DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251202003
引用格式: 林子晖, 周鹏飞, 钟立煌, 等. 维生素和矿物质对花生油体基全营养特医食品乳液稳定性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 249–257.
LIN ZH, ZHOU PF, ZHONG LH, *et al*. Effects of vitamins and minerals on the stability of full-nutrition, foods-for-special-medical-purposes emulsions based on peanut oil bodies [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 249–257. (in Chinese with English abstract).

维生素和矿物质对花生油体基全营养特医食品乳液稳定性的影响

林子晖[1,2], 周鹏飞[2], 钟立煌[2], 戈子龙[2], 刘　光[2], 李　萍[2], 朱　红[3], 项发晖[1], 赵志浩[2*]

(1. 福建省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所/福建省农产品质量安全重点实验室, 福州　350003; 2. 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; 3. 郯城县检验检测中心, 临沂　276100)

摘　要: 目的　探究添加维生素和矿物质对花生油体全营养特医食品乳液稳定性的影响。**方法**　利用花生油体的天然乳化结构制备能量密度为 1.0 kcal/mL 的花生油体全营养特医食品乳液, 通过粒径、电位、多重光扫描等表征手段, 评估维生素和矿物质对乳液稳定性的影响, 并分析灭菌前后各组乳液稳定性和外观品质变化。**结果**　添加维生素或矿物质不会诱导花生油体乳液产生明显的热聚集行为, 尤其是维生素强化组, 灭菌后液滴的粒径仅增加 0.49%。而添加矿物质的乳液表现出良好的贮藏稳定性, 贮藏 7 d 的乳析指数均小于 1.0%。此外, 灭菌后, 含有矿物质的乳液颜色发生较大变化(ΔE^*>20), 对感官品质造成一定影响。**结论**　添加维生素和矿物质的花生油体基全营养特医食品乳液具有优异的稳定性, 为油料油体在特医食品中的加工利用提供参考。

关键词: 花生油体; 维生素; 矿物质; 全营养特医食品乳液; 乳液稳定性

Effects of vitamins and minerals on the stability of full-nutrition, foods-for-special-medical-purposes emulsions based on peanut oil bodies

LIN Zi-Hui[1,2], ZHOU Peng-Fei[2], ZHONG Li-Huang[2], GE Zi-Long[2], LIU Guang[2], LI Ping[2], ZHU Hong[3], XIANG Fa-Hui[1], ZHAO Zhi-Hao[2*]

(1. *Institute of Quality Standards & Testing Technology for Agro-products*, *Fujian Academy of Agricultural Sciences*/*Fujian Key Laboratory of Agro-products Quality & Safety*, *Fuzhou* 350003, *China*; 2. *Sericultural & Agri-food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Food*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Product Processing*, *Guangzhou* 510610, *China*; 3. *Tancheng County Center for Inspection and Testing*, *Linyi* 276100, *China*)

收稿日期: 2025-12-02
基金项目: 福建省农产品质量安全重点实验室开放课题项目(APQSKF202304); 广东省重点研发计划项目(2025B0202130004); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目(油料作物产业技术体系)(2024CXTD06); 广东省科协青年科技人才培育计划项目(SKXRC2025479)
第一作者: 林子晖(2000—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农产品加工。E-mail: 1303134141@qq.com
***通信作者:** 赵志浩(1991—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为粮油加工。E-mail: zhaozhihao1991@163.com

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of added vitamins and minerals on the stability of full-nutrition, foods-for-special-medical-purposes emulsions based on peanut oil bodies. **Methods** Prepared a peanut oil body-based, full-nutrition, foods-for-special-medical-purposes emulsion with an energy density of 1.0 kcal/mL using the natural emulsifying structure of peanut oil bodies, and evaluated the effects of vitamins and minerals on emulsion stability by particle size, zeta potential and multiple light scattering analyses, as well as examined changes in stability and appearance quality of each emulsion group before and after sterilization. **Results** The addition of vitamins or minerals did not induce obvious heat-induced aggregation in peanut oil body emulsions; in particular, in the vitamin-fortified group, the droplet size increased by only 0.49% after sterilization. Emulsions with added minerals exhibited good storage stability, with creaming index values after 7 d of storage all below 1.0%. However, after sterilization, emulsions containing minerals showed a pronounced change in color (ΔE^*>20), which had a certain impact on sensory quality. **Conclusion** The vitamin-and mineral-enriched peanut oil body-based complete nutritional emulsion for special medical foods exhibits exceptional stability, providing a reference for the processing and utilization of oil body-based in FSMP foods.

KEY WORDS: peanut oil body; vitamins; minerals; full-nutrition; foods-for-special-medical-purposes emulsions; emulsion stability

0 引 言

特殊医学用途配方食品是为了满足进食受限、消化吸收障碍、代谢紊乱或特定疾病状态人群对营养素或膳食的特殊需要，专门加工配制而成的配方食品，简称特医食品。其中，全营养乳液富含蛋白质、脂肪、碳水化合物等宏量营养素，以及维生素、矿物质等微量营养素，营养素全面且具有较高的能量密度，可作为单一营养素来源[1]。由于全营养乳液的热力学不稳定特性及其丰富的营养素组成，产品在加工和贮藏过程中易发生蛋白质絮凝、脂肪上浮等不稳定现象[2]。因此，全营养乳液通常需要加入多种食品乳化剂，以提高其物理稳定性。食品乳化剂具有乳化、起泡、润滑等作用，能够改善食品的外观、质地和口感，其中合成食品乳化剂性质优越、成本低廉，广泛应用于各类食品的加工。然而，近年来研究发现合成乳化剂的摄入可能对人体健康具有潜在危害[3]。LV 等[4]通过动物实验研究发现，合成乳化剂(聚山梨酯-80、聚甘油蓖麻醇酸酯)会破坏小鼠的肠道屏障并通过刺激炎症引起黏膜损伤，进而诱发全身炎症。此外，不同食品乳化剂之间可能存在协同效应，复配使用可能加剧其潜在风险[5]。因此，开发绿色安全的新型食品乳化剂，甚至是不依赖食品乳化剂的新型食品乳化体系，是未来食品工业发展的重要方向之一。

