

# *L*-抗坏血酸棕榈酸酯对椰子油结晶行为的影响

孟校宇, 刘春环, 曹 晨, 郑召君, 刘元法

(江南大学 食品学院, 食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:**以椰子油作为模型,利用结晶动力学方程、X-射线衍射(XRD)分析、热力学分析以及偏振光显微镜(PLM)观察等方法研究了*L*-抗坏血酸棕榈酸酯(*L*-AP)对椰子油结晶行为的影响。结果表明:*L*-AP提高了椰子油的结晶速率,改变了晶体成核和生长机制;*L*-AP以“晶种”的方式诱导椰子油的结晶,对其结晶过程产生了促进作用;*L*-AP没有改变椰子油晶体的晶型以及堆积方式,却增加了晶体纳米片层的厚度;随着*L*-AP添加量的增加,晶体结构更加致密有序。

**关键词:**椰子油;*L*-抗坏血酸棕榈酸酯;结晶动力学;晶型;晶体形态

中图分类号:TS201.2;TS225.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2020)11-0040-06

## Effect of *L*-ascorbyl palmitate on the crystallization behavior of coconut oil

MENG Xiaoyu, LIU Chunhuan, CAO Chen, ZHENG Zhaojun, LIU Yuanfa

(State Key Laboratory of Food Science and Technology, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

**Abstract:** Coconut oil was used as a model, and the effect of *L*-ascorbyl(*L*-AP) on the crystallization behavior of coconut oil was studied by crystallization kinetics equation, X-ray diffraction (XRD), thermodynamic analysis and polarized light microscopy (PLM). The results showed that *L*-AP increased the crystallization rate of coconut oil and changed the mechanism of nucleation and growth. Moreover, *L*-AP induced the crystallization as a "seed effect" and promoted the crystallization process of coconut oil. No significant changes were found in the crystal packing mode and crystal form with the addition of *L*-AP. However, *L*-AP increased the thickness of the crystal nanosheets. Furthermore, coconut oil presented more ordered the crystal structure as the increase of the dosage of *L*-AP.

**Key words:** coconut oil; *L*-ascorbyl palmitate; crystallization kinetics; crystal form; crystal morphology

在工业上,脂类食品如巧克力、人造黄油、糖果、乳制品等的加工过程直接受脂肪结晶行为的影响<sup>[1]</sup>。脂肪结晶特性对产品的质地、风味、口腔融化感、储存稳定性以及外观等具有重要的作用<sup>[2]</sup>。例如,人造黄油中粗大的晶体颗粒会产生明显的沙粒感<sup>[3]</sup>。为了获得更好品质的脂肪产品,工业上往往使用一些脂肪结晶改良剂来调控脂肪的结晶

过程。

乳化剂是食品工业中使用最多的油脂结晶改良剂。研究发现,乳化剂的作用机制是通过酰基与酰基之间的相互作用进而调节脂肪的结晶过程<sup>[4]</sup>。除此之外,亲水基团的大小也对晶体分子堆积起到重要作用。乳化剂根据其作用机制可以分为两类,一类是“结晶抑制剂”,另一类是“结晶促进剂”。前者的作用机制是乳化剂与其化学结构相似的甘油三酯同时结晶,发挥“共结晶作用”。后者的作用机制在于,乳化剂在甘油三酯之前结晶,作为晶核诱导甘油三酯的结晶。同时,乳化剂会吸附在晶体表面,调节晶型和晶体的微观结构<sup>[5]</sup>。许多国内外学者对椰子油结晶调控进行了深入的研究。Maruyama等<sup>[5]</sup>研究发现,单甘酯乳化剂可以提高椰子油结晶速率,其浓度对椰子油晶体形

收稿日期:2019-09-20;修回日期:2020-02-20

基金项目:山东省泰山产业领军人才创新类项目(LJNY2015007);国家自然科学基金(31671786)

作者简介:孟校宇(1996),女,硕士研究生,研究方向为油脂结晶(E-mail)15061885663@163.com。

通信作者:刘元法,教授,博士生导师(E-mail)yfliu@jiangnan.edu.cn。

态、晶体大小有显著影响。Sonwai 等<sup>[6]</sup>研究表明,脱水山梨糖醇单月桂酸酯对椰子油结晶性质的影响与结晶温度有关,在低于其熔点的结晶温度下,仅影响椰子油中高熔点组分的结晶行为,在高于其熔点的结晶温度下,椰子油中两种馏分的结晶速率均大幅度降低。

