

亚麻籽加工品质特性研究进展

邓乾春¹, 马方励², 魏晓珊¹, 臧茜茜¹, 陈鹏¹, 张逸¹, 黄凤洪^{1*}, 黄庆德^{1*}

(1. 中国农业科学院油料作物研究所, 油料脂质化学与营养湖北省重点实验室, 湖北武汉, 430062;

2. 中国农业科学院油料作物研究所-无限极(中国)有限公司功能油脂联合实验室, 广东广州, 510665)

摘要: 亚麻籽富含 α -亚麻酸、木酚素、多酚、植物甾醇、维生素E等多种营养功能成分, 在食品工业、健康产业均具有广阔的应用前景。亚麻生长区域、加工品种、加工部位以及加工工艺不同, 会导致亚麻籽、亚麻籽油、脱脂粉中的功能成分含量和结构存在显著差异, 进而影响其高值化利用前景。本文重点对亚麻籽加工品质特性的研究进展进行了综述, 以期为特定功能成分提取纯化、加工工艺技术优化、高值化专用产品研发和品种选育改良提供理论依据。

关键词: 亚麻籽; 营养成分; 氧化稳定性; 加工工艺

中图分类号: S565.9 文献标识码: A 文章编号: 1007-9084(2016)01-0126-09

Progress of studies on quality characteristics of flaxseed processing

DENG Qian-chun¹, MA Fang-li², WEI Xiao-shan¹, ZANG Xi-xi¹,

CHEN Peng¹, ZHANG Yi¹, HUANG Feng-hong^{1*}, HUANG Qing-de^{1*}

(1. *Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Wuhan 430062, China*; 2. *Functional Oil Laboratory Associated by Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences and Infinite Co. LTD., Guangzhou 510665, China*)

Abstract: Flaxseed, a potential source of α -linolenic acid, lignans, polyphenols, phytosterols and tocopherols, has broad application in food and healthcare industries. However, the contents and compositions of these bioactive components were susceptibly affected by planting area, variety, processing tissue and techniques, leading to decreased value-added utilization of flaxseed, flaxseed oil and defatted flour. This paper systematically reviewed the quality characteristics of flaxseed for value-promoted techniques. The techniques include extraction and purification of specific bioactive components, optimization of processing technology, development of high-value products and improvement of variety breeding.

Key words: Flaxseed; Bioactive components; Oxidative stability; Processing technique

我国是油料生产大国, 且蕴含着丰富的特色油料, 其中亚麻籽作为一种富含营养功能成分的油料作物, 长期以来备受人们关注。在我国亚麻籽主要分布于黄土高原区、阴山北部高原区、黄河中下游及河西走廊灌区、北疆内陆灌区、南疆内陆灌区、甘青高原区和东北平原区。近5年来中国亚麻籽总产量一直稳居世界第二位, 仅在加拿大之后, 2013年产

量是39.88万吨^[1]。基于亚麻籽在我国农业中的重要地位, 2008年被列入国家现代农业产业技术体系。亚麻籽及其油脂能够润肠通便, 降低血脂, 辅助控制血糖和抑制炎症, 可以帮助预防和治疗炎症引发的慢性疾病, 诸如心脏病、中风、糖尿病、癌症、肥胖症、代谢综合症和老年痴呆症等^[2], 其功能与其中含有的 α -亚麻酸、木酚素、多酚、植物甾醇、维生素E等活性成分密切相关。

收稿日期: 2015-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(31371766); 胡麻现代农业产业技术体系(CARS-17); 中国农业科学院油料作物研究所所长基金(1610172014006)

作者简介: 邓乾春(1979-), 男, 副研究员, 主要从事脂质化学与营养研究

* 通讯作者: 黄庆德, 男, 研究员, 从事油料加工技术研究, E-mail: huangqd@oilcrops.cn;

黄凤洪, 男, 研究员, E-mail: huangfh@oilcrops.cn

目前以亚麻籽或其中的功能成分为原料已开发出面包、麦片、饼干、能量棒、杂粮食品、混合食品、油(包括以油制成的保健软胶囊)、休闲食品、面条制品、 $\omega-3$ 鸡蛋、宠物食品等种类丰富的产品^[3],且在向保健食品和医药产业领域渗透。由于亚麻籽或者亚麻籽油的功能成分是决定其高值化应用潜力和商品化开发的重要物质基础,目前除了有大量的研究集中在其生物活性和作用机制、加工提取技术、产品研发等领域上外,对于其加工品质特性也给予了更多关注。本文针对全球范围内不同亚麻籽种植区域,综述了品种、部位、加工工艺等关键影响因素对亚麻籽和亚麻籽油中脂肪酸组成、木酚素、多酚、植物甾醇和维生素E等特定成分含量和结构的影响,以期为特定功能成分提取纯化、高值化专用产品研发、加工工艺技术优化和品种选育改良提供理论基础和依据。

