功能油脂

DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003－7969.240545

基于油脂凝胶化零反式/低饱和植脂末的构建及其特性研究

李自阳[1],朱蒙蒙[1],周燕霞[2],王　彬[3],张林尚[1],孙尚德[1],陈小威[1]

(1.河南工业大学 粮油食品学院,郑州 450001;2.小麦和玉米深加工国家工程研究中心,郑州 450001;
3.丹东大豆科技有限公司,辽宁 丹东 118300)

摘要:为满足对植脂末的健康要求,以油凝胶替代传统氢化/饱和基料油,构建了零反式/低饱和的健康型植脂末。以大豆油为原料,分别采用蜂蜡(B)、单甘酯(M)、小烛树蜡(C)、植物甾醇/谷维素(PO)复配作为凝胶剂,制备了 4 种油凝胶(B13C2、C10M2、PO7B5 和 PO7C5)。以油凝胶为油相,通过乳化制备油凝胶基乳液,并采用喷雾干燥法制得油凝胶基植脂末。将所制备的植脂末添加于黑咖啡中,对油凝胶、油凝胶基乳液、植脂末以及添加了植脂末的咖啡的物化特性进行了分析。结果表明:4 种油凝胶中,PO7B5 和 PO7C5 在很低的固体脂肪含量(<18%)下,可达到与传统植脂末基料油相似的硬度;4 种油凝胶基乳液的体积加权平均粒径较小(<1.5 μm),且分布较集中,喷雾干燥后的颗粒大小均一,表面含油率较低(<5%)且光滑,耐酸性好,其中 PO7B5 和 PO7C5 基植脂末包埋率达 96% 以上,溶解度高达 94% 以上;4 种油凝胶基植脂末饱和脂肪酸含量在 20% 左右,并具备“零”反式脂肪酸(反式脂肪酸含量<0.3%)特性;将油凝胶基植脂末加入黑咖啡中,对咖啡有明显的增白效果,呈现出与市售植脂末相媲美的外观效果和总体可接受度,其中 PO7C5,即 7% 植物甾醇/谷维素(质量比 6∶4)+5% 小烛树蜡油凝胶基植脂末效果最佳。综上,基于油脂凝胶化可制备出零反式/低饱和植脂末,且应用效果可与市售植脂末相媲美。

关键词:油脂凝胶化;零反式;低饱和;微胶囊;植脂末

中图分类号:TS225.6;TS273　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1003－7969(2025)12－0131－09

Fabrication and characterization of zero－*trans*/low saturated non－dairy creamer based on oleogelation

LI Ziyang[1], ZHU Mengmeng[1], ZHOU Yanxia[2], WANG Bin[3], ZHANG Linshang[1], SUN Shangde[1], CHEN Xiaowei[1]

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. National Engineering Research Center of Wheat and Corn Further Processing, Zhengzhou 450001, China; 3. Dandong Soybean Technology Co., Ltd., Dandong 118300, Liaoning, China)

Abstract: To meet the health requirements for non－dairy creamer, a healthy non－dairy creamer with zero－*trans*/low saturated fatty acids was constructed by replacing traditional hydrogenated/saturated fats with oleogels. With soybean oil as the raw material, a combination of beeswax(B), monoglyceride(M), candelilla wax(C), phytosterols/oryzanol(PO) as gelators, four types of oleogels (B13C2, C10M2, PO7B5, PO7C5) were prepared. Taking the oleogels as the oil phase, oleogel－based emulsions were prepared by emulsification, and oleogel－based non－dairy creamers were obtained via spray drying. The non－dairy creamers prepared were added to the black coffee.

收稿日期:2024－09－08;**修回日期**:2025－06－21

基金项目:河南省高校科技创新人才支持计划(24HASTIT056);河南省科技攻关项目(252102110130)

作者简介:李自阳(1999),男,硕士研究生,研究方向为油脂深加工与品质控制(E-mail)liziyang411081@163.com。

通信作者:孙尚德,教授,博士生导师,博士(E-mail)shangdesun@haut.edu.cn;陈小威,副教授,博士(E-mail)fexwchen@haut.edu.cn。

The physicochemical properties of the oleogels, oleogel – based emulsions, non – dairy creamers, and black coffee added with non – dairy creamers were analyzed. The results showed that among the four types of oleogels, PO7B5 and PO7C5 achieved a hardness similar to that of the base fat of traditional non – dairy creamer at a very low solid fat content (< 18%). The oleogel – based emulsions had a smaller weighted volume average particle size (< 1.5 μm) with a concentrated distribution. After spray drying, the microcapsules were uniform in size, with a low surface oil content (< 5%), smooth surface, and good acid resistance. Among them, the non – dairy creamers prepared using PO7B5 and PO7C5 exhibited an encapsulation efficiency of over 96% and a solubility of over 94%. The oleogel – based non – dairy creamers contained approximately 20% saturated fatty acids and featured "zero" *trans* fatty acids (*trans* fatty acid content < 0.3%). As coffee companion, the resulted zero – *trans*/low saturated oleogels – based non – dairy creamers showed a whitening effect, presenting an appearance and acceptability comparable to commercial non – dairy creamer. The non – dairy creamer prepared from the composite oleogel of 7% phytosterol/oryzanol (mass ratio 6∶4) + 5% candelilla wax was to be the most effective in the application. In conclusion, non – dairy creamers with zero – *trans*/low saturated fatty acid content can be prepared based on oleogelation, and their application effects are comparable to those of commercially available non – dairy creamers.

