

急冷温度及凝胶剂添加量对植物甾醇/谷维素油凝胶物理特性的影响

张欢¹, 孙尚德¹, 时紫云¹, 张浩¹, 陈小威^{1,2}

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 河南工业大学国家工程实验室/省重点实验室, 郑州 450001)

摘要:为促进植物甾醇/谷维素油凝胶在零反式、低饱和的营养型塑性脂肪中的应用,以大豆油为基料油,植物甾醇/谷维素为凝胶剂,在不同急冷温度(5、20℃)及凝胶剂添加量下制备油凝胶,测定不同急冷温度及凝胶剂添加量下植物甾醇/谷维素油凝胶的晶型、晶体形态、物理稳定性、质构和热力学特性的变化。结果表明:随着凝胶剂添加量的升高,油凝胶中晶体排列逐渐致密,硬度增大,熔点升高;尽管急冷温度对油凝胶的晶型(β 晶型)没有明显影响,但相对于5℃急冷,20℃急冷得到的油凝胶晶体组装更为致密,物理稳定性增强;在与传统甘三酯固脂对比 SFC 与硬度和熔点的关系中发现,在油凝胶体系中熔点随 SFC 的增加呈现非线性关系增长,但低固体脂肪含量(4.85%)即可赋予植物甾醇/谷维素油凝胶较高的硬度。综上,急冷温度及凝胶剂添加量对植物甾醇/谷维素油凝胶的物理特性具有显著的影响。

关键词:急冷温度;凝胶剂添加量;植物甾醇;谷维素;油凝胶;物理特性

中图分类号:TS201.7;TS227 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)03-0090-06

Effect of rapid cooling temperature and gelator dosage on the physical properties of phytosterol/oryzanol oleogels

ZHANG Huan¹, SUN Shangde¹, SHI Ziyun¹, ZHANG Hao¹, CHEN Xiaowei^{1,2}

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. National Engineering Laboratory/Key Laboratory of Henan Province, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To promote the utilization of the phytosterol/oryzanol oleogels in the development of zero-*trans*, low saturated and nutritional plastic fats, with soybean oil as base oil, phytosterol/oryzanol as gelator, oleogels was prepared under different rapid cooling temperature (5, 20℃) and gelator dosages, and the changes of crystal form, crystal morphology, physical stability, texture and thermodynamic properties of phytosterol/oryzanol oleogels were investigated. The results showed that the hardness and melting point of the oleogels increased with the increase of gelator dosage, attributing to a denser arrangement of crystals. Although no obvious effect on the β crystal form of oleogels by rapid cooling temperature, the rapid cooling at 20℃ resulted in a denser crystals and higher physical stability compared with rapid cooling at 5℃. Compared with the traditional triglyceride solid fat, the relationship between SFC and hardness as well as melting point showed that the melting point increased in a non-linear with the increase of SFC in the oleogels system.

收稿日期:2021-12-14;修回日期:2022-11-23

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2022B0202010003);
河南工业大学粮油食品学科国家工程实验室/省重点实验室
开放课题(NL2021002)

作者简介:张欢(1995),女,硕士研究生,研究方向为油脂
加工与品质(E-mail)H2281988335@163.com。

通信作者:陈小威,讲师,博士(E-mail)fexwchen@haut.
edu.cn。

Interestingly, a low SFC(4.85%) endowed a high hardness of phytosterol/oryzanol oleogels. To sum up, the rapid cooling temperature and gelator dosage have significant effect on the physical properties of phytosterol/oryzanol oleogels.

Key words: rapid cooling temperature; gelator dosage; phytosterol; oryzanol; oleogel; physical property

油凝胶(Oleogel)是指液态油脂被束缚在由凝胶剂通过分子间相互作用构建的网络结构中,形成的一种半固态或固态的塑性脂肪^[1]。油脂凝胶化技术在食品、医药和化妆品等领域中应用,具有以下3点优势:①可限制油脂的流动和迁移;②降低饱和脂肪酸和替代反式脂肪酸,开发低饱和/零反式人造奶油、起酥油等油脂制品;③凝胶剂具有双亲性,能更好地包埋生物活性物质(营养素、药物等)并控制其释放^[2-4]。因此,油凝胶越来越受到食品行业的广泛关注。

