品有限公司)。

酪蛋白酸钠、麦芽糊精、菊粉、复合维生素、焦磷酸铁、碳酸钙、葡萄糖酸锌、硫酸镁、氢氧化钠(食品级, 广州力衡临床营养品有限公司); 柠檬酸钠(食品级, 山东英轩实业股份有限公司); 氯化钾(食品级, 江苏科伦多食品配料有限公司); 山梨糖醇(食品级, 石家庄瑞雪制药有限公司); 抗性糊精(食品级, 健隆生物科技股份有限公司); 低聚果糖(食品级, 山东百龙创园生物科技股份有限公司); *D*-异抗坏血酸钠、琥珀酸单甘酯(食品级, 河南万邦化工科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

SQP 分析天平(精度 0.0001 g)、BSA4202S 分析天平(精度 0.01 g)(北京赛多利斯科学仪器有限公司); 12 Pro 高速迷你离心机(群安实验仪器有限公司); MILLI-Q 超纯水处理系统(法国 Millipore 公司); DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器(巩义市予华仪器有限责任公司); ZSE 马尔文电位分析仪(英国马尔文仪器有限公司); AH-BASICI 高压均质机(广州奥龙生物科技有限公司); FA25 pro 剪切均质机(上海弗鲁克科技发展有限公司); MSHOT-ML51-M 光学显微镜(广州市明美光电技术有限公司); Turbiscan Lab 稳定性分析仪(北京朗迪森科技有限公司); DH-1 流变仪(美国 TA 公司); Bettersize 2600 激光粒度仪(丹东百特仪器有限公司); Astree V5 II LS16 电子舌(法国 Alpha MOS 公司); LS-75HD 立式压力蒸汽灭菌器(江阴滨江医疗设备有限公司); CR-400/410 色彩色差计(日本柯尼卡美能达公司); FE20K pH 计(瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司)。

1.3 方 法

1.3.1 高能量密度全营养配方乳剂食品制备

乳剂基础配方及制备工艺参照课题组前期刘媛等[11]、栗程程等[13]相关研究: 高能量密度全营养配方乳剂食品的原辅料配方: 酪蛋白酸钠 40.0 g、茶油 40.0 g、大豆油 15.0 g、麦芽糊精 50.0 g、山梨糖醇 25.0 g、菊粉 14.0 g、低聚果糖 17.5 g、抗性糊精 10.0 g、复合维生素 600.0 mg、柠檬酸钠 300.0 mg、焦磷酸铁 8.5 mg、碳酸钙 560.0 mg、葡萄糖酸锌 4.0 mg、硫酸镁 185.0 mg、氯化钾 1110.0 mg、*D*-异抗坏血酸钠 0.3 mg、琥珀酸单甘酯 2.5 mg, 加水补足至 500 mL。

高能量密度全营养配方乳剂食品的制备工艺流程如图 1 所示。

操作要点: 按配方分别向一定量的超纯水中加入麦芽糊精、山梨糖醇、抗性糊精、菊粉、低聚果糖、酪蛋白酸钠、复合维生素、碳酸钙、硫酸镁、葡糖糖酸锌、焦磷酸铁、氯化钾、柠檬酸钠、*D*-异抗坏血酸钠, 并使上述配料充分溶解及分散均匀; 同时, 按照配方将乳化剂琥珀酸单甘酯溶于茶油和大豆油的混合油, 将上述水相和油相混合均匀后置于剪切均质机 8000 r/min 剪切均质 3~5 min, 随后经高压均质机于 40 MPa 高压均质 1 次。均质完成后, 先将 pH 计置于乳剂中实时监测并用 0.01 mol/L 氢氧化钠溶液精准调节 pH, 得到 pH 分别为 6.90、7.00、7.10、7.20、7.30 的各组乳剂, 再将乳剂分装于 50 mL 洁净玻璃瓶, 每瓶 40 mL。密封后置于灭菌锅 121 ℃灭菌 15 min, 得到高能量密度全营养配方乳剂食品, 静置冷却后进行各指标测定。

1.3.2 离心沉淀率测定

参照肖丹虹等[14]方法并进行一定修改。称取 2.00 g 样品于离心管中, 8000 r/min 下离心 10 min, 弃去上层清液, 称取离心管底部的沉淀物重量。按公式(1)计算离心沉淀率。

$$离心沉淀率/\%=\frac{W_3-W_1}{W_2-W_1}\times 100\% \quad (1)$$

式中: W_1 为离心管质量, g; W_2 为样品和离心管总质量, g; W_3 为离心后沉淀和离心管总质量, g。

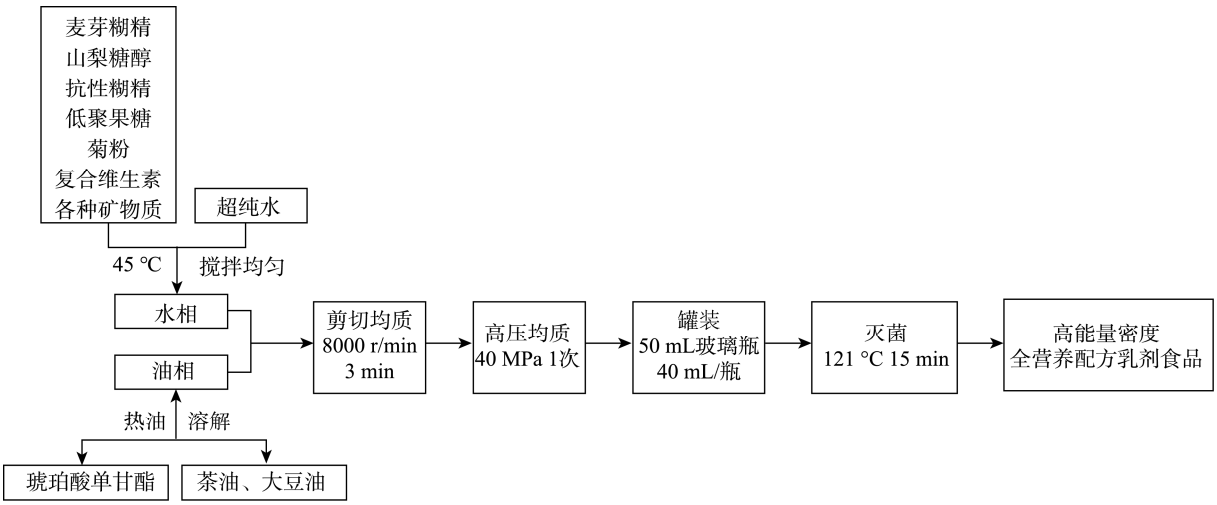


图 1　高能量密度全营养配方乳剂食品的制备工艺流程

Fig.1　Preparation process flow of high-energy density total nutrient formula emulsion foods

1.3.3　粒径及其分布测定

参照 WANG 等[15]的方法并进行一定修改。使用 Bettersize 2600 激光粒度仪的手动模式对乳剂体系的平均粒径及分布进行测定。用胶头滴管将样品缓慢滴加于进样口, 当折光率稳定在 8.00%±2.00%时, 开始检测分析。设置折射率为 1.57, 吸收率为 0.001, 分散剂为去离子水, 折射率为 1.33, 循环速度 1200 r/min, 超声时间 30 s。

1.3.4　Zeta 电位测定

参考 HANG 等[16]的方法, 使用 ZSE 马尔文电位分析仪对乳剂的 Zeta 电位进行分析。准确移取 10.0 μL 乳剂用超纯水稀释 800 倍, 润洗电位测试专用比色皿后加入 0.80 mL 样液, 放入电位槽进行测定。测试参数: 样品折射率为 1.471, 分散剂折射率为 1.330, 平衡时间为 120 s, 测定温度为 25 ℃。

