

云南 6 种木本植物油脂肪酸组成分析及调和优化

于雪莲^{1,2}, 杨培艺³, 郭娟¹, 罗嘉¹, 张帆³

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园 热带植物资源可持续利用重点实验室, 昆明 650223;

2. 中国科学院大学 生命科学学院, 北京 101408; 3. 云南民族大学 化学与环境学院, 昆明 650500)

摘要:为促进云南木本植物油的应用,以产自云南的蒜头果油、印度血桐油、元宝枫籽油、滇牡丹籽油、美藤果油和橡胶籽油为研究对象,采用气相色谱法测定其总脂肪酸和 sn-2 位脂肪酸的组成与含量,并在满足膳食脂肪酸推荐标准的基础上,以功能性脂肪酸含量为指标,利用规划求解算法优化了 6 种木本植物油的调和产品。结果表明:6 种木本植物油富含功能性脂肪酸,其中元宝枫籽油、美藤果油和橡胶籽油分别含有 35.92%、39.59% 和 35.78% 的亚油酸,滇牡丹籽油与美藤果油分别含有 32.02% 和 42.56% 的 α -亚麻酸,蒜头果油、印度血桐油和元宝枫籽油分别含有 40.10%、48.53% 和 5.32% 的神经酸;蒜头果油和印度血桐油中 sn-2 位神经酸含量较高,分别达 13.79% 和 14.27%,滇牡丹籽油中 sn-2 位亚油酸(31.06%)、 α -亚麻酸(20.71%)含量较高;通过 6 种木本植物油的配比优化,得到满足膳食脂肪酸推荐标准的亚油酸含量最高(36.3%)、亚麻酸含量最高(9.1%)和神经酸含量最高(4.1%)的 3 种调和油。综上,以云南 6 种木本植物油为原料,通过配比优化,可得到富含功能性脂肪酸的调和油。

关键词:木本植物油;功能性脂肪酸;sn-2 位脂肪酸;调和油

中图分类号:TS225.1;TS201.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)12-0052-06

Fatty acid composition analysis and blending optimization of six woody plant oils in Yunnan province

YU Xuelian^{1,2}, YANG Peiyi³, GUO Juan¹, LUO Jia¹, ZHANG Fan³

(1. CAS Key Laboratory of Tropical Plant Resources and Sustainable Use, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; 2. College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3. College of Chemistry and Environment, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to promote the application of woody plant oils in Yunnan province, the composition and content of total fatty acids and sn-2 fatty acids of *Malaria oleifera* oil, *Macaranga indica* oil, *Acer truncatum* seed oil, *Paeonia delavayi* seed oil, *Plukenetia volubilis* oil and *Hevea brasiliensis* seed oil from Yunnan province were determined by gas chromatography. Based on the dietary fatty acid recommendation, the blending products of six woody plant oils were optimized by programming algorithm with the content of functional fatty acids as the index. The results showed that the six woody plant oils were rich in functional fatty acids. The linoleic acid contents in *Acer truncatum* seed oil, *Plukenetia volubilis* oil and *Hevea*

brasiliensis seed oil were 35.92%, 39.59% and 35.78%, respectively. The α -linolenic acid content in *Paeonia delavayi* seed oil and *Plukenetia volubilis* oil were 32.02% and 42.56%, respectively. *Malaria oleifera* oil, *Macaranga indica* oil and *Acer truncatum* seed oil contained 40.10%, 48.53% and 5.32% nervonic acid, respectively. At position sn-2, the contents of nervonic acid in *Malaria oleifera*

收稿日期:2024-01-31;修回日期:2024-07-29

基金项目:云南省基础研究专项重点项目(202101AS07001);云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(202105AC160083);中国科学院大学创新实践训练计划项目(20234001922)

作者简介:于雪莲(1998),女,在读硕士,研究方向为功能性油脂的合成(E-mail)m15214445407@163.com。

通信作者:张帆,研究员(E-mail)2676965081@qq.com。

oil and *Macaranga indica* oil were higher, which were 13.79% and 14.27%, respectively, while *Paeonia delavayi* seed oil had higher levels of linoleic acid (31.06%) and α -linolenic acid (20.71%). By optimizing the ratio of the six woody plant oils, three blended oils were created with the highest levels of linoleic acid (36.3%), α -linolenic acid (9.1%), and nervonic acid (4.1%). In conclusion, the optimal ratio of six woody plant oils from Yunnan province can be used to create a blending oil which is rich in functional fatty acids.