*L*-抗坏血酸棕榈酸酯(*L*-AP)是*L*-抗坏血酸和棕榈酸通过酯键结合而成的具有双亲性的化合物。基于此,我们推测*L*-AP的非极性尾部、极性头部与甘油三酯之间可能存在强烈的相互作用,进而影响甘油三酯的结晶行为。然而几乎没有关于*L*-AP对油脂结晶影响的研究。同时,*L*-AP是一种脂溶性维生素C,其不仅保留了维生素C全部的生理活性,而且克服了维生素C怕光、怕潮、怕热的缺点。并且,*L*-AP被世界卫生组织认定为营养、无毒、高效和安全的食品添加剂。

椰子油是一种中碳链油脂,其脂肪酸组成主要为月桂酸和肉豆蔻酸,饱和脂肪酸含量约为90%<sup>[7]</sup>,适合作为结晶动力学的研究模型。研究表明,椰子油对人类营养健康有重要的影响。虽然椰子油饱和度较高,但其相对分子质量较低,更容易被人体吸收,具有促进新陈代谢、降低患动脉粥样硬化或心脏病风险的功效<sup>[8]</sup>。在工业生产中,椰子油也被应用到人造黄油和巧克力酱等产品中<sup>[5]</sup>。然而椰子油与氢化油相比,仍然具有许多结晶方面的缺陷。

本文的目的在于通过脉冲核磁共振(*p*-NMR)、X-射线衍射(XRD)、差示扫描量热法(DSC)和偏振光显微镜(PLM)等研究手段探究*L*-AP对椰子油结晶行为的影响,进而证明*L*-AP作为一种潜在的结晶改良剂可改善椰子油的结晶特性,扩大椰子油在食品工业中的应用范围,为食品领域中油脂改性提供新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

椰子油,益海嘉里研究中心;*L*-抗坏血酸棕榈酸酯(*L*-AP),上海阿拉丁有限公司;其他分析纯或者色谱纯的化学试剂均购于国药试剂公司。

GC-2010 PLUS 气相色谱仪,日本 Shimadzu 公司;Agilent 1200 高效液相色谱仪,美国 Agilent 公司;低场脉冲式核磁共振仪,英国 Oxford 公司;D8-Advance X-射线衍射仪,德国 Bruke 公司;功率补偿型差示扫描量热仪,瑞士 METTLER-DSC3 公司;TA.XTPlus 质构分析仪,美国 TA 公司;偏振光显微镜,德国 Leica 公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 样品的制备

将*L*-AP与椰子油均匀混合,于120℃下加热30 min至完全熔化,然后在20℃下储存过夜以备分析。分别将*L*-AP添加量(以椰子油质量计)为0%、1%、3%、5%的椰子油样品记为0%(*L*-AP)、1%(*L*-AP)、3%(*L*-AP)、5%(*L*-AP)。

### 1.2.2 脂肪酸和甘油三酯组成的测定

脂肪酸组成使用配备有火焰离子化检测器的气相色谱仪测定。测定条件:TR-FAME毛细管柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm);初始柱温130℃并保持3 min,然后以5℃/min的速率到175℃,保持10 min,然后以2℃/min的速率升至220℃,保持3 min;N<sub>2</sub>流速2.0 mL/min;进样量1 μL。样品根据标样的保留时间定性,采用面积归一化法定量。

甘油三酯组成使用配备有蒸发光散射检测器的Agilent 1200 高效液相色谱仪测定。测定条件:Nova-pak RP-C18 色谱柱(150 mm×4.6 mm,4 μm);流动相流速1.0 mL/min;进样量10 μL;流动相A为乙腈,流动相B为异丙醇-正己烷(体积比1:1),在最初的10 min内以流动相比例为60%溶剂A和40%溶剂B的线性梯度洗脱,然后以56%A、44%B洗脱40 min,再以60%A、40%B洗脱10 min,最后以60%A、40%B洗脱10 min。根据Liu等<sup>[9]</sup>的方法鉴定甘油三酯。

