

# 营养均衡动植物调和油的研制

于海坤, 刘爱成, 陈佳丽, 李墨翰, 杨梅, 杨柳, 岳喜庆\*

(沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866)

**摘要:** 为更加符合成人脂肪酸平衡要求, 满足消费者摄入营养健康油脂的需求, 以 11 种常见植物油和分提牛油为原料, 在满足脂肪酸平衡和营养成分含量前提下, 以价格为指标, 使用 Matlab 软件进行建模编程得到营养均衡动植物调和油配方, 通过单因素及正交试验设计对调配工艺进行优化, 并对其进行货架期的预测。结果表明, 营养均衡动植物调和油的配比为: 分提牛油 8.00%, 玉米油 16.40%, 亚麻籽油 72.20%, 芝麻油 3.40%; 单价为每百毫升 0.28 元; 实际测得饱和脂肪酸占 12.78%,  $\omega$ -6/ $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸 (Polyunsaturated Fatty Acids, PUFA) 的值为 5.99, 在 4-6:1 之间, 单不饱和脂肪酸 (Monounsaturated Fatty Acids, MUFA) 与 PUFA 的质量分数比为 0.96, 基本满足 MUFA:PUFA 约为 1:1, 所配得的调和油脂脂肪酸比例与期望值相符; 最佳调配工艺为: 搅拌时间 30 min、TBHQ 添加量 15 mg、搅拌温度 20 °C; 营养均衡动植物调和油保质期为 18 个月。研究结果为营养平衡健康的调和油开发奠定了理论依据, 为食用油企业新产品研发提供新的途径。

**关键词:** 营养均衡; 调和油; 不饱和脂肪酸

文章编号: 1673-9078(2023)01-160-169

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.1.0215

## Development of Nutritionally Balanced Animal and Plant Blend Oil

YU Haikun, LIU Aicheng, CHEN Jiali, LI Mohan, YANG Mei, YANG Liu, YUE Xiqing\*

(College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** In order to better meet the requirements of fatty acid balance for adults and meet the demands of consumers for nutritional and healthy oils, 11 kinds of common vegetable oils and fractionated butter were used as the raw materials. On the premise of meeting the requirements of fatty acid balance and nutrient content, the price is taken as the index, and the MATLAB software was used for modeling and programming to obtain the formula of nutritionally balanced animal and vegetable blend oil. The blending process was optimized by the single factor and orthogonal experimental designs, and the shelf life was predicted. The results showed that the proportion of nutritionally balanced animal-plant blend oil was as follows: fractionated butter 8.00%, corn oil 16.40%, flaxseed oil 72.20%, sesame oil 3.40%; the unit price was 0.28 yuan per 100 ml, The actual measurements revealed the composition as follows: saturated fatty acids, 12.78%;  $\omega$ -6/ $\omega$ -3 polyunsaturated fatty acids (PUFA) ratio, 5.99 (which was between 4 and 6:1); the mass ratio of monounsaturated fatty acids (MUFA) to PUFA, 0.96 (which basically meets the required MUFA-to-PUFA ratio of 1:1). The fatty acid ratio of the blend oil was consistent with the expected value. The optimum blending process was as follows: stirring time, 30 min; TBHQ addition, 15 mg; stirring temperature, 20 °C. The nutritionally balanced animal and plant blend oil had a shelf life of 18 months. The results of this study lay a theoretical foundation for the development of nutritionally balanced and healthy blend oils, and provide a new path for edible oil enterprises to develop new products.

**Key words:** nutritional balance; blending oil; Unsaturated Fatty Acids (UFA)

引文格式:

于海坤,刘爱成,陈佳丽,等.营养均衡动植物调和油的研制[J].现代食品科技,2023,39(1):160-169

YU Haikun, LIU Aicheng, CHEN Jiali, et al. Development of nutritionally balanced animal and plant blend oil [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(1): 160-169

油脂是食物中重要组成成分,是重要的能量物质,

收稿日期: 2022-03-01

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2018YFC1604302-03)

作者简介: 于海坤 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 动物源食品加工利用, E-mail: yxksp1827@163.com

通讯作者: 岳喜庆 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 动物源食品加工利用, E-mail: yxqsyau@126.com

也是细胞、组织等主要结构组成的基础原料<sup>[1]</sup>, 参与机体的众多生理功能调节, 除了提供人体所需的必需脂肪酸, 还含有脂溶性维生素、植物甾醇、角鲨烯等功能性有益伴随物<sup>[2,3]</sup>, 促进身体、大脑、视力的发育<sup>[4]</sup>。若长期食用单一植物油容易导致营养单一, 体内某些脂肪酸过量或者不足、部分微量元素缺失等。尤其是  $\omega$ -3 脂肪酸摄入不足<sup>[5]</sup>。大量研究表明, 脂类

与血管疾病、胆汁淤积、肥胖等多种疾病的发生直接相关<sup>[6-10]</sup>，不同种类的脂肪酸对人体健康的影响也不相同，研究表明，饱和脂肪酸（Saturated Fatty Acids, SFA）摄入过量引起心血管等一系列疾病<sup>[11]</sup>，SFA 过低不利于婴幼儿和青少年的发育，可能增加心脏的出血<sup>[12]</sup>；单不饱和脂肪酸（Monounsaturated Fatty Acids, MUFA）、多不饱和脂肪（Polyunsaturated Fatty Acids, PUFA）能预防凝血和动脉粥样硬化、降血压、降血脂，减少冠心病的发病危险性<sup>[13-16]</sup>，但 PUFA 很容易发生氧化，过量摄入多不饱和脂肪酸会引起体内脂质过氧化<sup>[5]</sup>。同时，人体摄入的脂肪酸不仅需要摄入量合适，而且还要比例适宜。 $\omega$ -3 PUFA 与  $\omega$ -6 PUFA 在影响机体免疫的机制上具有竞争效应， $\omega$ -3 和  $\omega$ -6 的比例会对免疫功能产生影响， $\omega$ -3 PUFA 比率低时能增强非特异性抗性和免疫反应<sup>[17-20]</sup>。适宜的 PUFA 比例也有利于预防心血管疾病、肿瘤等<sup>[21-23]</sup>。维持  $\omega$ -3 PUFA 与  $\omega$ -6 PUFA 比例的动态平衡，对体内环境稳定、维持细胞因子、调控基因表达及脂蛋白的平衡等方面具有重要作用<sup>[24,25]</sup>。