Key words: woody plant oil; functional fatty acid; sn-2 fatty acid; blended oil

功能性脂肪酸是指具有特殊功能的脂肪酸,可应用在食品、医药、化妆品等多个领域。例如:亚油酸是人体必需脂肪酸,也是天然油脂中最主要的二烯酸,由于人体无法合成亚油酸,必须通过食物额外补充来维持其正常的生理功能^[1-2]。 α -亚麻酸属于 ω -3多不饱和脂肪酸(ω -3 PUFA),也是必需脂肪酸,且 α -亚麻酸可通过机体代谢途径合成其他不饱和脂肪酸,如二十二碳六烯酸(DHA)、二十碳五烯酸(EPA)等。 α -亚麻酸具有抗炎、调节机体免疫反应等作用^[3]。神经酸是一种 ω -9型超长链单不饱和脂肪酸,具有促进大脑发育、修复神经元、延缓衰老、调节血脂和血糖等功效^[4-7]。功能性脂肪酸在甘油三酯上的位置分布会影响人体对其的摄取和利用,研究发现,功能性脂肪酸位于sn-2位时,其吸收效果优于位于sn-1/3位或随机分布状态以及游离形式^[8-9]。国内外已有针对植物油中sn-2位脂肪酸的研究,如大豆油、花生油、核桃油、沙棘油等^[10-11],但对于一些富含功能性脂肪酸的新型木本植物油的研究较少。

《中国居民膳食营养素参考摄入量》中成人脂肪酸推荐摄入量为单不饱和脂肪酸(MUFA)与多不饱和脂肪酸(PUFA)比例为1:1, ω -6多不饱和脂肪酸(ω -6 PUFA)与 ω -3 PUFA比例为4:1~6:1^[12-13]。但是已知的天然单一油脂不论是植物油还是动物油其脂肪酸比例都难以满足营养均衡需求。因此,可通过对两种及两种以上的食用油进行调配以满足营养均衡需求^[14-15]。

云南拥有丰富的油料种质资源,其中木本植物油具有很高的研究价值^[12,16],且多种新型木本植物油目前仍处于开发阶段,在食品、医药、化工等领域具有潜在的应用价值^[17-22]。为促进云南木本植物油的应用,本文对蒜头果油、印度血桐油、元宝枫籽油、滇牡丹籽油、美藤果油和橡胶籽油等6种云南木本植物油的总脂肪酸及sn-2位脂肪酸组成进行了分析,并在满足膳食营养均衡需求的条件下,优化调和至最优比例,以期功能性脂肪酸的食品开发和

健康应用提供重要的参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

蒜头果、印度血桐,分别采自云南省广南县和西双版纳傣族自治州,手工去除种皮粉碎后,利用超临界二氧化碳萃取法(萃取釜I温度42℃,分离釜I温度56℃,分离釜II温度37℃)得到蒜头果油和印度血桐油;美藤果、橡胶籽,采自云南省西双版纳傣族自治州,机械压榨得到美藤果油和橡胶籽油;元宝枫籽油,昆明海之灵生物科技有限公司;滇牡丹籽油,云南省农业科学院高山经济植物研究所。

脂肪酸甲酯混合标准品,美国Sigma-Aldrich公司;胰脂肪酶(比活力 ≥ 30 U/mg);Milli-Q超纯水(18.2 M Ω ·cm)。

硅胶[0.125~0.150 mm(100~120目)]、薄层层析板(50 mm \times 200 mm),青岛海洋化工有限公司;层析槽(100 mm \times 200 mm);硅胶柱(ϕ 15 mm \times 300 mm);电子分析天平,德国Sartorius公司;恒温水浴锅,巩义市予华仪器有限公司;涡旋振荡器,海口市其林贝尔仪器制造有限公司;旋转蒸发器、真空干燥箱,日本Yamato公司;气相色谱仪(配备氢火焰离子化检测器),美国PerkinElmer公司。

