

## 6种富含 $\alpha$ -亚麻酸食用油脂的主要组成成分及消化特征研究进展

陈福妮<sup>1,2</sup>, 王卫飞<sup>1</sup>, 穆利霞<sup>1</sup>, 王思远<sup>1</sup>, 廖森泰<sup>1</sup>, 邹宇晓<sup>1</sup>

(1. 广东省农业科学院 蚕业与农产品加工研究所, 广州 510610; 2. 广东海洋大学 食品科技学院, 广东 湛江 524088)

**摘要:**  $\alpha$ -亚麻酸(ALA)是人体必需脂肪酸,在维持人体正常生理活动中具有多重作用。旨在确定ALA在食用油脂中的物质基础与其功能的构效关系,实现精准的膳食脂质营养,对6种富含ALA食用油脂的总脂肪酸组成、甘油三酯中脂肪酸的位置分布情况、甘油三酯分子构成、脂质伴随物和消化特性等研究内容进行了总结和分析。6种富含ALA食用油脂主要脂肪酸组成为棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、ALA,其中:紫苏籽油、亚麻籽油和牡丹籽油的ALA含量较高;不同富含ALA食用油脂甘油三酯中脂肪酸的位置分布存在显著差异,蚕蛹油的ALA主要分布在sn-2位,牡丹籽油和火麻仁油的ALA主要分布在sn-1,3位;不同富含ALA食用油脂甘油三酯的分子结构类型存在显著差异;富含ALA食用油脂的脂质伴随物主要为维生素E和甾醇,其中沙棘籽油的维生素E和甾醇含量均高于其余5种食用油脂;富含ALA食用油脂的消化程度和消化速率均低于非富含ALA食用油脂。

**关键词:**  $\alpha$ -亚麻酸;食用油脂;脂肪酸;分子结构;脂质伴随物;消化特征

中图分类号:TS225;TS201.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)01-0060-07

### Progress on composition and digestive characteristics of 6 kinds of edible oils rich in $\alpha$ -linolenic acid

CHEN Funi<sup>1,2</sup>, WANG Weifei<sup>1</sup>, MU Lixia<sup>1</sup>, WANG Siyuan<sup>1</sup>,  
LIAO Sentai<sup>1</sup>, ZOU Yuxiao<sup>1</sup>

(1. Sericulture & Agricultural - Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China; 2. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

**Abstract:** *Alpha*-linolenic acid (ALA) is an essential fatty acid, which plays multiple roles in maintaining normal physiological activities of human body. In order to determine the structural-activity relationship between the material basis of ALA in edible oils and its functions, and achieve accurate dietary lipid nutrition, the total fatty acid composition, location distribution of fatty acids in triglycerides, molecular composition of triglycerides, lipid concomitants, and digestive characteristics of 6 kinds of edible oils rich in ALA were summarized and analyzed. The main fatty acids of these edible oils were palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid and ALA, among which perilla seed oil, linseed oil and peony seed oil had higher ALA content. There were significant differences in the location distribution

of fatty acids in triglycerides of edible oils rich in ALA. The ALA of silkworm chrysalis oil mainly distributed at sn-2 position, while the ALA of peony seed oil and hemp seed oil mainly distributed at sn-1,3 position. The molecular structure types of triglycerides of these edible oils were significantly different. The main lipid

收稿日期:2022-08-08;修回日期:2023-09-17

基金项目:高水平广东省农业科技示范市建设资金市院合作项目

作者简介:陈福妮(1997),女,硕士研究生,研究方向为油脂加工(E-mail)1309157370@qq.com。

通信作者:邹宇晓,研究员,博士(E-mail)yuxiaozou@126.com。

concomitants were vitamin E and sterol, and the contents of vitamin E and sterol in sea buckthorn seed oil were higher than that of the other 5 edible oils. The degree and rate of digestion of ALA-rich edible oils were lower than those of non-ALA-rich edible oils.

**Key words:** *alpha*-linolenic acid; edible oils; fatty acid; molecular structure; lipid concomitants; digestive characteristics

$\alpha$ -亚麻酸(ALA)是一种 $\omega$ -3结构的必需脂肪酸,具有维持机体正常生理活动、降低血脂和血压、改善心血管疾病、提高记忆力、保护神经组织、预防过敏性疾病、抑制肿瘤细胞转移、延缓衰老等功能<sup>[1]</sup>。ALA的生理功效已被广泛认可,目前推荐的ALA适宜摄入量通常为1.1~1.6 g/d,大于2 g/d时对心血管健康有益<sup>[2]</sup>。ALA主要以脂肪酸甘油酯、磷脂的形式存在于动植物油脂中,我国拥有丰富的ALA动植物资源,其中:亚麻籽油、牡丹籽油、紫苏籽油、蚕蛹油等是高ALA含量的主要食用油脂,其含量一般高达25%以上<sup>[3-4]</sup>。食用油脂的主要组成成分、分子结构是影响其理化特性、消化吸收、生理功效的重要因素,国内外对富含ALA的食用油脂(以下简称“ALA型食用油脂”)的生理功效已有