油体是植物细胞中储存油脂的微球型亚细胞器，为种子的萌发提供能量。油体的核心成分为甘油三酯，其表面由连续的磷脂单层与蛋白质构成[6]。此外，油体还富含植物甾醇、生育酚等活性物质，相比精炼植物油具有更高的营养价值[7]。油体天然稳定的亲水表面，使其在水中分散可直接形成水包油乳液，较强的空间位阻效应和静电相互作用，赋予其优异的抵抗液滴絮凝和聚结的能力[8]。此外，油体可承受外部机械压力[9]以及可耐受较高的环境温度[10]，这些性质使其能够作为乳化油脂的替代品应用在食品领域。研究表明，油体在酸奶以及蛋黄酱等仿乳制品中表现出极大的应用潜力，可显著改善食品的质地、稳定性以及营养[11]。基于此，LIN 等[12]此前已经利用花生油体作为乳化体系制备了不含乳化剂的特医乳液。此外，在高能量密度下，与合成乳化剂稳定的特医乳液相比，花生油体基特医乳液在贮藏稳定性以及油脂的氧化稳定性方面具有显著优势[13]。然而，关于维生素、矿物质等微量营养素对花生油体基特医乳液的影响尚不明确。

为了探究以油料油体为乳化体系制备全营养特医乳液的可行性，本研究选择花生油体作为原材料，制备无添加精炼植物油和合成乳化剂的全营养乳液。通过粒径、电位、显微结构等综合分析了乳液的物理稳定性，并根据外观、色泽评价了乳液的感官品质。本研究旨在阐明维生素与矿物质两种营养素对花生油体营养乳液的影响，进一步挖掘油体在食品领域的应用价值，为制备天然健康的绿色食品提供一些参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

花生(鲁花 11 号)，市售。

酪蛋白酸钠(纯度 99%，新疆梅花氨基酸有限公司)；麦芽糊精[葡萄糖当量(glucose equivalen, DE)值 15~20，秦皇岛骊骅淀粉股份有限公司]；复合维生素(泛酸、烟酸、叶酸、维生素 A、维生素 B_1、维生素 B_2、维生素 B_6、维生素 B_{12}、维生素 C、维生素 D、维生素 E)(食品级，郑州瑞普生物工程有限公司)；复合矿物质(碘、钙、钾、磷、镁、锰、钠、铁、铜、硒、锌)(食品级，郑州瑞普生物工程有限

公司); 其余试剂(分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司)。

1.2 仪器与设备

IKA-T25 高速均质机(广州艾卡仪器设备有限公司); AH-BASICII高压均质机(加拿大 ATS 工业系统有限公司); LS-75HD 立式压力蒸汽灭菌器(江阴滨江医疗设备有限公司); ZSE 马尔文纳米粒度/电位分析仪(英国 Malvern 公司); ML51-M 光学生物显微镜(广州市明美光电技术有限公司); DHR-1 动态剪切流变仪(美国 TA 公司); LAB 多重光散射仪(法国 Formulaction 仪器公司); CM-600d 便携式分光测色计(日本柯尼卡美能达公司); SQP 赛多利斯电子天平(精度 0.1 mg, 北京赛多利斯科学仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 花生油体的提取

参考曾广镇等[14]的方法, 并稍作修改。花生与去离子水按照 1:7 的质量比混合, 并在 4 ℃的环境条件下贮藏 10 h。料液经过破壁机处理 3 min 后, 使用 4 层纱布过滤。滤液在 4 ℃、10000×*g* 条件下离心 20 min, 最后回收离心瓶上层的白色膏状物质, 即花生油体。通过本方法获得的花生油体提取率为 42.60%, 即 100 g 花生经过浸泡、破碎、过滤、离心后, 最终得到 42.60 g 花生油体。该花生油体通过 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》、GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》以及 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》分别测出水分、蛋白质以及油脂的含量为 20.61%、1.60%、67.84%。

1.3.2 花生油体全营养乳液的制备

将花生油体分散在去离子水中, 并加入适量酪蛋白酸钠、麦芽糊精、复合维生素以及复合矿物质。经过玻璃棒搅拌混合后, 将高速均质机的转子-定子探头插入乳液中, 高速均质机的转速设定为 10000 r/min, 在室温条件下(25 ℃)均质处理 10 min。随后将乳液转移至高压均质机中, 设置均质压力为 50 MPa, 并循环均质两次, 得到花生油体全营养乳液。最后将乳液置入高压蒸汽灭菌锅, 设置灭菌温度为 121 ℃, 灭菌时间为 15 min。待灭菌结束后, 将乳液冷却至室温, 并取样分析。本研究中, 花生油体全营养乳液的能量密度为 1.0 kcal/mL, 并根据不同组成的营养素, 设计 4 种乳液, 分别为未添加维生素和矿物质的花生油体营养乳液(对照组)、添加维生素的花生油体营养乳液(维生素强化组)、添加矿物质的花生油体营养乳液(矿物质强化组)以及添加维生素和矿物质的花生油体全营养乳液(全营养组), 各组乳液的配方如表 1 所示, 各种营养素的添加量均符合 GB 29922—2013《食品安全国家标准 特殊医学用途配方食品通则》对 10 岁以上人群全营养配方食品营养素含量的要求。

1.3.3 粒径和电位

使用去离子水以 1:800 的比例稀释乳液样品, 并通过 ZSE 马尔文纳米粒度/电位分析仪测量乳液的粒度和 ζ-电位。乳液液滴的粒径由体积平均径($D4,3$)表示。乳液和分散相的折射率分别设置为 1.45 和 1.33。所有样品的测试均在 25 ℃下进行。

1.3.4 微观结构

使用光学生物显微镜观察乳液的微观形态。将 4 μL 样品转移至载玻片上, 缓慢地用盖玻片覆盖, 静置 5 min 后, 调节光强与焦距, 放大 400 倍观察样品并拍照。