植物甾醇是一类广泛存在于植物中的天然活性物质,主要包括 β -谷甾醇、豆甾醇、菜油甾醇、菜籽甾醇等。大量研究证实,植物甾醇具有抑制胆固醇吸收、预防冠状动脉粥样硬化类心脏病等功效^[5-6]。2000年9月,美国食品与医药管理局(FDA)批准添加植物甾醇的食品属于“有益健康”范畴。2010年3月,我国批准植物甾醇为新资源食品。Bot等^[7-8]首次发现植物甾醇与谷维素通过植物甾醇的C-3位羟基和谷维素的羰基氧之间发生氢键相互作用,组装成纳米管状体(直径约为7.2 nm)。这些管状体可进一步组成三维网络结构,诱捕液态油脂形成透明的油凝胶^[5,9]。与此同时,大量研究还发现在不同油凝胶体系中,受凝胶剂以及凝胶化机制的影响,急冷温度对油凝胶的物理特性存在较大影响^[10-12]。尽管众多研究分析了不同油脂类型和凝胶剂浓度对植物甾醇/谷维素油凝胶微观结构和物化性能的影响,并认为可替代反式/高饱和脂肪应用于食品加工,但仍缺乏工艺条件(如急冷温度)对油凝胶不同尺度结构(如纳米尺度相互作用、微观结构、超分子结构、宏观性能)物理特性影响的研究^[9,11-14]。基于此,本文以大豆油为基料油,以植物甾醇/谷维素为凝胶剂制备油凝胶,利用差示扫描量热(DSC)、脉冲核磁共振(p -NMR)、X射线衍射(XRD)、偏振光显微(PLM)及质构等技术探究了不同急冷温度及凝胶剂添加量对植物甾醇/谷维素油凝胶热力学特性、物理稳定性、结晶特性和机械性能的影响,旨在推进该体系替代反式/高饱和脂肪在人造奶油、起酥油等制品中应用的工业化进程。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

植物甾醇(纯度95%)、谷维素(纯度98%),西安海斯夫生物科技有限公司;一级精炼大豆油,采购于当地超市。

1.1.2 仪器与设备

AUY200分析天平,日本Shimadzu公司;DRHH-SW4数显恒温磁力搅拌水浴锅,上海双捷实验设备有限公司;XPV-203Z偏振光显微镜,德国卡尔蔡司;MQC-23脉冲式核磁共振仪,英国Oxford公司;D8 X-射线衍射仪,德国布鲁克AXS有限公司;TA.XT Plus质构仪,英国SMS公司;NETZSCH 204 F1差示扫描量热仪,德国耐驰仪器制造有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油凝胶的制备

将植物甾醇与谷维素等物质的量比混合作为凝胶剂。在大豆油中分别加入5%、8%、10%的凝胶剂,然后在95℃磁力搅拌下加热1 h至澄清透明。将样品分别置于5℃或20℃的恒温培养箱中贮藏24 h,使体系降温至结晶温度形成凝胶(急冷阶段),取出后置于20℃恒温培养箱孵化稳定24 h(熟化阶段),得到油凝胶。

1.2.2 质构特性分析

采用质构仪测定油凝胶样品的硬度。取熔融样品装入50 mL的玻璃烧杯中,置于20℃恒温培养箱内贮存48 h后进行质构测试。选用P/0.5R探针;探针以2 mm/s的测前速度,1 mm/s的测中速度,1 mm/s的测后速度压入油凝胶样品;压缩样品2次,下压深度为10 mm;触发力为1.0 g;每个样品重复测定3次。

1.2.3 固体脂肪含量(SFC)测定

将熔融样品(95℃下融化30 min以消除结晶记忆)装入核磁玻璃管中,样品高度(4±1) cm。将待测样品试管分别放入5℃和20℃恒温培养箱成胶24 h,然后置于20℃恒温培养箱中24 h,再在水浴锅中依次在20、25、30、35、40℃和45℃下分别孵化30 min,测得各温度下的SFC。