大量研究报道,但是关于其主要组成成分、分子结构及消化吸收特性的研究报道较少。因此,本文对ALA型食用油脂的主要组成成分、分子结构和消化吸收特性等研究进展进行总结分析,以期完善ALA型食用油脂的科学研究及合理利用ALA型食用油脂资源提供参考。

### 1 ALA型食用油脂的总脂肪酸组成

总脂肪酸组成是最早被关注的食用油脂物质组成特征之一。菜籽油、大豆油、花生油、棕榈油等日常食用油中的ALA含量较少,一般不超过总脂肪酸含量的10%,但亚麻籽油、紫苏籽油、火麻仁油、牡丹籽油、沙棘籽油等少数植物油中含有丰富的ALA。常见食用油脂的脂肪酸组成见表1。

表1 常见食用油脂的脂肪酸组成

食用油脂	含量/%					参考文献
	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	ALA	
大豆油	10.88~11.27	3.98~4.18	20.67~25.54	51.51~53.06	6.43~6.64	[4-5]
菜籽油	4.05	1.85	62.25	19.66	9.41	[5]
花生油	10.75	2.99	47.24	33.73	0.00	[5]
棕榈油	39.58	4.23	43.18	10.91	0.17	[5]
紫苏籽油	3.16~7.17	0.56~2.30	9.60~26.85	8.53~15.75	53.83~70.90	[4,6-8]
亚麻籽油	2.41~7.97	3.98~9.38	10.03~39.00	10.14~30	41.62~65.84	[9-11]
牡丹籽油	5.86~6.05	0.81~0.97	22.82~23.36	26.25~27.04	42.58~44.17	[12]
火麻仁油	5.80~9.19	1.79~3.60	9.60~16.11	52.2~60.93	10.01~23.90	[13-16]
沙棘籽油	6.59~9.27	2.24~3.54	13.9~23.0	27.2~38.71	20.8~29.2	[17-18]
蚕蛹油	22.34~29.92	3.22~11.85	24.06~37.36	3.09~7.07	24.55~37.02	[19]

由表1可知,ALA型食用油脂的主要脂肪酸组成均为棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、ALA。除了花生油和棕榈油外,其他食用油脂中ALA含量在6.43%~70.90%之间,其中紫苏籽油、亚麻籽油和牡丹籽油的ALA含量较高。

紫苏籽油是现有食用油脂中ALA含量最高的,一般在60%以上,部分品种可以达到70%以上<sup>[4,6-8]</sup>。紫苏是唇形科、紫苏属一年生草本植物,在我国有2000多年的栽培历史,是卫生部颁布的首批药食同源60种药品之一,在多个国家均有种植<sup>[6-7]</sup>。亚麻籽油是目前产量最大的ALA型食用油脂,其含有少量的饱和脂肪酸(9%)和丰富的不

饱和脂肪酸,ALA含量为41.62%~65.84%<sup>[9-11]</sup>。牡丹籽油是由芍药属植物牡丹种子制成的食用油脂,油用牡丹籽的含油量一般在20%~30%之间,牡丹籽油中ALA含量一般在40%以上,油酸和亚油酸含量也较高,均在20%以上<sup>[20]</sup>。火麻是一年生桑科植物(又名汉麻等),是我国的原产植物之一,火麻仁含油量可达到50%以上,火麻仁油中亚油酸含量一般在50%以上,其次为ALA和油酸,ALA含量为10.01%~23.90%<sup>[13-16]</sup>,亚油酸与ALA的天然比例在2.3:1~3.7:1之间<sup>[21]</sup>。沙棘籽油来源于成熟的沙棘种子,主要脂肪酸组成为亚油酸(27.2%~38.71%)和ALA(20.8%~29.2%)<sup>[17-18]</sup>。

动物油脂中 ALA 含量一般不足 3%, 较为特殊的蚕蛹油, 其 ALA 含量达到总脂肪酸含量的 24.55% ~ 37.02%<sup>[19]</sup>。桑蚕蛹是蚕茧缂丝后的副产物, 因桑蚕蛹不同品系、不同饲养环境, 其含油量存在差异, 可以达到 25% 以上<sup>[19]</sup>, 是我国正在开发的油料资源之一。蚕蛹油主要脂肪酸为 ALA (24.55% ~ 37.02%)、油酸 (24.06% ~ 37.36%) 和棕榈酸 (22.34% ~ 29.92%)<sup>[19]</sup>。

## 2 ALA 型食用油脂甘油三酯中脂肪酸的位置分布

食用油脂的主要成分是甘油酯, 其含量在 95% 以上。脂肪酸组成和 ALA 在甘油三酯中的位置分布对食用油脂的理化性质和 ALA 的消化吸收特性具有重要影响。对 ALA 型食用油脂甘油三酯中脂肪酸位置分布的大量研究报道进行总结分析, 结果见表 2。