### 1.2.3 结晶动力学的测定

使用低场脉冲式核磁共振仪测定结晶动力学。将约3 mL完全熔化的样品置于核磁管中并在120℃下储存20 min以消除结晶历史。以适当的时间间隔测量固体脂肪含量(SFC)直到达到平衡。然后将得到的数据通过非线性回归拟合Avrami方程(1)得到相关参数。

$$\frac{C(t)}{C(\infty)} = 1 - e^{-Kt^n} \quad (1)$$

式中: $C(t)$ 为结晶时间 $t$ 的固体脂肪含量; $C(\infty)$ 为平衡时的固体脂肪含量; $K$ 为结晶速率; $n$ 为Avrami指数。

结晶诱导时间( $\tau_{SFC}$ )定义为SFC曲线的线性生长区段的起始时间。结晶半数时间( $t_{1/2}$ )根据方程(2)计算。

$$t_{1/2} = \sqrt[n]{\frac{0.693}{K}} \quad (2)$$

### 1.2.4 晶体多态性和晶体域大小

采用X-射线衍射仪进行晶型分析。测定条

件:铜靶 Cu-K $\alpha$ ( $\lambda = 0.154\ 06\ \text{nm}$ ),功率 1 600 W,采用 NaI 晶体闪烁计数器测量 X 射线的强度,样品以  $0.01(^{\circ})/\text{min}$  的速度从  $0^{\circ} \sim 35^{\circ}(2\theta)$  扫描,总分析程序持续时间 566 s。实验结果通过 MDI Jade 6.0 软件(Materials Data, Inc., USA)分析。

晶体的厚度( $\xi$ )根据 Scherrer 方程(3)计算。

$$\xi = \frac{k\lambda}{H\cos\theta} \quad (3)$$

式中: $k$  为形状因子(无量纲),提供关于颗粒“圆度”的信息,球形颗粒的形状因子为 1,而其他颗粒小于 1,通常计算晶体厚度时取值为 0.9; $\lambda$  为 X 射线的波长; $H$  为以弧度表示的半峰宽; $\theta$  为衍射角。

### 1.2.5 热分析

采用差示扫描量热仪进行热分析。将 5 ~ 10 mg 完全熔化的样品称入铝盘中,并将空盘作为空白对照。DSC 程序:首先  $130^{\circ}\text{C}$  下保持 5 min 以确保样品完全熔化并清除所有晶体记忆,然后以  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率冷却至  $-20^{\circ}\text{C}$ ,在  $-20^{\circ}\text{C}$  下平衡 10 min,接着以  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率线性升温至  $130^{\circ}\text{C}$ 。所有分析重复 3 次平行。

### 1.2.6 晶体形态

所有样品于  $120^{\circ}\text{C}$  加热 20 min,然后将完全熔化的样品(约 15  $\mu\text{L}$ )滴在预热的载玻片上。使用毛细管小心地在样品上覆盖预热的盖玻片,防止气泡进入。将玻片分别于  $4^{\circ}\text{C}$  和  $20^{\circ}\text{C}$  的恒温箱中储藏 24 h 后采用偏振光显微镜进行晶体形态的观察。获得图片使用 Image J 软件中的盒维数计数算法获得分形维数( $D_f$ )<sup>[3]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 椰子油的脂肪酸和甘油三酯组成

椰子油的脂肪酸和甘油三酯的组成如表 1、表 2 所示。

表 1 椰子油的脂肪酸组成和含量 %

脂肪酸	含量	脂肪酸	含量
C6:0	4.14 $\pm$ 0.15	C18:0	3.81 $\pm$ 0.11
C10:0	4.29 $\pm$ 0.13	C18:1	10.01 $\pm$ 0.18
C12:0	43.02 $\pm$ 0.27	C18:2	2.23 $\pm$ 0.01
C14:0	20.18 $\pm$ 0.11	SFA	87.75 $\pm$ 0.18
C16:0	12.32 $\pm$ 0.22	UFA	12.24 $\pm$ 0.15