联合国粮农组织、世界卫生组织以及各国家对脂肪酸均衡及生理代谢进行大量研究，并制定了膳食脂肪与脂肪酸比例的参考摄入量相应的标准<sup>[26-30]</sup>。根据我国居民饮食习惯，中国营养学会推荐 SFA 不超过 10%； $\omega$ -6 PUFA 含量为 2.50%~9.00%； $\omega$ -3 PUFA 含量为 0.50%~2.00%；多不饱和脂肪酸中  $\omega$ -6 与  $\omega$ -3 的质量比是(4~6):1<sup>[31]</sup>。已知的天然的单一油脂不论植物油还是动物油的脂肪酸比例都难以满足营养要求，调和油是指两种及两种以上的食用油根据营养需求以及科学的比例进行调配的一种新型的食用油，不仅可以弥补单一食用油营养过量或不足的缺陷，还能符合脂肪酸比例的需求。市场的植物食用油琳琅满目，但调和食用油较少，符合脂肪酸平衡的调和油更寥寥无几。植物油调和后的油脂风味和口感会大大降低，所以被消费者的青睐程度并不高<sup>[32]</sup>，而牛油不仅能提供独特浓郁的风味，还具有丰富脂溶性维生素极易被吸收，同时还含有抗氧化能力强的微量硒元素，但是由于高熔点和饱和脂肪酸特性，常对其进行改性，通过分提后使其更适合食用。营养均衡调和油配方计算采用 Matlab 建立数学模型，可转化为线性模型，降低了计算的难度、复杂度，且准确率高、耗时短，也可根据实际需求设定目标参数、原料油、营养含量等，应用方便灵活，Matlab 软件在调和油的配方设计中被广泛使用<sup>[33]</sup>。

本研究以常见的多种植物油及牛油为原料，考虑油脂营养价值、口感风味及市场价格等因素，通过建立相应的数学模型计算出脂肪酸配比合理、价格最优

的各原料油的配比，通过最佳调配工艺对原料油进行调配得到营养均衡动植物调和油，并预测其货架期。通过本研究缓解了消费者食用单一食用油营养功能结构不合理的问题，促进我国调和油的健康发展，对保证消费者健康和提高食品安全具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

精炼牛油、稻米油、低芥酸菜籽油、菜籽油、花生油、玉米油、葵花籽油、茶油、橄榄油、亚麻籽油、芝麻油、大豆油均为市售；37 种脂肪酸甲酯混合标准品，索莱宝生物科技有限公司；胆固醇标准品（纯度 >99%），上海麦克林生化科技有限公司；正己烷、三氯甲烷、冰乙酸、韦氏试剂国产分析纯

### 1.2 仪器与设备

Aglient 7820A 气相色谱仪、Aglient 1100 高效液相色谱仪，美国安捷伦公司；电热恒温鼓风干燥箱，上海福玛实验设备有限公司；JB-1 型磁力搅拌器，天津市欧谱仪器仪表有限公司；7200-紫外-可见分光光度计，尤尼柯有限公司；分析天平 ALC-210.4，德国赛多利斯艾科勒公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 溶剂法分提牛油

称取适量的牛油，80 °C 水浴恒温加热 30 min 后，在 60 °C 水浴中继续保持 15 min，按丙酮与牛油 10:1 (V:m) 的比例加入丙酮，放入转子，通过超级恒温水浴锅混合均匀，设置工作参数，初始温度 40 °C，搅拌速率 300 r/min，搅拌时间 20 min，得到混匀的液体立刻降温至 10 °C，并在此温度下保持 24 h 充分结晶，结束后真空抽滤得到固脂，旋转蒸发滤液回收丙酮，同时得到分提液体牛油<sup>[34]</sup>。

#### 1.3.2 理化指标的测定

酸价：参照《食品安全国家标准食品中酸价的测定》（GB 5009.229-2016）中冷溶剂指示剂滴定法测定；过氧化值：参照《食品安全国家标准食品中过氧化值的测定》（GB 5009.227-2016）中滴定法测定；碘值：参照《动植物油脂碘值的测定》（GB/T 5532-2008）测定；皂化值：参照《动植物油脂皂化值的测定》（GB/T 5534-2008）测定；熔点：参照《动植物油熔点测定》（GB/T 12766-2008）执行测定；胆固醇：参照《食品安全国家标准食品中胆固醇的测定》（GB 5009.128-2016）测定。

### 1.3.3 脂肪酸组成及含量的测定

参照文献杨春英等<sup>[35-37]</sup>的方法并略有改动：称取 0.05 g（精确到 0.000 1 g），将油脂置于 10 mL 具塞玻璃试管中，加入 5.0 mL 0.5 mol/L NaOH-CH<sub>3</sub>OH 溶液，涡旋 40 s 混合均匀，65 °C 水浴下反应 40 min（每 5 min 摇匀一次），加入 5.0 mL 正己烷，摇匀后静置分层，取上层清液，加入 0.6 g 无水硫酸钠振摇，中和 NaOH 并干燥，静置后上清液用 0.22 μm 有机过滤器过滤，等待 GC-MS 分析。

GC 条件：色谱柱：HP-FFAP 石英毛细管色谱柱（30×0.25 mm，ID 0.25 μm）；进样口温度：250 °C；载气：高纯氦气（纯度>99.999%）；进样量：1.0 μL，流速：1.0 mL/min，分流比为 20:1；柱温箱程序升温：初始温度 180 °C，维持 1 min，以 3 °C/min 升温速率升至 230 °C，维持 10 min。

MS 条件：电子电离离子源；电子能量 70 eV；离

子源温度 230 °C；接口温度 250 °C；四极杆温度 150 °C；传输线温度 280 °C；扫描质量范围 30~450 u，全扫描方式；不延迟。

将样品的峰与 37 种脂肪酸甲酯混合标准品各色谱峰保留时间对比，通过 NIST 质谱库辅助进行样品脂肪酸定性分析，运用峰面积归一化法和标准曲线法计算各脂肪酸含量百分比进行定量分析。