1.2 实验方法

1.2.1 总脂肪酸组成测定

采用硫酸-甲醇酯化法对油样进行甲酯化。取6种木本植物油各4 μ L置于试管中,加入200 μ L正己烷,涡旋振荡,使油脂充分溶解,加入2 mL 2%的硫酸-甲醇溶液,在涡旋混合器上充分混匀,于85℃下水浴2 h,冷却至室温,加入2 mL 0.9%的氯化钠溶液和4 mL正己烷,涡旋振荡至少30 s,于4 000 r/min离心5 min,将上清液转移至新试管中,下层加入4 mL正己烷,重复上述步骤。合并两次上清液,放入真空干燥箱中,在37℃、-0.8 kPa条件下减压浓缩,加入1.5 mL正己烷复溶,然后转移至进样瓶待气相色谱检测。

气相色谱条件: Elite - 225 毛细管色谱柱 (30 m × 0.32 mm × 0.25 μm); 氢火焰离子化检测器 (FID) 温度 250 °C; 进样口温度 250 °C; 程序升温方式为初始温度 150 °C, 保持 3 min, 以 10 °C/min 升温至 180 °C, 保持 9 min, 以 5 °C/min 升温至 220 °C, 保持 8 min; 载气为氮气; 分流比 30:1; 进样量 3.5 μL。

1.2.2 sn-2 位脂肪酸组成测定

1.2.2.1 sn-2 位甘油单酯的制备

sn-2 位甘油单酯的制备参照 GB/T 24894—2010《动植物油脂 甘三酯分子 2-位脂肪酸组分的测定》, 并进行改进。

氢氧化钠中和: 称取 5 g 油样加入 30 mL 正己烷, 转入分液漏斗, 加入 25 mL 95% 的乙醇及 1~2 滴酚酞溶液; 然后加入中和油样中游离脂肪酸所需的氢氧化钠溶液 (0.5 mol/L), 振摇 1 min 后, 加入 25 mL 超纯水再振摇, 静置, 分层后弃去下层及中间层。用 50% 乙醇清洗中和后的油脂, 直至酚酞的粉色消失。然后将溶液进行减压旋蒸, 除去正己烷, 并进行真空干燥, 得到中和油脂。

氧化铝柱层析净化: 称取 10 g 已活化的氧化铝与 20 mL 正己烷混合, 均匀缓慢地倒入层析柱, 打开塞子, 使正己烷缓慢淋洗下来, 确保柱中填料均匀, 不出现气泡和断层现象, 直至液面到达吸附剂以上 2 mm。将中和油脂用 25 mL 正己烷溶解, 缓慢倒入层析柱中, 打开旋塞, 收集滤液至锥形瓶中, 用旋转蒸发仪减压浓缩后进行真空干燥, 得到纯化甘油三酯。

胰脂肪酶的水解: 取 0.1 g 纯化甘油三酯于 10 mL 离心管, 加入 20 mg 胰脂肪酶和 2 mL Tris-HCl 缓冲液 (pH 8), 然后加入 0.5 mL 1 g/L 的胆酸钠溶液和 0.2 mL 220 g/L 的氯化钙溶液, 振荡摇匀后, 立即放入 40 °C 水浴锅, 保持手摇 4 min; 取出离心管后, 涡旋振荡 2 min, 然后立即加入 1 mL 6 mol/L 的盐酸溶液和 4 mL 乙醚, 并用振荡器振荡 30 s 后离心分离, 将有机相转移至试管中。

sn-2 位甘油单酯的分离: 将试样点至距薄层板底部 15 mm 处, 多次重复点样。将点好样的薄层板在通风橱中预饱和 25~30 min 后放入层析槽中, 下端浸入展开剂 [正己烷-乙醚-冰醋酸 (体积比 70:30:1)] 中, 待展开剂到达距离薄层板顶部 1 cm 时, 将薄层板取出、晾干后置于盛有碘蒸气的密闭容器中显色; 将甘油单酯的谱带刮下 (比移值约为 0.035)。