表 2 ALA 型食用油脂甘油三酯中的脂肪酸位置分布

食用油脂	脂肪酸位置分布	含量/%					参考文献
		棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	ALA	
紫苏籽油	总量	5.44 ± 0.22	1.48 ± 0.11	10.47 ± 0.49	12.77 ± 0.67	69.11 ± 1.57	[22]
	sn-2 位	0.39 ± 0.04	0.07 ± 0.01	14.48 ± 0.23	18.29 ± 0.47	66.13 ± 0.77	
亚麻籽油	总量	5.81 ± 0.03	4.16 ± 0.02	20.12 ± 0.04	16.31 ± 0.03	52.90 ± 0.17	[14]
	sn-2 位	5.78 ± 0.21	4.19 ± 0.10	20.20 ± 0.32	16.40 ± 0.22	53.30 ± 0.52	
牡丹籽油	总量	5.19 ± 0.35	1.69 ± 0.09	20.23 ± 0.57	27.64 ± 0.62	44.66 ± 0.61	[23]
	sn-2 位	2.03 ± 0.15 <sup>b</sup>	1.12 ± 0.03 <sup>b</sup>	48.06 ± 1.41 <sup>a</sup>	24.07 ± 0.63 <sup>b</sup>	23.11 ± 0.57 <sup>b</sup>	
	sn-1,3 位	6.77 ± 0.60 <sup>a</sup>	1.98 ± 0.02 <sup>a</sup>	6.32 ± 0.15 <sup>b</sup>	29.36 ± 0.62 <sup>a</sup>	55.44 ± 1.23 <sup>a</sup>	
火麻仁油	总量	5.98 ± 0.02	2.41 ± 0.09	9.15 ± 0.17	55.64 ± 1.21	18.02 ± 0.19	[24]
	sn-2 位	4.80 <sup>b</sup>	1.30 <sup>b</sup>	18.01 <sup>a</sup>	58.28 <sup>b</sup>	11.52 <sup>b</sup>	
	sn-1,3 位	6.57 <sup>a</sup>	2.97 <sup>a</sup>	3.88 <sup>b</sup>	55.67 <sup>a</sup>	21.28 <sup>a</sup>	
沙棘籽油	总量	8.74 ± 0.04	2.61 ± 0.01	20.68 ± 0.18	38.71 ± 0.39	25.66 ± 0.18	[17]
	sn-2 位	2.09 ± 0.26	2.06 ± 0.06	23.02 ± 0.35	46.46 ± 0.21	25.49 ± 0.08	
蚕蛹油	总量	21.07 ± 0.54	7.52 ± 1.14	32.52 ± 0.22	6.56 ± 0.31	30.96 ± 2.20	[25]
	sn-2 位	3.46 ± 0.23 <sup>b</sup>	1.68 ± 3.11 <sup>b</sup>	36.32 ± 1.23 <sup>a</sup>	6.61 ± 0.74 <sup>a</sup>	54.02 ± 0.61 <sup>a</sup>	
	sn-1,3 位	30.49 ± 0.74 <sup>a</sup>	10.55 ± 0.99 <sup>a</sup>	28.72 ± 2.21 <sup>b</sup>	6.63 ± 0.75 <sup>a</sup>	22.93 ± 1.35 <sup>b</sup>	

注: 同一种食用油脂的同一列数据不同字母表示脂肪酸在 sn-2 和 sn-1,3 位分布有显著性差异 ( $p < 0.05$ )

由表 2 可知, 不同 ALA 型食用油脂的各脂肪酸总量、脂肪酸在 sn-2、sn-1,3 位的分布有各自的规律特征。紫苏籽油 ALA 总量和在 sn-2 位的含量均达 60% 以上, 棕榈酸和硬脂酸在 sn-2 位的含量低于 0.5%<sup>[22, 26-28]</sup>。亚麻籽油中 ALA 总量和其在 sn-2 位的含量均达 52% 以上, 且其他脂肪酸总量和其在 sn-2 位的含量接近<sup>[14, 24, 29]</sup>。牡丹籽油中油酸在 sn-2 位的含量 (48.06%) 显著高于 sn-1,3 位的 (6.32%), 而 ALA、亚油酸、棕榈酸和油酸在 sn-2 位的含量显著低于 sn-1,3 位的<sup>[23]</sup>。牡丹籽油中亚油酸和 ALA 更易结合到 sn-1,3 位<sup>[30]</sup>, 这两种多不饱和脂肪酸比油酸更容易氧化, 其高含量使牡丹籽油容易氧化变质, 牡丹籽油的脂肪酸分布规律对其氧化稳定性具有显著影响。火麻仁油中 ALA 在甘油三酯 sn-2 和 sn-1,3 位的含量分别为 11.52% 和 21.28%, 除油酸和亚油酸外, 火麻仁油中其他脂肪酸在 sn-2 位的含量均低于 sn-1,3 位的<sup>[24]</sup>。沙棘籽油在 sn-2 位的饱和脂肪酸含量明显低于总量, 从 11.35% 降低至 4.15%, 同时其多不饱和脂肪酸含量明显上升 (64.37% 升高至