1.2.4 物理稳定性分析

持油性用于表征油凝胶的物理稳定性。取1 g左右的油凝胶样品于已称质量(a)的2 mL离心管中,称总质量(b)。然后以9 000 r/min离心15 min,将离心管倒置5 min,沥干游离油并称取剩余质量(c),按公式(1)计算持油性(O_{BC})。

$$O_{BC} = (b - c) / (b - a) \times 100\% \quad (1)$$

1.2.5 熔点测定

参照GB/T 12766—2008测定熔点。

1.2.6 热性质分析

采用差示扫描量热仪进行热性质分析。精确称取8.0~12.0 mg油凝胶样品于铝坩埚内并加盖密封,升温速率为5℃/min,温度范围为20~80℃。

1.2.7 微观结构分析

取少许油凝胶样品置于偏振光显微镜的载玻片上,以垂直下压的方式盖上盖玻片。在偏振光下放大200倍观察样品中晶态聚集体形貌和三维网络,并利用相机进行图像采集。

1.2.8 晶型分析

取适量油凝胶样品平铺在检测片上,用X-射线衍射仪测定样品的晶型,扫描条件:扫描范围 2θ $5.0^\circ \sim 60.0^\circ$,扫描步长 0.02° ,测试温度 25°C 。

2 结果与讨论

2.1 急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶质地和SFC的影响

不同急冷温度及凝胶剂添加量下形成的植物甾醇/谷维素油凝胶外观及硬度如图1所示。

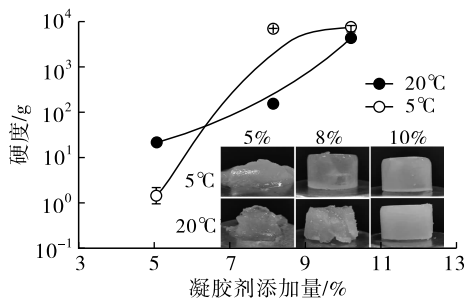


图1 急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶外观与硬度的影响

从图1可知,油凝胶整体呈黄色、半透明状。同一急冷温度下,随着植物甾醇/谷维素凝胶剂添加量的增加,样品硬度增大,这是由于在高凝胶剂含量下形成了更为致密的三维网络结构。此外,相比于 20°C 急冷, 5°C 急冷形成的油凝胶硬度提升更加明显,这可能与不同温度下植物甾醇/谷维素组装形成的晶体形态有关^[5,12]。而随着凝胶剂添加量的增加,样品透明度降低,相比于 20°C 急冷, 5°C 急冷得到的油凝胶透明度更好,这可能是不同温度下冷却对自组装体大小的影响而导致透光性的差异^[15]。

SFC是塑性脂肪的一个重要物理指标。急冷温度(5°C 、 20°C)和凝胶剂添加量对油凝胶SFC的影响如图2所示。从图2可知,随着凝胶剂添加量的增加,样品中SFC也逐渐升高,但显著低于相似硬度的传统饱和脂肪结晶体系的SFC($>50\%$),这是凝胶因子组装作用下束缚液态油脂的主要特点。这种差异归因于塑性脂肪形成的机制不同:以植物甾醇/谷维素为凝胶剂的油凝胶体系是由凝胶因子的分子组装形成三维网络结构实现对液态油脂的固化,而传统脂肪是由高熔点的甘三酯分子结

晶实现对液态油脂的固化^[5,9]。这也表明,不同于传统塑性脂肪的表征,SFC可能并不适宜于油凝胶体系^[16]。从图2还可知, 5°C 急冷得到的油凝胶中SFC总体高于 20°C 急冷下的油凝胶。相比于 20°C 急冷, 5°C 急冷得到的油凝胶在 $20 \sim 45^\circ\text{C}$ 范围内SFC降低不明显,表现出更宽的塑性范围。

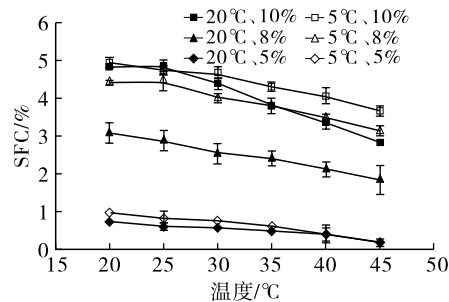


图2 急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶SFC的影响

2.2 急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶物理稳定性的影响(见图3)