1.2.2.2 sn-2 位脂肪酸组成分析

将刮下的甘油单酯谱带用正己烷浸提、减压浓

缩后进行甲酯化, 甲酯化方法同 1.2.1, 不同之处为样品减压浓缩后溶于 200 μL 正己烷, 然后转移至带有 6 mm 微量内插管的进样瓶。

气相色谱条件同 1.2.1。

1.2.3 6 种木本植物油的调和优化

参考《中国居民膳食营养素参考摄入量》中成人脂肪酸推荐参考摄入量^[12-13], 即 MUFA/PUFA = 1:1, 4 ≤ ω-6 PUFA/ω-3 PUFA 值 ≤ 6, 以调和油的功能性脂肪酸含量为优化指标, 利用 SPSS 19.0 分析软件对调和油中各木本植物油含量进行优化。设调和油中各植物油含量为 X_i , $X_i ≥ 0$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, 分别代表蒜头果油、印度血桐油、元宝枫籽油、滇牡丹籽油、美藤果油和橡胶籽油); 设每种植物油中各脂肪酸含量为 a_{ij} , $a_{ij} ≥ 0$ ($j = 1, 2, 3, 4$, 分别代表 MUFA、PUFA、ω-6 PUFA 和 ω-3 PUFA); 设各植物油中亚油酸 (C18:2)、α-亚麻酸 (α-C18:3)、神经酸 (C24:1) 含量分别为 m_i 、 n_i 、 q_i , 调和油中 C18:2、α-C18:3、C24:1 含量分别为 Y_m 、 Y_n 、 Y_q 。