### 1.3.4 营养均衡动植物调和油的调配目标

参照 2013 版《中国居民膳食营养素参考摄入量》有关成人脂肪酸推荐参考摄入量及相关文献为营养均衡动植物调和油的调配目标<sup>[31]</sup>。

### 1.3.5 运用 Matlab 建立数学模型

混合植物油中各原料油比例优化；利用 Matlab 软件按照表 1 设定优化的条件对原料油的进行配比，设调和油的价格为优化指标，具体参数的表示方法如表 2 所示。

表 1 营养均衡动植物调和油的调配目标

成分	SFA/%	ω-6 PUFA/%	ω-3 PUFA/%	MUFA:PUFA
成人含量范围	<10	2.50~9.00	0.50~2.00	1:1

表 2 原料油各成分参数设定

序号	脂肪酸	SFA(a <sub>1</sub> )/%	MUFA(a <sub>2</sub> )/%	PUFA(a <sub>3</sub> )/%	ω-6 PUFA(a <sub>4</sub> )/%	ω-3 PUFA(a <sub>5</sub> )/%	价格/(¥/kg)	
1	分提牛油	x <sub>1</sub>	a <sub>11</sub>	a <sub>12</sub>	a <sub>13</sub>	a <sub>14</sub>	a <sub>15</sub>	C <sub>1</sub>
2	稻米油	x <sub>2</sub>	a <sub>21</sub>	a <sub>22</sub>	a <sub>23</sub>	a <sub>24</sub>	a <sub>25</sub>	C <sub>2</sub>
3	低芥酸菜籽油	x <sub>3</sub>	a <sub>31</sub>	a <sub>32</sub>	a <sub>33</sub>	a <sub>34</sub>	a <sub>35</sub>	C <sub>3</sub>
4	菜籽油	x <sub>4</sub>	a <sub>41</sub>	a <sub>42</sub>	a <sub>43</sub>	a <sub>44</sub>	a <sub>45</sub>	C <sub>4</sub>
5	花生油	x <sub>5</sub>	a <sub>51</sub>	a <sub>52</sub>	a <sub>53</sub>	a <sub>54</sub>	a <sub>55</sub>	C <sub>5</sub>
6	玉米油	x <sub>6</sub>	a <sub>61</sub>	a <sub>62</sub>	a <sub>63</sub>	a <sub>64</sub>	a <sub>65</sub>	C <sub>6</sub>
7	葵花籽油	x <sub>7</sub>	a <sub>71</sub>	a <sub>72</sub>	a <sub>73</sub>	a <sub>74</sub>	A <sub>75</sub>	C <sub>7</sub>
8	茶油	x <sub>8</sub>	a <sub>81</sub>	a <sub>82</sub>	a <sub>83</sub>	a <sub>84</sub>	a <sub>85</sub>	C <sub>8</sub>
9	橄榄油	x <sub>9</sub>	a <sub>91</sub>	a <sub>92</sub>	a <sub>93</sub>	a <sub>94</sub>	a <sub>95</sub>	C <sub>9</sub>
10	亚麻籽油	x <sub>10</sub>	a <sub>101</sub>	a <sub>102</sub>	a <sub>103</sub>	a <sub>104</sub>	a <sub>105</sub>	C <sub>10</sub>
11	芝麻油	x <sub>11</sub>	a <sub>111</sub>	a <sub>112</sub>	a <sub>113</sub>	a <sub>114</sub>	a <sub>115</sub>	C <sub>11</sub>
12	大豆油	x <sub>12</sub>	a <sub>121</sub>	a <sub>122</sub>	a <sub>123</sub>	a <sub>124</sub>	a <sub>125</sub>	C <sub>12</sub>

如表 2，设每种原料油占总油的百分含量为 x<sub>i</sub>，x<sub>i</sub> ≥ 0，i=1, 2, 3, …, 10, 11, 12。每种原料油中各种脂肪酸的百分含量为 a<sub>ij</sub>，a<sub>ij</sub> ≥ 0，i=1, 2, 3, …, 10, 11, 12；j=1, 2, 3, 4, 5。优化指标设定为营养均衡动植物调和油的价格，建立相应数学模型为：

①假设调和油总量为 1，各原料油占混合油总量的百分比加和为 100%，因此建立条件公式：

$$\sum_{i=1}^{12} X_i = 1$$

②ω-6 PUFA：ω-3 PUFA 的比例为 4:1~6:1 之间，

因此建立条件公式：

$$4 \leq \sum_{i=1}^{12} X_i a_{i4} : \sum_{i=1}^{12} X_i a_{i5} \leq 6$$

③MUFA：PUFA 的比例为 1:1 之间，因此建立条件公式：

$$1 \leq \sum_{i=1}^{12} X_i a_{i2} : \sum_{i=1}^{12} X_i a_{i3} \leq 1$$

④以调和油总价 Y 最少为目标，因此建立公式：

$$Y = (x_1 C_1 + x_2 C_2 + x_3 C_3 + x_4 C_4 + x_5 C_5 + x_6 C_6 + x_7 C_7 + x_8 C_8 + x_9 C_9 + x_{10} C_{10} + x_{11} C_{11} + x_{12} C_{12}) \times 10^{-3}$$

根据所建立的数学模型基础之上,调用 Matlab 软件中的 Linprog 线性约束优化函数,具体 Linprog 函数程序公式如下:

$[x, fval, exitflag, output, lambda]=linprog(f, A, b, Aeq, beq, lb, ub, x_0)$

式中:

$x$ ——最优条件下取得的解;

$fval$ ——最优解  $x$  处的目标函数值;

$exitflag$ ——退出条件;

$output$ ——含有优化信息的输出结构;

$lambda$ ——将  $x$  解返回到函数中的拉格朗日乘子;

$f$ ——是优化参数  $x$  最小化的系数矩阵;

$A$ ——线性不等式约束条件函数  $x$  前系数;

$b$ ——不等式约束条件的矩阵;

$Aeq$ ——线性方程约束条件函数  $x$  前系数;

$beq$ ——线性方程约束条件的矩阵;

$lb, ub-x$ ——点的上界和下界;

$x_0$ ——初始值。

### 1.3.6 优化调和油调配工艺的单因素试验

按照 1.3.5 计算所得的比例称取原料油置于锥形瓶中,内置磁性转子,利用超级恒温水浴锅,通过调控搅拌时间(5、15、30、45、60 min)、搅拌温度(20、30、40、50、60 °C)、搅拌转速(200、400、600、800、1 000 r/min)及叔丁基对苯二酚(Tertiary Butylhydroquinone, TBHQ)添加量(10、15、20、25、30 mg)进行调和油调配,结合酸值和过氧化值的变化趋势为判断指标,以确定最佳调配工艺。

### 1.3.7 正交试验

根据单因素试验结果,选取三个主要因素设计了三因素三水平正交试验(见表 3),以酸值和过氧化值为考察指标,每组实验重复 3 次。

表 3 正交实验因素水平表

Table 3 Orthogonal experiment factor level table

水平	因素		
	A(搅拌时间)/min	B(TBHQ 添加量)/mg	C(搅拌温度)/°C
-1	20	10	20
0	30	15	30
1	40	20	40

### 1.3.8 营养均衡动植物调和油货架期的预测

采用 Schaal 烘箱法,将调配好的调和油置于(60±1)°C的恒温培养箱中加速氧化,每隔 12 h 晃动一次,且任意更换其在培养箱中的位置。每隔 24 h 测定一次酸价及过氧化值,得出调和油到达过氧化值上限,参照 Arrhenius 经典公式中温度与货架期的系数关系,利用外推法对营养均衡动植物调和油在室温下的

货架期进行预测<sup>[38,39]</sup>。

Arrhenius 经典公式如下:

$$K_{(T+10^{\circ}\text{C})}/K_{(T)}=2$$

式中:

$K$ ——反应速度常数;

$T$ ——贮存温度,°C。

## 1.4 数据处理

所有实验均至少重复 3 次,数据以平均值±标准差的形式表示;选用 IBM SPSS 软件进行差异显著性分析及正交试验数据处理;采用 Origin 2021 进行图表绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 牛油及其分提牛油的理化指标及脂肪酸

组成

表 4 牛油及其分提牛油的理化指标表

Table 4 Physical and chemical index table of tallow and its

理化指标	extract oil	
	牛油	分提牛油
酸价/(mg/g)	0.14±0.02 <sup>a</sup>	0.38±0.03 <sup>b</sup>
过氧化值/(meq/kg)	1.56±0.21 <sup>a</sup>	1.78±0.18 <sup>a</sup>
碘值/(g/100 g)	42.54±0.24 <sup>a</sup>	65.69±0.32 <sup>b</sup>
熔点/°C	43.83±0.53 <sup>a</sup>	21.74±0.44 <sup>b</sup>
皂化值/(mg/g)	194.01±0.38 <sup>a</sup>	202.73±0.39 <sup>a</sup>
胆固醇含量/(mg/100 g)	100.43±0.24 <sup>a</sup>	80.55±0.21 <sup>b</sup>