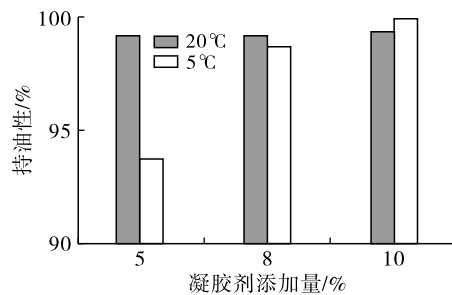


图3 急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶持油性的影响

由图3可知,不同急冷温度及凝胶剂添加量下的油凝胶持油性均在90%以上,表明植物甾醇/谷维素油凝胶具有良好的物理稳定性。此外,在相同急冷温度下,随着凝胶剂添加量的增加,持油性逐渐升高,这归因于高凝胶剂浓度下组装体对液态油脂分子的高效束缚^[17]。然而相较于 20°C 急冷, 5°C 急冷对植物甾醇/谷维素油凝胶的物理稳定性总体表现出不利影响,这可能是不同急冷温度下凝胶因子相互作用下分子组装进程差异的结果^[10,18]。综上所述可知, 20°C 急冷更有利于植物甾醇/谷维素油凝胶的稳态化制备。这一现象也在Davidovich-Pinhas等^[10]研究乙基纤维素油凝胶体系中发现,并证明高急冷温度可有效促进氢键网络的形成。

2.3 急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶热力学特性的影响(见图4)

熔点和差示扫描量热(DSC)可为塑性脂肪的热性质分析提供依据。从图4可知,随着凝胶剂添加量的增加,油凝胶熔点逐渐升高。在相对低凝胶剂

添加量($\leq 8\%$)下,20℃急冷温度下得到的油凝胶具有较高的熔点;而在凝胶剂添加量10%时,5℃急冷温度更有利于高熔点油凝胶的形成。从DSC熔化曲线可以看出,油凝胶样品均出现明显的熔化峰,

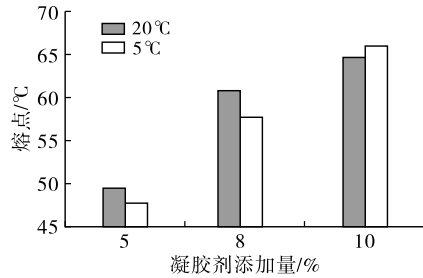
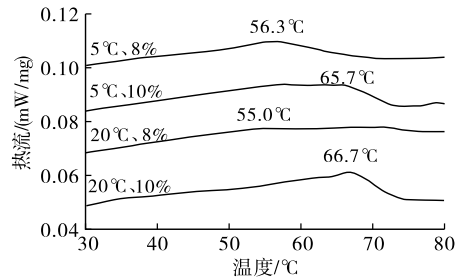


图4 急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶熔点及热稳定性的影响

且随着凝胶剂添加量的增加,熔化峰逐渐向高温方向移动,说明高凝胶剂添加量下更有利于稳定晶型(如 β 型)的形成。这与Kamali等^[19]报道的单甘酯油凝胶结果一致。



2.4 急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶微观结构的影响

三维网络结构的存是油凝胶形成的基础。采用偏振光显微镜观察急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶内部晶态聚集体形貌和三维晶态网络结构的影响,结果见图5。

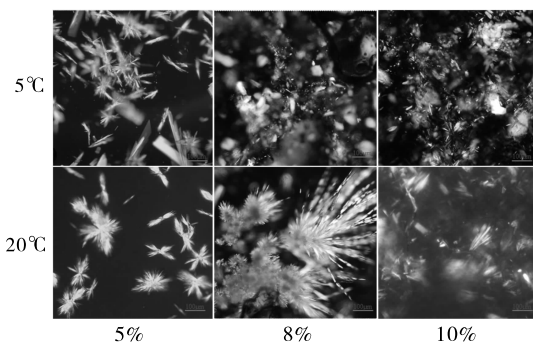


图5 急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶微观结构的影响

从图5可知,不同凝胶剂添加量下油凝胶中的晶体形状和分布存在明显差异。随着凝胶剂添加量

的增加,晶体形状从分散片型转变成片状聚集的玫瑰簇状,分布更致密。相比于5℃急冷,20℃急冷下晶体组装更为致密。这归因于高温下有利于凝胶剂分子在植物油中的运动与相互作用^[11]。

2.5 急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶晶体结构的影响(见图6)

由图6可以看出,相同凝胶剂添加量下,5℃和20℃急冷温度下油凝胶晶型相同。随着植物甾醇/谷维素凝胶剂添加量的增加,油凝胶体系中衍射峰的数量增多,这一点与在偏振光显微图中观察的结果一致(图5)。此外,不同凝胶剂添加量下得到的油凝胶均在0.46 nm和0.48 nm处存在较强的衍射峰,其峰为 β 型晶体特征峰^[20],表明主要存在 β 晶型,这与前人^[21]研究一致。随着凝胶剂添加量的增加,在0.59 nm和0.63 nm处出现新的衍射峰,说明油凝胶的结晶排列变得更加致密有序。韩立娟^[22]研究中也发现高植物甾醇/磷脂凝胶剂浓度下初级自组装体的分子排列更加有序。