1.3.5 离心沉淀率

将适量乳液转移至 10 mL 离心管中, 在 25 ℃下以 6000×*g* 的离心力离心 15 min, 分离上层液相后, 测定底部沉淀的质量。使用公式(1)计算乳液的离心沉淀率:

$$\text{离心沉淀率}/\% = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为乳液样品质量, g; m_1 为离心管的质量, g; m_2 为离心后沉淀和离心管的质量, g。

1.3.6 表观黏度

准确地将 1.4 mL 乳液样品转移到流变仪的样品台上, 并使用直径为 40 mm 的夹具进行接触测量。将样品台与夹具之间的间距设置为 1000 μm, 测量乳液样品的静态剪切黏度。剪切速率从 0.1 s^{-1} 增加到 100 s^{-1} 的时间为 1 min。所有样品的测量均在 25 ℃下进行。

1.3.7 动力学稳定性

使用 LAB 多重光散射仪测量乳液的动力学不稳定指数(turbiscan stability index, TSI)以及背散射光变化值(backscattering, ΔBS)。取 15 mL 乳液样品转移至 20 mL 样品管中, 并确保样品无挂壁和气泡。随后将样品管放置在分析室中, 设置扫描时间为 6 h, 每 5 min 扫描一次。所有测量均在 25 ℃下进行。

表 1　各组乳液的配方(1 L)

Table 1　Formula for each group of emulsion (1 L)

样品	油体/g	酪蛋白酸钠/g	麦芽糊精/g	复合维生素/g	复合矿物质/g
对照组	44.2	39.2	150	-	-
维生素强化组	44.2	39.2	150	0.25	-
矿物质强化组	44.2	39.2	150	-	17.5
全营养组	44.2	39.2	150	0.25	17.5

注: -表示无此项, 下同。

1.3.8 乳析指数

将适量乳液样品转移至细长玻璃样品瓶中, 在常温干燥且避光的条件下贮藏 7 d, 测量乳液整体高度以及乳液上层形成的乳化层厚度, 使用公式(2)计算乳液的乳析指数:

$$\text{乳析指数}/\% = \frac{h_1}{h_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: h_0 为乳液总高度, mm; h_1 为乳化层厚度, mm。

1.3.9 颜色

乳液的颜色通过色度计测量和分析, 使用国际照明委员会颜色色度 L^*、a^*和 b^*标度(L^*=暗/亮, a^*=红/绿, b^*=黄/蓝)。乳液颜色的 L^*越高, 颜色越亮; a^*越高, 乳液颜色越红; b^*越高, 颜色越黄; 样品的色差值 ΔE^*由以下公式(3)计算:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (3)$$

式中: L_0、a_0、b_0为乳液的色度; ΔE^*为灭菌前后乳液的色差值。

1.4 数据处理

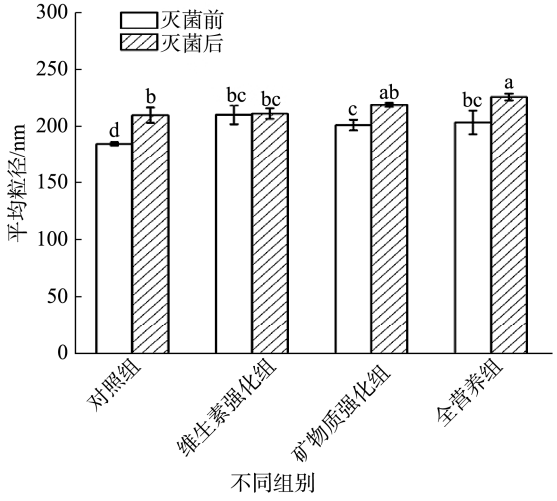
所有样品都至少进行了 3 次分析, 使用 MATLAB 的方差分析(analysis of variance, ANOVA)程序进行统计分析, 并通过最小显著性差异检验检测试验平均值之间的差异($P \leqslant 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 粒径电位分析

粒径是评估乳液稳定性的基本指标之一, 较小的粒径表明其液滴表面具有更小的界面张力, 不易发生絮凝、聚结等失稳现象, 从而具有更高的稳定性[15]。如图 1 所示, 灭菌前对照组、维生素强化组、矿物质强化组与全营养组乳液的粒径分别为 184.3、209.9、200.8、203.1 nm, 其中, 对照组乳液平均粒径显著小于其他组(P<0.05)。然而, 对照组、矿物质强化组和全营养组可能由于灭菌过程中发生液滴热聚集, 灭菌后乳液平均粒径均显著升高, 分别为 209.5、218.6、225.4 nm。液滴热聚集主要由于高温导致界面蛋白变性, 分子间相互作用力改变, 乳化能力被削弱, 从而促进液滴的絮凝和聚结[16]。此外, 长时间热处理加快了液滴布朗运动、增加液滴之间的碰撞, 加剧其聚集行为[17]。矿物质强化组和全营养组乳液的粒径均发生较大的变化(提高 8.85%、10.99%), 表明矿物质对花生油体乳液的稳定性具有较大影响, 这主要是由于矿物质中含有较高含量的 Ca^{2+}、Mg^{2+}以及 Fe^{3+}等高价金属离子, 而油体蛋白质的亲水 N 端能够与这类金属离子相结合, 并暴露更多的疏水基团, 从而增强疏水结构域的相互吸引力, 导致油体之间发生絮凝[18]。值得注意的是, 维生素强化组乳液的平均粒径在高温灭菌后没有显著增大(仅 0.49%), 说明此类营养素可能对乳液的热稳定性起积极作用。

各组乳液的多分散指数(polydispersity index, PDI)如图 2, 结合 PDI 对乳液粒径进一步分析, 结果表明, 除维生素强化组乳液, 其余组乳液的 PDI 在灭菌后均增加, 与粒径的变化趋势一致, 即乳液体系中存在较大的聚集体。其中, 含有矿物质的乳液在灭菌前后均具有较低的 PDI, 说明液滴的粒度分布更均匀, 乳液体系稳定。ISHII 等[19]研究表明, 低浓度的 Na^+ (0~100 mmol/L)有利于油体的抗聚结能力。而本研究的矿物质组乳液的 Na^+浓度大约为 25 mmol/L, 且含有低浓度的高价金属离子, 表明添加适量的复合矿物质同样能够改善油体乳液的稳定性。此外, 利用油体制备的全营养乳液具有最低的 PDI, 说明其在抵抗失稳行为方面可能具有一定优势。