注:不同的小写字母表示有显著性差异,显著性水平  $p<0.05$ 。

由表 4 可以看出,分提后的牛油酸价提高了 0.24 mg/g,酸价越低油脂质量越好,推测在分提过程中油脂被水解为游离脂肪酸,故酸价上升。过氧化值变化不显著,这可能与它的脂肪酸组成有关,牛油中饱和脂肪酸的含量较高。碘值是衡量油脂不饱和度的一种指标,碘值越大,油脂的不饱和程度越高。而熔点与碘值表示正相反,熔点越低,其不饱和程度越高<sup>[40]</sup>。分提牛油的碘价升高,说明组成分提牛油的不饱和度提高,而分提牛油的熔点从原料牛油 43.83 °C 降至 21.74 °C,熔点的变化由甘油三酯直接决定,溶剂法分提在冷却过程中使高熔点的饱和甘油三酯生成晶体析出后过滤,则低熔点的饱和甘油三酯富集在分离后的分提牛油中,导致熔点降低,与碘价变化吻合,有利于调和油的制备及室温下的贮藏状态不易发生改变<sup>[41]</sup>;分提牛油的皂化值显著提高了 8.72 mg/g,

皂化值反应了油脂脂肪酸的平均分子量大小, 分子量越小, 皂化值越高。分提牛油中脂肪酸分子碳链较短, 故皂化值升高; 分提牛油的胆固醇含量降低, 可能是溶剂法分提时部分胆固醇溶于丙酮, 这同时也表明溶剂法分提是降低胆固醇含量的有效手段<sup>[34]</sup>。

表5 牛油及其分提牛油的脂肪酸组成

Table 5 Fatty acid composition of beef tallow and its fractions

脂肪酸	固体牛油/%	分提牛油/%
C14:0	4.53±0.34 <sup>a</sup>	4.05±0.51 <sup>a</sup>
C15:0	1.58±0.23 <sup>a</sup>	1.36±0.66 <sup>a</sup>
C16:0	24.64±0.12 <sup>a</sup>	18.85±0.43 <sup>b</sup>
C16:1	2.71±0.45 <sup>a</sup>	4.01±0.53 <sup>b</sup>
C17:0	4.99±0.32 <sup>a</sup>	4.39±0.46 <sup>a</sup>
C18:0	23.01±0.29 <sup>a</sup>	17.18±0.57 <sup>b</sup>
C18:1n9t	2.19±0.23 <sup>a</sup>	5.44±0.21 <sup>b</sup>
C18:1n9c	33.90±0.71 <sup>a</sup>	39.23±0.56 <sup>b</sup>
C18:2n6c	1.64±0.65 <sup>a</sup>	4.58±0.80 <sup>b</sup>
C20:0	0.33±0.17 <sup>a</sup>	0.16±0.09 <sup>a</sup>
C18:3n3	0.47±0.16 <sup>a</sup>	0.76±0.33 <sup>b</sup>
C22:0	ND	ND
C22:1n9	ND	ND
SFA	59.09	45.98
MUFA	38.80	48.67
PUFA	2.12	5.34

注: ND.未检出, 定义为脂肪酸含量≤0.05%; 不同的小写字母表示有显著性差异, 显著性水平  $p < 0.05$ 。

由表5可以看出, 分提牛油中总SFA比牛油降低了13.11%, 总MUFA、PUFA分别升高了9.87%、3.22%。

表6 原料油的脂肪酸组成

Table 6 Orthogonal experiment factor level table

序号	脂肪酸	SFA/%	MUFA/%	PUFA/%	$\omega$ -6 PUFA/%	$\omega$ -3 PUFA/%	$\omega$ -6/ $\omega$ -3 PUFA	MUFA/PUFA	价格/(¥100 mL)
1	分提牛油	45.98	48.67	5.34	4.59	0.76	6.04	9.11	17.2
2	稻米油	19.09	43.61	37.30	35.79	1.51	23.75	1.17	23.8
3	低芥酸菜籽油	7.26	63.94	28.80	19.51	9.28	2.10	2.22	19.0
4	菜籽油	7.63	66.91	25.46	17.53	7.93	2.21	2.63	11.8
5	花生油	24.74	46.15	29.12	29.12	ND	ND	1.58	26.9
6	玉米油	16.39	26.96	56.65	54.97	1.69	32.61	0.48	16.8
7	葵花籽油	11.16	27.49	61.35	60.49	0.87	69.82	0.45	16.0
8	茶油	10.01	81.47	8.53	8.53	ND	ND	9.55	89.5
9	橄榄油	9.59	85.45	4.97	4.34	0.63	6.95	17.21	60.5
10	亚麻籽油	7.41	16.48	76.11	15.39	60.72	0.25	0.22	32.2
11	芝麻油	15.48	41.79	42.73	42.73	ND	ND	0.98	14.6
12	大豆油	19.73	28.35	51.92	44.86	7.06	6.36	0.55	9.80

注: ND.未检出, 定义为脂肪酸含量≤0.05%; 原料油价格以2021年国内市场平均价格计算。

其中, 分提牛油中棕榈酸(C16:0)含量从24.64%减少到18.85%, 硬脂酸(C18:0)含量减少了5.83%, 油酸(C18:1)含量从33.90%增加到39.23%。这与表4中分提牛油的碘值和熔点的变化一致。此外, 分提牛油的亚油酸(C18:2)含量增加了2.94%, 亚麻酸(C18:3)相比牛油而言略有上升。综上可知, 溶剂法分提法可有效降低牛油的饱和度, 改善油脂质量, 拓宽牛油的使用范围。

## 2.2 原料油的脂肪酸组成

由表6所知, 分提牛油SFA含量较高而PUFA含量仅占5.34%, 脂肪酸比例严重失衡, 饮食中低水平的PUFA:SFA比率(低于0.45)是血液胆固醇水平升高的一个风险因素。用于治疗或预防疾病的 $\omega$ 6: $\omega$ 3脂肪酸的最佳比例为4:1至6:1, 这一比例在亚麻籽油、玉米油和橄榄油中分别为0.25、32.61和69.82, 纯油均不具有最佳的 $\omega$ 6: $\omega$ 3比率, 亚麻籽油由于其高水平的亚麻酸可以有效改善纯油的 $\omega$ 6: $\omega$ 3比率。稻米油是最接近人体需求的植物油, 但 $\omega$ 6: $\omega$ 3比率偏高, 低芥酸菜籽油、菜籽油、花生油、茶油中MUFA含量远高于PUFA含量, 橄榄油中MUFA含量高达85.45%; 而玉米油、葵花籽油、大豆油MUFA含量却低于PUFA含量, 亚麻籽油中PUFA含量超过75%, 存在易氧化稳定性差的问题, 均不符合MUFA和PUFA的比例约为1:1。由此可见, 多种原料油需要调和才符合人体对均衡摄入脂肪酸的要求。各种原料油的混合能够使PUFA、MUFA和SFA均匀分布, 因此平衡了制备的调和油中的脂肪酸组成<sup>[42]</sup>。