设调和油总量为 1, 即各植物油含量之和为 100%, 因此建立条件公式(1)。

$$\sum_{i=1}^6 X_i = 1 \quad (1)$$

根据 MUFA/PUFA = 1:1, 建立条件公式(2)。

$$\sum_{i=1}^6 X_i a_{i1} : \sum_{i=1}^6 X_i a_{i2} = 1 : 1 \quad (2)$$

根据 ω-6 PUFA/ω-3 PUFA 值为 4~6 之间, 建立条件公式(3)。

$$4 \leq \sum_{i=1}^6 X_i a_{i3} : \sum_{i=1}^6 X_i a_{i4} \leq 6 \quad (3)$$

分别以 3 种功能性脂肪酸含量为目标函数, 建立公式(4)~(6)。

$$Y_m = (m_1 X_1 + m_2 X_2 + m_3 X_3 + m_4 X_4 + m_5 X_5 + m_6 X_6) \quad (4)$$

$$Y_n = (n_1 X_1 + n_2 X_2 + n_3 X_3 + n_4 X_4 + n_5 X_5 + n_6 X_6) \quad (5)$$

$$Y_q = (q_1 X_1 + q_2 X_2 + q_3 X_3 + q_4 X_4 + q_5 X_5 + q_6 X_6) \quad (6)$$

根据所建立的数学模型, 调用 SPSSpro 中的规划求解算法, 设定目标函数及约束条件, 进行运算得到最优解。

2 结果与分析

2.1 6 种木本植物油总脂肪酸组成

云南 6 种木本植物油总脂肪酸组成及相对含量见表 1。

表1 云南6种木本植物油总脂肪酸组成及相对含量

脂肪酸	蒜头果油	印度血桐油	元宝枫籽油	滇牡丹籽油	美藤果油	橡胶籽油	%
C16:0	1.52 ± 0.01	1.70 ± 0.05	4.78 ± 0.34	5.92 ± 0.53	4.31 ± 0.23	9.85 ± 0.06	
C16:1	-	0.06 ± 0.00	0.14 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.03 ± 0.00	-	
C18:1n9	36.40 ± 0.33	5.18 ± 0.10	21.74 ± 6.83	26.87 ± 0.40	9.40 ± 0.33	28.84 ± 0.10	
C18:1n11	0.38 ± 0.03	0.15 ± 0.01	2.26 ± 1.28	1.49 ± 0.29	2.65 ± 0.24	6.62 ± 0.08	
C18:2	1.83 ± 0.14	4.79 ± 0.00	35.92 ± 2.41	22.60 ± 0.17	39.59 ± 0.12	35.78 ± 0.10	
γ-C18:3	0.70 ± 0.06	0.87 ± 0.32	1.45 ± 0.05	0.15 ± 0.00	0.19 ± 0.00	0.48 ± 0.01	
α-C18:3	-	0.87 ± 0.19	1.84 ± 0.14	32.02 ± 0.70	42.56 ± 1.43	17.27 ± 0.37	
C20:1n11	0.28 ± 0.01	0.14 ± 0.00	0.14 ± 0.00	0.17 ± 0.06	0.10 ± 0.01	0.31 ± 0.01	
C20:1n-13	2.42 ± 0.13	2.41 ± 0.00	8.70 ± 0.64	2.18 ± 0.51	0.34 ± 0.02	0.20 ± 0.01	
C20:2	-	0.17 ± 0.00	0.28 ± 0.04	-	0.08 ± 0.02	-	
C22:1	16.05 ± 0.06	31.88 ± 0.01	17.03 ± 1.55	8.10 ± 0.02	0.10 ± 0.10	0.17 ± 0.01	
C22:2	-	3.17 ± 0.03	0.01 ± 0.00	-	-	-	
C24:0	0.28 ± 0.03	-	0.33 ± 0.10	0.17 ± 0.07	0.37 ± 0.21	0.29 ± 0.00	
C24:1	40.10 ± 0.72	48.53 ± 0.36	5.32 ± 0.32	0.13 ± 0.10	0.20 ± 0.12	0.14 ± 0.01	
SFA	1.80	1.70	5.11	6.09	4.68	10.14	
UFA	98.16	98.22	94.83	93.85	95.24	89.81	
MUFA	95.63	88.35	55.33	39.08	12.82	36.28	
PUFA	2.53	9.87	39.50	54.77	82.42	53.53	
ω-6 PUFA	2.53	5.66	37.37	22.75	39.78	36.26	
ω-3 PUFA	-	0.87	1.84	32.02	42.56	17.27	

注: - 表示未检出; SFA 代表饱和脂肪酸, UFA 代表不饱和脂肪酸。下同

Note: " - ". Not detected; SFA. Saturated fatty acid, UFA. Unsaturated fatty acid. The same below

从表1可以看出,6种木本植物油中含有较为丰富的功能性脂肪酸,其中:蒜头果油中神经酸(C24:1)和油酸(C18:1n9)含量较为丰富,分别达到40.10%和36.40%;印度血桐油中神经酸、芥酸(C22:1)含量较多,分别为48.53%和31.88%;元宝枫籽油中亚油酸(C18:2)、油酸含量较多,分别为35.92%和21.74%,还含有5.32%的神经酸,与张凯等^[23]测定的元宝枫籽油的脂肪酸含量略有差异,这可能是由于元宝枫产地不同导致的;滇牡丹籽油和美藤果油中α-亚麻酸含量较丰富,分别为32.02%和42.56%;美藤果油和橡胶籽油中亚油酸含量较高,分别为39.59%和35.78%,另外,橡胶籽油中油酸含量也较高,为28.84%。油酸作为自然界中最重要的一烯酸,在医药卫生等领域发挥着重要作用^[24]。6种木本植物油中UFA含量均较高,UFA具有抗炎、抗凝、免疫系统调节及改善神经系统功能^[25]等功效,对人体具有较多益处。蒜头果油、印度血桐油、元宝枫籽油中MUFA含量均高于PUFA,而滇牡丹籽油、美藤果油、橡胶籽油中MUFA含量均低于PUFA。6种木本植物油的ω-6 PUFA与ω-3 PUFA比值均不在4~6区间内,不满足人体膳食营养均衡需求。