注: 不同字母表示组间具有显著性差异(P<0.05), 图 2~3、5、9 同。

图 1 各组乳液的平均粒径(n=3)

Fig.1 Average particle size of each group of emulsion (n=3)

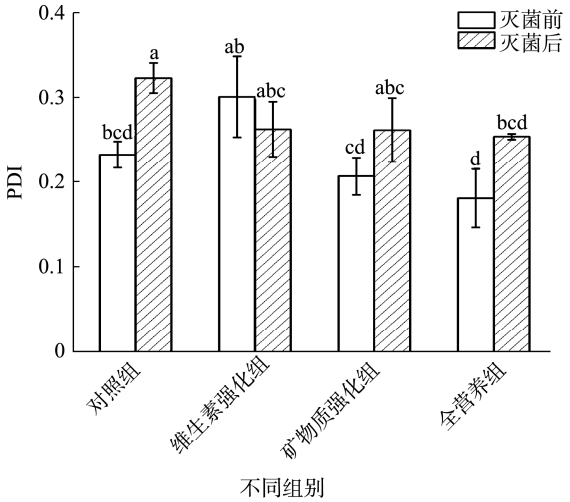


图 2 各组乳液的 PDI (n=3)

Fig.2 PDI of each group of emulsion (n=3)

ζ-电位是评估乳液局部电荷分布的关键参数。ζ-电位的绝对值越高, 表明液滴之间的静电排斥力越强, 这有助于防止液滴聚集并提高乳液稳定性。如图 3 所示, 所有乳液的 ζ-电位绝对值均超过 35 mV, 表明液滴之间存在强烈

的静电排斥，乳液体系较稳定[20]。结果表明，灭菌前矿物质强化组(–48.4 mV)与全营养组乳液(–47.2 mV)表现出较大的 ζ-电位绝对值，灭菌后各组乳液的 ζ-电位相接近。值得注意的是，未添加矿物质的两组乳液经过灭菌后 ζ-电位绝对值增大，而添加矿物质的两组乳液经过灭菌后 ζ-电位绝对值减小。一方面，油体乳液经过高温灭菌处理后，其表面的蛋白质与多糖形成稳定的共价复合物，液滴之间的静电作用力增强[21]，并且热处理能够灭活油体表面携带的酶和微生物，有利于乳液稳定[22]。另一方面，低浓度的金属离子改善了油水界面的静电效应，进而拓宽油体表面的双电层，抑制液滴聚集。但长时间高温处理改变了吸附金属离子的表面结构，导致液滴表面携带的电荷数量减少，最终加剧液滴发生聚集。

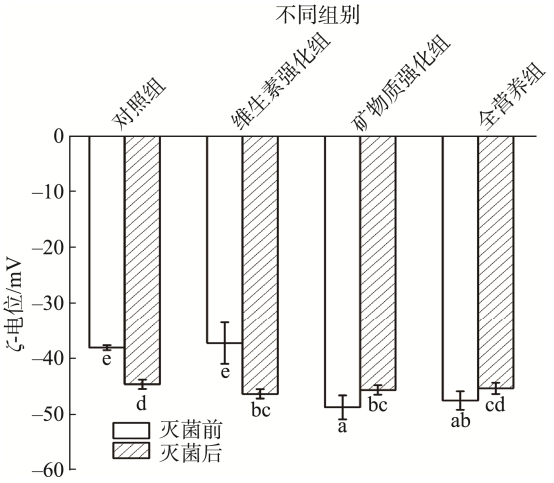


图 3　各组乳液的 ζ-电位(n=3)

Fig.3　ζ-potential of each group of emulsion (n=3)

2.2　微观结构分析

通过光学显微镜更加直观地观察到乳液液滴的热聚集行为。乳液的微观形态如图 4 所示，各组乳液在灭菌前均具有较小粒径，并且液滴在连续相中均匀分布。灭菌后，对照组乳液出现较多的由小液滴絮凝形成的大聚集体，并且这类聚集体的分布比较密集，导致短时间内容易发生脂肪上浮现象，进而加速油脂氧化。此外，矿物质强化组和全营养组乳液液滴之间的间距较大。其主要原因可能是液滴表面携带较多的净电荷，增强了静电斥力，并且乳液体系中存在低浓度的金属离子，有助于形成强度更高的界面层，从而呈现出更佳的稳定性[23]。

2.3　离心沉淀率分析

离心沉淀率是评估乳液稳定性的重要指标，其值越大表明乳液底部的沉淀物越多，影响整体的感官品质。各组乳液的离心沉淀率结果如图 5 所示，结果表明，各组乳液均出现沉淀物质，其中，矿物质强化组(灭菌前后分别为 0.74%、0.88%)与全营养组乳液(灭菌前后分别为 0.70%、0.82%)的离心沉淀率较高。这主要是由于乳液中含有较多的酪蛋白酸钠和麦芽糊精，可能形成一些蛋白质聚集物以及其他不溶性物质[24]。此外，添加的复合矿物质本身同样含有部分难溶物质，导致矿物质强化组与全营养组的离心沉淀率偏高。然而，各组乳液的离心沉淀率均低于 1.0%，不溶性物质含量较少，表明这部分沉淀物质对乳液整体的外观影响较小。