1.3.5　动力学不稳定性测定

参照 LIN 等[17]的方法, 采用 Turbiscan Lab 稳定性分析仪测量 TSI。设置仪器温度为 30 ℃, 取约 3 mL 样品于 4 mL 圆柱形透明玻璃瓶中扫描。具体测定参数如下: 近红外光(880 nm)从乳液底部向上部扫描, 仪器温度为 30 ℃, 每隔 5 min 扫描 1 次, 持续 6 h, 根据仪器自带的软件 TowerSoft-2.3.1.125 计算出体系的 TSI。

1.3.6　流变学特性测定

参照 YANG 等[18]的方法, 使用流变仪对乳剂流变学特性进行表征。准确移取 1.40 mL 乳剂于流变仪样品台上, 使用直径 40 mm 的夹具进行测定, 具体测定参数如下: 测量温度(25±1) ℃, 板间距 1 mm, 剪切速率由 0.1 s^{-1} 升至 100.0 s^{-1}。

1.3.7　色度测定

参考侯嘉淼等[19]的方法并进行适当修改, 色差仪开机后进行零位校准和白板矫正, 将乳剂倒入 25 mL 烧杯中, 用校正后的色差仪测定乳剂样品的 L^*、a^*和 b^*。L^*为亮度值; a^*为绿色/红色值, 正值表示红色; b^*为蓝色/黄色值, 正值表示黄色; 按公式(2)计算样品总色度 E^*。

$$E^*=\sqrt{(L^*)^2+(a^*)^2+(b^*)^2} \tag{2}$$

式中: E^*为乳剂体系的总色度值。

1.3.8　感官评价

参照 YU 等[20]的方法制定感官评分标准。感官评价方法和评分标准如表 1 所示。将乳剂随机编码后由 10 位感官评价员(5 名健康男性, 5 名健康女性, 年龄在 22~26 岁之间)依据感官评分表进行打分, 每次评价前使用纯净水漱口, 以消除前一个样品的影响。结果以平均值±标准偏差表示。

表 1　感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria

感官指标	评分标准	分值
组织状态(25 分)	组织均匀, 流动性好, 无脂肪上浮, 无分层, 无沉淀	16~25
	组织均匀, 流动性较差, 少量脂肪上浮现象, 无沉淀	6~15
	组织较均匀, 流动性较差, 有分层和少量沉淀	0~5
色泽(25 分)	呈均一的乳白色或微偏黄, 光泽好	16~25
	色泽均匀, 黄色, 略有光泽	6~15
	色泽不均匀, 黄褐色, 无光泽	0~5
气味(25 分)	乳香味浓厚, 无任何异味	16~25
	乳香味稍淡, 无明显异味	6~15
	出现明显异味, 无法接受	0~5
口感(25 分)	口感细腻爽滑, 无涩味	16~25
	无明显涩味, 口味一般, 略有粗糙	6~15
	粗糙有涩味, 口感单薄	0~5

1.3.9 电子舌分析

参照付燕梦等[21]的方法并进行一定修改。采用 Astree V5 II LS16 电子舌仪器进行测定，根据本研究样品特点，选择甜味、鲜味、咸味、酸味、苦味共 5 种味觉信息进行分析。

1.3.10 微观形貌观察

使用光学显微镜观察微观形貌。取 5 μL 乳剂滴在载玻片中心，缓慢盖上盖玻片，防止产生气泡，在 40×物镜、10×目镜下观察。

1.3.11 贮藏稳定性

将乳剂在室温下贮藏 28 d，分别在第 0、7、14、21、28 d 测定其粒径分布、微观形貌并拍照，以表征在贮藏过程中的物理稳定性。测定方法同 1.3.3 和 1.3.10。

1.4 数据处理

所有实验重复 3 次，结果以平均值±标准偏差表示，采用 SPSS 27.0.1 分析软件进行统计分析，使用单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA)、Duncan's 多重比较检验进行显著性分析，$P<0.05$，表明差异显著，$P<0.01$，表明差异极显著；使用 Origin 2021 软件进行数据作图。

2 结果与分析

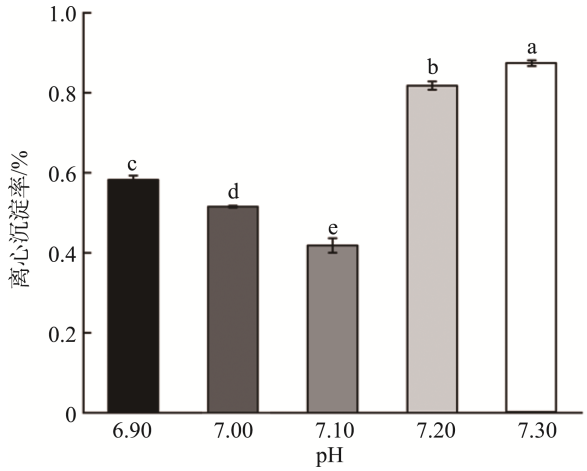
由于弱酸性或中性全营养配方乳剂食品更适宜人体服用，因此本研究探讨 6.90~7.30 的 pH 对高能量密度全营养配方乳剂食品稳定性的影响。

2.1 pH 对高能量密度全营养配方乳剂离心沉淀率的影响结果

离心沉淀率与乳剂稳定性呈负相关，是评价乳剂物理稳定性最直观的指标[22]。图 2 为不同 pH 高能量密度全营养配方乳剂的离心沉淀率。pH 在 6.90~7.30 范围内，乳剂离心沉淀率呈先减小后增大的趋势，当 pH≥7.20 时，离心沉淀率均超过了 0.8%，显著大于 pH 6.90、7.00、7.10 的乳剂样品($P<0.05$)。pH 7.10 条件下的乳剂离心沉淀率最小，表明该条件下乳剂液滴聚结速度最慢，乳剂体系稳定性最好。

2.2 pH 对高能量密度全营养配方乳剂粒径及其分布的影响结果

粒径分布表明了乳剂中 O/W 液滴及不溶性颗粒的分散或聚集情况[23]，大粒径液滴及颗粒越多，越容易出现分层及沉降等不稳定现象[24]，粒径及其分布是评价乳剂稳定性的重要指标。如图 3A 所示，在 pH 6.90~7.30 区间，各组乳剂均为单峰分布，粒径集中在 0.1~5.0 μm 范围，以 O/W 液滴为主；同时各组乳剂粒径分布均在右侧出现拖尾，这可能与体系中存在少量不溶性大颗粒片段有关。一方面，在高能量密度全营养配方乳剂食品中，蛋白质浓度较高，可能存在少量未能充分溶解、展开的蛋白质聚集体[17]，同时，在灭菌过程中，剧烈的热处理会诱导蛋白质变性，进一步加剧蛋白的无序聚集与絮凝[12]；此外，配方中的钙、镁等矿物质离子可能与蛋白质形成不溶性微晶或复合物，从而导致出现粒径分布拖尾现象[25]。另一方面，美拉德反应会生成大分子不溶性产物，其产物与 O/W 液滴共存于体系中，从而在粒径分布图右侧形成拖尾。由图 3B 液滴及颗粒粒径占比可知，各组乳剂粒径 2.0~5.0 μm 占比先减小后增大，pH 7.10 时大粒径占比最低，表明乳剂中不溶性大颗粒最少，乳剂稳定性最好。图 3C 表明乳剂平均粒径呈先减小后增大的趋势，pH 为 7.00 和 7.10 时粒径最小且无显著性差异($P>0.05$)。值得一提的是，图 3C 平均粒径的结果与前述图 2 离心沉淀率的结果呈现一致性，基于重力作用的影响，相较于平均粒径较大及大颗粒含量较多的乳剂样品，乳剂平均粒径越小、大颗粒含量越少，其离心沉淀率也越小，且均在 pH 7.10 时最小。