由表 1 可见,椰子油含有大量饱和脂肪酸,如月桂酸(C12:0, 43.02%)、肉豆蔻酸(C14:0, 20.18%)和棕榈酸(C16:0, 12.32%)。

表 2 椰子油的甘油三酯组成和含量 %

甘油三酯	含量	甘油三酯	含量
CCC	3.58 $\pm$ 0.12	LPM	3.74 $\pm$ 0.17
CCL	16.56 $\pm$ 0.02	LOO	0.21 $\pm$ 0.32
CLL	16.77 $\pm$ 0.15	LPO	0.57 $\pm$ 0.42
LLL	25.25 $\pm$ 0.09	LPP	0.89 $\pm$ 0.36
LLM	19.39 $\pm$ 0.53	MMO	0.26 $\pm$ 0.47
LLO	1.49 $\pm$ 0.21	MPO	0.15 $\pm$ 0.51
LMM	9.88 $\pm$ 0.25	POO	0.19 $\pm$ 0.19
LMO	0.90 $\pm$ 0.05	PPO	0.17 $\pm$ 0.25

注: C. 癩酸; L. 月桂酸; M. 肉豆蔻酸; P. 棕榈酸; O. 油酸。

由表 2 可见,椰子油中甘油三酯主要是中碳链甘油三酯,包括 LLL(25.25%)、LLM(19.39%)、CLL(16.77%)、CCL(16.56%)、LMM(9.88%)。

### 2.2 椰子油及椰子油与 L-AP 混合物的结晶动力学

椰子油及椰子油与 L-AP 混合物的等温结晶曲线并通过 Avrami 曲线拟合,结果如表 3 所示。

由表 3 可见,椰子油的结晶速率( $K$ )随着温度的升高而降低,而结晶诱导时间( $\tau_{\text{SFC}}$ )和半数结晶时间( $t_{1/2}$ )随温度的升高而升高。同时,随着 L-AP 添加量的增大, $\tau_{\text{SFC}}$  和  $t_{1/2}$  降低, $K$  增大,这说明在椰子油中甘油三酯结晶之前,L-AP 率先结晶并作为晶种诱导椰子油中甘油三酯的结晶,从而起到了促进结晶的作用,并且促进作用随着 L-AP 添加量的增大而更加明显。

成核生长维数可以用  $n$  表示,其反映了成核和生长的机理。其中: $n$  为 1 代表了瞬时成核和线性生长; $n$  为 2 表示存在瞬时或零星两种成核方式,以及线性和盘状生长方式; $n$  为 3 表示瞬时或零星成核,晶核生长方式是盘状和球晶状生长; $n$  为 4 表示零星的成核和球晶生长<sup>[10]</sup>。由表 3 可见,随着温度的升高, $n$  值呈上升趋势。对于椰子油,在  $5^{\circ}\text{C}$  时,瞬时成核和线性生长( $n \sim 1$ )占主导地位;当温度升高到  $10^{\circ}\text{C}$  时,瞬时和零星成核( $n \sim 2$ )同时存在,两种生长模式为线性和盘状生长;而温度为  $15^{\circ}\text{C}$  时, $n$  值在 2 和 3 之间,表明主要晶体生长机制为盘状和球形生长。这说明温度对椰子油晶体的成核和生长方式有重要影响。同一温度下,随着 L-AP 添加量的增大, $n$  值增大。如在  $5^{\circ}\text{C}$  下, $n$  值由  $1.23 \pm 0.05$  (0%)变为  $1.36 \pm 0.05$  (1%)、 $1.63 \pm 0.06$  (3%)、 $1.70 \pm 0.02$  (5%),说明 L-AP 改变了椰子油的成核和生长方式。

表3 不同温度下椰子油及椰子油与L-AP混合物的结晶速率( $K$ )、Avrami指数( $n$ )、结晶半数时间( $t_{1/2}$ )、结晶诱导时间( $\tau_{SFC}$ )