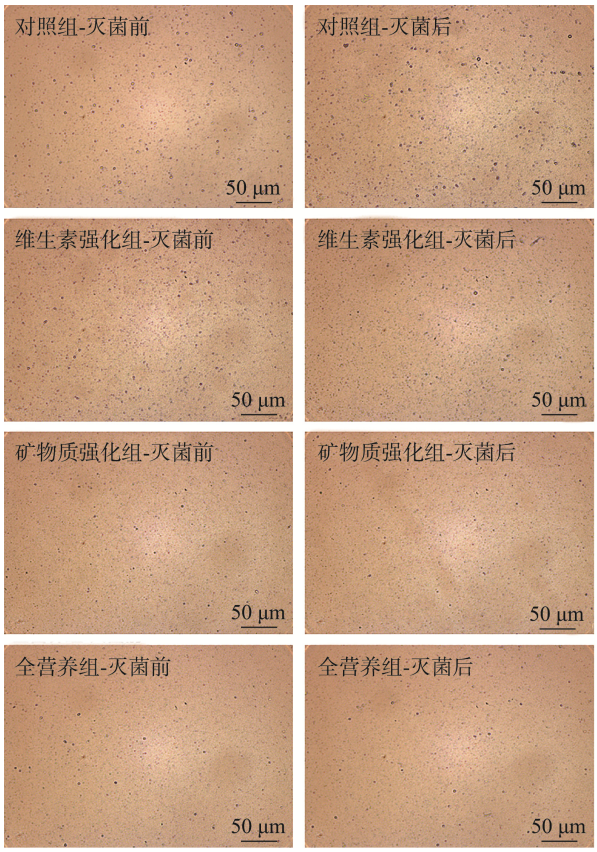


图 4　各组乳液的微观结构

Fig.4　Microstructure of each group of emulsion

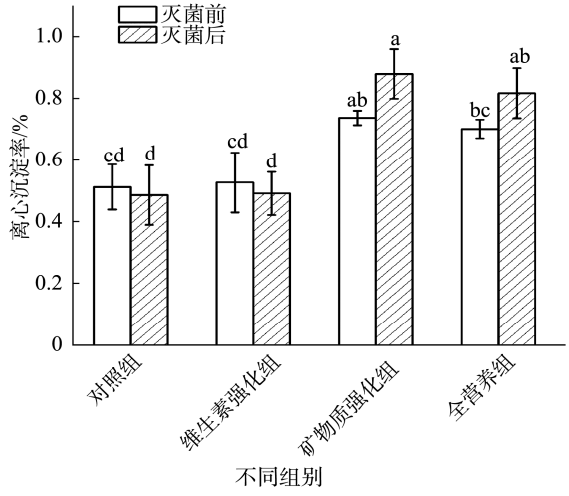


图 5　各组乳液的离心沉淀率(n=3)

Fig.5　Centrifugal sedimentation rate of each group of emulsion (n=3)

2.4 表观黏度分析

黏度是决定乳液稳定性的重要因素之一，高黏度可以减缓液滴的运动，从而延缓絮凝和聚结，提高乳液的稳定性。如图 6 所示，各组乳液的黏度均随着剪切速率的增加而明显降低，表明它们属于剪切稀化的假塑性流体[25]。在灭菌前，含有矿物质的乳液具有较大的黏度，这可能是不溶性物质增加了液滴之间的摩擦力，从而削弱乳液的流动性[26]。然而，灭菌后各组乳液的黏度曲线几乎重合，表明具有相似的流变特性，添加维生素与矿物质对油体乳液的黏度影响不大。

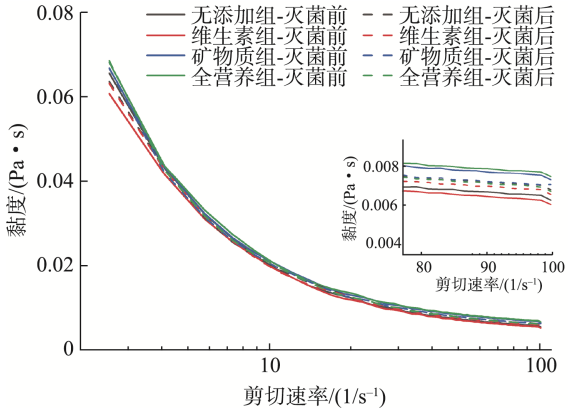


图 6 各组乳液在 0.1~100 s^{-1} 的剪切速率范围内的黏度曲线

Fig.6 Viscosity curves of each group of emulsions as a function of shear rate from 0.1–100 s^{-1}

2.5 动力学稳定性分析

乳液的 ΔBS 反映了乳液体系的动态行为，包括上浮、沉淀以及聚集等。各组乳液灭菌后的 ΔBS 如图 7 所示，其中蓝色至红色的曲线分别表示开始至最终的 ΔBS。结果显示，在各组乳液的 ΔBS 曲线右侧均出现一个正向峰值，这意味着乳液的顶部出现分层现象，并且该部分层析物比较浓厚，说明液滴发生聚集，即扫描过程中乳液出现脂肪上浮现象。其中，对照组与维生素强化组的 ΔBS 曲线峰值更宽，说明脂肪上浮速率更快，分层现象更明显。此外，在各组乳液的 ΔBS 曲线左侧同样出现峰值，但不同的是对照组与维生素强化组是反向峰值，而矿物质强化组与全营养组是正向峰值。反向峰值代表多重光的强度减少被扫描的体系变澄清，与之相反，出现正向峰值则是体系变浑浊，多重光的强度增大[27]。因此，ΔBS 的结果表明，贮藏过程中对照组与维生素强化组乳液的底部逐渐澄清，整体液滴向上移动，并在顶部形成分层。值得注意的是，中部的乳液仍然保持均匀稳定，这是各组乳液均具有的特性。而矿物质强化组与全营养组则呈现固体颗粒沉淀的情况，这主要由矿物质中的不溶固形物引起。其中，全营养组乳液的两处峰值均比其余组更低，表明其在相同的贮藏时间内脂肪上浮或颗粒沉降的趋势更小，乳液体系均匀稳定。

