

牛油与 4 种植物油的相容性

Study on compatibility of tallow and four kinds of plant oil

姚迪^{1,2,3} 何新益^{1,2,3} 闫西纯⁴ 李旭⁵ 甄润英^{1,2,3}

YAO Di^{1,2,3} HE Xin-yi^{1,2,3} YAN Xi-chun⁴ LI Xu⁵ ZHEN Run-ying^{1,2,3}

(1. 天津农学院食品科学与生物工程学院, 天津 300384; 2. 天津市农副产品深加工技术工程中心, 天津 300384; 3. 天津市科教兴农集成创新示范基地, 天津 300384; 4. 天津市伊兴清真食品有限公司, 天津 300399; 5. 天津市粮油质量检测中心, 天津 300171)

(1. College of Food Science and Biological Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Engineering and Technology Research Center of Agricultural Products Processing, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin Agricultural Innovation Demonstration Base for Integration of Technology and Education, Tianjin 300384, China; 4. Tianjin Yixing Hahal Food Co., Ltd., Tianjin 300399, China; 5. Tianjin Grain & Oil Quality Inspection Center, Tianjin 300171, China)

摘要:为丰富牛油产品种类,降低其熔点及硬度,将其与菜籽油、大豆油、橄榄油、调和油进行二元复配,结合固体脂肪含量等温曲线(SFC-T)和偏差曲线(Δ SFC-T),对二元混合体系相容性进行分析。结果表明,4 种二元混合体系在不同温度下主要呈现偏晶现象,各组 0~40 °C 时的等温曲线线性关系良好($R^2 > 0.95$); 4 种植物油中,菜籽油与牛油的相容性最好,牛油与调和油任一组分为 10%, 20%, 30% 时相容性较好,牛油与橄榄油在任一组分为 10%, 20% 时相容性较好, Δ SFC 值在 $\pm 2\%$, 大豆油相比于其他几种植物油相容性较差。

关键词:牛油; 植物油; 二元混合; 相容性

Abstract: To enrich the variety of tallow products and reduce its melting point and hardness, the melting point and fatty acid composition properties of tallow, rapeseed oil, soybean oil, olive oil and cooking oil were analyzed. With the binary compatibilities of tallow and other four kinds of plant oil, their compatibility was studied through isothermal curve (SFC-T) and deviation curve (Δ SFC-T). The results suggested that four kinds of binary compatibilities mainly showed partial crystal phenomenon at different temperatures. The linear relationship of isothermal curve was good at 0~40 °C centigrade of each group ($R^2 > 0.95$). Among the four plant oils, rapeseed oil had the best compatibility with tallow. The mix proportion of tallow and cooking oil were better when any component was 10%, 20%, 30%;

作者简介:姚迪,男,天津农学院在读硕士研究生。

通信作者:何新益(1974—),男,天津农学院教授,博士。

E-mail: hedevid@163.com

甄润英(1962—),女,天津农学院教授,硕士。

E-mail: 593283104@qq.com

收稿日期:2017-09-30

Olive oil was better when any component was 10%, 20%. Each group of tallow and soybean oil were the worst, and all the value of Δ SFC were in the range of $\pm 2\%$. This study provides a theoretical basis and practical experience for the development of butter products.

Keywords: tallow; plant oil; binary blend; compatibility

牛油是指兽医检验的健康牛屠宰后其新鲜、洁净和完好的脂肪组织经炼制而成的油脂。因独特的风味,被广泛应用于食品工业,如烘焙食品、火锅底料、新型牛油粉末油脂等^[1-2]。牛油脂肪酸组成复杂,饱和脂肪酸含量高,熔点范围 43~49 °C^[3],硬度相对于鸡油、猪油等其他动物油脂更高,日常取用不方便,家用烹饪油应用较少。因此,改善牛油硬度,适当降低其熔点,对于扩大牛油产品市场具有一定意义。

王宏平等^[4]在油脂分提工艺的进展与应用中提到,通过油脂分体的方法,根据油脂中不同组分熔点的差异,通过结晶、离心分离的方法来获取不同熔点的组分,进而获得更低熔点的牛油。油脂的物理混合同样可以改变油脂体的硬度,但混合体系会使油脂的结晶特性发生改变,油脂间的相容性是影响产品品质及货架期寿命的关键指标^[5]。Andrés 等^[6]对比了差式热量扫描法与低场核磁共振方法对油脂固体脂肪含量测试结果的差异, Pedro 等^[7]研究了温度对脂质固体脂肪含量的影响。目前关于 2 种油脂间融合性的研究以猪油为主,高佳佳等^[8]研究了猪油与 3 种植物油二元混合体系相容性,夏莹^[9]¹³⁻²²研究了猪油与棕榈油混合体系的相容性,这些研究的目的主要在于改良起酥油的性质,其他油脂间相容性的研究还包括施参等^[2]研究了巴沙硬脂与 6 种油脂的相容性,张婷等^[10]研究了棕榈仁油与 5 种油脂的相容