样品	温度/°C	$\tau_{SFC}/\text{min}$	$K/(10^{-2}\text{min}^{-n})$	$n$	$t_{1/2}/\text{min}$	$R^2$
0% (L-AP)	5	$0.97 \pm 0.01^a$	$11.52 \pm 0.06^a$	$1.23 \pm 0.05^a$	$3.70 \pm 0.01^a$	0.976
	10	$1.26 \pm 0.03^a$	$6.07 \pm 0.06^b$	$1.80 \pm 0.01^b$	$3.83 \pm 0.05^b$	0.987
	15	$4.91 \pm 0.01^b$	$0.26 \pm 0.07^c$	$2.46 \pm 0.03^c$	$7.90 \pm 0.04^c$	0.973
	20	$114.6 \pm 0.83^c$	-	-	-	-
1% (L-AP)	5	$0.99 \pm 0.01^a$	$13.05 \pm 0.28^a$	$1.36 \pm 0.05^a$	$3.26 \pm 0.04^a$	0.974
	10	$1.01 \pm 0.02^a$	$6.10 \pm 0.01^b$	$1.84 \pm 0.02^b$	$3.71 \pm 0.02^b$	0.988
	15	$4.85 \pm 0.03^b$	$0.23 \pm 0.02^c$	$2.42 \pm 0.42^c$	$7.69 \pm 0.03^c$	0.979
	20	$90.33 \pm 0.06^c$	-	-	-	-
3% (L-AP)	5	$0.99 \pm 0.01^a$	$14.09 \pm 0.05^a$	$1.63 \pm 0.06^a$	$2.58 \pm 0.02^a$	0.975
	10	$1.00 \pm 0.01^a$	$9.98 \pm 0.04^b$	$1.88 \pm 0.01^b$	$2.80 \pm 0.02^b$	0.980
	15	$4.31 \pm 0.04^b$	$0.50 \pm 0.04^c$	$2.73 \pm 0.05^c$	$7.33 \pm 0.06^c$	0.983
	20	$67.43 \pm 0.06^c$	-	-	-	-
5% (L-AP)	5	$0.98 \pm 0.02^a$	$14.29 \pm 0.05^a$	$1.70 \pm 0.02^a$	$2.25 \pm 0.05^a$	0.973
	10	$0.99 \pm 0.03^a$	$11.00 \pm 0.05^b$	$1.90 \pm 0.01^b$	$2.60 \pm 0.04^b$	0.976
	15	$2.13 \pm 0.05^b$	$0.70 \pm 0.03^c$	$2.78 \pm 0.03^c$	$6.51 \pm 0.06^c$	0.989
	20	$38.97 \pm 0.43^c$	-	-	-	-

注:同一列中具有不同小写字母的数值有显著性差异( $p < 0.05$ )。下同。

### 2.3 椰子油及椰子油与L-AP混合物的晶体多态性和晶体域大小

椰子油及椰子油与L-AP混合物的XRD图谱如图1所示。由图1可见,在长间距扫描过程中,所有样品均只有在4.6 Å附近有一个明显的特征峰,这说明椰子油的晶型主要是 $\beta$ 晶型。短间距扫描显示在33 Å附近有一个特征峰,说明椰子油中甘油三酯为3倍长链堆积方式<sup>[11]</sup>。并且L-AP对椰子油的晶型以及堆积方式没有显著影响。

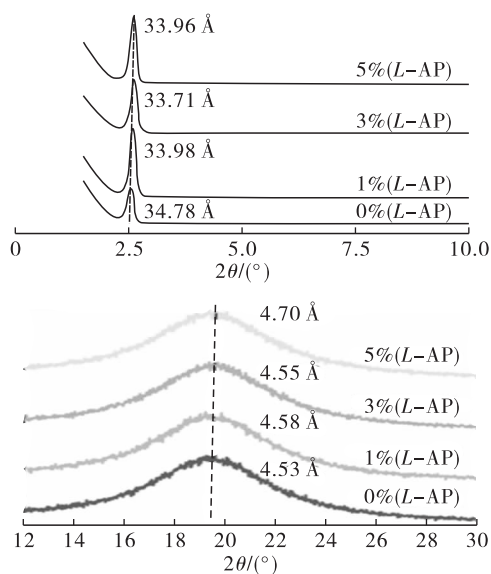


图1 椰子油及椰子油与L-AP混合物的XRD图谱

表4为椰子油及椰子油与L-AP混合物晶体的厚度。由表4可见,晶体的厚度随着L-AP添加

量的增加而增加,说明L-AP参与了椰子油结晶过程,增加了晶体厚度。

表4 椰子油及椰子油与L-AP混合物晶体的厚度

样品	厚度/Å
0% (L-AP)	$212.38 \pm 0.007^a$
1% (L-AP)	$214.69 \pm 0.014^b$
3% (L-AP)	$215.87 \pm 0.028^c$
5% (L-AP)	$229.80 \pm 0.078^d$