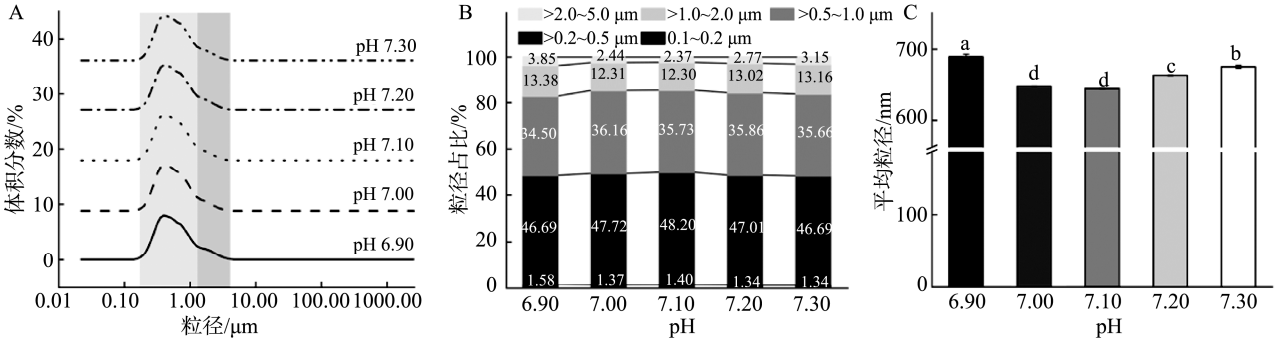
注：不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)，图 3~6 同。

图 2 pH 对高能量密度全营养配方乳剂离心沉淀率的影响

Fig.2 Effects of pH on the centrifugal sedimentation rates of high-energy density total nutrient formula emulsions

2.3 pH 对高能量密度全营养配方乳剂 Zeta 电位的影响结果

Zeta 电位表征乳剂分散液滴表面的电荷量，可评估静电斥力维持乳剂稳定性的效果[26]，Zeta 电位绝对值越高，分散液滴间静电斥力越大，有利于提高乳剂稳定性。一般认为 Zeta 电位绝对值大于 30 mV 时，分散液滴之间的静电斥力能阻止液滴聚集、形成稳定性好的乳剂[17]。图 4 中不同 pH 高能量密度全营养配方乳剂的 Zeta 电位均为负值，说明乳剂的分散液滴均带负电荷，这归因于液滴界面组成和分散相 pH，高能量密度全营养配方乳剂食品中的酪蛋白酸钠不仅是蛋白质营养素，同时也作为乳化剂吸附至油-水界面形成致密界面膜[27]，且乳剂分散相 pH 6.90~7.30 大于酪蛋白酸钠的等电点(isoelectric point, pI) 4.6~5.2，导致酪蛋白酸钠中谷氨酸、天冬氨酸的羧基以及磷酸化的丝氨酸等基团发生去质子化，使酪蛋白酸钠界面膜带负电荷。



注: A. 粒径分布; B. 粒径占比; C. 平均粒径。

图 3　pH 对高能量密度全营养配方乳剂粒径分布的影响

Fig.3　Effects of pH on the particle size distribution of high-energy density total nutrient formula emulsions

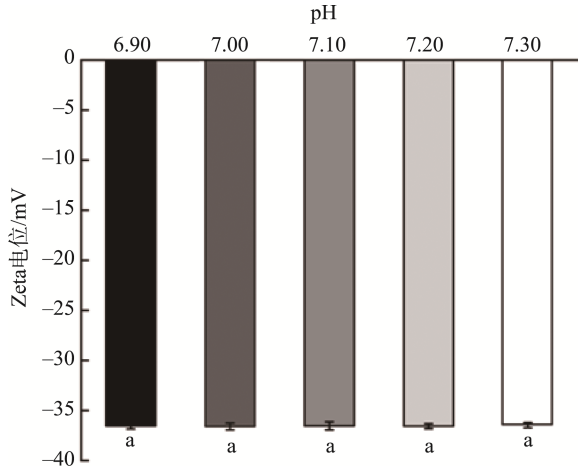


图 4　pH 对高能量密度全营养配方乳剂 Zeta 电位的影响

Fig.4　Effects of pH on the Zeta potential of high-energy density total nutrient formula emulsions

各组乳剂 Zeta 电位无显著差异(P>0.05)，绝对值处于 36~37 mV，表明 pH 在 6.90~7.30 区间变化对 Zeta 电位无显著影响，同时该 pH 范围内分散液滴间的静电斥力有利于乳剂体系的稳定。

2.4　pH 对高能量密度全营养配方乳剂流变学特性的影响结果

流变学特性反应了乳剂受外力作用后发生的形变或流动，可从表观黏度、模量等参数的变化中反映乳剂液滴内部结构和稳定性变化[28]。根据 Stokes 定律[24]，乳剂液滴的沉降速度与连续相黏度呈反比，黏度增加使液滴在连续相中运动所受阻力增加，不易发生分层、絮凝和聚集，稳定性增加。

不同 pH 高能量密度全营养配方乳剂的流变学特性结果见图 5A。各组乳剂黏度均随剪切速率的增加而减小，直至稳定，是典型的剪切稀化现象，表明乳剂均为假塑性流体。这是在剪切力作用下，乳剂液滴中多组分交联结构被破坏的速度大于结构重建的速度，乳剂液滴从无序转为定向排列，液滴间定向阻力减小，导致黏度下降；随剪切时间及速率增加，黏度变化趋于稳定。这与栗程程等[24]、李红娟等[29]、LI 等[30]的研究表明 O/W 型乳液呈现假塑性流体特性结果相一致。

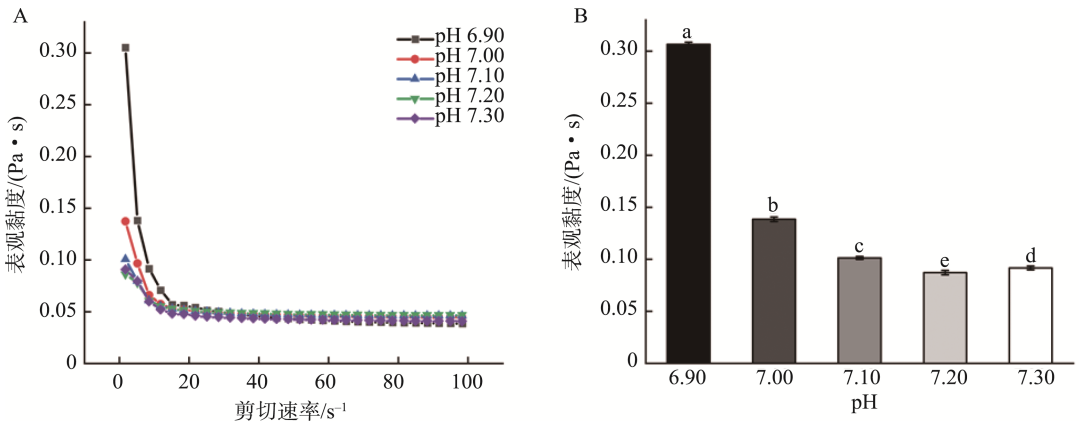
初始表观黏度如图 5B 所示，在 pH 6.90~7.30 范围内，乳剂表观黏度总体呈下降趋势，pH 7.20 时黏度最小，pH 7.30 时黏度有所升高但仍显著低于 pH 6.90 乳剂(P<0.05)。这可能是 pH 6.90 条件下，乳剂中高浓度钙离子与带负电的酪蛋白酸钠通过“钙桥”交联作用形成凝胶网络结构，导致体系黏度显著上升[31]；随 pH 升高至中性及弱碱性范围，钙离子逐渐转化为碳酸钙，使体系钙离子浓度降低，“钙桥”交联作用被削弱，导致黏度大幅度降低[32]。其中，pH 7.30 乳剂黏度出现小幅度回升，这可能是由于 pH 7.30 可促进美拉德反应进入末期，生成的类黑精高分子聚合物与蛋白质、碳水化合物及矿物质离子形成三维网络结构提高了乳剂体系的黏度[33]。