Key words: oleogelation; zero – *trans*; low saturation; microcapsule; non – dairy creamer

随着食品工业的发展,植脂末已成为重要的食品加工配料。植脂末因其良好的油脂氧化稳定性、水溶性和风味稳定性,被广泛应用于奶茶、咖啡、方便食品汤料、烘焙食品和固体饮料等食品中,用以增强风味、改善口感和延长货架期[1-4]。然而,传统植脂末中使用的基料油主要是氢化(部分氢化)植物油和/或高饱和固体脂肪,含有大量的反式脂肪酸和饱和脂肪酸。大量研究指出,过量摄入反式脂肪酸和饱和脂肪酸会增加心血管疾病、糖尿病和老年痴呆等发病风险[5-7]。《中国居民膳食指南(2022)》中明确建议:远离反式脂肪酸,尽可能少吃富含氢化油脂的食物,日常反式脂肪酸摄入量不宜超过 2 g,饱和脂肪酸摄入量应控制在总能量摄入量的 10% 以下。目前,行业内推行零反式植脂末替代计划,以极度氢化植物油或高熔点植物硬脂作为基料油生产零反式植脂末,但仍存在饱和脂肪酸含量过高(>60%)的问题。因此,开发零反式/低饱和植脂末对消费者的健康和食品工业具有重要意义。

数年来以营养健康为驱动,开展了零反式植脂末的制备研究。王彪[8]以大豆油和极度氢化大豆油酶法酯交换的改性油脂为基料油制备零反式植脂末,发现当两种油脂质量比为 6∶4 时,所制备的改性油脂适用于制备零反式植脂末。Wanthong 等[1]以红毛丹果仁油代替氢化植物油,制备出性质稳定的植脂末,将其加入到饮品中具有良好的感官品质。Liu 等[9]以椰子油基甘油二酯(CO – DAG)为基料油制备植脂末,DAG 含量为 50% 的 CO – DAG 表现出广泛的塑性范围,且以其为原料制备的植脂末表现出与商业产品相似的包埋率(92.74%)和热稳定性。近年来,随着对零反式、低饱和脂肪食品的高要求,利用油凝胶为基料油制备植脂末受到食品科技界和食品工业界的广泛关注[10-12]。然而,前期研究发现单独凝胶因子形成的油凝胶强度弱、稳定性差,不能满足植脂末基料油所需的质构特性,通过凝胶因子复配是开发低饱和/零反式油凝胶基植脂末的途径之一。

本研究以大豆油为原料,分别以蜂蜡、单甘酯、小烛树蜡、植物甾醇/谷维素复配作为凝胶剂,制备了 4 种油凝胶,再以油凝胶为基料油,通过乳化、喷雾干燥构建油凝胶基植脂末,探究不同油凝胶物化特性的差异,并进一步分析油凝胶基植脂末与市售植脂末的基础特性、溶解性等特性以及在咖啡中的应用效果,以期为以油凝胶作为固体脂肪替代品生产零反式/低饱和健康植脂末提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

食品级单硬脂酸甘油酯,郑州百思特食品添加剂有限公司;谷维素、植物甾醇,西安海斯夫生物科技股份有限公司;蜂蜡、小烛树蜡,上海麦克林生化科技股份有限公司;辛烯基琥珀酸酐(OSA)变性淀

粉、皂皮皂苷,宜瑞安食品配料有限公司;葡萄糖浆、大豆油、植脂末(NDC,以蛋白为壁材),购于郑州当地超市;植脂末基料油(NDCO),采用索氏抽提法从市售植脂末中得到。

1.1.2　仪器与设备

Ultra－Turrax T10 剪切分散机,德国 IKA 公司;恒温培养箱;MQC－23 脉冲核磁共振仪,上海牛津仪器科技有限公司;TA－XT Plus 物性分析仪,英国 Stable Micro Systems 公司;D2 Phaser X－射线衍射(XRD)仪,德国布鲁克 AXS 有限公司;DSC8500 差示扫描量热仪,美国 Perkin Elmer 公司;Zeiss Sigma 300 扫描电子显微镜(SEM),德国卡尔蔡司公司;Mastersizer 3000 激光粒度仪,英国 Malvern 公司;Scan Pro1166 高精度分光测色仪,美国 Hunterlab 公司;HF－6000Y 喷雾干燥机,上海贺帆仪器有限公司。

1.2　*实验方法*

1.2.1　油凝胶的制备

将蜂蜡(B)、单甘酯(M)、小烛树蜡(C)、植物甾醇/谷维素(PO)分别与大豆油混合,在 85 ℃、600 r/min 条件下加热搅拌 30 min 至完全溶解,冷却至室温后,在 20 ℃恒温培养箱中平衡 24 h,制备出 13% 蜂蜡 +2% 单甘酯的油凝胶(B13M2)、10% 小烛树蜡 +2% 单甘酯的油凝胶(C10M2)、7% 植物甾醇/谷维素(质量比 6∶4) +5% 蜂蜡的油凝胶(PO7B5)和 7% 植物甾醇/谷维素(质量比 6∶4) +5% 小烛树蜡的油凝胶(PO7C5)。

1.2.2　油凝胶基乳液的制备

将 14% 的 OSA 变性淀粉、1% 的皂皮皂苷和 5% 的葡萄糖浆加入 85 ℃的水中,在 600 r/min 下水浴搅拌使其充分溶解,得到水相;将占总体积 20% 的不同种类油凝胶在 85 ℃下完全溶解,得到油相。将油相和水相在 85 ℃下混合,并利用高速剪切分散机在 24 000 r/min 下分散 3 min,制得粗乳液。将粗乳液在冰水浴下 360 W 超声乳化 7 min,制得水包油型油凝胶基乳液。

1.2.3　油凝胶基植脂末的制备

采用喷雾干燥机对油凝胶基乳液进行喷雾干燥。参数设置:进风口温度 170 ℃,压缩空气压力 0.3 MPa,进料泵转速 18 r/min,出风口温度 70 ~ 90 ℃。当喷雾干燥机进风口温度达到 100 ℃后,在进料管路通入蒸馏水清洗管路并使进出风口温度缓慢上升。当进风口温度达到 170 ℃后,在进料管通入油凝胶基乳液进行喷雾干燥。喷雾干燥结束后,待收集罐冷却至室温,收集植脂末,避光密封干燥保存。