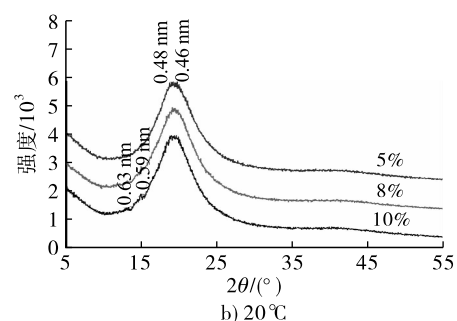
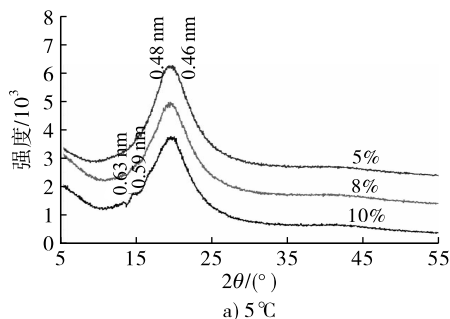


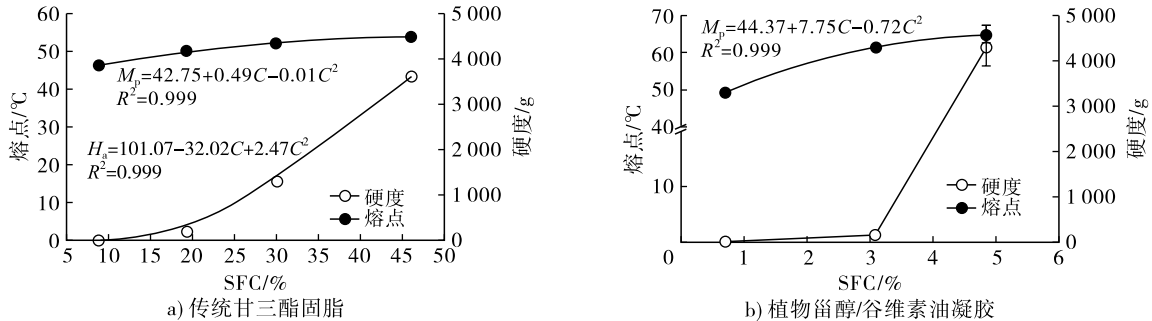
图6 急冷温度及凝胶剂添加量对油凝胶晶体结构的影响

2.6 传统甘三酯油脂和油凝胶中SFC与硬度和熔点的关系

基于以上急冷温度对植物甾醇/谷维素油凝胶物理特性的影响,进一步考察了20℃急冷得到的植物甾醇/谷维素油凝胶与棕榈油基固脂(棕榈硬脂

与大豆油混合)硬度、熔点与SFC的关系,结果如图7所示。从图7a可以看出,传统甘三酯固脂的熔点和硬度随SFC的增加呈现非线性关系增长,其中当SFC大于20%时硬度呈现快速增加趋势。从图7b可以看出,在油凝胶体系中,熔点随SFC的

增加呈现非线性关系增长。然而,油凝胶硬度在较低 SFC(3.1%) 时为 157.48 g,随后急剧增加,在 SFC 为 4.85% 时就可达到 4 325.52 g,这相较 SFC 为 46.01% 的传统甘三酯硬度(3 656.25 g)高



注: M_p 为熔点; H_a 为硬度; C 为固体脂肪含量

图7 传统甘三酯固脂和植物甾醇/谷维素油凝胶的 SFC 与硬度及熔点的关系

3 结论

植物甾醇/谷维素凝胶剂赋予了油凝胶独特的结构特性,其中急冷温度和凝胶剂添加量对植物甾醇/谷维素油凝胶的构建和物理性能具有重要影响。通过 X-射线衍射、偏振光显微、质构、差示扫描量热和脉冲核磁共振等技术分析表明:随着植物甾醇/谷维素凝胶剂添加量的增加,油凝胶中晶体排列逐渐致密,硬度增大,熔点升高;尽管急冷温度对油凝胶的晶型(β 晶型)没有明显影响,但是相对于 5 °C 急冷,20 °C 急冷得到的油凝胶中晶体组装更为致密,物理稳定性增强。相对于传统甘三酯固脂,低固体脂肪含量(4.85%) 即可赋予植物甾醇/谷维素油凝胶较高的硬度。研究结果将促进利用植物甾醇/谷维素油凝胶生产零反式、低饱和的营养型塑性脂肪。