### 2.4 椰子油及椰子油与L-AP混合物的热分析

图2显示了样品的结晶和熔化曲线,表5为样品对应的结晶/熔化起始温度( $T_{oc}/T_{om}$ )、结晶/熔化峰值温度( $T_{pc}/T_{pm}$ )以及对应的结晶/熔化焓值( $\Delta H_c/\Delta H_m$ )的变化。由图2、表5可见,在结晶过程中,椰子油存在两个吸收峰,一个是低熔点峰( $0.21^\circ\text{C}$ ,  $\Delta H_c = 119.01 \text{ J/g}$ ),一个是高熔点峰( $7.85^\circ\text{C}$ ,  $\Delta H_c = 1.25 \text{ J/g}$ )。随着L-AP的加入, $T_{oc}$ 略微向高温区移动,如 $9.87^\circ\text{C}$ (1%)、 $10.60^\circ\text{C}$ (3%)和 $11.78^\circ\text{C}$ (5%)。此外,加入L-AP后的椰子油只存在一个吸收峰,并且随L-AP添加量增大 $T_{pc}$ 升高,如 $6.82^\circ\text{C}$ (1%)、 $7.34^\circ\text{C}$ (3%)和 $7.69^\circ\text{C}$ (5%), $\Delta H_c$ 同样增大,分别为 $124.07 \text{ J/g}$ (1%)、 $130.08 \text{ J/g}$ (3%)和 $137.70 \text{ J/g}$ (5%)。在熔化过程中,随着L-AP添加量的增加, $T_{om}$ 、 $T_{pm}$ 以及 $\Delta H_m$ 均随之增大,这说明L-AP促进了椰子油的结晶过程<sup>[12]</sup>,这与之前的结晶动力学的测定结果是相照应的。

表5 椰子油及椰子油与L-AP混合物的结晶/熔化起始温度( $T_{oc}/T_{om}$ )、结晶/熔化峰值温度( $T_{pc}/T_{pm}$ )、结晶/熔化焓值( $\Delta H_c/\Delta H_m$ )

样品	结晶曲线			熔化曲线		
	$T_{oc}/^{\circ}\text{C}$	$T_{pc}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_c/(\text{J/g})$	$T_{om}/^{\circ}\text{C}$	$T_{pm}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J/g})$
0%(L-AP)	$3.27 \pm 0.01$	$0.21 \pm 0.15$ $7.85 \pm 0.12$	$119.01 \pm 0.17$ $1.25 \pm 0.23$	$15.69 \pm 0.01^c$	$23.23 \pm 0.11^a$	$122.96 \pm 0.23^a$
1%(L-AP)	$9.87 \pm 0.03^a$	$6.82 \pm 0.15^a$	$124.07 \pm 2.26^a$	$13.61 \pm 0.11^a$	$24.17 \pm 0.12^b$	$135.81 \pm 0.51^b$
3%(L-AP)	$10.60 \pm 0.12^b$	$7.34 \pm 0.03^b$	$130.08 \pm 0.06^b$	$13.82 \pm 0.10^a$	$24.78 \pm 0.04^c$	$142.23 \pm 0.05^c$
5%(L-AP)	$11.78 \pm 0.11^c$	$7.69 \pm 0.40^c$	$137.70 \pm 0.39^c$	$14.43 \pm 0.05^b$	$24.91 \pm 0.02^c$	$149.82 \pm 1.46^d$