1.2.4　植脂末在黑咖啡中的应用

将 3 g 黑咖啡加入 85 ℃的 100 mL 热水中,完全溶解后加入 2 g 油凝胶基植脂末/市售植脂末(以未加植脂末作为空白对照)制成植脂末咖啡。

1.2.5　样品物化特性分析

1.2.5.1　油凝胶

硬度测定:将 20 g 样品置于 50 mL 烧杯中,采用圆柱探头(P/0.5R)进行穿刺实验以测定硬度,其中测试速度为 1.0 mm/s,测前和测后速度均为 3.0 mm/s,穿透深度为 10 mm[13]。滑动熔点测定:参照 GB/T 12766—2008 测定。晶型测定:采用 XRD 仪在室温下测试样品晶型,测试条件为 Cu－Kα 辐射源、扫描范围(2θ)5° ~ 70°、扫描速度 5(°)/min、步长 0.02°[14]。固体脂肪含量(SFC)测定:将 3 ~ 5 mL 熔融的油凝胶样品置于核磁管中,并置于 90 ℃的水浴中 30 min 以消除晶体记忆。将装有样品的核磁管转移至恒温水浴中,在 0 ℃下保持 1 h 以确保完全固化。测量之前,将试管置于特定温度(温度范围 0 ~ 60 ℃,每次升高 5 ℃)下放置 30 min。

1.2.5.2　油凝胶基乳液

稳定性测定:取 20 mL 油凝胶基乳液于 30 mL 玻璃小瓶中,封口后于常温(25 ℃)放置 24 h,观察乳液的分层情况。粒径分布测定:采用激光粒度仪,以去离子水为分散介质进行测定,检测前将样品用去离子水稀释 500 倍,大豆油和水的折射率分别设定为 1.440 和 1.330。

1.2.5.3　植脂末

微观形态观测:用棉签将植脂末均匀涂到贴有双面胶的样品台上,除去表面多余样品后进行 30 s 的喷金处理,在 15 kV 的加速电压下采用 SEM 观察样品表面形态。表面含油率测定:参考 Bae 等[15]的方法并稍作修改,称取 5 g 植脂末(精确至 0.000 1 g),用 45 mL 石油醚(沸程 30 ~ 60 ℃)分 3 次浸提,过滤,滤渣用 5 mL 石油醚洗涤,洗涤液与滤液合并收集至干燥锥形瓶中,在 50 ℃下旋转蒸发将石油醚完全蒸出后,将锥形瓶在 105 ℃的烘箱中烘干至恒重,计算表面含油率。总含油率测定:参照 GB 5009.6—2016 测定。植脂末包埋率计算:以总含油与表面含油差值占总含油的比例表征。植脂末水分含量、堆积角、溶解度测定:参考徐婉莉[16]的方法测定。耐酸性测定:参考王彪[8]的方法测定。脂肪酸组成测定:参照 GB 5009.168—2016 测定。复溶性测定:称取 0.5 g 植脂末分散于 5 g 蒸馏水中,利用激光粒度仪测定复溶乳液的粒径分布。

1.2.5.4 咖啡

粒径分布测定:参照 1.2.5.2 中的方法测定。色泽测定:用黑白陶瓷板对高精度分光测色仪进行校准后,将样品装入专用比色皿中静置 30 min 完全去除气泡后,测定样品的 $L*$、$a*$、$b*$ 值。感官评价:参考 GB/T 29605—2013,将样品装入透明的杯子中,并进行随机编号后,由 12 人组成的评价小组对其气味、色泽、口感和整体可接受度进行评价。

1.2.6 数据统计与分析

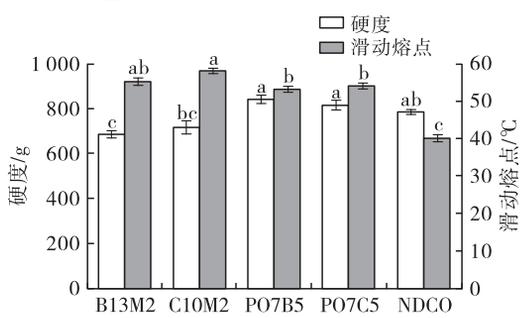
使用 SPSS 23.0 软件对数据进行 ANOVA 单因素方差分析和 Duncan 检验分析样本差异性。

2 结果与讨论

2.1 油凝胶的物化特性

2.1.1 硬度和滑动熔点

植脂末基料油的硬度和滑动熔点如图 1 所示。



注:同一指标不同字母表示具有显著差异($p<0.05$)

Note: Different letters for the same index indicate significant difference ($p<0.05$)

图 1 植脂末基料油的硬度及滑动熔点

Fig. 1 Hardness and sliding melting point of non – dairy creamer based fat

由图 1 可知,PO7B5(842 g)和 PO7C5(816 g)的硬度高于 NDCO(786 g)的,而 C10M2(717 g)和 B13M2(687 g)的硬度低于 NDCO 的,这种差异归因于油凝胶中凝胶因子含量及其成胶机制不同[17-18]。4 种油凝胶的滑动熔点在 53.37 ~ 58.27 ℃之间,均显著高于 NDCO(40.25 ℃)的($p<0.05$),这种差异归因于凝胶因子的高熔点特性,这也是油凝胶的特性之一[19]。

2.1.2 晶型

植脂末基料油的 XRD 图谱见图 2。

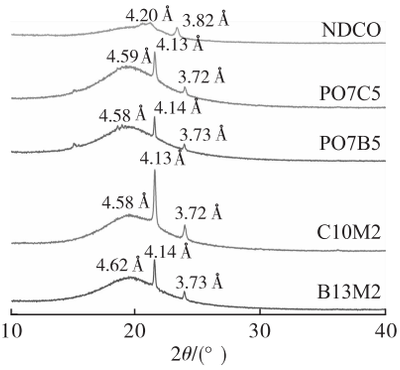


图 2 植脂末基料油的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of non – dairy creamer based fat

由图 2 可知,所有油凝胶在 3.72、4.13、4.60 Å 附近均出现了衍射峰,表明其存在 β'、α、β 晶型[20]。NDCO 在 3.82 Å 和 4.20 Å 处出现衍射峰,表明其主要存在 β' 晶型。与 NDCO 相比,油凝胶具有更多的 α 晶型和 β 晶型,β' 型晶体含量则较低。传统的 β' 晶型具有较好的塑性,其倾向于形成能够固定大量液体油的细小三维网络结构;β 晶型则倾向于形成较大的晶体颗粒,形成三维网络结构能力弱,而 α 晶型虽然能快速形成初始三维网络(冷却过程中最先析出),但其分子排列疏松,稳定性差,这可能会导致油凝胶基植脂末的表面含油率过高及较差的包埋效率[21-22]。但是,以分子自组装为机制的油脂凝胶化技术,是通过凝胶因子分子组装形成的三维网络固定液态油脂,这可能会改善油凝胶基植脂末的包埋效率[23]。