2.2 6种木本植物油sn-2位脂肪酸组成

6种木本植物油sn-2位脂肪酸组成及相对含量见表2。

从表2可以看出:6种木本植物油中,印度血桐油、美藤果油、橡胶籽油sn-2位棕榈酸(C16:0)含量最为丰富,分别为32.07%、42.61%和50.59%;蒜头果油、元宝枫籽油和滇牡丹籽油sn-2位油酸相对含量最高,分别为42.56%、67.90%和41.16%;蒜头果油和印度血桐油中sn-2位神经酸含量较高,分别为13.79%和14.27%;滇牡丹籽油中亚油酸和α-亚麻酸含量较高,分别为31.06%和20.71%。与总脂肪酸组成相比,6种木本植物油中长链脂肪酸含量在sn-2位占比更高,超长链脂肪酸由于空间位阻多分布于sn-1,3位。冯西娅等^[26]研究发现,牡丹籽油的油酸主要分布在sn-2位,亚油酸分布较均匀,而亚麻酸主要分布在sn-1/3位,与本文研究结果有一定差异。除橡胶籽油外,其他几种木本植物油sn-2位UFA含量均高于SFA。除滇牡丹籽油外,其他几种植物油sn-2位MUFA含量均高于PUFA。

此外,将6种木本植物油的sn-2位脂肪酸含量与其总脂肪酸含量进行相关性分析,结果显示,除

滇牡丹籽油 sn-2 位脂肪酸与总脂肪酸含量呈显著正相关($p < 0.05$)外,其他木本植物油 sn-2 位脂肪酸与总脂肪酸含量均无显著相关性。

表 2 6 种木本植物油 sn-2 位脂肪酸组成及相对含量

脂肪酸	蒜头果油	印度血桐油	元宝枫籽油	滇牡丹籽油	美藤果油	橡胶籽油
C16:0	9.64 ± 0.52	32.07 ± 4.00	7.36 ± 0.81	3.89 ± 0.53	42.61 ± 1.49	50.59 ± 1.20
C18:1n9	42.56 ± 11.53	23.33 ± 4.48	67.90 ± 2.86	41.16 ± 5.02	7.83 ± 1.07	14.04 ± 0.34
C18:1n11	5.26 ± 0.99	14.47 ± 0.99	2.42 ± 0.03	2.33 ± 0.39	31.84 ± 0.96	25.18 ± 0.76
C18:2	5.80 ± 0.84	4.90 ± 0.15	15.05 ± 0.47	31.06 ± 3.38	13.75 ± 2.09	5.10 ± 0.84
γ -C18:3	-	-	-	0.38 ± 0.25	-	-
α -C18:3	-	-	-	20.71 ± 2.37	-	-
C22:1	22.92 ± 9.41	10.93 ± 3.48	2.85 ± 0.61	0.44 ± 0.06	3.94 ± 0.48	-
C24:1	13.79 ± 0.23	14.27 ± 5.84	4.40 ± 1.87	-	-	3.21 ± 2.03
SFA	9.64	32.07	7.36	3.89	42.61	50.59
UFA	90.33	67.90	92.62	96.08	57.36	47.53
MUFA	84.53	63.00	77.57	43.93	43.61	42.43
PUFA	5.80	4.90	15.05	52.15	13.75	5.10

2.3 调和油配比

在满足调和油的相关脂肪酸比例达到膳食营养标准的条件下,分别以亚油酸、 α -亚麻酸、神经酸含量最大值为目标,利用规划求解算法进行调和油中各植物油配比优化,结果如表 3 所示。

表 3 调和油最优配比

Table 3 Optimal ratio of blended oils

参数	调和油 1	调和油 2	调和油 3
X_1	0	0.002	0
X_2	0	0	0.002
X_3	0.815	0.812	0.811
X_4	0	0	0
X_5	0.185	0.187	0.187
X_6	0	0	0
Y	0.366	0.094	0.045