### 2.3 建立数学模型确定调和油最优配比

调和油满足营养均衡的前提下,以调和油总价  $Y$  最小值为指标,利用 Matlab 软件中约束优化函数 linprog 求解几种原料油的最佳配比,可建立以下线性规划模型:

$$Y_{\min}=0.173x_1+0.238x_2+0.190x_3+0.118x_4+0.269x_5+0.168x_6+x_7+x_8+x_9+x_{10}+x_{11}+x_{12}=100\%$$

$$6.04x_1+23.75x_2+2.10x_3+2.21x_4+32.61x_6+69.82x_7+6.95x_9+0.25x_{10}+6.36x_{12}\leq 6$$

$$-6.04x_1-23.75x_2-2.10x_3-2.21x_4-32.61x_6-69.82x_7-6.95x_9-0.25x_{10}-6.36x_{12}\leq -4$$

$$-9.11x_1-1.17x_2-2.22x_3-2.63x_4-1.58x_5-0.48x_6-0.45x_7-9.55x_8-17.21x_9-0.22x_{10}-0.98x_{11}-0.55x_{12}\leq -1$$

$$9.11x_1+1.17x_2+2.22x_3+2.63x_4+1.58x_5+0.48x_6+0.45x_7+9.55x_8+17.21x_9+0.22x_{10}+0.98x_{11}+0.55x_{12}\leq 1$$

$$x_1\geq 0.08, x_2\geq 0, x_3\geq 0, x_4\geq 0, x_5\geq 0, x_6\geq 0, x_7\geq 0, x_8\geq 0, x_9\geq 0, x_{10}\geq 0, x_{11}\geq 0, x_{12}\geq 0$$

$$Y_{\min}=(17.2x_1+23.8x_2+19.0x_3+11.8x_4+2.69x_5+16.8x_6+16.0x_7+89.5x_8+60.5x_9+32.2x_{10}+14.6x_{11}+9.80x_{12})\times 10^3$$

根据该模型的具体要求,利用 Matlab 语言代码编

程调用 Linprog 函数:

$$f=[0.172; 0.238; 0.190; 0.118; 0.269; 0.168; 0.160; 0.895; 0.605; 0.322; 0.146; 0.980]$$

$$A=[6.04 \ 23.75 \ 2.10 \ 2.21 \ 0 \ 32.61 \ 69.82 \ 0 \ 6.95 \ 0.25 \ 0 \ 6.36 \ -6.04 \ -23.75 \ -2.10 \ -2.21 \ 0 \ 32.61 \ -69.82 \ 0 \ -6.95 \ -0.25 \ 0 \ -6.36; \ 9.11 \ 1.17 \ 2.22 \ 2.63 \ 1.58 \ 0.48 \ 0.45 \ 9.55 \ 17.21 \ 0.22 \ 0.98 \ 0.55; \ -9.11 \ -1.17 \ -2.22 \ -2.63 \ -1.58 \ -0.48 \ -0.45 \ -9.55 \ -17.21 \ -0.22 \ -0.98 \ -0.55; \ 45.98 \ 19.09 \ 7.26 \ 7.63 \ 24.74 \ 16.39 \ 11.16 \ 10.01 \ 9.59 \ 7.41 \ 15.48 \ 19.73; \ -1 \ 0]$$

$$b=[6 \ -4 \ 1 \ -1 \ -0.08]$$

$$Aeq=[1 \ 1]$$

$$beq=[1]$$

$$lb=zeros(12, 1)$$

$$[x, fval, exitflag, output, lambda]=linprog(f, A, b, Aeq, beq, lb)$$

利用建立的数学模型、Excel 和 MATLAB 软件得出营养均衡动植物调和油的配方,结果见表 7。

表 7 原料油在调和油配方中用量 (%)

Table 7 Dosage of raw oil in blended oil formula (%)

原料油	分提牛油	玉米油	亚麻籽油	芝麻油	单价/(¥100 mL)
配比	8.00	16.36	72.18	3.45	0.28

根据运行结果可知,在营养均衡动植物调和油中,分提牛油占 8.00%,玉米油占 16.36%,亚麻籽油占 72.18%,芝麻油占 3.45%,调和油的单价为 0.28 元/kg。实际调配中,分提牛油占 8.00%,玉米油占 16.40%,亚麻籽油占 72.20%,芝麻油占 3.40%,调和油的单价为每百毫升 0.28 元。此时调和油中的脂肪酸理论值 SFA 为 12.24%, $\omega$ -6/ $\omega$ -3 PUFA 的值为 6.01, MUFA 与 PUFA 的比值为 1.00,结果均在约束条件范围,故选择上述比例进行复配。实际通过 GC-MS 测得脂肪酸的结果为 SFA 占 12.78%, $\omega$ -6/ $\omega$ -3 PUFA 的值为 5.99,在 4~6:1 之间, MUFA 与 PUFA 的质量分数比为 0.96,基本满足 MUFA:PUFA 约为 1:1,符合中国营养学会推荐的比例,满足了成人脂肪酸平衡的需求,从而促进大脑和机体等的良好发育。

### 2.4 优化调和油调配工艺的单因素试验

#### 2.4.1 调和油最佳搅拌时间的确定

由图 1 可知,营养均衡动植物调和油酸价和过氧化值随搅拌时间增加的变化趋势不同。酸价逐渐增长,从 0.10 mg/g 缓慢增至 0.22 mg/g,最后突增至 0.48 mg/g,

可能是随着时间延长油脂氧化增加。而过氧化值变化不稳定且幅度大,从 5 min 到 15 min 增加了 0.26 meq/kg,其原因可能是搅拌过程中调和油与外界刚接触,内部状态不稳定,导致过氧化值增加;而从 15 min 至 30 min 过氧化值却下降,可能是搅拌后抗氧化剂与调和油充分接触,且使酸败产生的小分子醛酮类物质散发出去<sup>[43]</sup>;之后过氧化值继续升高至 2.02 meq/kg。

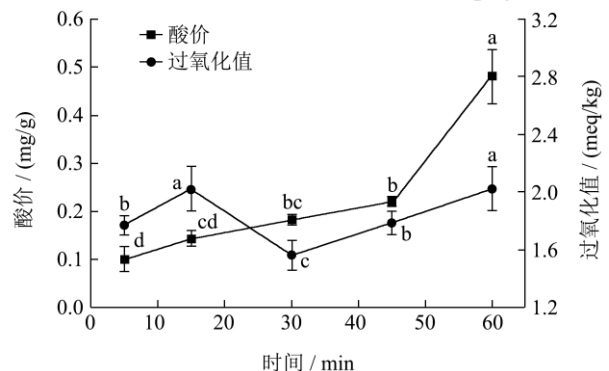


图 1 搅拌时间对调和油酸价与过氧化值的影响

Fig.1 Effect of stirring time on the valence and peroxide value of reconstituted oleic acid