2.1.3 SFC

植脂末基料油的 SFC 见图 3。

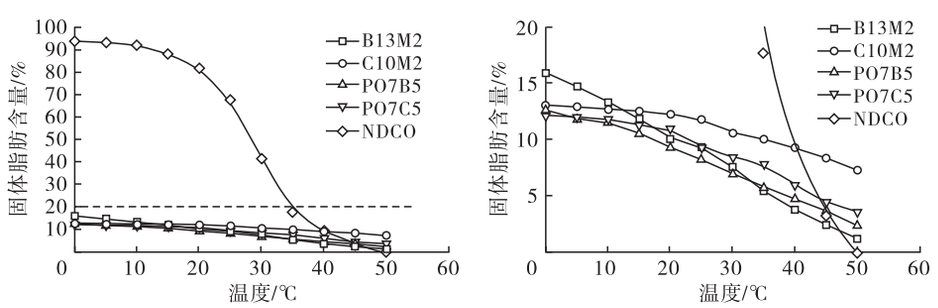


图 3 植脂末基料油的固体脂肪含量

Fig. 3 Solid fat content of non – dairy creamer based fat

由图 3 可知,油凝胶具有较低的 SFC(<18%)。NDCO 在低温时的 SFC 远大于油凝胶的,这归因于两者形成机制的差异:油凝胶是通过颗粒堆积及分子自组装形式对液态油脂进行包埋固定,而传统固

体脂肪是由高熔点甘油三酯分子结晶固化液态油脂[17,24]。NDCO 在 10 ~ 35 ℃之间 SFC 快速降低，到 50 ℃时 SFC 降为 0。这主要是由于 NDCO 大多含有大量饱和脂肪酸或反式脂肪酸，在低温下存在更多的固脂[25]。油凝胶的 SFC 含量较低，且随着温度的升高其下降速度缓慢，这归因于油凝胶独特的凝胶因子组装成三维网络的成胶机制[17]。相比于其他 3 种油凝胶，C10M2 的 SFC 曲线较为平缓，可赋予其更宽的塑性范围。

2.2　油凝胶基乳液的物化特性

2.2.1　稳定性

4 种油凝胶基乳液在室温下放置 24 h 后均未出现分层、漏油等不稳定现象，表明其具有良好的稳定性。一般地，制备好的乳液在短时间内即进行喷雾干燥，因此所构建的油凝胶基乳液满足植脂末的工业生产要求。

2.2.2　粒径分布

油凝胶基乳液粒径分布如图 4 所示。

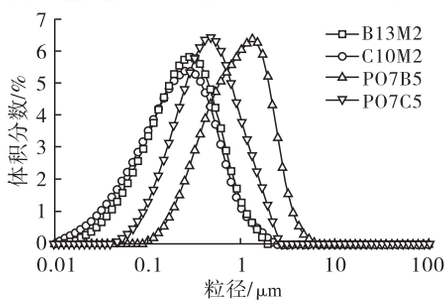


图 4　油凝胶基乳液粒径分布

Fig. 4　Particle size distribution of oleogel – based emulsion

由图 4 可知，油凝胶基乳液粒径分布曲线只有 1 个峰，说明乳液粒径分布相对集中。PO7B5 和 PO7C5 乳液相对于 B13M2 和 C10M2 乳液粒径分布曲线右移，这表明 PO7B5 和 PO7C5 乳液具有更大的平均粒径，这可能与植物甾醇/谷维素油凝胶自组装结构有关，其组装晶体结构相对于蜂蜡及小烛树蜡的尺寸更大[26]。根据油凝胶基乳液的粒径分布计算其体积加权平均粒径（$D_{4,3}$）和粒径分布宽度（Span），结果如表 1 所示。

表 1　油凝胶基乳液的 $D_{4,3}$ 和 Span

Table 1　$D_{4,3}$ and Span of oleogel – based emulsion

样品	$D_{4,3}$/μm	Span
B13M2	0.33 ± 0.01^{c}	2.32 ± 0.03^{b}
C10M2	0.31 ± 0.00^{c}	2.72 ± 0.01^{a}
PO7B5	1.20 ± 0.02^{a}	2.07 ± 0.03^{c}
PO7C5	0.59 ± 0.01^{b}	2.32 ± 0.03^{b}

注：同列不同字母表示具有差异显著（$p < 0.05$）。下同

Note：Different letters in the same column indicate significant difference（$p < 0.05$）. The same below

由表 1 可知，所有油凝胶基乳液的 Span 在 2.0 ~ 2.8 之间，分布较为居中（Span ＜10），且 $D_{4,3}$ 均小于 1.5 μm。根据斯托克斯定律，较小且均匀的液滴尺寸可很大程度上降低乳滴的沉降速度，避免液滴凝结沉积，赋予乳液高稳定性[27]。

2.3　植脂末的物化特性

2.3.1　外观及微观形态

从外观来看，油凝胶基植脂末有部分聚集现象，这可能是因为其颗粒粒径较小，在静电吸附作用下聚合成大小不一的球体[28]。植脂末的 SEM 图如图 5 所示。

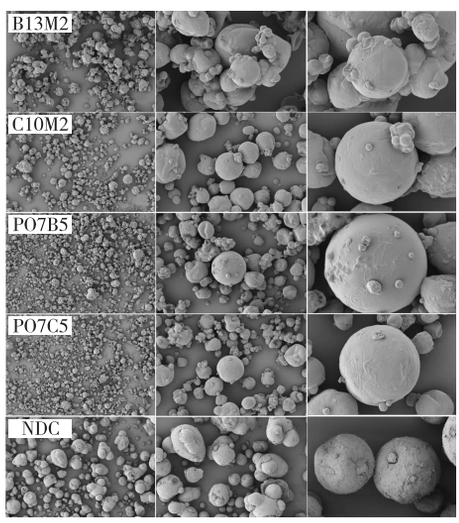


图 5　植脂末的 SEM 图

Fig. 5　SEM images of non – dairy creamer

由图 5 可知，油凝胶基植脂末颗粒大小较为均一，基本呈球形，整体表面光滑，但也存在部分颗粒的开裂或凹陷以及粘结现象。凹陷现象的出现可能是喷雾干燥过程中颗粒内部水分流失过快，引起内部塌陷，从而导致结构的凹陷[29]。NDC 颗粒较大，形状不规则，表面较为粗糙。这可能是商品植脂末多是经过流化床造粒制备，这个过程可以增加颗粒度，导致表面粗糙。B13M2 基植脂末相较于其他样品具有更多的颗粒黏聚，且颗粒分布大小不一，而 PO7C5 基植脂末具有最好的微观结构，大小均一，颗粒粒径最小，可能是最适合制备零反式/低饱和植脂末的油凝胶。