注:调和油 1、2、3 分别表示以亚油酸、 α -亚麻酸、神经酸为最大值的最优解。下同

Note: Blended oils 1, 2, and 3 indicate optimal solutions with linoleic acid, α -linolenic acid, and nervonic acid content as the maximum values, respectively. The same below

由表 3 可知:在达到膳食营养标准的条件下,当

元宝枫籽油、美藤果油分别占 81.5%、18.5% 时,调和油中亚油酸含量最高,为 36.6%;当蒜头果油、元宝枫籽油、美藤果油分别占 0.2%、81.2%、18.7% 时,调和油中 α -亚麻酸含量最高,为 9.4%;当印度血桐油、元宝枫籽油、美藤果油分别占 0.2%、81.1%、18.7% 时,调和油中神经酸含量最高,为 4.5%。

将以亚油酸、 α -亚麻酸、神经酸含量最大值为目标函数得到的 3 种调和油进行脂肪酸含量计算,并进行气相色谱检测验证,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,对 3 种调和油中目标功能性脂肪酸进行实验验证,其亚油酸、 α -亚麻酸和神经酸含量分别为 36.3%、9.1%、4.1%,与理论值相符。3 种调和油的 MUFA/PUFA \approx 1:1, ω -6 PUFA/ ω -3 PUFA \approx 4:1,满足人体膳食营养标准。与 6 种单一木本植物油进行对比,3 种调和油较好地满足了人体膳食营养均衡要求,为功能性脂肪酸的食品开发和健康应用提供了重要的参考和依据,具有良好的应用前景。

表 4 调和油中各脂肪酸计算值与测定值对比

Table 4 Comparison of calculated and measured values of fatty acids in blended oils

调和油	调和油 1		调和油 2		调和油 3	
	计算值	测定值	计算值	测定值	计算值	测定值
MUFA	0.475	0.471 ± 0.001	0.475	0.469 ± 0.002	0.474	0.480 ± 0.001
PUFA	0.474	0.471 ± 0.002	0.475	0.464 ± 0.006	0.475	0.469 ± 0.002
ω -6 PUFA	0.378	0.374 ± 0.001	0.378	0.368 ± 0.002	0.378	0.364 ± 0.004
ω -3 PUFA	0.094	0.092 ± 0.001	0.094	0.091 ± 0.001	0.095	0.091 ± 0.002
Y	0.366	0.363 ± 0.000	0.094	0.091 ± 0.001	0.045	0.041 ± 0.001

3 结论

6种木本植物油中富含功能性脂肪酸,其中元宝枫籽油、美藤果油和橡胶籽油分别含有35.92%、39.59%和35.78%的亚油酸,滇牡丹籽油与美藤果油分别含有32.02%和42.56%的 α -亚麻酸,蒜头果油、印度血桐油和元宝枫籽油分别含有40.10%、48.53%和5.32%的神经酸,且6种木本植物油不饱和脂肪酸含量较高。

6种木本植物油中,蒜头果油和印度血桐油中sn-2位神经酸含量较高,分别为13.79%和14.27%,滇牡丹籽油中sn-2位亚油酸、 α -亚麻酸含量较高,分别为31.06%和20.71%。与总脂肪酸相比,长链脂肪酸在sn-2位占比更高,超长链脂肪酸由于空间位阻多分布于sn-1,3位,为后续油脂改性提供较大研究空间,具有很大的发展潜力。

经调和优化,得到满足膳食营养标准的富含功能性脂肪酸的调和油。当元宝枫籽油、美藤果油分别占81.5%、18.5%时,调和油中亚油酸含量最高,为36.3%;当蒜头果油、元宝枫籽油、美藤果油分别占0.2%、81.2%、18.7%时,调和油中 α -亚麻酸含量最高,为9.1%;当印度血桐油、元宝枫籽油、美藤果油分别占0.2%、81.1%、18.7%时,调和油中神经酸含量最高,为4.1%。与单一植物油相比,3种调和油均具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] LIMONGI F, NOALE M, MARSEGLIA A, et al. Impact of cheese rich in conjugated linoleic acid on low density lipoproteins cholesterol: Dietary intervention in older people (CLADIS study)[J]. *J Food Nutr Res*, 2018, 6(1): 1-7.