结合前述的离心沉淀率结果，黏度最大的 pH 6.90 乳剂离心沉淀率显著低于黏度较低的 pH 7.30 乳剂(P<0.05)，表明高黏度可一定程度抵抗离心力造成的液滴聚集，降低离心沉淀率。

值得一提的是，尽管黏度增加有利于乳剂体系稳定，但乳剂流动性降低，不利于临床管饲使用，可根据应用场景，确定适宜的 pH。图 5 结果表明，pH 7.10~7.30 乳剂表观黏度处于 0.01~0.10 Pa·s，不仅可维持一定黏度以提高乳剂稳定性，而且具有较好流动性。

2.5　pH 对高能量密度全营养配方乳剂动力学不稳定性的影响结果

TSI 由多次扫描乳剂油滴、颗粒运动迁移后收集光强偏差计算得到，是表征乳化体系不稳定性的重要指标[34]，TSI 与乳剂稳定性呈负相关，低 TSI 表示发生相分离可能性较小，乳剂稳定性更好。图 6A 结果表明，随扫描时间延长，pH≤7.20 的乳剂 TSI 均呈先增大后稳定的趋势，表明乳剂稳定性较好; pH 为 7.30 的乳剂在整个扫描时间内 TSI 值一直增加且增长速率明显大于其他组乳剂，表明该乳剂在放置过程中液滴一直处于运动状态，抵抗不稳定因素的能力较弱，乳剂稳定性降低。



注: A. 表观黏度; B. 初始表观黏度。

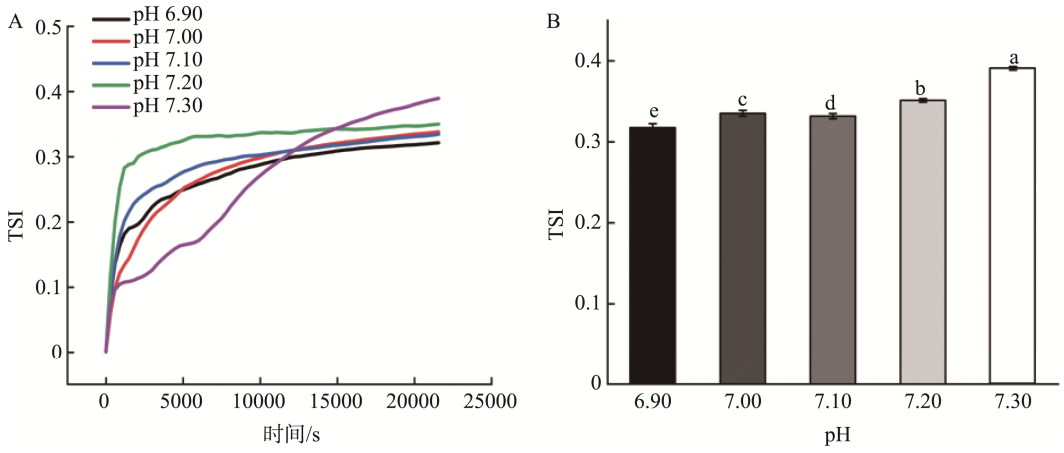
图 5 pH 对高能量密度全营养配方乳剂流变学特性的影响

Fig.5 Effects of pH on the rheological properties of high-energy density total nutrient formula emulsions

图 6B 结果表明, 近红外扫描测试终止时, 在 pH 6.90~7.30 范围内, 乳剂 TSI 总体呈上升趋势, 结合前述平均粒径和表观黏度的研究结果进行分析, 不同 pH 对 TSI 值影响的机制并不相同。根据 Stokes 定律, 液滴运动速度与其直径平方成正比, 与黏度成反比[27]。乳剂液滴粒径越小、黏度越大, 乳剂稳定性越好, 前述平均粒径和表观黏度结果表明, 当pH≤7.10时, 随pH增大, 乳剂平均粒径和表观黏度均减小, 其中表观黏度呈现极显著下降趋势(P<0.05), 此时 TSI 显著上升的原因可能是粒径减小导致的乳剂稳定性增加弱于黏度大幅度减小产生的乳剂稳定性降低, 动力学稳定性降低; 当 pH 从 7.20 增加至 7.30, 乳剂平均粒径和表观黏度均增大, 大粒径液滴显著增多, 此时 TSI 显著增加则可能是由于液滴运动引起的乳剂不稳定性强于黏度增加对乳剂稳定的维持作用, 降低了 pH 7.20 及以上 pH 乳剂动力学稳定性。

2.6 pH 对高能量密度全营养配方乳剂色度的影响结果

乳剂色度是影响感官特性的重要指标, 颜色较浅的乳剂更易被消费者接受。由表 2 可知, 在 pH 6.90~7.30 范围内, 随 pH 升高, 乳剂 a^*、b^*均为正值且逐渐增大, 表明乳剂均呈红、黄色泽且颜色越来越深; L^*逐渐降低, 表明乳剂亮度越来越暗。为综合评价乳剂色度, 采用 E^*进行表征, 其值越高, 表明乳剂的外观接受度越好[11]。由表 2 可知, E^*随 pH 增大呈降低趋势, 这可能与pH升高可促进美拉德反应进程有关, 使其从中期生成的还原酮、席夫碱等黄色产物转变为棕褐色终产物类黑精, 使乳剂颜色加深、亮度降低[35], 但总体降低幅度较小, 其中 pH 7.00 与 pH 7.10 组间无显著差异(P>0.05)。色度研究结果表明, 在 pH 6.90~7.30 区间, 较低的 pH 更有利于保持乳剂较浅的色泽、提升乳剂亮度。



注: A. 扫描期间 TSI; B. 扫描终点 TSI。

图 6 pH 对高能量密度全营养配方乳剂 TSI 的影响

Fig.6 Effects of pH on TSI of high-energy density total nutrient formula emulsions

表 2　pH 对高能量密度全营养配方乳剂色度的影响
Table 2　Effects of pH on chromaticity of high-energy density total nutrient formula emulsions

pH	L^*	a^*	b^*	E^*
6.90	61.89±0.02^a	12.04±0.04^d	19.18±0.14^d	65.90±0.03^a
7.00	58.94±0.00^b	12.12±0.01^c	19.46±0.08^c	63.24±0.03^b
7.10	58.73±0.21^b	12.73±0.00^b	19.65±0.01^c	63.22±0.19^b
7.20	56.60±0.11^c	12.79±0.07^b	20.00±0.04^b	61.38±0.11^c
7.30	55.78±0.07^d	13.39±0.02^a	20.26±0.01^a	60.83±0.06^d