性,魏超昆等^[11]研究了鸡油固体脂肪与5种起酥油基料油的相容性,这些研究对2种或多种油脂相容性效果进行了探讨,对相关的检测手段进行了介绍,给本试验的设计提供了思路,并给油脂间相容性的评价方法提供了参考。

因此,本试验选取菜籽油、大豆油、调和油及橄榄油,分别与牛油进行复配,通过测定体系固体脂肪含量^[12],了解油脂间相容情况,分析不同油脂间各比例调配的可行性,为开发性质稳定、脂肪酸种类丰富、质地柔软,具有更加广泛应用空间的调和牛油产品提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

牛油(Tallow, TAL)、鸡油(Chicken oil, CHO):天津市伊兴清真食品有限公司;

猪油(Lard, LAR):临沂新程金锣肉制品集团有限公司;

大豆油(Soybean oil, SOO)、菜籽油(Rapeseed oil, RAO):山东鲁花集团有限公司;

调和油(Cooking oil, COO):益海嘉里南海油脂工业(赤湾)有限公司;

橄榄油(Olive oil, OLO):上海嘉里食品有限公司。

1.1.2 仪器与设备

电子分析天平:FA2204B型,上海佑科仪器仪表有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9203A型,上海精宏实验设备有限公司;

电热恒温水浴锅:HWS24型,上海一恒科技有限公司;

气质联用仪:Agilent7890A 5975C型,美国安捷伦公司;

核磁共振测试仪:PQ001型,上海纽迈电子科技有限公司;

数控超声波清洗器:KQ-500DE型,昆山市超声仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 熔点的测定 按GB/T 24892—2010《动物油脂在开口毛细管中熔点(滑点)的测定》执行。

1.2.2 脂肪酸组成分析 按GB/T 17376—2008《动植物油脂脂肪酸甲酯制备方法》和GB/T 17377—2008《动植物油脂脂肪酸甲酯的气相色谱分析法》执行。

1.2.3 不同比例调和牛油的制备 将牛油与植物油按照1:9,2:8,3:7,4:6,5:5,6:4,7:3,8:2,9:1的质量比混匀,每组取30 mL,分别加入至50 mL离心管中,置于超声振荡器60℃条件下振荡30 min使其充分混匀,得到植物油含量为10%,20%,30%,40%,50%,60%,70%,80%,90%的待测样品。

1.2.4 固体脂肪含量计算 按照GB/T 31743—2015《动植物油脂脉冲核磁共振法测定固体脂肪含量》中核磁共振直接法,经过计算得到混合油脂样品在不同温度下的固体脂肪含量。本试验是将样品加入核磁玻璃管(内径1.5 cm),每管样品高度为1.5 cm,置于100℃烘箱中加热使其完全融化并保留15 min,随后置于60℃恒温水浴下保持30 min,再将样品

放置在0℃下保留1 h后,利用仪器测得其FID(自由衰减信号)首点信号,再分别在温度为5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55℃水浴中,恒温30 min,测得样品在各温度下的FID首点信号。一般认为,固体脂肪在FID首点信号内已经完全衰减,因此对首点信号进行一定处理即可得到固体脂肪含量。固体脂肪含量值按式(1)计算:

$$SFC = (1 - \frac{S_{x,t}/S_{x,60^\circ\text{C}}}{S_{\text{甘油酯},t}/S_{\text{甘油酯},60^\circ\text{C}}}) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

SFC——固体脂肪含量, %

$S_{x,60^\circ\text{C}}$ ——X样品在温度60℃测得的FID信号量;

$S_{\text{甘油酯},60^\circ\text{C}}$ ——三油酸甘油酯在温度60℃测得的FID信号量;

$S_{x,t}$ ——X样品在温度 t 测得的FID信号量;