71.95%), 主要表现在亚油酸含量升高 (38.71% 升高至 46.46%), ALA 含量基本不变<sup>[17, 31]</sup>。蚕蛹油甘油三酯中不饱和脂肪酸 ALA 和油酸主要分布在 sn-2 位, 其含量分别为 54.02% 和 36.32%, 饱和脂肪酸棕榈酸和硬脂酸更多地分布在 sn-1,3 位, 棕榈酸在 sn-2 位的含量只有 3.46%, 显著低于其在 sn-1,3 位的含量 (30.49%)<sup>[25, 32-33]</sup>。脂肪酸的种类和其在甘油酯中的位置分布规律, 决定了 ALA 型食用油脂甘油三酯的分子结构, 影响脂肪酸的生物利用度和代谢, 从而影响甘油三酯的营养功效<sup>[34]</sup>。

## 3 ALA 型食用油脂的甘油三酯分子构成

除少量游离脂肪酸、磷脂外, 天然动植物油脂主要是由大量的甘油酯组成, 经脱酸、脱色处理后的精炼油中主要是甘油三酯 (约占 97% 以上) 和微量的维生素 E、甾醇等脂溶性伴随物。甘油三酯的脂肪酸组成和位置分布决定了甘油三酯的分子结构, 对其消化吸收特性、理化性质也具有重要影响。

紫苏籽油已被鉴定出约 20 种甘油三酯<sup>[35]</sup>, 主要为 LnLnLn (35.8%, Ln 为亚麻酸)、LLnLn (20.2%, L 为亚油酸)、LLLn (17.7%) 和 PLnLn

(14.9%, P 为棕榈酸),其他甘油三酯含量较低,如 LnPL(2.5%)、OOL(2.0%, O 为油酸)。亚麻籽油甘油三酯分子中 LnLnLn(24.2%)、LLLn + OLnLn(18.6%)、LLnLn(14.7%)、LLL + OLLn(8.0%)、PLLn(7.1%)、PLL + OOLn(7.1%)与 PLnLn(6.1%)是主要组成部分,可达到总甘油三酯的85.8%<sup>[36]</sup>。牡丹籽油中主要甘油三酯为 LLLn + OLnLn、LLL + OLLn 与 LLnLn,含量分别为21.37%~21.67%、14.88%~15.44%及13.56%~14.98%<sup>[37]</sup>,含有 ALA 的甘油三酯分子可以占到79%以上<sup>[23]</sup>。火麻仁油中甘油三酯主要由 LLL + LnLP(21.9%)、LnLL(18.7%)、LnLnL(15.3%)、LLO + LLP(13.8%)、LOO + LOP(9.5%)和 LnLnLn(5.0%)组成<sup>[24]</sup>。在沙棘籽油中共发现20多种甘油三酯,其中 LOL(13.65%)、OLO(12.06%)和 LLnO(11.23%)的含量相对较高,其次为 OPoL(9.78%, Po 为棕榈油酸)、LLnL(9.62%)等,三不饱和脂肪酸甘油三酯(UUU)占总量的83.58%,含有 ALA 的甘油三酯分子占比在33.56%以上<sup>[17]</sup>。蚕蛹油共鉴定出18种甘油三酯,含

量较高的为 POO、POLn、OLnLn 和 PLnLn,其含量分别为15.0%、13.4%、11.7%和10.18%,含有 ALA 的甘油三酯分子占比为62.4%<sup>[32]</sup>。

甘油三酯是食用油脂的主要成分,不同来源食用油脂甘油三酯的分子结构类型和含量占比存在显著差异。在6种 ALA 型食用油脂中紫苏籽油和亚麻籽油甘油三酯分子中 LnLnLn 占比最大,而火麻仁油的 LnLnLn 占比则最低;牡丹籽油和蚕蛹油含 ALA 的甘油三酯分子占比均较高(60%以上),而沙棘籽油含 ALA 的甘油三酯分子占比则相对较低。

#### 4 ALA 型食用油脂的脂质伴随物

除甘油酯外,食用油脂还含有少量的脂质伴随物,如脂溶性维生素(主要为维生素 E)、甾醇、角鲨烯等,其对维持人体健康具有不可替代的作用。食用油脂中脂质伴随物的含量与组成主要由油料种类决定,如玉米油中甾醇、米糠油中谷维素和初榨橄榄油中酚类物质和角鲨烯均具有较高含量。此外,脂质伴随物的含量与组成也受生长环境、加工工艺、存储过程的影响。ALA 型食用油脂中主要脂质伴随物见表3。