注: 同一列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，表 3 同。

2.7　pH 对高能量密度全营养配方乳剂感官特性的影响结果

感官评价可反映消费者对产品的接受程度[36]。不同 pH 高能量密度全营养配方乳剂的感官评分如表 3 所示。在 4 个感官评价指标中，pH 对乳剂组织状态、色泽和口感评分影响显著，气味评分接近，无显著差异(P>0.05)。随 pH 增加，乳剂组织状态评分总体增加，pH 7.20 与 7.30 评分略有下降但与 pH 7.10 无显著差异(P>0.05)，pH 7.10~7.30 的乳剂组织状态评分显著高于 pH 6.90 (P<0.05)，可能与乳剂黏度下降、流动性增加有关；色泽评分逐渐下降，与上述 2.6 色度 E^*随 pH 增加而减小的结果相一致；口感评分先增大后减小。综合乳剂的组织状态、色泽、气味和口感评分，pH 为 7.10 的乳剂感官总评分最高，为 80.25。

电子舌系统通过传感器模仿人类味觉，相较于传统的感官评价法具有更加客观、快速和准确的特点[37]。图 7 为不同 pH 高能量密度全营养配方乳剂的电子舌信息雷达图，各组乳剂的滋味轮廓基本相似，在咸味、苦味和甜味响应值上差异较大。随乳剂 pH 增大，直接导致酸味响应值呈下降趋势；甜味响应值逐渐增大，可能与美拉德反应加剧生成了更多还原酮、麦芽酚等特征性甜味物质有关[38]；同时美拉德反应过度也会导致杂环胺类、吡嗪类及醛类等苦味物质增多[39]，以及因蛋白质降解或矿物质状态改变而产生的咸味物质开始呈浓度依赖性累积，使苦味和咸味响应值也增大[24]。

表 3　pH 对高能量密度全营养配方乳剂感官评分的影响
Table 3　Effects of pH on sensory score of high-energy density total nutrient formula emulsions

pH	组织状态/分	色泽/分	气味/分	口感/分	总分/分
6.90	12.50±1.29^c	20.00±0.82^a	22.75±0.96^a	13.00±0.82^c	68.25±3.40^c
7.00	16.25±0.96^b	16.75±1.26^b	22.00±1.63^a	15.50±0.58^b	70.50±2.65^c
7.10	21.00±0.82^a	15.50±0.58^b	22.00±1.41^a	21.75±0.96^a	80.25±2.22^a
7.20	19.75±0.96^a	12.75±0.96^c	22.00±0.82^a	20.50±1.29^a	75.00±2.94^b
7.30	19.25±1.26^a	11.50±1.00^c	22.00±0.82^a	16.00±0.82^b	68.75±2.99^c

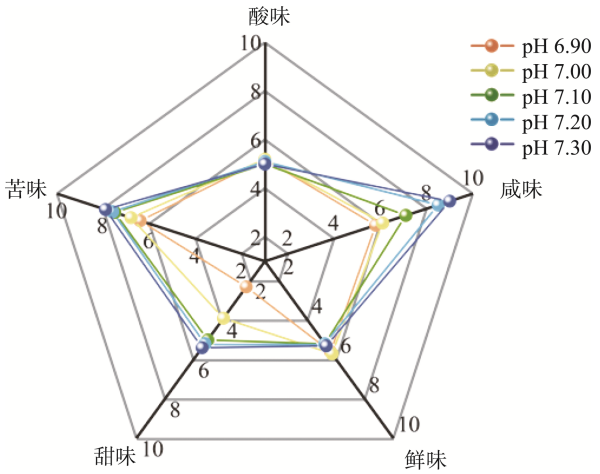


图 7　不同 pH 高能量密度全营养配方乳剂的电子舌信息雷达图
Fig.7　Electronic tongue information radar map of high-energy density total nutrient formula emulsions with different pH

结合感官评分和电子舌分析结果，pH 7.10 的乳剂在表 3 中表现出最高的口感评分，这可能由于 pH≤7.10 时，美拉德反应生成的甜味物质增多，有效平衡了同步微增的苦、咸味，从而提升了口感的接受度；当 pH 进一步升高时，美拉德反应加剧使苦味与咸味物质呈浓度依赖性累积，其响应值明显大于甜味响应值，导致整体滋味协调性被破坏、口感评分下降。整体上，pH 7.10 的乳剂表现出甜味适中、低酸低苦、滋味丰富的特点，电子舌分析与感官评价结果一致。

2.8　不同 pH 高能量密度全营养配方乳剂的贮藏稳定性结果

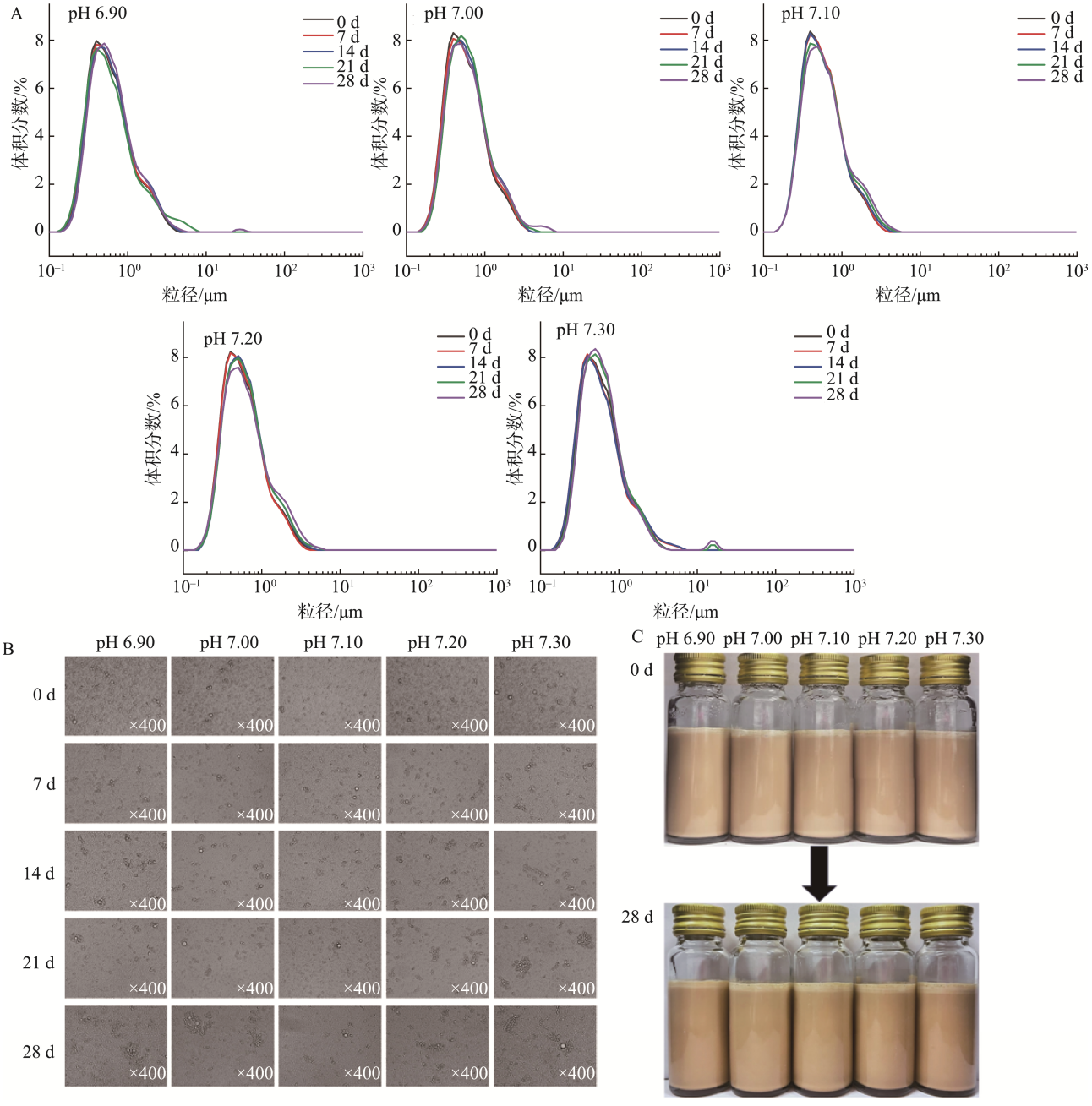
高能量密度全营养配方乳剂食品作为营养成分复杂的热力学不稳定体系，在贮藏期间易发生蛋白质絮凝、脂肪上浮、矿物质沉淀和货架期凝胶化等物理不稳定现象[40]。粒径分布、乳剂微观与表观形貌变化可反映乳剂贮藏过程中的稳定状态。