注: 不同的小写字母表示有显著性差异,  $p<0.05$ , 下同。

### 2.4.2 调和油最佳搅拌温度的确定

由图 2 可知, 搅拌温度对营养均衡动植物调和油酸价和过氧化值均有显著性影响, 随着温度的上升, 调和油酸价呈先上升后下降趋势, 过氧化值呈先下降后上升的趋势。当温度升高至 50 °C 时, 酸价达到最大值为 0.27 mg/g, 在油脂氧化初期阶段, 温度使饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸均不稳定, 但不饱和脂肪酸受其影响更大, 故酸价较大, 与刘龙龙等<sup>[44]</sup>研究的营养平衡调和油结论一致。当温度增加至 30 °C 时, 过氧化值降到最小值为 0.88 meq/kg, 之后温度持续升高过氧化值继续增加, 说明油脂氧化程度加深, 过氧化物增加, 过氧化值升高。酸价及过氧化值越小, 油脂质量越好, 故最佳搅拌温度选为 30 °C。

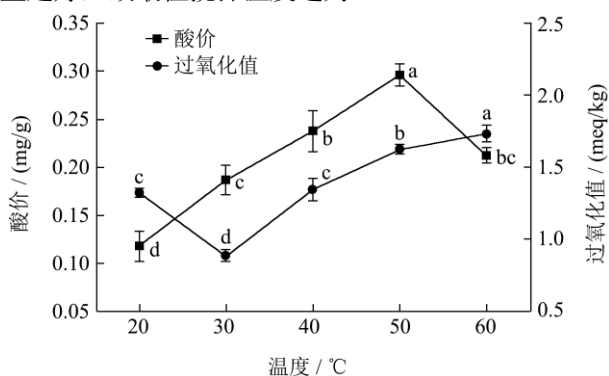


图 2 搅拌温度对调和油酸价与过氧化值的影响

Fig.2 Effect of stirring temperature on the valence and peroxide value of mixed oleic acid

### 2.4.3 调和油最佳搅拌速度的确定

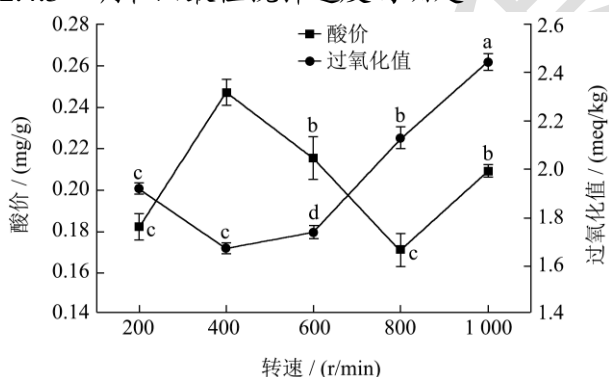


图 3 搅拌速度对调和油酸价与过氧化值的影响

Fig.3 Effect of stirring speed on the valence and peroxide value of mixed oleic acid

由图 3 可知, 搅拌速度对营养均衡动植物调和油酸价和过氧化值均有显著性影响, 随着转速的增加, 酸价呈先上升后下降再上升的趋势, 过氧化值呈先下降后上升的趋势。在转速为 400 r/min 时, 酸价达到最大值为 0.25 mg/g, 从 400 至 800 r/min, 酸价逐渐降低至最小值为 0.17 mg/g, 可能是由于搅拌速度影响了调和油分子之间相互作用力, 同时对抗氧化剂的溶解程

度也有着一定的影响<sup>[45]</sup>。在转速为 400 r/min 时, 过氧化值最小值为 1.67 meq/kg, 之后过氧化值不断升高, 推测其原因可能是转速越大, 调和油与空气的接触面积增大, 从而使氧化程度越来越深。因此, 营养均衡动植物调和油最佳转速为 400 r/min。

### 2.4.4 调和油最佳 TBHQ 添加量的确定

从图 4 中可以发现, 随着 TBHQ 添加量的增加, 营养均衡动植物调和油的酸价和过氧化值均呈先下降后上升的趋势, 与蒋艺晴<sup>[45]</sup>研究营养均衡玉米调和油添加 TBHQ 的变化趋势相吻合, TBHQ 对调和油的质量具有一定的维护作用。在转速为 400 r/min 时, 酸价和过氧化值均最小, 分别为 0.15 mg/g、1.42 meq/kg, 虽然随着 TBHQ 添加量的增加酸价和过氧化值酸价和过氧化值有显著性差异, 但幅度变化不大, 极差分别为 0.11 mg/g、1.02 meq/kg, TBHQ 添加量越大, 酸价和过氧化值越大, 由文献可知, 存在抗氧化剂因浓度过高而促进油脂氧化的现象<sup>[46]</sup>, 可能由于 TBHQ 的某些氧化产物促进了油脂氧化<sup>[47]</sup>。

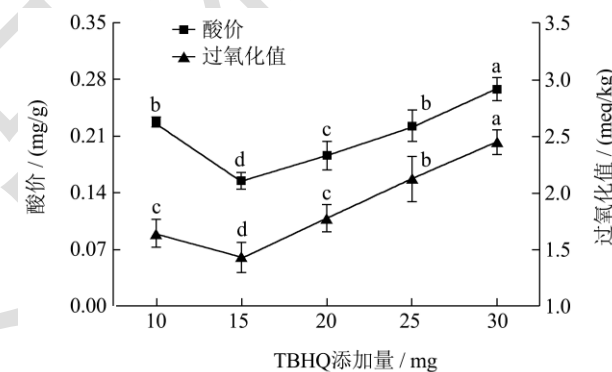


图 4 TBHQ 添加量对调和油酸价与过氧化值的影响

Fig.4 Effect of TBHQ addition on the valence and peroxide value of reconstituted oleic acid

## 2.5 正交试验结果

通过单因素试验结果表明, 搅拌时间、TBHQ 添加量、搅拌温度对酸价及过氧化值的影响更显著, 选其作为影响因素, 采用 L<sub>9</sub> (3<sup>4</sup>) 正交试验优化, 优化试验参数, 试验设计结果及方差分析见表 8、表 9 和表 10。

由表 8 可知, 当以酸价为最佳调配工艺考察指标时, 较优组合为 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>, 从极差 R 结果及可知, 影响酸价的主次顺序为 C>A>B, 由方差分析也可看出(表 9), 搅拌温度对酸价有显著性差异, 搅拌时间及 TBHQ 添加量影响较小, 差异不显著; 当以过氧化值为考察指标时, 较优组合为 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>, 对其影响程度为 A>B>C, 且方差分析结果表明(表 10), 搅拌时间、TBHQ 添加量及搅拌温度对过氧化值均有极显著差异。由此

可以看出, 两组较优组合中仅搅拌温度不一致, 其中搅拌温度对酸价的影响较大, 而对过氧化值影响较小, 推测可能是在氧化初期, 温度使饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸均不稳定导致酸价变化波动大, 而试验温度范围较低, 产生氧化产物较少, 过氧化值变化较小。综

合考虑最终确定营养均衡动植物调和油最佳配比组合为 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>, 即: 搅拌时间 30 min、TBHQ 添加量 15 mg、搅拌温度 20 °C。经过验证试验测得酸价为 0.17 mg/g, 过氧化值为 1.33 meq/kg, 表明该组合为最佳的营养均衡动植物调和油调配工艺。