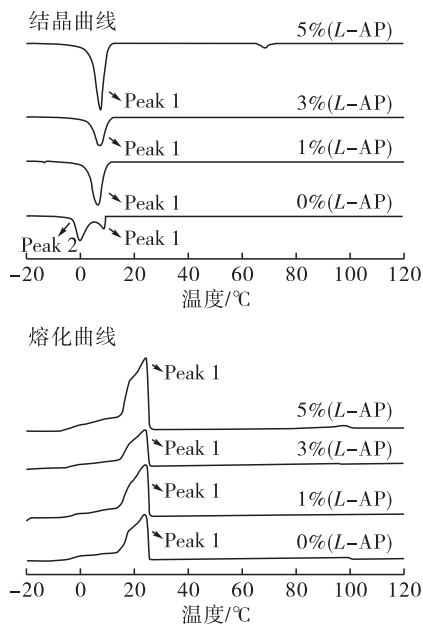


图2 椰子油及椰子油与L-AP混合物的DSC曲线

## 2.5 椰子油及椰子油与L-AP混合物的晶体形态及分形维数

椰子油及椰子油与L-AP混合物的晶体形态如图3所示。由图3可见,在4℃时,椰子油呈现的是细小的晶球结构,并且随着L-AP添加量的增大,晶体数量增多,展现出更加均匀和细小的形态结构。而20℃的样品呈现出明显的针状结构,L-AP的加入使该结构变得更密集。通常较高的分形维数( $D_f$ )对应于更有序的晶体结构,说明成核和生长过程同样是更加有序的<sup>[2,13]</sup>。随着L-AP添加量的增加,样品的 $D_f$ 值增大,说明L-AP参与了椰子油的结晶过程,促使其通过更为有序的结晶过程形成更为致密的晶体结构。

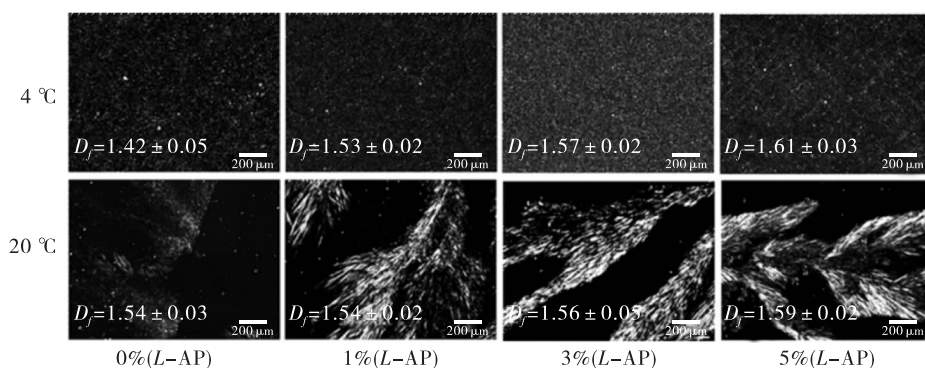


图3 椰子油及椰子油与L-AP混合物的晶体形态

## 3 结论

本文主要研究了L-AP对椰子油结晶行为的影响。L-AP的添加促进了椰子油的结晶,提高了其结晶速率。L-AP发挥作用的机制主要是通过“晶种”的形式,L-AP率先结晶形成细小的晶体,作为“晶种”诱导椰子油中甘油三酯的结晶。在分子角度层面,L-AP对椰子油的晶型和晶体堆积方式没有显著影响;在纳米层面,L-AP的加入增加了椰子油晶体纳米片层的厚度。同时,偏振光显微镜图片显示出更高的分形维数,说明L-AP促使椰子

油的结晶过程中形成更为有序致密的结构。综上所述,L-AP对椰子油结晶特性产生了显著的影响。

## 参考文献:

- [1] MARUYAMA J M, SOARES F A, D'AGOSTINHO N R, et al. Effects of emulsifier addition on the crystallization and melting behavior of palm olein and coconut oil [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(10): 2253-2263.
- [2] CHAI X H, MENG Z, CAO P R, et al. Influence of indigenous minor components on fat crystal network of fully hydrogenated palm kernel oil and fully hydrogenated