通过 TSI 进一步表征各组乳液的稳定性，结果如图 8 所示。一般情况下，TSI 的数值随时间的变化越小，表明乳液体系越稳定[28]。结果表明，含有矿物质的油体乳液的 TSI 较小，并且随着扫描时间增加 TSI 的数值并未发生明显改变。而未添加矿物质的两组油体乳液随着扫描时间的推进，它们的 TSI 呈现持续增大的变化趋势，这意味着扫描过程中乳液体系发生较为明显的失稳现象。其中，对照组乳液的 TSI 整体数值最大，全营养组乳液的 TSI 最小，表明花生油体在添加维生素和矿物质后，可形成在物理稳定性上更具优势的乳液体系。

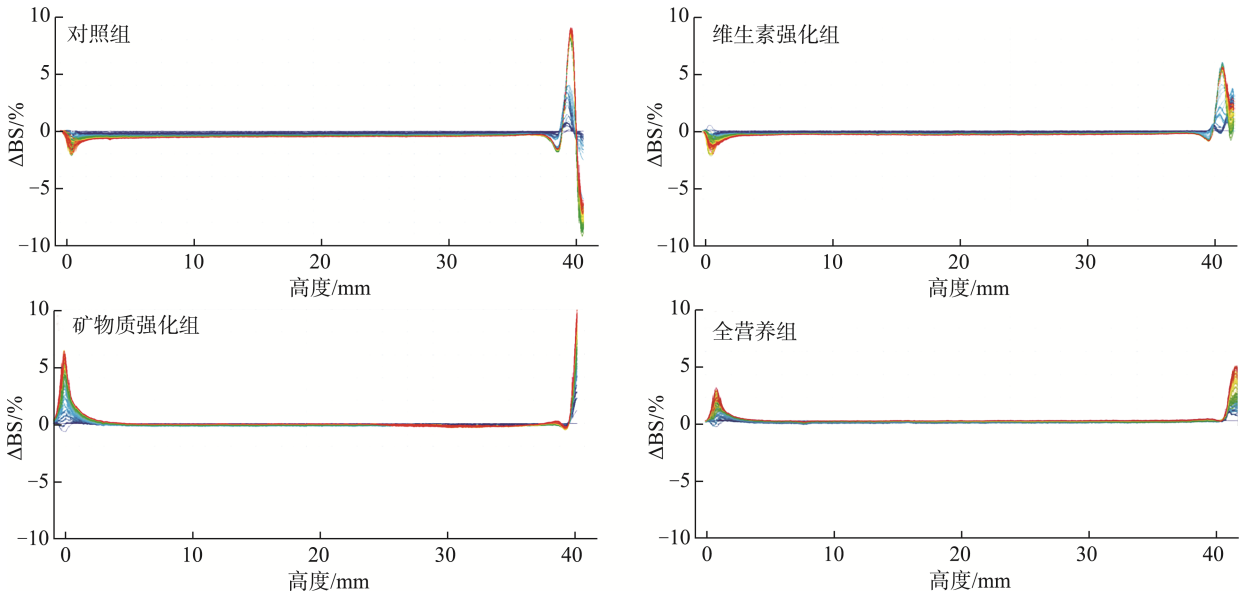


图 7 各组乳液灭菌后的 ΔBS

Fig.7 ΔBS after sterilization of each group of emulsion

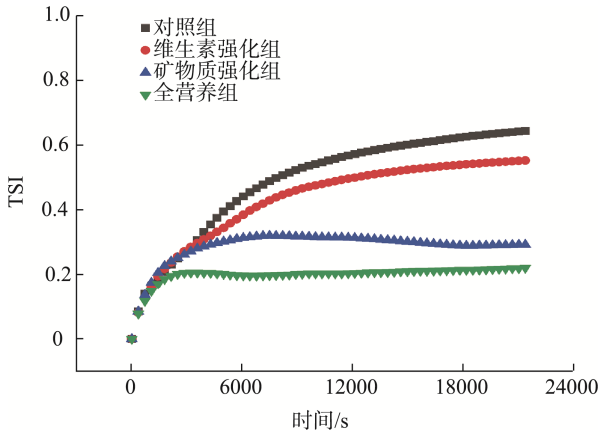


图 8　各组乳液灭菌后的 TSI

Fig.8　TSI after sterilization of each group of emulsion

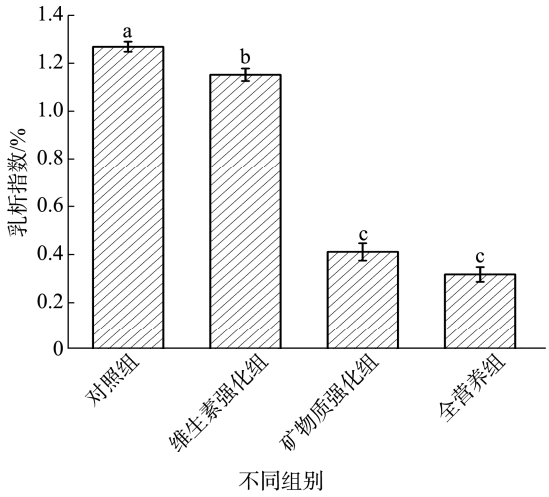


图 9　各组乳液灭菌后的乳析指数(n=3)

Fig.9　Creaming index after sterilization of each group of emulsion (n=3)

2.6　乳析指数分析

乳液的贮藏稳定性通过脂肪上浮后在顶部形成的乳化层厚度表征, 即乳析指数。由于分散相和连续相具有互不相溶且存在密度差异的物理属性, 因此在重力作用下, 密度小的物质在体系中总是保持向上的运动趋势, 导致相分离。而根据斯托克斯定律, 这种向上运动的速率是可调控的, 即减小分散相的粒径尺寸以及增大连续相的黏度可有效减缓分散相在连续相中的运动速率, 从而抑制相分离, 维持乳液体系的稳定[29]。图 9 的结果显示, 各组乳液发生不同程度的脂肪上浮现象, 其中, 对照组与维生素强化组的乳析指数较大, 分别为 1.26%、1.15%, 呈现出更明显的分层现象。然而, 各组乳液的乳析指数较小, 尤其是含有矿物质的两组乳液(0.41%、0.32%), 几乎观察不到分层现象。其原因有两点, 一方面, 乳液体系中含有大量的麦芽糊精(15%), 极大程度增加连续相的黏度, 从而抑制液滴的移动速率。另一方面, 添加矿物质的油体乳液液滴之间具有很强的静电斥力, 不易发生相互吸引形成更大的聚集体, 导致所受到的浮力较小, 油脂上浮趋势减弱。SUKHOTUR 等[30]通过将阿拉伯胶吸附在花生油体表面, 同样证明了多糖可增强油体表面的静电排斥力, 从而抑制油体之间的相互聚集。