表3 ALA 型食用油脂的主要脂质伴随物

食用油脂	维生素 E		甾醇		参考文献
	含量范围/(mg/kg)	主要组分(占比)	含量范围/(mg/kg)	主要组分(占比)	
紫苏籽油	400.71~503.26	$\gamma$ -生育酚(75%)	3 272.52~3 716.99	$\beta$ -谷甾醇(75%)	[38]
亚麻籽油	174~434	$\gamma$ -生育酚(90%)	4 720~7 550	$\beta$ -谷甾醇(50%)	[39-41]
牡丹籽油	560~963.17	$\gamma$ -生育酚(85%)	2 000 以上	$\beta$ -谷甾醇 (55.50%~62.17%)	[30,37]
火麻籽油	277~912	$\gamma$ -生育酚(90%)	925~5 904	$\beta$ -谷甾醇(60%)	[16]
沙棘籽油	2 450~2 710	$\alpha$ -生育酚(78%)	18 100~18 470	$\beta$ -谷甾醇(50%)	[42]
蚕蛹油	465~486	$\alpha$ -生育酚(44.85%)	17 150	胆固醇(67.35%~90%)	[32,43]

由表3可知,在6种 ALA 型食用油脂中,紫苏籽油、亚麻籽油、牡丹籽油、火麻籽油、蚕蛹油、沙棘籽油的维生素 E 总含量为174~2 710 mg/kg。其中:部分亚麻籽油中维生素 E 含量偏低,可能是由于加工或存储过程中的氧化损失;沙棘籽油中维生素 E 含量较高,可达到2 450 mg/kg 以上;紫苏籽油、牡丹籽油、火麻籽油和亚麻籽油中  $\gamma$ -生育酚是含量最高的维生素 E 异构体,其占比可以达到75%以上。许春芳等<sup>[6]</sup>利用高效液相色谱法测得紫苏籽油生育酚总含量为634~994 mg/kg,  $\gamma$ -生育酚含量为612~964 mg/kg,占总生育酚的95%左右。另有报道,牡丹籽油中生育酚总量约为380.31 mg/kg,  $\gamma$ -生育酚含量可以达到353.67 mg/kg,约占总含量的93%<sup>[44]</sup>。沙棘籽油和蚕蛹油中维生素 E 主要成分是  $\alpha$ -生育酚,分别为总量的78%和44.85%。

维生素 E 是良好的脂溶性抗氧化成分,其异构体组成的差异对其生理功能和油脂的氧化稳定性有显著影响。

甾醇是动植物油脂中最主要的不皂化物,是维持人体健康重要的营养物质。在6种 ALA 型食用油脂中甾醇总含量一般为2 000 mg/kg 以上,除蚕蛹油外,其他 ALA 型食用油脂的甾醇以  $\beta$ -谷甾醇为主要组分。紫苏籽油中的  $\beta$ -谷甾醇占甾醇总量的75%以上,其次是菜油甾醇和豆甾醇<sup>[38]</sup>。亚麻籽油的甾醇总含量为4 720~7 550 mg/kg,  $\beta$ -谷甾醇含量约为2 400 mg/kg,约占甾醇总量的50%<sup>[39]</sup>,其次是菜油甾醇和  $\Delta 5$ -燕麦甾醇<sup>[40]</sup>,还含有少量的环肽类物质,环肽由8~9个氨基酸构成,具有较强的抗氧化活性和螯合金属离子等生理活性和功效<sup>[45-46]</sup>。牡丹籽油中  $\beta$ -谷甾醇占甾醇总量的

55.50% ~ 62.17%, 其次为  $\Delta 5$ -燕麦甾烯醇(25.28% ~ 28.01%), 还含有少量的角鲨烯, 含量为 28.60 ~ 62.66 mg/kg, 显著高于亚麻籽油角鲨烯含量(18.00 mg/kg)<sup>[37]</sup>。沙棘籽油的甾醇含量显著高于其他食用油脂, 可以达到 18 100 ~ 18 470 mg/kg,  $\beta$ -谷甾醇占甾醇总量的 50% 以上, 其次是  $\Delta 5$ -燕麦甾醇<sup>[42]</sup>。与大多数动物油脂相似, 蚕蛹油固醇类组分中胆固醇含量最高(67.35% ~ 90%), 其次为  $\beta$ -谷甾醇(10% ~ 19.21%), 其他动植物油脂中常见的菜油甾醇、燕麦甾醇等在蚕蛹油中含量较少, 且尚未发现豆甾醇<sup>[43]</sup>。

### 5 ALA 型食用油脂的消化研究

食用油脂在小肠上段经各种酶及胆酸盐的作用, 水解为甘油、脂肪酸等。在小肠消化液中以脂肪酸、单甘油酯、磷脂和胆酸盐组成的混合胶束形式透过小肠表面的不流动水层、黏性多糖-蛋白质复合物层到达小肠绒毛进行吸收。不同食用油脂甘油三酯中脂肪酸的种类(链长、饱和程度)与位置分布存在差别, 且由于人体消化道中脂肪酶对不同脂肪酸和甘酰基位置具有特异性, 因此人体对不同脂肪酸的消化和吸收也会存在差异<sup>[47]</sup>。研究 ALA 型食用油脂的消化和代谢, 有助于阐明饮食中膳食脂质的物理特性对 ALA 消化率和吸收程度的影响, 进一步明确影响其生理功效的相关因素, 以便于精准发挥膳食脂质中 ALA 的生理功能。