图 8A 表示不同 pH 高能量密度全营养配方乳剂在 0~28 d 贮藏过程中粒径分布的变化情况。可以看出 pH 6.90 乳剂在贮藏 21 d 时于主峰右侧出现明显拖尾，贮藏 28 d 时出现小峰；pH 7.00 乳剂在贮藏前期粒径分布峰型变化不大，在贮藏 28 d 时主峰发生轻微右移并于右侧出现明显拖尾；pH 7.10 和 7.20 的乳剂在整个贮藏期间粒径分布出现右移但仍保持单峰形态；pH 7.30 乳剂在贮藏 21 d 后于主峰右侧出现小峰，且贮藏 28 d 时小峰峰值进一步增大；其中 pH 7.30 乳剂的粒径分布变化最明显。贮藏期间粒径分布变化一方面可能是发生奥斯特瓦尔德熟化现象[41]，促使小液滴转变成大液滴导致大粒径液滴增多，因此各组乳剂粒径分布整体右移；另一方面，随贮藏时间增加，弱酸性环境下

酪蛋白酸钠溶解度降低可形成不溶性颗粒，碱性环境促进美拉德反应发生、产物增多，形成的非水溶性物质粒径大于 O/W 液滴，使粒径分布于主峰右侧出现拖尾，当不溶性颗粒进一步增多且粒径分布相对集中时，于主峰右侧形成小峰。综上，pH 7.10~7.20 的乳剂在贮藏期内粒径分布保持稳定单峰可能是由于未发生蛋白质聚集且美拉德反应程度较弱，新增大粒径颗粒较少，使得粒径分布变化较小，因此提高了贮藏稳定性。

图 8B 表示短期贮藏期间高能量密度全营养配方乳剂微观形貌的变化。随贮藏时间延长，所有乳剂在视野中的大粒径液滴增多，pH 6.90 和 pH 7.30 的乳剂还出现明显的液滴聚集情况；在同一贮藏时间点，pH 7.10 乳剂微观形貌中大液滴及液滴聚集现象明显少于其他组乳剂。总体来看，pH 7.10 的乳剂体系均匀，视野中大粒径液滴及聚集较少，与贮藏期间粒径分布变化反映的稳定性基本一致。

图 8C 为贮藏期间高能量密度全营养配方乳剂表观形



注：A. 粒径分布；B. 微观形貌；C. 表观形貌。

图 8 高能量密度全营养配方乳剂短期贮藏稳定性

Fig.8 Short-term storage stability of high-energy density total nutrient formula emulsions

貌的变化, 随 pH 增大, 乳剂颜色逐渐加深, 与上述色度和感官评价结果一致; 贮藏 28 d 后乳剂颜色进一步加深, 这是由于碱性条件促进美拉德反应进程以及在贮藏期间还原酮、席夫碱、类黑精等美拉德反应产物的积累所致[24]。贮藏 28 d 后, 各组乳剂无肉眼可见沉淀, 但均在顶部出现“奶油化”乳析现象, 这可能与贮藏过程中发生了奥斯特瓦尔德熟化以及乳剂液滴迁移有关[41]。根据 Stokes 定律[17], 液滴迁移的速度取决于液滴大小、连续相和分散相之间的密度差及黏度, 由于乳剂为 O/W 型, 且油相密度低于水相, 贮藏期间发生奥斯特瓦尔德熟化使液滴粒径增大[41], 使液滴上浮速度加快, 进一步在顶部聚集, 即出现“奶油化”现象。从图 8C 还可看出, pH 6.90 的乳剂样品贮藏后“奶油”层厚度较其他样品略小, 结合前述 2.4 表观黏度结果, 可能由于 pH 6.90 样品表观黏度显著高于其他样品(P<0.05), 延缓了液滴向上迁移进程。贮藏 28 d 后观察各组乳剂表观形貌, 除了出现轻微乳析现象, 整体状态比较稳定。

3　讨　论

pH 对全营养配方乳剂食品稳定性的影响机制与体系营养素组成及组分间相互作用密切相关, 相较于 0.9~1.2 kcal/mL 普通能量密度乳剂, 1.5~2.0 kcal/mL 高能量密度乳剂宏量营养素和微量营养素浓度大幅度提高、水相比例相应降低, 导致体系界面化学环境更为复杂, 对 pH 的敏感度显著增强, 因此, 为提升高能量密度全营养配方乳剂食品的稳定性, 对 pH 调控精密度的要求更高。

3.1　蛋白质组分对高能量密度全营养配方乳剂稳定性的影响

高能量密度全营养配方乳剂中蛋白质含量达到了 7.00%~9.00%, 是普通能量密度乳剂的 1.5~2.0 倍, 基于蛋白质特有的溶解、乳化、聚集等特性, 在加工和贮藏过程中对乳剂稳定性可产生显著影响。本研究表明, pH 7.10~7.20 乳剂稳定性较好, 此 pH 条件下, 蛋白质溶解度显著高于 pH 7.00 以下的酸性条件, 乳剂蛋白质组分酪蛋白酸钠构象充分展开, 使亲水、疏水基团充分暴露[42], 可快速吸附至油-水界面以降低界面张力, 产生良好的乳化作用, 是导致乳剂液滴粒径减小、分布均一, 离心沉淀率与 TSI 降低, 稳定性增强的主要原因。MA 等[43]将大豆分离蛋白-大豆油乳剂的 pH 从 5.00 调至 9.00, 可引起大豆分离蛋白三级结构解聚并暴露更多疏水性氨基酸残基, 从而增强其在油水界面的吸附能力、降低界面张力, 最终改善乳化特性; 同时二级结构中 α-螺旋含量增加、β-折叠和无规卷曲含量降低, 增强了蛋白与水相的氢键作用, 进而提高了大豆分离蛋白的溶解度。LIU 等[44]发现罗非鱼分离蛋白-玉米油乳剂 pH 从 6.00 增加至 8.00 时, 罗非鱼分离蛋白解离、展开和重排, α-螺旋增至 25.74%, 提供更多水合位点, 同时暴露更多疏水基团和游离巯基, 提高了蛋白质的溶解度和乳化性能, 最终导致乳剂稳定性的提高。这也是本研究中 pH 7.10~7.20 的乳剂稳定性优于 pH 6.90~7.00 乳剂的主要原因之一。

一方面蛋白质凭借乳化特性提高乳剂稳定性; 另一方面, 当乳剂体系 pH<7.00 时, 蛋白质溶解度降低会诱发絮凝与聚集, 从而导致乳剂稳定性降低。本研究中, 当 pH 为 6.90 时, 酪蛋白酸钠溶解性降低, 这可能是导致高能量密度全营养配方乳剂食品离心沉淀率、颗粒粒径增加、稳定性下降的主要原因之一, 与上述 MA 等[43]、LIU 等[44]均发现乳剂在酸性 pH 时, 蛋白质溶解度降低, 乳剂稳定性下降的结果一致。