表 8 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 正交实验设计表及极差分析

Table 8 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) Orthogonal experimental design and range analysis

编号	A 搅拌时间	B TBHQ 添加量	C 搅拌温度	D 空白	酸价/(mg/g)	过氧化值/(meq/kg)
1	1	1	1	1	0.17	1.45
2	1	2	3	2	0.20	1.35
3	1	3	2	3	0.23	1.40
4	2	1	3	3	0.20	1.35
5	2	2	2	1	0.22	1.34
6	2	3	1	2	0.18	1.34
7	3	1	2	2	0.25	1.40
8	3	2	1	3	0.19	1.33
9	3	3	3	1	0.25	1.30
-----						
	K <sub>1</sub>	0.60	0.61	0.53	0.65	
	K <sub>2</sub>	0.60	0.61	0.70	0.63	
	K <sub>3</sub>	0.69	0.66	0.65	0.61	
酸价	K <sub>1</sub>	0.20	0.21	0.18	0.22	
	K <sub>2</sub>	0.20	0.20	0.24	0.21	
	K <sub>3</sub>	0.23	0.22	0.22	0.20	
	R	0.03	0.02	0.06	0.01	
-----						
	主次因素			C>A>B>D		
	优水平			A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>		
-----						
	K <sub>1</sub>	4.20	4.19	4.12	4.09	
	K <sub>2</sub>	4.02	4.02	4.14	4.09	
	K <sub>3</sub>	4.03	4.04	4.00	4.08	
过氧化值	K <sub>1</sub>	1.40	1.40	1.37	1.36	
	K <sub>2</sub>	1.34	1.34	1.38	1.36	
	K <sub>3</sub>	1.34	1.35	1.33	1.36	
	R	0.06	0.06	0.05	0.01	
-----						
	主次因素			A>B>C>D		
	优水平			A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>		

表 9 酸价多因素方差分析结果

Table 9 Results of multivariate analysis of variance of acid

	value				
	平方和	自由度	均方	F	显著性
搅拌时间	0.002	2	0.001	8.801	0.102
TBHQ 添加量	0	2	0	2.426	0.292
搅拌温度	0.005	2	0.003	26.847	0.036*
误差	0	2	0		

注: \*p<0.05, 差异显著; \*\*p<0.01, 差异极显著。

表 10 过氧化值多因素方差分析结果

Table 10 Results of multivariate ANOVA of peroxide value

	平方和	自由度	均方	F	显著性
搅拌时间	0.007	2	0.004	203.918	0.005**
TBHQ 添加量	0.006	2	0.003	173.07	0.006**
搅拌温度	0.004	2	0.002	113.377	0.009**
误差	0	2	0		

注: \*p<0.05, 差异显著; \*\*p<0.01, 差异极显著。



## 2.6 营养均衡动植物调和油货架期的预测结果

由图 5 可知, Schaal 烘箱法测得营养均衡动植物调和油在 90 °C 的条件下, 每日的酸价和过氧化值变化趋势。根据 SB/T 10292 食用调和油中规定, 调和油的酸价 < 1.00 mg/g, 过氧化值 < 12 meq/kg。在第 6 天时, 营养均衡动植物调和油的两个指标均超过最高限度, 酸价为 1.10 mg/g, 过氧化值为 12.24 meq/kg。因此, 在 90 °C 条件下, 营养均衡动植物调和油的保质期为 5 d。据 Arrhenius 经典公式, 参照温度与货架期的系数关系, 调和油在 90 °C 的恒温培养箱内放置 1 d 与在 20 °C 室温环境中放置 128 d 等价<sup>[39]</sup>, 根据系数关系则可推算出营养均衡动植物调和油在室温下的货架期寿命为 640 d, 因此营养均衡动植物调和油在室温下能够贮藏 18 个月。

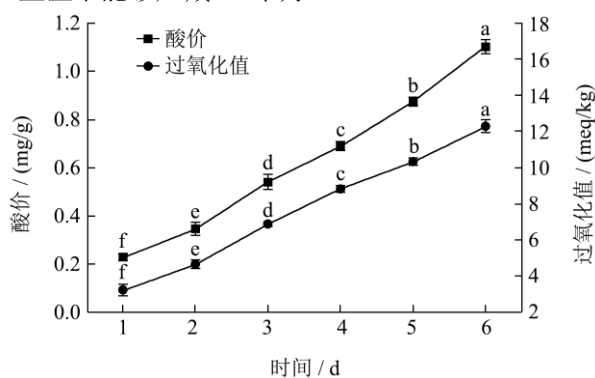


图 5 90 °C 下调配油的酸价和过氧化值

Fig.5 The AV and POV of blend oil on 90 °C

## 3 结论

营养均衡动植物调和油以 11 种植物油以及通过溶剂法分提牛油得到油脂品质提升的分提牛油作为原料, 采用 Matlab 软件确定调和油最优配比为: 分提牛油 8.00%, 玉米油 16.36%, 亚麻籽油 72.18%, 芝麻油 3.45%, 调和油的单价为每百毫升 0.28 元; 通过 GC-MS 测得脂肪酸的结果符合成人脂肪酸平衡的需求, 满足消费者摄入健康油脂理念的追求; 在单因素的基础上, 利用正交试验设计对营养均衡动植物调和油的调配工艺进行优化, 最佳制备条件为: 搅拌时间 30 min、TBHQ 添加量 15 mg、搅拌温度 20 °C; 此时, 酸价为 0.17 mg/g, 过氧化值为 1.33 meq/kg; 营养均衡动植物调和油保质期为 18 个月。本实验为营养调和油的开发提供理论依据, 增添了食用油品类, 促进食用油市场多元化, 希望对食用油的消费具有指导意义。

## 参考文献

- [1] Marin M G, Sanjurjo A, Rodrigo M A, et al. Long-chain polyunsaturated fatty acids in breast milk in La Plata, Argentina: relationship with maternal nutritional status [J]. Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids 2005, 73(5): 355-360
- [2] 耿树香, 宁德鲁, 杨明佳, 等. 云南 11 种油料作物油脂主要功能性成分评价[J]. 中国油脂, 2021, 46(1): 108-111
- [3] 廖阳, 李昌珠, 于凌一丹, 等. 我国主要木本油料油脂资源研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(8): 151-160
- [4] Hamosh M, Bitman J, Wood D L, et al. Lipids in milk and the first steps in their digestion [J]. Pediatrics, 1984, 75(1): 146-150
- [5] 邓泽元. 我国食用调和油存在的问题和对策探讨[J]. 中国食品学报, 2014, 12(5): 1-12
- [6] Yan S, Zhou H, Liu S, et al. Differential effects of Chinese high-fat dietary habits on lipid metabolism: mechanisms and health implications [J]. Lipids in Health and Disease, 2020, 30(19): 1-9
- [7] Fleming J, Holligan S, Kris-Etherton P. Dietary patterns that decrease cardiovascular disease and increase longevity [J]. Journal of Clinical Experimental Cardiology, 2013, 6: 1-7
- [8] Tortosa-Caparrós E, Navas-Carrillo D, Marin F, et al. Anti-inflammatory effects of omega 3 and omega 6 polyunsaturated fatty acids in cardiovascular disease and metabolic syndrome [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2017, 57(16): 3421-3429
- [9] Zhou Y, Ollesch J, Wille H, et al. Method development for investigation of polar lipids in biological samples by reversed phase liquid chromatography coupled to mass spectrometry [J]. Abstracts of Papers of the American Chemical Society, 2010, 240
- [10] Fattore E, Massa E. Dietary fats and cardiovascular health: a summary of the scientific evidence and current debate [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2018, 69(8): 916-927
- [11] Hashempour F, Torbati M, Azadmard-Damirchi S, et al. Chemical, rheological and nutritional characteristics of sesame and olive oils blended with linseed oil [J]. Advanced Pharmaceutical Bulletin, 2018, 8: 107-113
- [12] Martinez Steele E, Batis C, Cediel G, et al. The burden of excessive saturated fatty acid intake attributed to ultra-processed food consumption: a study conducted with nationally representative cross-sectional studies from eight countries [J]. Journal of Nutritional Science, 2021, 43(10): 1-9