$S_{\text{甘油酯},t}$ ——三油酸甘油酯在温度 t 测得的FID信号量。

1.2.5 油脂相容性分析 油脂二元混合体系的相容性可以通过等温曲线(SFC-T)来分析,完全相容的二元混合体系的等温曲线为一条直线,二元混合体系相容性越差,则等温曲线弯曲越严重,线性关系越差^[13]。本试验以二元混合体系中植物油含量为横坐标,以SFC为纵坐标绘制SFC-T图。

同时,实测SFC与理论SFC之间差值得到的偏差曲线(Δ SFC-T)也可以评价油脂二元混合体系的相容性。SFC_{理论}值按式(2)计算:

$$SFC_{\text{理论}} = x \times SFC_x + y \times SFC_y, \quad (2)$$

式中:

x, y ——二元混合体系中 x 组分和 y 组分的体积占比;

SFC_x, SFC_y ——在某温度下 x 组分和 y 组分的实测SFC值。

以温度为横坐标,以 Δ SFC为纵坐标绘制偏差曲线(Δ SFC-T), Δ SFC为正值时体系中为偏晶现象,反之则为共晶现象,一般来说, Δ SFC在 $\pm 1.5\%$ 以内为完全相容^[14]。

2 结果与分析

2.1 原料油的熔点及脂肪酸组成

从表1可以看出,3种动物油的熔点从高到低依次为牛油>猪油>鸡油,牛油在常温下可塑性最强;3种植物油在室温下呈液态,表中数值仅作为参考。调和油由于其各批次主要脂肪酸组成比例为一一定的范围,本试验不对其熔点进行讨论。

从表2可看出,7种油脂的脂肪酸以长链脂肪酸为主,动物油的脂肪酸组成以油酸($C_{18:1}$)和棕榈酸($C_{16:0}$)为主,牛油和猪油中的硬脂酸($C_{18:0}$)含量较高,而鸡油中亚油酸($C_{18:2}$)含量相对于其他2种动物油脂更高。从脂肪酸组成上来看,牛油饱和脂肪酸含量最高,占60%以上;猪油中饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸含量相当;鸡油中不饱和脂肪酸含量更多;植物油以不饱和脂肪酸为主,其中油酸($C_{18:1}$)和亚油酸($C_{18:2}$)含量相对更高,饱和脂肪酸含量不足20%;橄榄油中油酸($C_{18:1}$)含量高达77.7%,棕榈酸($C_{16:0}$)含量则多于亚油酸($C_{18:2}$)。

表 1 原料油的熔点[†]

Table 1 Melting point of TAL, LAR, CHO, RAO, SOO and OLO

油脂	牛油	猪油	鸡油	菜籽油	大豆油	橄榄油
熔点/℃	44.67±0.76	33.83±0.29	26.33±0.29	−9	−8~18	−6

† 3 种植物油的熔点由于仪器条件限制,本文未进行测量,数据为网站查阅获得。

表 2 原料油的脂肪酸组成[†]

Table 2 Fatty acid composition of TAL, LAR, CHO, RAO, SOO, OLO and COO %

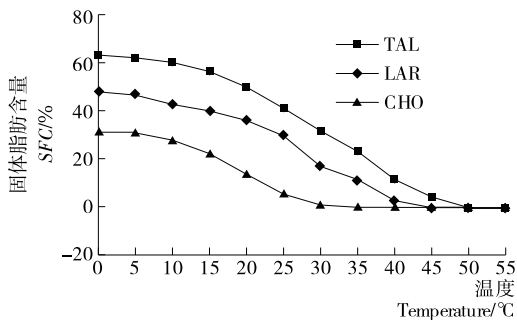
成分	牛油	猪油	鸡油	菜籽油	大豆油	橄榄油	调和油
C _{10:0}	0.04	—	—	—	—	—	—
C _{11:0}	0.06	—	—	—	—	—	—
C _{14:0}	3.1	1.3	0.8	—	—	—	—
C _{16:0}	27.0	24.5	26.4	4.3	11.0	11.2	12.3
C _{16:1}	1.7	2.0	6.3	0.2	—	0.9	—
C _{17:0}	1.3	0.2	—	—	—	—	—
C _{17:1}	—	—	—	—	—	—	—
C _{18:0}	30.8	14.2	6.3	2.3	4.7	3.3	1.9
C _{18:1}	33.2	41.1	42.0	60.2	21.6	77.7	30.1
C _{18:2}	2.6	14.4	18.2	19.1	53.1	5.6	52.3
C _{18:3}	—	0.7	—	7.3	8.4	0.6	0.4
C _{20:0}	0.3	0.2	—	0.8	0.4	0.4	0.5
C _{20:1}	—	0.8	—	2.0	—	0.3	0.2
C _{20:2}	—	—	—	—	—	—	—
C _{22:0}	—	—	—	0.6	—	—	0.2
C _{20:4}	—	0.3	—	3.0	—	—	—
C _{22:1}	—	—	—	—	—	—	0.1