2.3.2　基本理化指标

植脂末的基本理化指标如表 2 所示。

由表 2 可知，所制备的油凝胶基植脂末的总含油率显著低于 NDC 的。B13M2 和 C10M2 基植脂末表现出较高的表面含油率，这可能是较高的蜡浓度导致植脂末外层黏度较高，从而吸附了较多油脂，这也导致其呈现出较低的包埋率[30]。而 PO7B5 和

PO7C5 基植脂末尽管水分含量较高,但其表面含油率分别为 1.02% 和 0.98%,显著低于 NDC 和 B13M2 和 C10M2 基植脂末的($p < 0.05$)。以油凝胶替代固体脂肪制备的植脂末的堆积角在 35° ~ 40°范围内,表明油凝胶基植脂末的流动性较好[31]。在溶解性方面,所有植脂末均具有较好的溶解度(93.21% ~95.48%)。此外,相较于以蛋白为壁材的传统植脂末,利用变性淀粉和天然皂苷为壁材构建的油凝胶基植脂末具有较好的耐酸性,这有利于其在酸性食品中的应用。

表 2 植脂末的基本理化指标

Table 2 Physicochemical properties of non – dairy creamer

样品	总含油率/%	表面含油率/%	包埋率/%	水分含量/%	堆积角/(°)	溶解度/%	耐酸性
B13M2	30.24 ±0.11^{c}	4.34 ±0.07^{a}	85.65 ±0.18^{d}	2.64 ±0.09^{c}	36.45 ±1.01^{a}	93.21 ±0.26^{c}	稳定
C10M2	32.41 ±0.14^{b}	2.51 ±0.02^{b}	92.26 ±0.10^{c}	2.82 ±0.05^{bc}	35.10 ±0.86^{a}	95.46 ±0.35^{a}	稳定
PO7B5	32.61 ±0.09^{b}	1.02 ±0.03^{d}	96.87 ±0.09^{a}	3.12 ±0.06^{ab}	38.18 ±1.26^{a}	94.42 ±0.48^{ab}	稳定
PO7C5	31.98 ±0.16^{b}	0.98 ±0.05^{d}	96.93 ±0.15^{a}	3.01 ±0.11^{ab}	39.06 ±0.95^{a}	94.17 ±0.21^{bc}	稳定
NDC	34.06 ±0.15^{a}	2.11 ±0.02^{c}	93.80 ±0.09^{b}	3.25 ±0.09^{a}	28.72 ±1.46^{b}	95.48 ±0.12^{a}	一般

2.3.3 脂肪酸组成

植脂末的脂肪酸组成如表 3 所示。

由表 3 可知:NDC 中含有高达 21.47% 的月桂酸(C12:0),而椰子油和棕榈仁油均有较高含量的月桂酸(45% 以上),可推测 NDC 中含有部分椰子油或棕榈仁油;同时,NDC 中有高含量的饱和脂肪酸(62.97%)和反式脂肪酸(18.74%),可推测其中含有部分氢化植物油,这从该植脂末包装上的配料标注〔含有精炼植物油(部分氢化)〕得到证实。在油凝胶基植脂末中,饱和脂肪酸含量在 20% 左右以及“零”反式脂肪酸(反式脂肪酸含量 < 0.3%,GB 28050—2011),这赋予油凝胶基植脂末零反式/低饱和的特点,提升了其健康与安全品质。

表 3 植脂末的脂肪酸组成及含量

Table 3 Fatty acid composition and content of non – dairy creamer %

脂肪酸	B13M2	C10M2	PO7B5	PO7C5	NDC
C12:0	–	–	–	–	21.47 ±0.05
C14:0	0.09 ±0.00^{e}	0.15 ±0.01^{b}	0.12 ±0.01^{c}	0.12 ±0.01^{d}	6.70 ±0.01^{a}
C16:0	13.14 ±0.01^{d}	13.22 ±0.01^{c}	13.29 ±0.02^{a}	13.28 ±0.01^{b}	12.36 ±0.01^{e}
C18:0	5.65 ±0.01^{e}	6.40 ±0.01^{b}	6.14 ±0.02^{c}	6.13 ±0.03^{d}	22.15 ±0.02^{a}
C18:1	23.44 ±0.03^{d}	25.87 ±0.02^{a}	24.42 ±0.05^{c}	24.43 ±0.02^{b}	18.06 ±0.03^{e}
C18:1*t*	0.03 ±0.00^{c}	0.04 ±0.00^{b}	0.02 ±0.00^{d}	0.01 ±0.00^{e}	18.03 ±0.01^{a}
C18:2	57.23 ±0.04^{a}	53.91 ±0.04^{d}	55.53 ±0.03^{b}	55.51 ±0.04^{c}	0.23 ±0.03^{e}
C18:2*t*	0.02 ±0.00^{e}	0.03 ±0.01^{d}	0.11 ±0.00^{b}	0.10 ±0.00^{c}	0.71 ±0.01^{a}
C20:0	0.40 ±0.01^{b}	0.40 ±0.01^{a}	0.38 ±0.01^{c}	0.37 ±0.00^{d}	0.30 ±0.00^{e}
SFA	19.28 ±0.02^{e}	20.16 ±0.03^{b}	19.92 ±0.04^{c}	19.90 ±0.04^{d}	62.97 ±0.05^{a}
UFA	80.72 ±0.07^{a}	79.84 ±0.06^{d}	80.07 ±0.08^{b}	80.06 ±0.06^{c}	37.04 ±0.06^{e}
TFA	0.05 ±0.00^{d}	0.07 ±0.01^{c}	0.12 ±0.01^{b}	0.12 ±0.00^{b}	18.74 ±0.01^{a}