- [13] 孙翔宇,高贵田,段爱莉,等.多不饱和脂肪酸的研究进展[J].食品工业科技,2012,33(7):418-423
- [14] 蒋瑜,熊文珂,殷俊玲,等.膳食中 $\omega$ -3和 $\omega$ -6多不饱和脂肪酸摄入与心血管健康的研究进展[J].粮食与油脂,2016,29(11):1-5
- [15] Calder P. Omega-3 fatty acids and inflammatory processes: from molecules to man [J]. Biochemical Society Transactions, 2017, 45: 1-11
- [16] Lee J E, Seong J E, Hong S H, et al. Inhibitory effect of perilla oil on hepatic lipid accumulation in the apoE knock-out mice fed high cholesterol diet [J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2011, 70(1): 142
- [17] 杨绍军.食用调和油对肥胖大鼠心血管功能的影响研究[D].无锡:江南大学,2020:1-9
- [18] Saini R K, Keum Y-S. Omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids: Dietary sources, metabolism, and significance -A review [J]. Life Sciences, 2018, 203: 255-267
- [19] Simopoulos A. An increase in the omega-6/omega-3 fatty acid ratio increases the risk for obesity [J]. Nutrients, 2016, 128(8): 1-17
- [20] 李焕.食用植物油中脂肪酸的检测方法及其构效关系的研究与应用[D].太原:山西大学,2014
- [21] 熊旺,姜荷,华家才,等.复配 $\omega$ -3/ $\omega$ -6不饱和脂肪酸对高龄小鼠的认知保护[J].中国乳品工业,2021,49(2):10-13
- [22] Imopoulosa P. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acid [J]. Biomed Pharmacother, 2002, 56: 365-379
- [23] Clarke S D. Polyunsaturated fatty acid regulation of gene transcription: a mechanism to improve energy balance and insulin resistance [J]. The British Journal of Nutrition, 2000, 83(SUP): 59-66
- [24] D'angelo S, Motti M L, Meccariello R.  $\omega$ -3 and  $\omega$ -6 polyunsaturated fatty acids, obesity and cancer [J]. Nutrients, 2020, 12(9): 1-22
- [25] 伍金华,周克元.调节食物中 $\omega$ -6和 $\omega$ -3脂肪酸合适比例研究的进展[J].国外医学:卫生学分册,2006,33(2):70-73
- [26] 王兴国,金青哲.食用调和油开发依据、发展进程与标准现状[J].中国油脂,2018,43(3):1-5
- [27] Meydani S N, Lichtenstein A H, Cornwall S, et al. Immunologic effects of national cholesterol education panel step-2 diets with and without fish-derived N-3 fatty acid enrichment [J]. Journal of Clinical Investigation, 1993, 92: 105
- [28] Grundy S M. What is the desirable ratio of saturated, polyunsaturated, and monounsaturated fatty acids in the diet [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1997, 66: 988S-990S
- [29] 黄凤洪,黄庆德,刘昌盛.脂肪酸的营养与平衡[J].食品科学,2004,25:262-265
- [30] 李姗姗.婴幼儿专用调配油的制备及其功能性和毒理学的研究[D].长春:吉林大学,2015:1-14
- [31] 中国营养学会.中国居民膳食营养素参考摄入量(2013 版)[M].北京:科学出版社,2014
- [32] 吴晶晶,郎春秀,王伏林,等.我国食用植物油的生产开发现状及其脂肪酸组成改良进展[J].中国油脂,2020,45(5):4-10
- [33] 戴逸,戴智勇,张岩春,等.基于母乳脂肪酸组成的植物油复配研究[J].中国油脂,2020,45(5):88-92
- [34] 舒适.牛油及其调和油煎炸性能的研究[D].武汉:武汉轻工大学,2019
- [35] 杨春英,刘学铭,陈智毅.15种食用植物油脂肪酸的气相色谱-质谱分析[J].食品科学,2013,34(6):211-214
- [36] 杨明,邵鹏,赵建业,等.GC-MS 双内标法测定植物油中脂肪酸组成[J].分析实验室,2018,37(7):801-808
- [37] Zhu M, Long Y, Ma Y, et al. 2020. Comparison of chemical and fatty acid composition of green coffee bean (*Coffea arabica* L) from different geographical origins [J] LWT, 2020, 140: 1-9
- [38] 曹君.不同脂肪酸结构食用油的氧化规律及其动力学研究[D].南昌:南昌大学,2015
- [39] 姚志新.产妇玉米调和油的开发及稳定性研究[D].长春:吉林大学,2019
- [40] 李涛,卢岩,陈卫林,等.哈萨克羊不同部位脂肪溶剂法分提产物性质分析[J].现代食品科技,2018,34(4): 81-87
- [41] 邢田,韩玲,余群力,等.牛油的干法分提工艺优化及其对脂肪酸组成的影响[J].食品与发酵科技,2020,56(6):1-6
- [42] L S, Palvai V R, A G G K, et al. Retention of natural antioxidants of blends of groundnut and sunflower oils with minor oils during storage and frying [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 5(2): 849-857
- [43] 刘欢.食用叶酸的微胶囊化及高叶酸调和油的研制[D].长春:吉林大学,2015
- [44] 刘龙龙,姜宏宇,仇宏图,等.营养平衡调和油的研制及氧化稳定性研究[J].粮食与油脂,2021,34(4):40-44
- [45] 蒋艺晴.叶酸脂质体的制备及高叶酸玉米调和油的研发[D].长春:吉林大学,2017
- [46] 朱雪梅,吴俊锋,胡蒋宁,等. $\alpha$ -生育酚在花生油、芝麻油和菜籽油中的抗氧化效能[J].食品与发酵工业,2013,39(10):85-90
- [47] 邱伟芬,陶婷婷,海峰,等.番茄红素对食用油脂的抗氧化作用[J].中国油脂,2010,35(7):42-45

现代食品科技