† “—”表示含量低于 0.1 或不含。

结合表 1 中 3 种动物油来看,油脂熔点与其饱和脂肪酸含量呈正相关,拟合系数 $R^2 > 0.964\ 3$; 4 种植物油则皆以不饱和脂肪酸为主,含量有一定的差异,其中大豆油的饱和脂肪酸含量最高(16.1%),其熔点范围相对于其他植物油更高。因此,通过向牛油中添加植物油,能从一定程度上降低油脂体系的熔点。

2.2 原料油的固体脂肪含量

原料油的固体脂肪含量测定结果见图 1。



4 种植物油脂脂肪酸组成以不饱和脂肪酸为主,熔点都在 0 °C 以下,在 0~55 °C 的温度范围内固体脂肪含量少,实测数值未在图中展现。

图 1 原料油不同温度下的固体脂肪含量

Figure 1 SFC value under different of TAL, LAR and CHO

由图 1 可以看出,牛油、猪油、鸡油 3 种动物油的固体脂肪含量随温度的升高而减小,分别在 30, 45, 50 °C 时趋近于 0%。3 种油脂的塑性范围最宽的为牛油,其次为猪油,鸡油的塑性范围最窄。

2.3 牛油与菜籽油的二元混合体系相容性

牛油与不同比例菜籽油二元混合体系的等温曲线及其拟合系数见图 2 和表 3。由图 2 和表 3 可知,SFC 值与菜籽油的含量呈负相关性,温度越高,等温曲线的斜率越小,在 0~45 °C 时等温曲线呈现良好的线性关系, $R^2 > 0.95$, 体系的相容性较好;温度高于 45 °C 时,油脂中少量的高熔点甘油三酯存在于体系中使等温曲线线性关系变差,SFC 值在各温度下随菜籽油含量的增加逐渐趋近于 0%。

不同油脂的甘油三酯,因其碳链长度、双键数量以及分子的空间构型等存在较大差异,因而具有不同的分子形态和尺度;同时,在晶体亚晶细胞中的碳氢链聚集方式不同,甘油三酯有着不同的晶体结构和同质多晶的特性,因此,它们间的相容程度也表现出很大的差异性^[15]。2 种组分间的相容情况主要分为完全相容、部分相容(偏晶状态或共晶状态)和互不相容^{[9]13}。2 种不同油脂由于其甘油三酯的组成不同,在复配时体系内的甘油三酯比例会发生改变,进而导致其晶形发生改变,产生油脂迁移、起砂等不相容现象,影响油脂品质^[16]。

表 3 各组二元混合体系等温曲线线性方程
Table 3 Equation curve of different binary blend group of mixed oil

温度/ ℃	菜籽油		大豆油		橄榄油		调和油	
	线性方程	R^2	线性方程	R^2	线性方程	R^2	线性方程	R^2
0	$y = -6.379x + 64.688$	0.999 5	$y = -6.498x + 66.305$	0.998 9	$y = -6.284 5x + 64.465$	0.999 2	$y = -6.302 8x + 64.236$	0.999 8
5	$y = -6.24x + 62.38$	0.999 7	$y = -6.269 3x + 65.193$	0.999 0	$y = -6.189 3x + 63.552$	0.998 8	$y = -6.245 3x + 63.43$	0.999 4
10	$y = -6.291 9x + 61.903$	0.999 6	$y = -6.229 1x + 64.244$	0.999 2	$y = -6.148 3x + 61.836$	0.997 5	$y = -6.010 6x + 61.46$	0.998 4
15	$y = -6.132 6x + 59.779$	0.999 7	$y = -5.955 7x + 61.862$	0.997 0	$y = -5.734 8x + 58.014$	0.994 7	$y = -5.716 9x + 58.974$	0.998 6
20	$y = -5.415x + 53.067$	0.999 1	$y = -5.287 8x + 54.916$	0.996 6	$y = -5.031x + 51.181$	0.991 0	$y = -5.036 9x + 52.42$	0.998 0
25	$y = -4.375 4x + 43.756$	0.999 2	$y = -4.437 4x + 45.876$	0.997 3	$y = -4.145 4x + 42.731$	0.992 7	$y = -4.272 9x + 43.653$	0.998 2
30	$y = -3.275 1x + 33.295$	0.996 4	$y = -3.365 1x + 35.34$	0.991 9	$y = -3.290 9x + 34.417$	0.983 3	$y = -3.269 5x + 33.562$	0.996 5
35	$y = -2.272 8x + 24.083$	0.990 0	$y = -2.474 3x + 25.962$	0.989 6	$y = -2.507 9x + 26.07$	0.965 0	$y = -2.399 5x + 24.333$	0.998 5
40	$y = -1.230 8x + 11.482$	0.980 5	$y = -1.246 1x + 14.075$	0.979 9	$y = -1.439 4x + 14.545$	0.922 3	$y = -1.264 9x + 12.581$	0.997 2
45	$y = -0.497 7x + 4.091 5$	0.969 6	$y = -0.608 2x + 6.518 4$	0.970 8	$y = -0.631 4x + 6.537 1$	0.900 5	$y = -0.550 5x + 5.022 5$	0.984 6
50	$y = 0.001 9x - 0.458 1$	0.001 1	$y = -0.017 7x + 0.988 2$	0.075 4	$y = 0.008 5x - 0.548 8$	0.010 2	$y = -0.033 6x - 0.210 1$	0.131 9