注:– 表示未检出;SFA. 饱和脂肪酸;UFA. 不饱和脂肪酸;TFA. 反式脂肪酸。同行不同字母表示具有差异显著($p < 0.05$)

Note: –. Not detected; SFA. Saturated fatty acid; UFA. Unsaturated fatty aicd; TFA. *Trans* fatty acid. Different letters in the same row indicate significant difference ($p < 0.05$)

2.3.4 复溶性

外观上,植脂末复溶乳液均呈白色均匀的乳状液,表面无结膜,不分层,倾斜小瓶,无粒子挂壁,放置 24 h 后外观无变化,表现出良好的复溶稳定性。植脂末复溶乳液的粒径分布见图 6。根据油凝胶基乳液粒径分布计算其 $D_{4,3}$ 和 Span 值,结果如表 4 所示。

由图 6、表 4 可知:相较于植脂末原乳液(图 4),油凝胶基植脂末复溶乳液粒径分布曲线整体向大粒径方向移动,峰值降低,且在大颗粒粒径区域出现新峰,这可能是由于油凝胶基植脂末在水中弱分散性伴随着乳滴聚集的影响[32];PO7B5 基植脂末复溶乳液的粒径相较于原乳液粒径略微降低;PO7B5 和 PO7C5 基植脂末复溶乳液的粒径分布曲线相对于 B13M2 和 C10M2 基植脂末复溶乳液的小颗粒峰值更高,大颗粒的峰值更低,Span 更小,表明其颗粒分布更加集中,且主要以小颗粒为主。油凝胶基植脂末复溶乳液的 $D_{4,3}$ 较小(1.01 ~2.41 μm),但均显著高于 NDC 的(0.37 μm),这是由乳化剂配方的差异造成的。

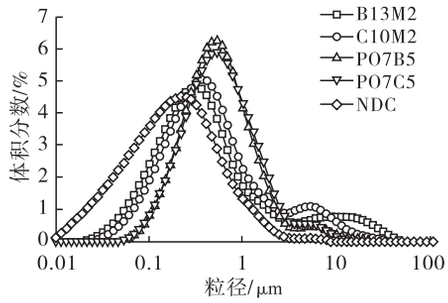


图 6　植脂末复溶乳液的粒径分布

Fig. 6　Particle size distribution of rehydrated emulsion of non – dairy creamer

表 4　植脂末复溶乳液的 $D_{4,3}$ 和 Span

Table 4　$D_{4,3}$ and Span of rehydrated emulsion of non – dairy creamer

样品	$D_{4,3}$/μm	Span
B13M2	2.41 ± 0.52^{a}	18.03 ± 5.40^{a}
C10M2	1.51 ± 0.13^{b}	9.19 ± 0.81^{ab}
PO7B5	1.02 ± 0.03^{bc}	2.86 ± 0.02^{b}
PO7C5	1.01 ± 0.03^{bc}	3.01 ± 0.12^{b}
NDC	0.37 ± 0.01^{c}	3.83 ± 0.02^{b}

2.4　咖啡的物化特性

2.4.1　粒径分布与色泽

添加植脂末咖啡的粒径分布如图 7 所示，其 $D_{4,3}$、Span 和色泽如表 5 所示。

从图 7 可知，黑咖啡的粒径分布曲线有 2 个峰，粒径分布较为分散。当加入 PO7B5 和 PO7C5 基植脂末后，虽然峰右移，粒径变大，但粒径分布更集中，粒径大（$D_{4,3}$ > 10 μm）的液滴较少。植脂末常作为咖啡伴侣替代牛奶加入咖啡中，为咖啡增白，提升咖啡的视觉吸引力，同时赋予咖啡顺滑的口感和浓郁的风味。本研究发现，植脂末的加入降低了咖啡的颜色，使其从褐色转变为黄棕色，这从 b^* 值由 1.78 增加到 13.08 ~ 15.75 也可观察到（表 5）。同时，植脂末赋予咖啡更高的视觉白度，这一现象从 L^* 值的变化得到证实。研究表明，植脂末因具有较大的粒径，可导致高的光散射效应，从而赋予咖啡更高的视觉白度[16]。由表 5 可知，黑咖啡的 $D_{4,3}$ 为 0.20 μm，显著小于加入了植脂末的咖啡，但黑咖啡具有较大的 Span（9.84）。除 C10M2 基植脂末外，其他植脂末的添加均显著降低了咖啡 Span（p < 0.05），其中添加 PO7B5 基植脂末咖啡的 Span 最小（4.85）。

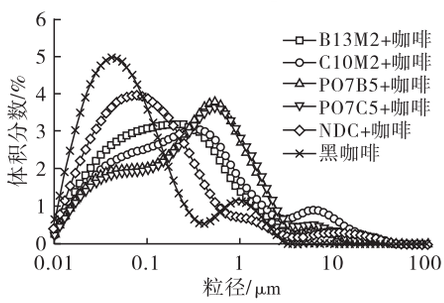


图 7　添加植脂末咖啡的粒径分布

Fig. 7　Particle size distribution of coffee with non – dairy creamer

表 5　添加植脂末咖啡的粒径与色泽

Table 5　Particle size and color parameters of coffee with non – dairy creamer

样品	$D_{4,3}$/μm	Span	L^*	a^*	b^*
B13M2 + 咖啡	0.97 ± 0.07^{e}	7.88 ± 0.21^{d}	35.70 ± 0.05^{a}	9.91 ± 0.04^{d}	15.04 ± 0.06^{e}
C10M2 + 咖啡	1.42 ± 0.12^{a}	15.36 ± 1.89^{a}	34.33 ± 0.03^{b}	10.18 ± 0.02^{c}	15.24 ± 0.02^{b}
PO7B5 + 咖啡	0.81 ± 0.02^{d}	4.85 ± 0.04^{f}	34.28 ± 0.03^{b}	10.64 ± 0.02^{a}	15.75 ± 0.07^{a}
PO7C5 + 咖啡	1.02 ± 0.02^{b}	5.29 ± 0.04^{e}	33.77 ± 0.02^{c}	10.51 ± 0.02^{b}	14.94 ± 0.07^{d}
NDC + 咖啡	0.79 ± 0.06^{e}	8.16 ± 0.41^{c}	33.05 ± 0.20^{d}	9.30 ± 0.12^{e}	13.08 ± 0.24^{e}
黑咖啡	0.20 ± 0.00^{f}	9.84 ± 0.07^{b}	20.19 ± 0.14^{e}	3.37 ± 0.07^{f}	1.78 ± 0.03^{f}