[2] 杨涛, 韦伟宁, 原亚梅, 等. 特殊医学用途全营养配方食品中亚油酸和 α -亚麻酸的测定[J]. *食品工业*, 2022, 43(10): 288-291.

[3] 廖振林, 李倩滢, 陈俊杰, 等. 亚麻籽油组分的功能活性研究进展[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(11): 379-389, 337.

[4] 侯镜德, 陈至善. 神经酸与脑健康[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006.

[5] 李文保, 孙昌俊, 王飞飞, 等. 神经酸及其在预防和治疗脑病中的应用研究进展[J]. *药学进展*, 2014, 38(8): 591-596.

[6] 付一笑. 蒜头果光合生理以及其种子中神经酸的提取纯化[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.

[7] 范一铭, 高桂珍, 薛羽君, 等. 植物神经酸研究进展[J]. *生物技术进展*, 2022, 12(5): 664-672.

[8] MICHALSKI M C, GENOT C, GAYET C, et al. Multiscale structures of lipids in foods as parameters affecting fatty

acid bioavailability and lipid metabolism[J]. *Prog Lipid Res*, 2013, 52(4): 354-373.

[9] 王强, 谢跃杰, 李园园, 等. sn-2长链多不饱和脂肪酸单甘酯的制备及其影响因素研究[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(10): 19-26.

[10] 聂小彤, 梁艳菁, 孙燕群, 等. 食用植物油中4种不饱和脂肪酸在sn-2位含量分析[J]. *轻工科技*, 2021, 37(6): 10-12.

[11] 郑莉, 赵晨伟, 查娟, 等. 沙棘油脂脂肪酸、sn-2位脂肪酸及甘三酯的测定与分析[J]. *中国油脂*, 2018, 43(4): 143-146.

[12] 杨水艳, 邵志凌, 聂绪恒. 10种云南植物油脂肪酸组成比较与评价[J]. *中国油脂*, 2018, 43(1): 144-146.

[13] 朱丽, 聂小彤, 张林, 等. 火麻油总脂肪酸及sn-2位脂肪酸组成分析[J]. *中国油脂*, 2021, 46(7): 138-142.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 吕树友, 黄元波. 云南省木本油料资源开发利用前景[J]. *绿色科技*, 2015(6): 154-157.

[17] FANALI C, DUGO L, CACCIOLA F, et al. Chemical characterization of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) oil[J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(24): 13043-13049.

[18] YANG D S, PENG W B, YANG Y P, et al. Cytotoxic prenylated flavonoids from *Macaranga indica* [J]. *Fitoterapia*, 2015, 103: 187-191.

[19] 周琴芬. 蒜头果种仁神经酸制备工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

[20] 胡鹏. 元宝枫籽油的提取及其功能特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.

[21] 郭雪, 池泽平, 兰蔚, 等. 同一产地不同地理种源滇牡丹籽营养成分含量比较分析[J]. *中国油脂*, 2024, 49(4): 139-144.

[22] 杨森. 橡胶籽仁制备橡胶籽油及蛋白产品的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2021.

[23] 张凯, 徐娟, 韦承珊, 等. 元宝枫种仁营养成分分析[J]. *中国油脂*, 2023, 48(5): 129-132, 152.

[24] 任春华. 油酸的利用[J]. *日用化学工业*, 1995(2): 53-55, 31.

[25] HU P, XU X, YU L L. Interesterified *trans*-free fats rich in sn-2 nervonic acid prepared using *Acer truncatum* oil, palm stearin and palm kernel oil, and their physicochemical properties [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2017, 76: 156-163.

[26] 冯西娅, 黄威, 索化夷, 等. 牡丹籽油甘油三酯结构及理化特性分析[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(21): 258-263.