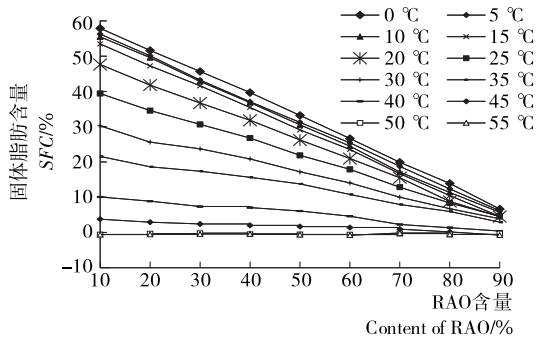


图 2 牛油与不同比例菜籽油的等温曲线图
Figure 2 Isothermal curves of different proportion of mixed oil of RAO and TAL

从图 3 可以看出,牛油与菜籽油体系在各比例下主要呈现偏晶现象;菜籽油含量为 10% 时,各温度下偏晶现象最严重,菜籽油含量在 20%~40% 比 10% 时稍有减弱;从温度上来看,在 10~35 °C 时 ΔSFC 均超过 1.5%;温度高于 45 °C 时, ΔSFC 变化范围变小,逐渐趋近于 0%。

整体来看,菜籽油与牛油在各比例下, ΔSFC 均在 1% 左右,体系的相容性较好,适合调和牛油相关产品的加工。

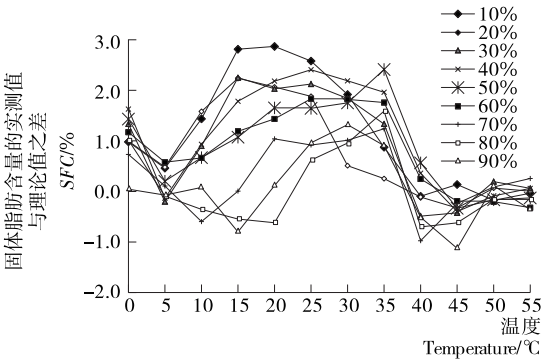


图 3 牛油与不同比例菜籽油的 ΔSFC 曲线图
Figure 3 ΔSFC values of different proportion of mixed oil of RAO and TAL

2.4 牛油与大豆油的二元混合体系相容性

从图 4 及表 3 可以看出,该组等温曲线的变化情况与菜籽油的情况类似,但在 0~15 °C 时,等温曲线更加密集,说明该温度范围内,各组固体脂肪含量下降趋势不大。

从图 5 可以看出,牛油与大豆油的二元混合体系在各温度下的 ΔSFC 均 $> 1.5\%$, 普遍存在偏晶现象,15 °C 时各组的 ΔSFC 普遍更高,大豆油含量为 50% 时 ΔSFC 最高,达到 5.8%, 偏晶现象最严重;仅 SOO 含量在 90% 时 ΔSFC 变