然而,植物甾醇与谷维素的高成本及油凝胶结构上的硬而脆特性在一定程度上限制了其在食品工业的应用,这需从分子修饰或新型分子设计等角度改善其物理特性,以满足工业需求。

参考文献:

- [1] MARANGONI A G, NISSIM G. Edible oleogels: structure and health implications[M]. Amsterdam: Elsevier, 2018.
- [2] 南阳. 荷载 V_c 油脂凝胶的制备及其在人造奶油中的应用研究[D]. 广州:华南理工大学, 2017.
- [3] 傅红, 张虹, 郑丽婷, 等. 有机凝胶构筑液态油脂晶体网络的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(2): 136-141.
- [4] MAGRI A, PETRICCIONE M, CERQUEIRA M A, et al. Self-assembled lipids for food applications: a review[J/OL]. Adv Colloid Interfac, 2020, 285: 102279 [2021-12-14]. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102279>.
- [5] MARTINS A J, CERQUEIRA M A, PASTRANA L M, et al.

出 18%。这一现象在植物甾醇/卵磷脂以及蜡基油凝胶中也被发现,其中在蜡基油凝胶还证实油凝胶硬度与 SFC 无相关性^[22-23]。

- Sterol-based oleogels' characterization envisioning food applications[J]. J Sci Food Agric, 2019, 99(7): 3318-3325.
- [6] 宋曙辉, 赵霖, 赵学志, 等. β -谷甾醇和 γ -谷维素的甾醇凝胶化油脂对大鼠营养生理功能的影响[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(11): 62-68.
- [7] BOT A, AGTEROF W G M. Structuring of edible oils by mixtures of γ -oryzanol with β -sitosterol or related phytosterols[J]. J Am Oil Chem Soc, 2006, 83(6): 513-521.
- [8] BOT A, ADEL R, ROIJERS E C. Fibrils of γ -oryzanol + β -sitosterol in edible oil organogels[J]. J Am Oil Chem Soc, 2008, 85(12): 1127-1134.
- [9] 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.
- [10] DAVIDOVICH-PINHAS M, GRAVELLE A J, BARBUT S, et al. Temperature effects on the gelation of ethylcellulose oleogels[J]. Food Hydrocolloid, 2015, 46: 76-83.
- [11] PALLA C, VICENTE J D, CARRIN M E, et al. Effects of cooling temperature profiles on the monoglycerides oleogel properties: a rheo-microscopy study[J/OL]. Food Res Int, 2019, 125(11): 108613 [2021-12-14]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108613>.
- [12] WANG X, WANG S J, NAN Y, et al. The effects of oil type and crystallization temperature on the physical properties of vitamin C-loaded oleogels prepared by an emulsion-templated approach[J]. Food Funct, 2020, 11(9): 8028-8037.
- [13] DOAN C D, TAVERNIER I, OKURO P K, et al. Internal and external factors affecting the crystallization, gelation and applicability of wax-based oleogels in food industry[J]. Innov Food Sci Emerg, 2018, 45: 42-52.

(下转第 122 页)