- coconut oil [J]. *Food Chem*, 2018, 255: 49–57.
- [3] LIU C H, ZHENG Z J, MENG Z, et al. Beeswax and carnauba wax modulate the crystallization behavior of palm kernel stearin [J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2019, 115: 108446 [2019–09–20]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108446>.
- [4] 陈寸红, 张虹, 毕艳兰, 等. 人造奶油结晶影响因素的研究进展 [J]. *中国油脂*, 2013, 38(12): 17–22.
- [5] MARUYAMA J M, DE MARTINI SOARES F A S, D'AGOSTINHO N R, et al. Effects of emulsifier addition on the crystallization and melting behavior of palm olein and coconut oil [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(10): 2253–2263.
- [6] SONWAI S, PODCHONG P, ROUSSEAU D. Crystallization kinetics of coconut oil in the presence of sorbitan esters with different fatty acid moieties [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2016, 93(6): 849–858.
- [7] 陈秀菊, 彭捷, 白新鹏, 等. 椰子油在温度梯度场中定向结晶动力学 [J]. *食品科学*, 2014, 35(17): 17–21.
- [8] WALLACE T C. Health effects of coconut oil—a narrative review of current evidence [J]. *J Am Coll Nutr*, 2019, 38(2): 97–107.
- [9] LIU C H, MENG Z, CAO P R, et al. Visualized phase behavior of binary blends of coconut oil and palm stearin [J]. *Food Chem*, 2018, 266: 66–72.
- [10] 贾延勇. 微量山梨醇三油酸酯对棕榈油结晶动力学影响 [D]. 海口: 海南大学, 2014.
- [11] 李慧灵. 猪油基酥皮油的制备及应用研究 [D]. 江苏无锡: 江南大学, 2017.
- [12] DE OLIVEIRA G M, RIBEIRO A P B, DOS SANTOS A O, et al. Hard fats as additives in palm oil and its relationships to crystallization process and polymorphism [J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2015, 63(2): 1163–1170.
- [13] LIU C H, ZHENG Z J, ZAABOUL F, et al. Effects of wax concentration and carbon chain length on the structural modification of fat crystals [J]. *Food Funct*, 2019, 10: 5413–5425.
- 
- (上接第31页)
- [38] WANG J, SUN B, CAO Y, et al. Optimisation of ultrasound – assisted extraction of phenolic compounds from wheat bran [J]. *Food Chem*, 2008, 106(2): 804–810.
- [39] 常强, 苏明华, 陈清西, 等. 2种提取工艺对橄榄果实多酚含量及抗氧化活性的影响 [J]. *热带作物学报*, 2016, 37(8): 1575–1581.
- [40] JAPÓN – LUJÁN R, LUQUE – RODRÍGUEZ J M, CASTRO L D. Dynamic ultrasound – assisted extraction of oleuropein and related biophenols from olive leaves [J]. *J Chromatogr A*, 2006, 1108(1): 76–82.
- [41] LI Y P, SKOUROUMOUNIS G K, ELSEY G M, et al. Microwave – assistance provides very rapid and efficient extraction of grape seed polyphenols [J]. *Food Chem*, 2011, 129(2): 570–576.
- [42] 孔维宝, 李阳, 白万明, 等. 微波辅助提取油橄榄果渣多酚 [J]. *食品与发酵工业*, 2011, 37(4): 233–237.
- [43] 项昭保, 刘星宇. 响应面法优化超声 – 微波协同辅助提取橄榄多酚工艺研究 [J]. *食品工业科技*, 2016, 37(1): 195–200.
- [44] TAAMALLI A, ARRÁEZ – ROMÁN D, BARRAJÓN – CATALÁN E, et al. Use of advanced techniques for the extraction of phenolic compounds from Tunisian olive leaves: phenolic composition and cytotoxicity against human breast cancer cells [J]. *Food Chem Toxicol*, 2012, 50(6): 1817–1825.
- [45] FLOCH F L, TENA M T, RÍOS A, et al. Supercritical fluid extraction of phenol compounds from olive leaves [J]. *Talanta*, 1998, 46(5): 1123–1130.
- [46] WIJESINGHE W A J P, JEON Y J. Enzyme – assistant extraction (EAE) of bioactive components: a useful approach for recovery of industrially important metabolites from seaweeds: a review [J]. *Fitoterapia*, 2012, 83(1): 6–12.
- [47] HAMZA M, KHOULFI S, SAYADI S. Changes in the content of bioactive polyphenolic compounds of olive mill wastewater by the action of exogenous enzymes [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(1): 66–73.
- [48] RUSSO C. A new membrane process for the selective fractionation and total recovery of polyphenols, water and organic substances from vegetation waters (VW) [J]. *J Membrane Sci*, 2007, 288: 239–246.
- [49] GARCIA – CASTELLO E, CASSANO A, CRISCUOLII A, et al. Recovery and concentration of polyphenols from olive mill wastewaters by integrated membrane system [J]. *Water Res*, 2010, 44(13): 3883–3892.