与普通食用油脂不同, ALA 型食用油脂含有大量 ALA, 其甘油三酯中脂肪酸组成和位置分布对消化吸收和生理功效有显著影响。研究发现, 亚麻籽油的消化程度和消化速率均远低于菜籽油等日常食用油脂, 限制了 ALA 在人体内的吸收和利用<sup>[48]</sup>。叶展<sup>[49]</sup>通过构建体外消化模型, 分析亚麻籽油等 5 种常用食用油脂的消化特性, 结果显示, 各油脂最终水解程度为棕榈油  $\approx$  菜籽油  $>$  亚麻籽油  $\approx$  葵花籽油  $>$  猪油, 棕榈油消化程度和消化速率均最高, 这可能与其甘油三酯结构和脂肪酸组成有关。对 5 种常见食用油脂的 pH-stat 体外模拟消化模型的研究发现, 脂肪酸最大释放量为蚕蛹油  $>$  大豆油  $>$  猪油  $>$  桑籽油  $>$  亚麻籽油, ALA 含量与吸收率呈正相关<sup>[50]</sup>。颜承海<sup>[50]</sup>研究发现, LnLnO 和 LnLnLn 单体的消化程度分别为 73.81% 和 72.67%, 吸收率分别为 6.06% 和 6.40%, 这两种甘油三酯形式能够促使机体高效吸收 ALA, 在分子水平上可对脂质代谢起到基因调控作用, 具有消化和吸收俱佳的生物利用度, 是人体高效补充 ALA 的最佳结构形式。

人体对不同类型的食用油脂的消化和吸收程度

存在差异, 主要受脂肪酸种类和位置分布的影响。油脂的分子结构修饰是提高 ALA 生物利用度的有效手段, 开发易消化吸收的食用结构脂是未来功能性油脂的发展方向。

### 6 结语

本文仅对 ALA 型食用油脂甘油三酯的种类和含量做了初步统计和总结。目前, ALA 型食用油脂的研究报道还集中在其生理功效机制的探究, 尚缺乏其功能的构效关系精细化、系统性研究, 且其生理功效机制研究多数聚焦于体外实验, 缺乏对食用油脂中 ALA 生物可及性和细胞代谢水平的研究, 对紫苏籽油、牡丹籽油、火麻仁油等 ALA 型食用油脂的吸收转运、脂质代谢相关基因表达情况的研究较少。此外, ALA 型食用油脂富含多不饱和脂肪酸, 在消化过程中也易受到氧气、金属离子、氧化还原酶等因素的影响而发生氧化, 从而产生不良的风味甚至潜在的有害物质。因此, 未来可以围绕以下几方面展开进一步的研究: 从食用油脂甘油三酯分子结构差异出发, 通过制备特定分子结构的结构脂, 探究分子结构对 ALA 型食用油脂理化特性、物质组成和消化特性的影响; 采用动物实验系统考察 ALA 型食用油脂的 ALA 生物利用度的差异, 并进一步阐明 ALA 型食用油脂脂质代谢差异的内在分子机制。此外, 未来的研究应以实现 ALA 型食用油脂健康功能的精准营养、高值化应用为导向, 促进功能性油脂的发展。

### 参考文献:

- [1] NAGHSHI S, AUNE D, BEYENE J, et al. Dietary intake and biomarkers of *alpha* linolenic acid and risk of all cause, cardiovascular, and cancer mortality: Systematic review and dose-response meta-analysis of cohort studies [J/OL]. *Bmj - Brit Med J*, 2021, 375: 2213 [2022-08-08]. <https://doi.org/10.1136/bmj.n2213>.
- [2] YUE H, QIU B, JIA M, et al. Effects of  $\alpha$ -linolenic acid intake on blood lipid profiles: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2021, 61(17): 2894-2910.
- [3] 杨敏, 魏冰, 孟橘, 等.  $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸的来源及生理功能研究进展 [J]. *中国油脂*, 2019, 44(10): 110-115.
- [4] 宋明明, 姜丽, 于大永, 等.  $\alpha$ -亚麻酸植物资源的筛选 [J]. *农业机械*, 2012(15): 40-42.
- [5] 李培燕. 油脂对煎炸薯条质构的影响及其机制 [D]. 江苏无锡: 江南大学, 2021.
- [6] 许春芳, 董喆, 郑明明, 等. 不同产地的紫苏籽油活性成分检测与主成分分析 [J]. *中国油料作物学报*, 2019, 41(2): 275-282.