2.7　颜色分析

表 2 代表各组乳液灭菌前后的色度变化, 结果显示, 各组乳液在灭菌前均具有较高的 L^*, 并且 a^*和 b^*的绝对值较小, 表明乳液的亮度较高且主要颜色为白色。其中, 添加维生素的两组乳液 b^*较高, 且为正值, 表明它们的颜色偏黄色, 这主要由呈现黄色的维生素 A 引起。由于维生素 A 是脂溶性物质, 在高压均质的剧烈物理机械力作用下, 油滴被重组细化时, 维生素 A 可溶解在小油滴中并被包埋, 导致均质后的乳液偏黄[31]。然而, 由于灭菌过程中蛋白质和多糖发生美拉德反应, 形成大量褐色产物, 导致各组乳液的颜色均发生显著的变化, 如图 10 所示。RAMONAITYTE 等[32]研究表明, 在金属离子(尤其是 Fe^{2+}和 Cu^{2+})的存在下, 可促进美拉德反应, 加速褐变产物形成。因此, 灭菌前后矿物质强化组和全营养组乳液的颜色变化更大, ΔE^*分别为 24.55、21.68, 并且在大量美拉德反应产物的影响下, 它们灭菌后的颜色更偏向于红棕色。然而, 含有维生素 A 的维生素强化组乳液在灭菌后颜色变化反而更小, ΔE^*为 11.73。

表 2　各组乳液的颜色分析(n=3)

Table 2　Color analysis of each group of emulsion (n=3)

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
对照组-灭菌前	80.12±0.09^{b}	–1.30±0.01^{g}	–0.56±0.02^{g}	-
维生素强化组-灭菌前	80.32±0.03^{a}	–2.62±0.02^{h}	2.87±0.01^{e}	-
矿物质强化组-灭菌前	76.94±0.15^{c}	–0.22±0.01^{e}	1.09±0.02^{f}	-
全营养组-灭菌前	76.29±0.07^{d}	–0.84±0.01^{f}	4.34±0.01^{d}	-
对照组-灭菌后	73.68±0.03^{f}	2.46±0.01^{c}	11.31±0.01^{c}	14.02±0.02^{c}
维生素强化组-灭菌后	74.25±0.04^{e}	1.93±0.01^{d}	11.81±0.02^{b}	11.73±0.01^{d}
矿物质强化组-灭菌后	58.80±0.05^{h}	5.61±0.01^{a}	16.57±0.01^{a}	24.55±0.04^{a}
全营养组-灭菌后	59.45±0.08^{g}	5.41±0.01^{b}	16.48±0.06^{a}	21.68±0.09^{b}

注: 同列不同字母表示组间具有显著性差异(P<0.05)。

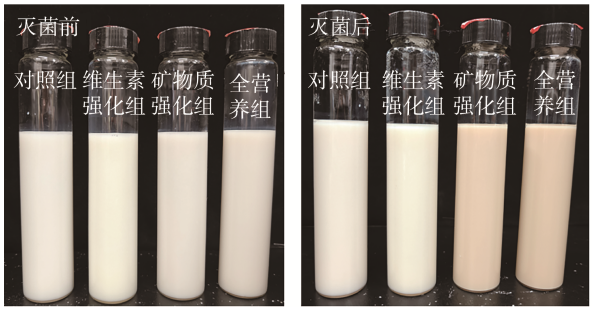


图 10 灭菌前后乳液的外观变化

Fig.10 Appearance changes of emulsion before and after sterilization

3 结 论

本研究利用花生油体制备了不含食品乳化剂的全营养特医食品乳液，并对其物理稳定性进行全面分析。结果表明，花生油体基全营养特医食品乳液经过灭菌处理后液滴并未出现明显的热聚集行为，并且在长时间的贮藏中仍然能够保持稳定，未观察到明显的分层、沉淀等严重失稳现象，具有优异的物理稳定性。此外，花生油体基全营养乳液的稳定性主要受到来自矿物质中金属离子的影响，并且在灭菌后显著影响乳液的外观颜色，而复合维生素的添加对乳液稳定性的影响并不显著。

综上所述，本研究为花生油体在全营养特医食品乳液中的应用提供了一定的参考价值。花生油体依赖其天然的乳化结构，可替代精制油脂和食品乳化剂的添加，生产全营养特医食品乳液。花生油体基全营养特医食品通过避免乳化剂的添加，对于特定疾病状态下患者的肠道健康具有潜在益处。

参考文献

[1] ESCURO AA, HUMMELL AC. Enteral formulas in nutrition support practice: Is there a better choice for your patient? [J]. Nutrition in Clinical Practice, 2016, 31(6): 709–722.

[2] 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.

[3] CHIH WK, JIE Q, DENNIS DB, *et al*. Regulation of intestinal lipid metabolism: Current concepts and relevance to disease [J]. Nature Reviews. Gastroenterology & Hepatology, 2020, 17(3): 169–183.

[4] LV WW, SONG JY, RIFAT RN, *et al*. Effects of food emulsifiers on high fat-diet-induced obesity, intestinal inflammation, changes in bile acid profile, and liver dysfunction [J]. Food Research International, 2023, 173: 113302.

[5] DAMMAK I, SOBRAL PJ, AQUINO A, *et al*. Nanoemulsions: Using emulsifiers from natural sources replacing synthetic ones-A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(5): 2721–2746.