2.4.2　感官评价

对添加植脂末的咖啡进行感官评价，结果如图 8 所示。

由图 8 可知，在气味方面，添加了 NDC 的咖啡得分最高，这可能是因为市售植脂末中加入了风味剂，同时市售植脂末用酪蛋白酸钠和乳清粉为壁材，这些壁材可为其提供更多的奶香味。在口感方面，添加了 NDC 的咖啡相对于纯黑咖啡具有明显的优势。在色泽方面，添加 PO7C5 基植脂末的咖啡具有与添加 NDC 的咖啡类似的色泽，而在总体可接受度上表现优异。因此，PO7C5 基植脂末可替代传统植脂末赋予咖啡良好的口感。

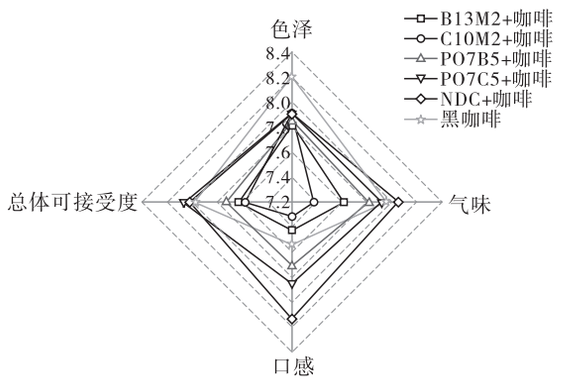


图 8　添加植脂末咖啡的感官评价

Fig. 8　Sensory evaluation of coffee with non – dairy creamer

3 结 论

以食品级的蜂蜡、小烛树蜡、单甘酯、植物甾醇/谷维素复配凝胶剂制备的 4 种油凝胶(B13M2、C10M2、PO7B5 和 PO7C5)中,PO7B5 和 PO7C5 在较低的固体脂肪含量(<18%)下可达到与传统植脂末基料油相似的硬度。4 种油凝胶基乳液的 $D_{4,3}$ 较小(<1.5 μm),且分布较集中(Span 为 2.0~2.8),喷雾干燥后的颗粒大小均一,表面光滑且耐酸性好,溶解度达到 93.21%~95.46%,其中以 PO7B5 和 PO7C5 为基料油制备的植脂末包埋率达 96% 以上,溶解度高达 94% 以上;在油凝胶基植脂末中,饱和脂肪酸含量在 20% 左右,并具备“零”反式脂肪酸(TFA <0.3%)特性。将油凝胶基植脂末加入咖啡后,对咖啡有明显的增白效果,添加 PO7C5 基植脂末的咖啡具有与添加市售植脂末的咖啡类似的色泽,且在总体可接受度上表现优异。综上,油脂凝胶化可制备符合消费者要求的零反式/低饱和的植脂末,PO7C5 基植脂末在咖啡中的应用效果最佳。本研究结果有助于推动油凝胶作为固体脂肪替代品,用于生产零反式/低饱和健康植脂末,进而促进其在咖啡、酸性饮料等食品中的应用。

参考文献:

[1] WANTHONG T, KLINKESORN U. Rambutan (*Nephelium lappaceum*) kernel olein as a non - hydrogenated fat component for developing model non - dairy liquid creamer: Effect of emulsifier concentration, sterilization, and pH[J]. J Food Sci Technol, 2020, 57(12): 4404 - 4413.

[2] CHUNG C, SHER A, ROUSSET P, et al. Use of natural emulsifiers in model coffee creamers: Physical properties of Quillaja saponin - stabilized emulsions [J]. Food Hydrocolloid, 2017, 67: 111 - 119.

[3] 蔡云升, 于金换, 王艳平. 冷饮专用植脂末的生产及其在冷饮中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2007(z1): 331 - 333, 249.

[4] EL - ADLY E F, EL - DAMATY E, EL - WASEIF M A. Effect of using non - dairy creamer as a fat substitution on quality properties of cake[J]. Egypt J Chem, 2023, 66(3): 69 - 78.

[5] VERNEQUE B J F, MACHADO A M, DE ABREU AILV A, et al. Ruminant and industrial *trans* - fatty acids consumption and cardiometabolic risk markers: A systematic review[J]. Crit Rev Food Sci, 2022, 62(8): 2050 - 2060.

[6] PUZYRENKO A M, CHEKMAN I S, BRIUZHINA T S, et al. Influence of antihypertensive and metabolic drugs on fatty acids content of lipids in cardiomyocytes of rats with spontaneous hypertension[J]. Ukr Biokhim Zh, 2013, 85(4): 67 - 74.

[7] ISLAM M A, AMIN M N, SIDDIQUI S A, et al. *Trans* fatty acids and lipid profile: A serious risk factor to cardiovascular disease, cancer and diabetes[J]. Diabetes Metab Syndr Clin Res Rev, 2019, 13(2): 1643 - 1647.

[8] 王彪. 零反式脂肪酸植脂末的制备[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2014.

[9] LIU X, XU W, WANG W, et al. Physicochemical properties and feasibility of coconut oil - based diacylglycerol as an alternative fat for healthy non - dairy creamer[J/OL]. Food Chem X, 2023, 19: 100749[2024 - 09 - 08]. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100749.

[10] DAI H, LIU Y, ZHENG X, et al. Fabrication and characterization of non - diary whipped creams: Influence of oleogel[J/OL]. Food Chem, 2025, 471: 142858[2024 - 09 - 08]. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.142858.

[11] TORO - VAZQUEZ J F. Development of *trans* - free lipid systems and their use in food products[M]. London: Royal Society of Chemistry, 2022.