3.2　pH 对乳剂体系 Zeta 电位的影响

本研究表明, 在 pH 6.90~7.30 区间, 各组乳剂 Zeta 电位无显著差异。pH 对 Zeta 电位的调控受蛋白质所带电荷性质和表面电荷程度影响, 当 pH 变化范围跨越其 pI 时, 蛋白质净电荷发生反转, Zeta 电位发生显著变化; 当 pH 波动始终处于 pI 同侧且区间较窄时, 蛋白质表面电荷性质相同且处于饱和状态, 导致 Zeta 电位无显著变化[45]。YANG 等[46]将杏仁分离蛋白乳剂的 pH 由 3.00 调至 12.00, Zeta 电位由正值变为负值且逐渐减小, 这是由于 pH 变化范围跨越了杏仁分离蛋白 pI 4.80, 蛋白质净电荷发生反转所致; 张会等[47]发现 pH 7.00~9.00 对玉米胚芽蛋白(pI 4.70) Pickering 乳剂的 Zeta 电位无显著性差异, 本研究结果与其一致, 这是由于 pH 变化幅度较小且均大于其蛋白质等电点。在本研究的高能量密度全营养配方乳剂体系中, 各组乳剂 Zeta 电位无显著差异, 该指标不能反映 pH 值变化对乳剂稳定性的影响, 因此课题组后续研究拟不再采用该指标表征乳剂稳定性, 以提高效率、降低成本。

此外, 当 pH≥7.00 时, 随 pH 增加乳剂平均粒径增大、2.0~5.0 μm 大粒径占比增多且粒径分布在右侧出现拖尾。这可能是由于高能量密度全营养配方乳剂富含蛋白质和碳水化合物, 随 pH 增加, 美拉德反应进程加快[48], 生成的 Amadori 化合物、类黑精等非水溶性大分子物质增多[49], 使大粒径颗粒增多、乳剂稳定性降低。因此, pH 对高能量密度全营养配方乳剂食品稳定性的影响是多因素协同作用的结果。

4　结　论

本研究表明 pH 是影响高能量密度全营养配方乳剂稳定性的重要因素。相较于 pH 7.00 以下乳剂, pH 7.10~7.20 的乳剂具有较小的平均粒径、离心沉淀率和 TSI, 适中的黏度, 感官评分较高, 短期贮藏期间粒径分布变化较小, 体系均匀、稳定性较好; 当 pH 增大至 7.30 时, 乳剂离心沉淀率、平均粒径和 TSI 显著增大, 体系均一性降低, 贮

藏中后期出现双峰分布与液滴聚集。综合各稳定性指标评价结果，pH 7.10~7.20 的弱碱性环境最有利于提高高能量密度全营养配方乳剂的稳定性，其中 pH 为 7.10 时，乳剂能保持均一稳定的体系和良好流动性，又具有适宜的口感，是高能量密度全营养配方乳剂食品的最适 pH。

参考文献

[1] RUUBEN M, VIRDIANA T, ENRIQUE C, *et al*. Evaluation of rheology and printability of 3D printing nutritious food with complex formulations [J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 103030.

[2] 张楠, 范琨, 张超, 等. 一种胃切除术后专用乳剂型特医食品的开发及其稳定性[J]. 食品科学, 2024, 45(17): 105–112.
ZHANG N, FAN K, ZHANG C, *et al*. Development and stability of a total nutrient emulsion intended specially for postgastrectomy patients [J]. Food Science, 2024, 45(17): 105–112.

[3] FENG M, ZHANG M, BHANDARI B. Innovations in 3D printing of food for special medical purposes: Potential applications of 4D/5D printing technology [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2025, 94: 103318.

[4] 吕俊玲, 夏路风, 胡咏川, 等. 肠内营养制剂基本特点及治疗中的药学监护[J]. 临床药物治疗杂志, 2020, 18(10): 76–79.
LV JL, XIA LF, HU YC, *et al*. Characteristic and pharmaceutical care in treatment of enteral nutrition preparations [J]. Clinical Medication Journal, 2020, 18(10): 76–79.

[5] 栾晶晶, 纪强, 刘珊珊, 等. 肠内营养制剂临床应用进展[J]. 中国新药与临床杂志, 2018, 37(12): 665–670.
LUAN JJ, JI Q, LIU SS, *et al*. Progress in clinical application of enteral nutrition preparations [J]. Chinese Journal of New Drugs and Clinical Remedies, 2018, 37(12): 665–670.

[6] 程熠娜, 李雯, 李吉莹, 等. 羧甲基茯苓多糖对酪蛋白 pH 稳定性与生物活性的调控与机制研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 88–96.
CHENG YN, LI W, LI JY, *et al*. Study on the regulation and mechanism of carboxymethyl pachymaran on pH stability and bioactivity of casein [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(12): 88–96.

[7] OWENS C, GRIFFIN K, KHOURYIEN H, *et al*. Creaming and oxidative stability of fish oil-in-water emulsions stabilized by whey protein-xanthan-locust bean complexes: Impact of pH [J]. Food Chemistry, 2018, 239: 314–322.

[8] WU YL, LI Y, LI B, *et al*. Effect of surface charge density of bacterial cellulose nanofibrils on the properties of O/W Pickering emulsions co-stabilized with gelatin [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 138: 108447.

[9] LI YL, XU YJ, XU XL, *et al*. Explore the mechanism of continuous cyclic glycation in affecting the stability of myofibrillar protein emulsion: The influence of pH [J]. Food Research International, 2022, 161: 111834.

[10] CHAI JL, LI YL, GUAN SQ, *et al*. Glycation improved the oxidative stability of myofibrillar protein emulsion: Effect of pH [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 225: 117942.

[11] 刘媛, 叶盛英, 魏振承, 等. 宏量营养素和 pH 值对乳剂型特医食品基质品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 23–31.
LIU Y, YE SY, WEI ZC, *et al*. Effects of macronutrients and pH on matrix quality of emulsion-type foods for special medical purposes [J]. Food Science, 2020, 41(4): 23–31.

[12] KLANG M, MCLYMONT V, NG N. Osmolality, pH, and compatibility of selected oral liquid medications with an enteral nutrition product [J]. Journal of Parenteral and Enteral Nutrition, 2013, 37(5): 689–694.

[13] 栗程程, 张雁, 刘光, 等. 超高温瞬时灭菌对甜玉米基质型全营养特医乳剂品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(19): 77–86.
LI CC, ZHANG Y, LIU G, *et al*. Effects of ultra-high temperature instantaneous sterilization on the quality of sweet corn matrix-based total nutrition special medical emulsion [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(19): 77–86.

[14] 肖丹虹, 李萍, 邓媛元, 等. 基于响应面法优化双酶同步酶解的全豌豆乳的稳定性及营养特性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 235–246.
XIAO DH, LI P, DENG YY, *et al*. Study on the stability and nutritional properties of double enzyme simultaneous enzymatic hydrolysis of whole pea milk based on response surface method [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 235–246.

[15] WANG LM, ZHANG YX, YANG Q, *et al*. A comparative study on the PSE-like chicken breast meat protein isolate-sunflower oil emulsion stability, rheological properties and gel properties by different additions of *L*-lysine [J]. Food Chemistry: X, 2025, 29: 102684.

[16] HANG JY, CHU YF, ZHU PN, *et al*. Preparation of size-controllable microparticles from pulse protein coacervates from a protein-polysaccharide phase separation with high emulsifying performance [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 169: 111602.

[17] LIN ZH, ZHOU PF, DENG YY, *et al*. Impact of homogenization methods on the interfacial protein composition and stability of peanut oil body emulsion with sodium caseinate and maltodextrin [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 215: 117286.

[18] YANG C, YAN RZ, HE YJ, *et al*. Ca^{2+} induced irregular spherical oat protein-shellac nanoparticles as pickering emulsions stabilizer to improve emulsion storage stability [J]. Food Chemistry, 2025, 480: 143975.