- [7] 许万乐, 李会珍, 张志军, 等. 紫苏籽油理化性质测定及脂肪酸组分分析[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(12): 106-109.
- [8] 李会珍, 刘艳, 李晓君, 等. 不同品种紫苏种子营养成分及脂肪酸组分分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 276-280.
- [9] 张晓霞, 尹培培, 杨灵光, 等. 不同产地亚麻籽含油率及亚麻籽油脂肪酸组成的研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(11): 142-146.
- [10] 廖丽萍, 肖爱平, 冷鹏, 等. 不同品种亚麻籽脂肪酸含量的GC-MS分析[J]. 中国麻业科学, 2014, 36(2): 68-71.
- [11] 韩丽丽, 侯占群, 文剑, 等. 富含 $\alpha$ -亚麻酸的功能性油脂及其微胶囊化研究进展[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(21): 185-189.
- [12] 冯贞, 方晓璞, 任春明. 不同提取方法对牡丹籽油品质和微量活性成分的影响[J]. 中国油脂, 2018, 43(10): 17-19.
- [13] 方晓璞, 田淑梅, 任春明, 等. 火麻仁油组分含量及理化性质的研究[J]. 粮食与食品工业, 2014, 21(3): 24-26.
- [14] 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.
- [15] 伍先绍, 凌海, 胡蓉. 火麻油的脂肪酸组成及理化指标分析[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(1): 24-28.
- [16] 从仁怀, 许春芳, 郑明明, 等. 不同产地火麻籽油脂溶性活性成分研究[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(6): 861-868.
- [17] 郑莉, 赵晨伟, 查娟, 等. 沙棘油脂肪酸、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.
- [18] 吴晓云, 谢强胜, 李启艳, 等. 基于7种脂肪酸含量测定和化学计量学的沙棘籽油质量评价研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 8128-8135.
- [19] 施英, 廖森泰, 肖更生, 等. 不同品种桑蚕蛹脂肪酸组成分析[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(3): 74-78.
- [20] YU S Y, DU S B, YUAN J H, et al. Fatty acid profile in the seeds and seed tissues of *Paeonia* L. species as new oil plant resources[J]. Sci Rep, 2016, 6(1): 1-10.
- [21] MATTHÄUS B, BRÜHL L. Virgin hemp seed oil: An interesting niche product[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2008, 110(7): 655-661.
- [22] 黄昭先, 王满意, 孙承国, 等. 酶法催化紫苏油和MCT合成中长链甘油三酯研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 359-366.
- [23] 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.
- [24] MUNGURE E T, BIRCH E J. Analysis of intact triacylglycerols in cold pressed canola, flax and hemp seed oils by HPLC and ESI-MS[J]. SOP Trans Anal Chem, 2014, 1: 48-61.
- [25] ZHAO X Y, WANG X D, LIU X, et al. Structured lipids enriched with unsaturated fatty acids produced by enzymatic acidolysis of silkworm pupae oil using oleic acid[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2015, 117(6): 879-889.
- [26] DOTE S, YAMAMOTO Y, HARA S. Effects of triacylglycerol molecular species on the oxidation behavior of oils containing  $\alpha$ -linolenic acid[J]. J Oleo Sci, 2016, 65(3): 193-199.
- [27] HUANG Z X, CAO Z Y, GUO Z W, et al. Lipase-catalysis of  $\alpha$ -linolenic acid-rich medium- and long-chain triacylglycerols from perilla oil and MCTs with reduced by-product[J/OL]. J Sci Food Agric, 2020, 100(12): 10515 [2022-08-08]. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10515>.
- [28] 张瑜, 戚欣, 白艺珍, 等. 紫苏籽油化学组成与检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(20): 7181-7188.
- [29] 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.
- [30] 毛程鑫, 李桂华, 李普选, 等. 牡丹籽油的脂肪酸组成及理化特性分析[J]. 现代食品科技, 2014, 30(4): 142-146.
- [31] REN G L. Extraction of sea buckthorn seed oil and analysis of its fatty acid composition[J/OL]. Study Soc Sci Res, 2021, 2(2): P64 [2022-08-08]. <https://doi.org/10.22158/sssr.v2n2p64>.
- [32] 石威. 蚕蛹油的溶剂提取与酶法精制技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [33] GUIL-GUERRERO J L, RAMOS-BUENO R P, GONZÁLEZ-FEMÁNDEZ M J, et al. Insects as food: Fatty acid profiles, lipid classes, and sn-2 fatty acid distribution of *Lepidoptera larvae*[J/OL]. Eur J Lipid Sci Tech, 2018, 120(6): 1700391 [2022-08-08]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700391>.
- [34] 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.
- [35] ZHAO B B, FU S J, LI H, et al. Chemical characterization of Chinese perilla seed oil[J]. J Oleo Sci, 2021, 70(11): 1575-1583.
- [36] ZHANG D, LI X J, DUAN X L, et al. Lipidomics reveals the changes in lipid profile of flaxseed oil affected by roasting[J/OL]. Food Chem, 2021, 364: 130431 [2022-