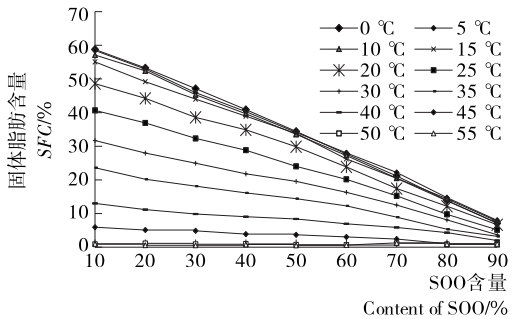


图 4 牛油与不同比例大豆油的等温曲线图
Figure 4 Isothermal curves of different proportion of mixed oil of SOO and TAL

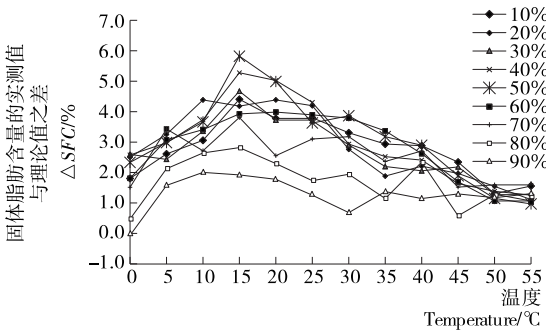


图 5 牛油与不同比例大豆油的 ΔSFC 曲线图
Figure 5 ΔSFC values of different proportion of mixed oil of SOO and TAL

化范围小于 $\pm 1.5\%$ 。整体来看,虽然等温曲线表现出较好的线性关系,但体系的偏晶现象较为严重,大豆油与牛油的二元体系相容性较差,同时,体系在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的等差曲线出现极值,该温度接近于室温,不利于调和牛油产品的实际应用。

2.5 牛油与橄榄油的二元混合体系相容性

从图6、表3可以看出,该组等温曲线在 $0\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时表现出良好的线性关系, $R^2 > 0.95$;温度高于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,等温曲线线性关系相对较差。

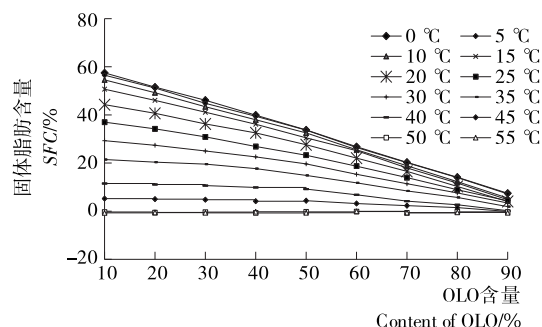


图6 牛油与不同比例橄榄油的等温曲线图

Figure 6 Isothermal curves of different proportion of mixed oil of OLO and TAL

从图7可以看出,该组体系以偏晶现象为主,温度为 $25\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$,橄榄油含量为 $40\%\sim 60\%$ 时最为严重,多组 ΔSFC 值超过 3% ;橄榄油含量在 $10\%, 20\%, 80\%, 90\%$ 时, ΔSFC 的变化范围为 $\pm 1.5\%$,2种植脂的相容性更好。整体来看,牛油与橄榄油的二元混合体系在牛油或橄榄油含量为 10% 和 20% 时,体系的相容性更好,偏晶现象主要出现在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后,高于室温,便于储藏和运输,因此比较适合于调和牛油产品的制作。

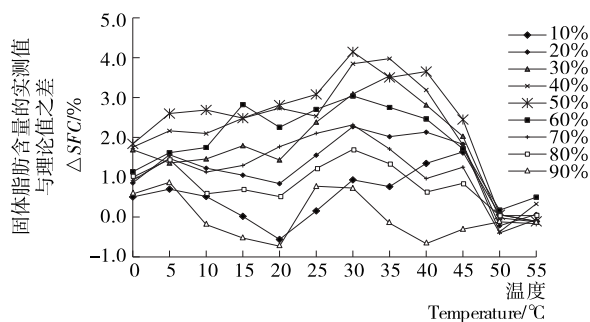


图7 牛油与不同比例橄榄油的 ΔSFC 曲线图

Figure 7 ΔSFC values of different proportion of mixed oil of OLO and TAL

2.6 牛油与调和油的二元混合体系

从图8、表3可以看出,该体系等温曲线在 $0\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时表现出良好的线性关系, $R^2 > 0.95$;温度高于 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,等温曲线趋近于 0% 。

从图9可以看出,该体系在各温度下主要出现偏晶现象;调和油含量为 50% 时,各温度下的偏晶现象更加严重,温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, ΔSFC 达到 3.6% ;调和油含量在 $10\%\sim 30\%$