- 株选育[D]. 江苏 无锡:江南大学,2013.
- [13] 赵犇. 提高 *Schizochytrium* DHA 产量的诱变筛选方法研究及高产机理解析[D]. 江苏 无锡:江南大学,2018.
- [14] 袁军, 赵犇, 孙梦玉, 等. 常压室温等离子体(ARTP)诱变快速选育高产 DHA 的裂殖壶菌突变株[J]. 生物技术通报, 2015(10): 199 – 204.
- [15] ZHU L Y, ZHANG X C, REN X Y, et al. Effects of culture conditions on growth and docosahexaenoic acid production from *Schizochytrium limacinum* [J]. J Ocean Univ China, 2008, 7(1): 83 – 88.
- [16] 宋立立, 刘苗. 混合菌发酵生产蛋白饲料的研究进展[J]. 中国饲料, 2020(11): 15 – 19.
- [17] SONG X J, ZANG X N, ZHANG X C. Production of high docosahexaenoic acid by *Schizochytrium* sp. using low – cost raw materials from food industry [J]. J Oleo Sci, 2015, 64(2): 197 – 204.
- [18] XU J, ZHU Y J, LI H C, et al. Alanine mother liquor as a nitrogen source for docosahexaenoic acid production by *Schizochytrium* sp. B4D1 [J]. Electron J Biotechnol, 2018, 35: 10 – 17.
- [19] 赵犇, 王武, 李昌灵, 等. EMS – ARTP 复合诱变选育高产 DHA 裂殖壶菌[J]. 食品与机械, 2018, 34(2): 19 – 24.
- [20] JIANG X, ZHANG J, ZHAO J, et al. Regulation of lipid accumulation in *Schizochytrium* sp. ATCC 20888 in response to different nitrogen sources [J/OL]. Eur J Lipid Sci Technol, 2017, 119(10): 201700025 [2022 – 01 – 10]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700025>.
- [21] BELIGON V, POUGHON L, CHRISTOPHE G, et al. Improvement and modeling of culture parameters to enhance biomass and lipid production by the oleaginous yeast *Cryptococcus curvatus* grown on acetate [J]. Bioresour Technol, 2015, 192: 582 – 591.
- [22] YIN F W, GUO D S, REN L J, et al. Development of a method for the valorization of fermentation wastewater and algal – residue extract in docosahexaenoic acid production by *Schizochytrium* sp. [J]. Bioresour Technol, 2018, 266: 482 – 487.
- [23] HU X C, REN L J, CHEN S L, et al. The roles of different salts and a novel osmotic pressure control strategy for improvement of DHA production by *Schizochytrium* sp. [J]. Bioproc Biosyst Eng, 2015, 38(11): 2129 – 2136.
- [24] MAZZOLENI S, LANDI C, CARTENI F, et al. A novel process – based model of microbial growth: self – inhibition in *Saccharomyces cerevisiae* aerobic fed – batch cultures [J/OL]. Microb Cell Fact, 2015, 14: 109 [2021 – 01 – 10]. <https://doi.org/10.1186/s12934-015-0295-4>.
-
- (上接第 94 页)
- [14] TAVERNIER I, NORTON I T, RIMAUX T, et al. Effect of high cooling and shear rate on the microstructural development of hybrid systems containing diacylglycerols and triacylglycerols of palm origin [J]. J Food Eng, 2019, 246(4): 141 – 152.
- [15] WEI F, MIAO J, TAN H, et al. Oleogel – structured emulsion for enhanced oxidative stability of perilla oil: influence of crystal morphology and cooling temperature [J/OL]. LWT – Food Sci Technol, 2021, 139(3): 110560 [2021 – 12 – 14]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110560>.
- [16] FLOTTER E, WETTLAUFER T, CONTY V, et al. Oleogels: their applicability and methods of characterization [J/OL]. Molecules, 2021, 26(6): 1673 [2021 – 12 – 14]. <https://doi.org/10.3390/molecules26061673>.
- [17] YANG D X, CHEN X W, YANG X Q. Phytosterol – based oleogels self – assembled with monoglyceride for controlled volatile release [J]. J Sci Food Agric, 2018, 98(2): 582 – 589.
- [18] SINGH A, AUZANNEAU F I, ROGERS M A. Advances in edible oleogel technologies; a decade in review [J]. Food Res Int, 2017, 97(7): 307 – 317.
- [19] KAMALI E, SAHARI M A, BARZEGAR M, et al. Novel oleogel formulation based on amaranth oil: physicochemical characterization [J]. Food Sci Nutr, 2019, 7(6): 1986 – 1996.
- [20] CHOPIN – DOROTEO M, MORALES – RUEDA J A, DIBILDOX – ALVARADO E, et al. The effect of shearing in the thermo – mechanical properties of candelilla wax and candelilla wax – tripalmitin organogels [J]. Food Biophys, 2011, 6(3): 359 – 376.
- [21] 刘宏, 刘慧敏, 冯国霞, 等. 植物甾醇 + γ – 谷维素型凝胶油的制备及其影响因素的研究 [J]. 中国油脂, 2015, 40(6): 66 – 71.
- [22] 韩立娟. 超分子油脂凝胶微观结构衍变与宏观性能变化的关系研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014.
- [23] TAVERMIER I, DOAN C D, VAN DE WALLE D, et al. Sequential crystallization of high and low melting waxes to improve oil structuring in wax – based oleogels [J]. RSC Adv, 2017, 7(20): 12113 – 12125.