[6] 贾梦婷, 郝佳, 许朵霞. 植物油体结构与提取技术及在食品应用的研究进展[J]. 中国油脂, 2025, 1(12): 1003–7969.
JIA MT, HAO J, XU DX. Research progress on the structure, extraction techniques, and food applications of plant oil bodies [J]. China Oils and Fats, 2025, 1(12): 1003–7969.

[7] ZAABOUL F, RAZA H, CHEN C, *et al*. Characterization of peanut oil bodies integral proteins, lipids, and their associated phytochemicals [J]. Journal of Food Science, 2018, 83(1): 93–100.

[8] YU X, NIE C, ZHAO P, *et al*. Influences of microwave exposure to flaxseed on the physicochemical stability of oil bodies: Implication of interface remodeling [J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130802.

[9] KERGOMARD J, PABOEUF G, BAROUH N, *et al*. Stability to oxidation and interfacial behavior at the air/water interface of minimally-processed versus processed walnut oil-bodies [J]. Food Chemistry, 2021, 360: 129880.

[10] SUN F, WANG Q, GAO C, *et al*. Effect of extraction pH and post-extraction heat treatment on the composition and interfacial properties of peanut oil bodies [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 656: 130351.

[11] SHI Z, LI K, MENG Z. Recent trends in oleosomes: Extraction methods, structural characterization, and novel applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 151: 104621.

[12] LIN Z, ZHOU P, DENG Y, *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, 2025, 215: 117286.

[13] LIN Z, ZHAO Z, ZHOU P, *et al*. Physicochemical properties of peanut oil body nutritional emulsions: Effects of energy density and nutrient ratio [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2025, 9: 1578053.

[14] 曾广镇, 赵志浩, 周鹏飞, 等. 去红衣与超声处理对花生油体提取及其乳化特性、抗氧化活性的影响[J]. 中国油脂, 2024, 49(1): 22–28, 42.
ZENG GZ, ZHAO ZH, ZHOU PF, *et al*. Effects of peanut testa removal and ultrasonic treatment on peanut oil bodies extraction and its emulsification and antioxidant properties [J]. China Oils and Fats, 2024, 49(1): 22–28, 42.

[15] SHEN P, WU J, ZHAO M, *et al*. Does particle size matter for soy protein nanoparticles in the fabrication and lipolysis of pickering-like emulsions? [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 110005.

[16] SHI C, DENG Y, WANG Z, *et al*. Investigating the thermal stability and calcium resistance of O/W emulsions prepared with glycosylated whey protein hydrolysates modified by different saccharides [J]. Food Chemistry, 2024, 454: 139805.

[17] 王震霄, 廖一, 于佳晔, 等. 超声处理制备大豆油体复合乳液及运载β-胡萝卜素研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 45–53.
WANG ZX, LIAO Y, YU JY, *et al*. Preparation of soybean oil body complex emulsions by ultrasonic treatment and transport of *β*-carotene [J].

Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 45–53.

[18] RG MJ, PETRIS V, DE CS, *et al*. The effect of monovalent (Na^+, K^+) and divalent (Ca^{2+}, Mg^{2+}) cations on rapeseed oleosome (oil body) extraction and stability at pH 7 [J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125578.

[19] ISHII T, MATSUMIYA K, MATSUMURA Y. Combinational effects of acid and salt addition on colloidal, interfacial, and emulsifying properties of purified soybean oil bodies [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106213.

[20] DIAO X, JIA R, WANG Y, *et al*. The physicochemical properties, microstructure, and stability of diacylglycerol-loaded multilayer emulsion based on protein and polysaccharides [J]. LWT, 2024, 196: 115879.

[21] CAO X, WANG S, YU Y, *et al*. Enhancing emulsification properties of pea protein isolate: Impact of heat treatment and soy hull polysaccharides on conformational modification and stability [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 298: 140106.

[22] RAHAMAN T, VASILJEVIC T, RAMCHANDRAN L. Effect of processing on conformational changes of food proteins related to allergenicity [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 49: 24–34.

[23] MA J, PAN C, CHEN H, *et al*. Effects of protein concentration, ionic strength, and heat treatment on the interfacial and emulsifying properties of coconut (*Cocos nucifera* L.) globulins [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100984.

[24] HARGROVE D, BARBANO DM, DRAKE MA. A sedimentation test to measure heat stability of milk protein beverages [J]. Journal of Dairy Science, 2025, 108(10): 10574–10585.

[25] PAN R, IQBAL S, WANG N, *et al*. Alteration in rheological and digestive properties of O/W emulsions using controlled aggregation of konjac glucomannan and xanthan gum in aqueous phases [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110795.

[26] TAO L, WANG H, WANG J, *et al*. Characterization and emulsion stability of soybean protein isolate/soybean peptide and ginseng polysaccharide conjugates [J]. LWT, 2024, 196: 115860.

[27] GOMES A, COSTA ALR, CUNHA RL. Impact of oil type and WPI/Tween 80 ratio at the oil-water interface: Adsorption, interfacial rheology and emulsion features [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2018, 164: 272–280.

[28] FELIX M, ROMERO A, GUERRERO A. Viscoelastic properties, microstructure and stability of high-oleic O/W emulsions stabilised by crayfish protein concentrate and xanthan gum [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 64: 9–17.

[29] LU W, ZHENG B, MIAO S. Improved emulsion stability and modified nutrient release by structuring O/W emulsions using konjac glucomannan [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 120–128.

[30] SUKHOTUR R, GUO S, XING J, *et al*. Changes in physiochemical properties and stability of peanut oil body emulsions by applying gum arabic [J]. LWT, 2016, 68: 432–438.

[31] FAN C, HOU Y, ZHANG M, *et al*. Synergistic protective effects of interfacial and oil-phase antioxidants on emulsion co-encapsulated vitamin A and vitamin D by regulating antioxidant distribution, interfacial properties and oxygen diffusion [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 169: 111643.

[32] RAMONAITYTE DT, KERSIENE M, ADAMS A, *et al*. The interaction of metal ions with Maillard reaction products in a lactose–glycine model system [J]. Food Research International, 2009, 42(3): 331–336.

(责任编辑: 韩晓红　安香玉)