- 08 - 08 ]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130431>.
- [37] 张东, 薛雅琳, 段章群, 等. 牡丹籽油和亚麻籽油化学组成分析与比较[J]. 中国油脂, 2017, 42(10): 34-38.
- [38] JUNG D M, YOON S H, JUNG M Y. Chemical properties and oxidative stability of perilla oils obtained from roasted perilla seeds as affected by extraction methods[J]. J Food Sci, 2012, 77(12): C1249 - C1255.
- [39] FARAG M A, ELIMAM D M, AFIFI S M. Outgoing and potential trends of the *omega*-3 rich linseed oil quality characteristics and rancidity management: A comprehensive review for maximizing its food and nutraceutical applications [J]. Trends Food Sci Tech, 2021, 114:292-309.
- [40] WASZKOWIAK K, SIGER A, RUDZIŃSKA M, et al. Effect of roasting on flaxseed oil quality and stability[J]. J Am Oil Chem Soc, 2020, 97(6):637-649.
- [41] 邓乾春, 马方励, 魏晓珊, 等. 亚麻籽加工品质特性研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(1):126-134
- [42] ZHENG L, SHI L K, ZHAO C W, et al. Fatty acid, phytochemical, oxidative stability and *in vitro* antioxidant property of sea buckthorn (*Hippopha rhamnoides* L.) oils extracted by supercritical and subcritical technologies[J]. LWT - Food Sci Tech, 2017,86:507-513.
- [43] 王卫飞, 邹宇晓, 廖森泰, 等. 蚕蛹油脂的组成和开发利用研究进展[J]. 蚕业科学, 2018, 44(2):321-328.
- [44] NING C, JIANG Y, MENG J, et al. Herbaceous peony seed oil: A rich source of unsaturated fatty acids and  $\gamma$ -tocopherol[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2015, 117(4): 532-542.
- [45] 左洋. 亚麻籽环肽分离纯化及其与金属离子相互作用研究[D]. 广州:暨南大学,2015.
- [46] 邹仙果. 亚麻籽环肽组成、氧化结构变化及其体外抗肿瘤抗炎活性研究[D]. 南昌:南昌大学,2019.
- [47] 刁小琴, 贾瑞鑫, 王莹, 等. 膳食脂质消化行径及其影响机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(5):1374-1381.
- [48] YE Z, CAO C, LI R, et al. Lipid composition modulates the intestine digestion rate and serum lipid status of different edible oils: A combination of *in vitro* and *in vivo* studies[J]. Food Funct, 2019, 10(3):1490-1503.
- [49] 叶展. 典型膳食油脂胃肠道消化吸收特性及其对肠道健康的影响研究[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2020.
- [50] 颜承海. 富含 $\alpha$ -亚麻酸的蚕蛹油及其甘油三酯单体的消化吸收特性研究[D]. 江苏 镇江:江苏科技大学, 2021.
- 
- (上接第 59 页)
- [15] VAIDYA B, CHO E. Effects of seed roasting on tocopherols, carotenoids, and oxidation in mustard seed oil during heating [J]. J Am Oil Chem Soc, 2011, 88(1):83-90.
- [16] REKAS A, WRONIAK M, RUSINEK R. Influence of roasting pretreatment on high - oleic rapeseed oil quality evaluated by analytical and sensory approaches[J]. Int J Food Sci Technol, 2015, 50(10):2208-2214.
- [17] REKAS A, WRONIAK M, SIGER A, et al. Chemical composition and resistance to oxidation of high - oleic rapeseed oil pressed from microwave pre - treated intact and de - hulled seeds[J/OL]. Grasas Aceites, 2017, 68(4):e225[2023-07-21]. <https://doi.org/10.3989/gya.0775171>.
- [18] FRANKE S, FRÖHLICH K, WERNER S, et al. Analysis of carotenoids and vitamin E in selected oilseeds, press cakes and oils[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2010, 112(10):1122-1129.
- [19] YANG M, ZHENG C, ZHOU Q, et al. Minor components and oxidative stability of cold - pressed oil from rapeseed cultivars in China[J]. J Food Compost Anal, 2013, 29(1):1-9.
- [20] 张亮, 李世刚, 曹培让, 等. 制油工艺对菜籽油微量成分和氧化稳定性的影响[J]. 中国油脂, 2017, 42(2):1-6.
- [21] 车振明, 朱秀灵, 万国福, 等. 酶法提高胡萝卜汁中 $\beta$ -胡萝卜素含量[J]. 食品与发酵工业, 2005(4): 77-80.
- [22] KREPS F, VRBIKOVÁ L, SCHMIDT Š. Influence of industrial physical refining on tocopherol, chlorophyll and *beta*-carotene content in sunflower and rapeseed oil[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2014, 116(11): 1572-1582.
- [23] ČMOLÍK J, SCHWARZ W, SVOBODA Z, et al. Effects of plant - scale alkali refining and physical refining on the quality of rapeseed oil[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2000, 102(1):15-22.
- [24] 王绪英, 王婉婷. 茶多酚与类胡萝卜素的协同抗氧化作用[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(17):44-47.
- [25] 云少君, 戴玥, 延莎.  $\beta$ -胡萝卜素和植酸对胡麻油抗氧化活性的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2015, 35(3):277-280.
- [26] MÜLLER L, FRÖHLICH K, BÖHM V. Comparative antioxidant activities of carotenoids measured by ferric reducing antioxidant power (FRAP), ABTS bleaching assay ( $\alpha$ TEAC), DPPH assay and peroxy radical scavenging assay [J]. Food Chem, 2011, 129(1): 139-148.