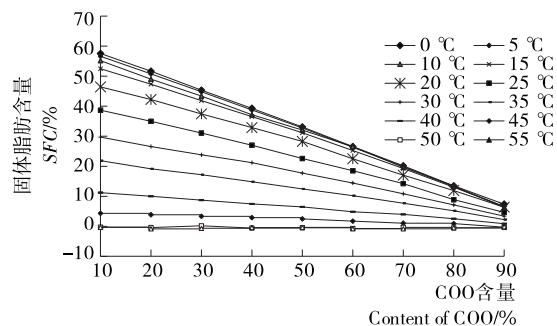


图8 牛油与不同比例调和油的等温曲线图

Figure 8 Isothermal curves of different proportion of mixed oil of COO and TAL

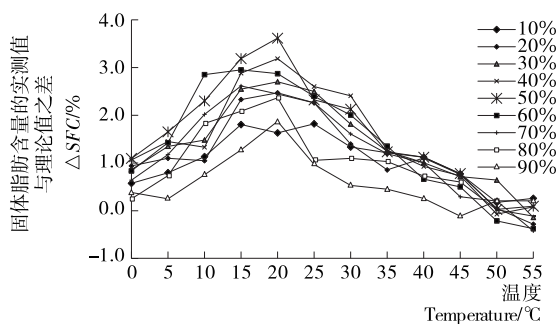


图9 牛油与不同比例调和油的 ΔSFC 曲线图

Figure 9 ΔSFC values of different proportion of mixed oil of COO and TAL

与 $70\%\sim 90\%$ 时, ΔSFC 整体均值均在 1% 左右,相比其他。比例,偏晶现象较弱。整体来看,仅温度在 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,大部分比例下的 ΔSFC 相对较高(为 $2\%\sim 3.0\%$),但牛油与调和油的复配比例相对于橄榄油更宽,考虑到原料价格更加便宜,调和油与牛油的复配产品同样可以接受。

3 结论

牛油与不同的植物油表现出不同的相容特性,不同比例的各组试验样品在不同的温度下都存在相容性较好的范围,结合原料油成本考虑,4种植物油脂与牛油的相容性由好到差分别为菜籽油>调和油>橄榄油>大豆油,各体系在不同温度下主要呈现偏晶现象,各组在 $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的等温曲线线性关系良好,其中菜籽油与牛油在各个比例下的混合油脂相容性最好,调和油与牛油在任一组分为 $10\%, 20\%, 30\%$,或与橄榄油在任一组分为 $10\%, 20\%$ 时,混合油脂表现出较好的相容性;大豆油相比于其他几种植物油的相容性较差。动物油与植物油的二元混合,从本质上来说使体系中甘油三酯的组成比例发生了改变,对油脂的不饱和度产生影响,进而对体系中的晶形及凝固特性产生影响。体系中甘油三酯的变化情况还需要在今后的研究中进一步讨论。

在生产应用中,可以利用牛油与其他油脂的融合特点进行合理调节,调配出品质稳定,质地柔软,脂肪酸组成合理的新型调和牛油产品,丰富牛油产品种类,为消费者提供更多选择。

(下转第110页)

4 结论

本试验对冰箱冻结虾仁进行数值模拟,采用等效热容法处理相变潜热,建立描述三维食品冻结过程的微分方程,预测了虾仁冻结过程中温度分布以及冻结时间,并考虑了虾仁在冷冻室的位置对冷冻过程的影响,所得的温度云图能直观地观察到随着距冰箱冷冻室底部蒸发盘管距离的增加,冻结时间逐渐增加;对模拟结果进行实验验证表明数值模拟能很好地反映虾仁内部温度场的变化,模拟冻结时间与实验冻结时间曲线相关系数为0.996,虾仁切面中心测点的最大误差值为1.85 K,由此可知数值模拟可以有效预测食品冻结过程中温度的分布,对虾仁的冷冻加工、品质控制以及速冻设备的设计优化具有重要意义。