[19] 侯嘉森, 陈梅, 陈雪莹, 等. 复合保鲜剂对 4 ℃贮藏期下鸡血质量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(23): 340–349.
HOU JM, CHEN M, CHEN XY, *et al*. Effects of compound preservatives on the quality of chicken blood during 4 ℃ storage period [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(23): 340–349.

[20] YU Q, WU H, FAN LP. Formation of casein and maltodextrin conjugates using shear and their effect on the stability of total nutrient emulsion based on homogenization [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109533.

[21] 付燕梦, 邹雅倩, 田星. 基于电子舌和 HS-SPME-GC-MS 技术的不同产地青钱柳茶风味特征及其生物活性成分分析[J/OL]. 食品工业科技, 1–21. [2025-11-06]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070013
FU YM, ZOU YQ, TIAN X. Flavor characterization and bioactive compound analysis of *Cyclocarya paliurus* tea from different origins using E-Tongue combined with HS-SPME-GC-MS [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1–21. [2025-11-06]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070013

[22] YANG YQ, JIN HB, JIN YG, *et al*. A new insight into the influence of pH on the adsorption at oil-water interface and emulsion stability of egg yolk protein [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 246: 125711.

[23] MARIA JR, TRERSA CD, JULIA M, *et al*. pH influences the interfacial properties of blue whiting (*M. poutassou*) and whey protein hydrolysates determining the physical stability of fish oil-in-water emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122: 107075.

[24] 栗程程, 张名位, 张雁, 等. 甜玉米基质型全营养特医乳剂食品的稳定性[J]. 中国农业科学, 2025, 58(17): 3531–3543.
LI CC, ZHANG MW, ZHANG Y, *et al*. The stability of sweet corn matrix-based total nutrition emulsion of food for special medical purposes [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(17): 3531–3543.

[25] LIU Y, WEI ZC, DENG YY, *et al*. Comparison of the effects of different food-grade emulsifiers on the properties and stability of a casein-maltodextrin-soybean oil compound emulsion [J]. Molecules, 2020, 25(3): 458–474.

[26] FU JN, LI SB, XU MZ, *et al*. Changes in physicochemical properties and formation process of colloidal nanoparticles (CNPs) during the lamb soup stewing [J]. Food Chemistry, 2024, 442: 138290.

[27] CAO J, CORSTENS NM, SCHROEN K. Bulk and interface properties determine the thermal stability of potato- and faba protein-stabilized emulsions [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 233: 118471.

[28] 孙一鸣, 沈梦琪, 张曼, 等. 大豆分离蛋白-黄原胶复合/双层乳液的制备及稳定性研究[J/OL]. 食品工业科技, 1–16. [2025-11-06]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120344
SUN YM, SHEN MQ, ZHANG M, *et al*. Study on the preparation and stability of soy protein isolate-xanthan gum composite and bilayer emulsions [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1–16. [2025-11-06]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120344

[29] 李红娟, 李振, 任钏, 等. 乳清蛋白-果胶高内相乳液凝胶对低脂再制奶酪的品质影响[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 57–64.
LI HJ, LI Z, REN C, *et al*. Effects of high internal phase emulsion gels stabilized by whey protein-pectin complex on the quality of low-fat processed cheese [J]. Food Science, 2025, 46(2): 57–64.

[30] LI S, ZHOU Z. Deciphering the role of endogenous polyphenols in the stability and rheological properties of walnut Oleosome emulsions [J]. Food Chemistry, 2025, 495(Pt 2): 146457.

[31] TANAMBELL H, BRAMSEN RM, DANIELSEN M, *et al*. Saponin and hexanal in pea (*Pisum sativum*) protein isolates: A comparative study of isoelectric precipitation and ultrafiltration [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 223: 117772.

[32] XU WQ, LI XY, WEN XK, *et al*. Calcium ion-regulated oil body-filled pea protein isolate-inulin emulsion gels for dysphagia-oriented products [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 169: 111605.

[33] TENA J, DIAZ E, DIEGO DR, *et al*. Sample preparation for sugar and melanoidin measurement during the maillard reaction [J]. Food Chemistry, 2025, 493(Pt3): 145623.

[34] KAN XH, YAN YM, RAN LW, *et al*. Evaluation of bioaccessibility of zeaxanthin dipalmitate from the fruits of lycium barbarum in oil-in-water emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105781.

[35] 侯俊财, 朱婉仪, 赵绪英, 等. 焙烤温度对甜杏仁乳液理化特性与稳定性的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1–15. [2025-07-16]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.202501003
HOU JC, ZHU WY, ZHAO XY, *et al*. Effect of roasting temperature on the physicochemical properties and stability of almond emulsions [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1–15. [2025-07-16]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.202501003

[36] SANTHI D, KALAIKANNAN A, SURESHKUMAR S. Factors influencing meat emulsion properties and product texture: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(10): 2021-2027.

[37] HAYASHIDA S, HAGI T, KOBAYASHI M, *et al*. Comparison of taste characteristics between koji mold-ripened cheese and camembert cheese using an electronic tongue system [J]. Journal of Dairy Science, 2023, 106(10): 6701–6709.

[38] THOMAS H. Taste-active maillard reaction products: The “tasty” world of nonvolatile maillard reaction products [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2005, 1043(1): 20–29.

[39] BAI XY, LI LY, QIAO XG, *et al*. Enhancing emulsification and encapsulation stability via maillard reaction of garlic polysaccharide and casein for potent curcumin delivery emulsions [J]. Food Chemistry, 2025, 489: 145045.

[40] ZHANG M, FAN LP, LIU YF, *et al*. Effects of proteins on emulsion stability: The role of proteins at the oil-water interface [J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133726.

[41] LIN ZJ, CHEN JL, LIU ZX, *et al*. Pea proteins prepared by self-coacervation: Physicochemical characterization and emulsifying properties [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 172(P2): 111995.

[42] EBRANHIMI P, LANTE A, GROSSMANN L. Protein-polyphenol complexation *vs*. conjugation: A review on mechanisms, functional differences, and antioxidant-emulsifier roles [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 169: 111590.

[43] MA HZ, ZHANG LN, NIU XR, *et al*. Soy protein-gellan gum noncovalent complexes stabilized emulsion: Effect of heating and pH on emulsion stability [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 301: 140067.

[44] LIU QG, CHEN AL, HONG PZ, *et al*. pH-induced interface protein structure changes to adjust the stability of tilapia protein isolate emulsion prepared by high-pressure homogenization [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101841.

[45] LI BR, DOU SK, LI Q, *et al*. Insight into emulsion gels stabilized by soy protein isolate-flavonoid complexes: Based on structural, interfacial, and emulsifying properties of the protein [J]. Food Research International, 2025, 221(P1): 117305.

[46] YANG QR, QI WH, SHAO YT, *et al*. Stability and pH-dependent mechanism of astaxanthin-loaded nanoemulsions stabilized by almond protein isolate [J]. Foods, 2024, 13(24): 4067.

[47] 张会, 任健. pH 对玉米胚芽蛋白 Pickering 乳液稳定性及流变学性质的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(3): 48–57.
ZHANG H, REN J. Effect of pH on stability and rheological property of corngerm protein Pickering emulsion [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(3): 48–57.

[48] WEI CK, NI ZJ, KIRAN T, *et al*. Color and flavor of flaxseed protein hydrolysates Maillard reaction products: Effect of cysteine, initial pH, and thermal treatment [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 84–99.

[49] ZHANG ZJ, WANG B, ADHIKARI B. Maillard reaction between pea protein isolate and maltodextrin via wet-heating route for emulsion stabilisation [J]. Future Foods, 2022, 6: 100193.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)