[12] SOLEIMANIAN Y, TANTI R, SHAW N, et al. Novel strategies for structuring liquid oils, their applications, and health implications[M]// PALLA C, VALOPPI F. Advances in oleogel development, characterization, and nutritional aspects. Cham: Springer International Publishing, 2024: 39 - 76.

[13] MENG Z, GUO Y, WANG Y, et al. Oleogels from sodium stearoyl lactylate - based lamellar crystals: Structural characterization and bread application [J]. Food Chem, 2019, 292: 134 - 142.

[14] ZHAO M, LAN Y, CUI L, et al. Physical properties and cookie - making performance of oleogels prepared with crude and refined soybean oil: A comparative study[J]. Food Funct, 2020, 11(3): 2498 - 2508.

[15] BAE E K, LEE S J. Microencapsulation of avocado oil by spray drying using whey protein and maltodextrin[J]. J Microencapsul, 2008, 25(8): 549 - 560.

[16] 徐婉莉. 椰子甘油二酯油的理化特性及其在植脂末中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.

[17] MARTINS A J, CERQUEIRA M A, PASTRANA L M, et al. Sterol - based oleogels′ characterization envisioning food applications[J]. J Sci Food Agric, 2019, 99(7): 3318 - 3325.

[18] MATHESON A, DALKAS G, CLEGG P S, et al. Phytosterol - based edible oleogels: A novel way of replacing saturated fat in food[J]. Nutr Bull, 2018, 43(2): 189 - 194.

[19] 左锋, 李雪, 杨舒, 等. 肉桂酸基油脂凝胶的制备及其流变特性和结晶特性分析[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 16 – 21.

[20] ZHAO M, XU M, MONONO E, et al. Unlocking the potential of minimally processed corn germ oil and high oleic soybean oil to prepare oleogels for bakery application [J]. Food Funct, 2020, 11(12): 10329 – 10340.

[21] LUPI F R, GRECO V, BALDINO N, et al. The effects of intermolecular interactions on the physical properties of organogels in edible oils[J]. J Colloid Interface Sci, 2016, 483: 154 – 164.

[22] HAN L, LI L, LI B, et al. Effect of high pressure microfluidization on the crystallization behavior of palm stearin – palm olein blends[J]. Molecules, 2014, 19(4): 5348 – 5359.

[23] PÉREZ – MARTÍNEZ J D, SÁNCHEZ – BECERRIL M, MARANGONI A G, et al. Structuration, elastic properties scaling, and mechanical reversibility of candelilla wax oleogels with and without emulsifiers[J]. Food Res Int, 2019, 122: 471 – 478.

[24] JIA J, ZHANG J, CHEN X W, et al. Towards the development of novel bicomponent phytosterol – based oleogels with natural phenolics[J/OL]. Food Chem, 2023, 429: 136895[2024 – 09 – 08]. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136895.

[25] NAREEPAN N, LINNA T, CHAMNAN P. Analysis of *trans* fatty acid in some foods by attenuated total reflection – Fourier transform infrared spectroscopy[J]. J Health Res, 2009, 23(4): 185 – 190.

[26] CALLIGARIS S, MIROLO G, DA PIEVE S, et al. Effect of oil type on formation, structure and thermal properties of γ – oryzanol and β – sitosterol – based organogels[J]. Food Biophys, 2014, 9(1): 69 – 75.

[27] HOGAN S A, MCNAMEE B F, O′RIORDAN E D, et al. Emulsification and microencapsulation properties of sodium caseinate/carbohydrate blends[J]. Int Dairy J, 2001, 11(3): 137 – 144.

[28] BERTOLINI A C, SIANI A C, GROSSO C R. Stability of monoterpenes encapsulated in gum Arabic by spray – drying[J]. J Agric Food Chem, 2001, 49(2): 780 – 785.

[29] TONON R V, GROSSO C R F, HUBINGER M D. Influence of emulsion composition and inlet air temperature on the microencapsulation of flaxseed oil by spray drying[J]. Food Res Int, 2011, 44(1): 282 – 289.

[30] CHEW S C, TAN C P, NYAM K L. Microencapsulation of refined kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) seed oil by spray drying using β – cyclodextrin/gum arabic/sodium caseinate[J]. J Food Eng, 2018, 237: 78 – 85.

[31] FUCHS M, TURCHIULI C, BOHIN M, et al. Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidised bed agglomeration[J]. J Food Eng, 2006, 75(1): 27 – 35.

[32] 梁贵江, 曾茂茂, 何志勇, 等. 大豆分离蛋白及其不同酶法水解产物对植脂末乳化稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 20 – 24.

(上接第 117 页)

[11] VUCANE S, CINKMANIS I, JUHNEVICA – RADENKOVA K, et al. Revolutionizing phenolic content determination in vegetable oils: A cutting – edge approach using smartphone – based image analysis[J/OL]. Foods, 2024, 13(11): 1700[2024 – 08 – 22]. https://doi.org/10.3390/foods13111700.

[12] LORENZO N D, DA ROCHA R A, PAPAIOANNOU E H, et al. Feasibility of using a cheap colour sensor to detect blends of vegetable oils in avocado oil[J/OL]. Foods, 2024, 13(4): 572[2024 – 08 – 22]. https://doi.org/10.3390/foods13040572.

[13] GAO H, SUN D, ZHOUY, et al. Experimental study on oil colour grading based on uniform colour space[J/OL]. J Phys: Conf Ser, 2023, 2428(1): 12007[2024 – 08 – 22]. https://doi.org/10.1088/1742 – 6596/2428/1/012007.

[14] 闯家亮, 段中兴. 基于图像处理的油脂色泽检测系统研究[J]. 计算机工程, 2012,38(24):235 – 238, 243.

[15] 沈乐丞, 曾秀英, 温志刚, 等. 基于近红外光谱技术的赣南茶油掺假快速鉴别[J]. 中国油脂, 2022,47(6): 62 – 67.

[16] 王立琦, 崔月, 张欢, 等. 基于 SVM 的大豆油脂色泽近红外光谱分析[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(8): 115 – 119.

[17] 吴晓婷, 闫德勤. 数据降维方法分析与研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(8): 2832 – 2835.