参考文献

- [1] AWAD T S, MOHARRAM H A, SHALTOUT O E, et al. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review[J]. Food Research International, 2012, 48(2): 410-427.
- [2] JI Min, NIN Xin-chao, TANG Bo-ning, et al. Numerical simulation and experimental study on thawing time of cylindrical frozen food[J]. Advanced Materials Research, 2014, 989-994: 3 513-3 517.
- [3] 王金锋, 李文俊, 谢晶. 数值模拟在食品冻结过程中的应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 200-204.
- [4] NORTON T, SUN Da-wei. Computational fluid dynamics (CFD)-an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(11): 600-620.
- [5] CAMPAÑONE L A, SALVADORI V O, MASCHERONI R H. Food freezing with simultaneous surface dehydration. Approximate prediction of freezing time[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2005, 48(6): 1 205-1 213.
- [6] 唐婉, 王金锋, 李文俊, 等. 牛肉冻结过程中模拟及热值传递理论分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 117-121.
- [7] 刘庆, 熊善柏, 鲁长新, 等. 鲢鱼肉冷冻过程中传热预测模型的建立与验证[J]. 现代食品科技, 2017(3): 110-115.
- [8] CLELAND D J, CLELAND A C, EARLE R L, et al. Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by numerical methods[J]. International Journal of Refrigeration, 1987, 10(1): 32-39.
- [9] 李晓宇, 刘斌, 邸倩倩, 等. 马铃薯冻结过程中不同风速对相变界面的影响[J]. 食品科技, 2015(4): 76-81.
- [10] 杨小梅. 对虾冷冻过程的温度分析及其数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 50-61.
- [11] 李杰, 谢晶. 鼓风冻结虾仁时间的数值模拟及实验验证[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 248-252.
- [12] 华泽钊, 李云飞, 刘宝林. 食品冷冻冷藏原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [13] 王贵强, 邹平华, 刘明生, 等. 包装对食品冻结过程的影响研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 171-176.
- [14] MORGAN V T. The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders[J]. Advances in Heat Transfer, 1975, 11: 199-264.
- [15] XANTHAKIS E, HAVET M, CHEVALLIER S, et al. Effect of static electric field on ice crystal size reduction during freezing of pork meat[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20(4): 115-120.
- [16] PHAM Q T. Freezing time formulas for foods with low moisture content, low freezing point and for cryogenic freezing[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 127(4): 85-92.

(上接第35页)

参考文献

- [1] 施参, 常明, 刘睿杰, 等. 巴沙硬脂与6种油脂相容性的研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(2): 21-25.
- [2] 范婷婷. 低载量牛油粉末油脂配方及工艺技术研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014: 12-19.
- [3] 李桂华, 王成涛, 张玉杰, 等. 食用牛油理化特性及组成分析的研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2010, 31(1): 30-32, 36.
- [4] 王宏平, 徐斌, 李健. 油脂分提工艺的进展与应用[J]. 中国油脂, 2004, 29(7): 23-25.
- [5] 徐振波. 酯交换对牛油使用性能影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 1-7.
- [6] ANDRÉS L Marqufz, MARÍA P Pérez, JORGE R Wagner. Solid fat content estimation by differential scanning calorimetry: prior treatment and proposed correction[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2013, 90(4): 467-473.
- [7] PEDRO E D Augusto, BEATRIZ M C Soares, MING C Chiu, et al. Modelling the effect of temperature on the lipid solid fat content (SFC)[J]. Food Research International, 2012, 45(1): 132-135.
- [8] 高佳佳, 马腾飞, 方庆敏, 等. 猪油与3种植物油二元混合体系相容性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(13): 53-57, 63.
- [9] 夏莹. 猪油与棕榈油混合体系的相容性研究与应用[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [10] 张婷, 金青哲, 王兴国. 棕榈仁油与五种油脂相容性的研究[J]. 中国油脂, 2006, 31(11): 26-29.
- [11] 魏超昆, 刘关瑞, 房想, 等. 鸡油固体脂肪与5种起酥油基料油相容性研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(11): 27-32.
- [12] 徐爱军, 俞金波, 张榴萍, 等. 油脂固体脂肪含量测定影响因素探讨[J]. 粮油加工, 2010(9): 26-29.
- [13] 池娟娟, 孟宗, 李进伟, 等. 棕榈油基基料油相容性及结晶形态的研究[J]. 中国油脂, 2012, 37(5): 16-21.
- [14] 朱向菊, 裴爱冰, 金青哲. 以猪油分提固脂为原料的起酥油的研制[J]. 中国油脂, 2005, 30(8): 12-15.
- [15] 华聘聘. 甘油三酯间和油脂间相容性[J]. 粮食与油脂, 1993(3): 31-38.
- [16] 肖新生, 杨天奎. 脂类结晶习性的研究[J]. 粮油加工, 2008(4): 75-77.