1 脂肪酸组成

油脂中脂肪酸比例与人体健康及心脑血管疾病有着密切的关系,其中长链多不饱和脂肪酸起到了至关重要的作用。亚麻籽中 α -亚麻酸含量以及 $\omega-3$ 与 $\omega-6$ 脂肪酸的比例与诸多油料种子相比具有显著优势^[4,5]。表1为现有报道的亚麻籽或油中脂肪酸组成,就不同区域而言 α -亚麻酸的含量变异范围较广,含量最低的为37.19%,来自于非洲地区突尼斯的品种^[6],最高为大洋洲新西兰国家的品种,含量为59.34%^[7],大部分含量均在50%以上。品种对亚麻籽油脂肪酸组成有较大的影响,如突尼斯Herch等对3个品种进行测定,结果表明其 α -亚麻酸的含量为37.19%~53.80%^[6];Sargi等报道了巴西两个品种中 α -亚麻酸含量分别为48.34%和39.65%^[8]。加工部位对脂肪酸组成的影响较小,Oomah等的研究表明亚麻籽、亚麻籽仁和亚麻籽皮中油脂 α -亚麻酸含量分别为53.13%、50.10%和53.35%^[9];采用正己烷、超临界CO₂和加速溶剂法等不同溶剂萃取对亚麻籽油脂肪酸组成影响较小^[10],但油脂精炼会导致 α -亚麻酸含量降低,王常青等的研究表明,压榨亚麻籽毛油经过碱炼脱酸、负压脱色和脱臭等工艺处理后, α -亚麻酸含量从53.06%分别下降到50.91%、51.58%和47.99%,最高下降了5.07%^[11]。因此通过筛选品种、控制加工工艺可以获得高 α -亚麻酸含量的亚麻籽油原料。

2 木酚素含量

木酚素是一种广泛存在于植物中的酚类化合

物,其结构特征是由两个苯丙基团在丙烷侧链 β -位置通过化学键连接而成^[17];亚麻籽中木酚素主要以SDG(secoisolariciresinol diglucoside)存在^[18],具有抗癌、降低冠心病风险因子、护肝、延缓2型糖尿病进程、抗氧化等作用^[19]。在亚麻籽中,SDG不是全以游离形式存在的,部分SDG与3-羟基-3-甲基-戊二酸(HMGA)通过酯键共价结合形成低聚体;其他酚类化合物如对香豆酸、阿魏酸与糖基以糖苷键结合的方式存在于低聚体中。因此需要通过水解,使酚类物质变成游离形式才能准确测定木酚素含量^[20]。表2为目前报道的亚麻籽或油中木酚素的含量,木酚素主要存在于亚麻籽皮中,含量为12.17mg/g,是仁中含量的4.12倍^[21];亚麻籽皮经过脱脂后其木酚素含量显著增加,达到27.52~53.08mg/g。但不同脱脂工艺对亚麻籽皮的木酚素含量产生显著影响,超临界CO₂法脱脂后木酚素含量是丙酮脱脂后的2.6倍^[22];脱脂粉中木酚素含量约是全籽的两倍^[18];由于木酚素是极性化合物,在提取的油脂中含量一般较低,如氯仿-甲醇提取油脂中木酚素含量为0.093~0.11 μ g/g^[23],超临界CO₂萃取亚麻籽油则高达32.28 μ g/g^[10];当然两种不同工艺提取油脂中木酚素含量的差异可能与测定方法、品种也有一定的关系。不同亚麻品种的木酚素含量差异较大,Eliasson等分别对来自欧洲南部17个品种和中部的10个品种亚麻籽脱脂粉中的(+)-SDG和(-)-SDG含量进行了测定,发现这两种成分的含量最高品种分别为最低品种的1.75倍和2倍^[24],另外瑞士^[25]、瑞典^[18]和丹麦^[18]等地区不同品种的木酚素含量均也有较大差异。以上研究表明通过筛选品种并进行脱脂、脱皮可获得高木酚素含量的素材,可用于获得高纯度木酚素、开发富含木酚素功能食品。

3 多酚含量

植物多酚是一种具有多元酚结构的重要次生代谢产物,广泛存在于植物体中,具有抗氧化活性。油料中的酚类化合物主要包括苯甲酸和肉桂酸的羟基化衍生物、香豆素、黄酮类化合物和木酚素等^[26],与其他油料作物相比,亚麻籽中结合多酚含量偏低,以酚酸或酯化酚酸为主^[27,28]。亚麻籽中主要酚酸物质为香豆酸、阿魏酸、丁香酸、芥子酸、没食子酸、羟基苯甲酸、肉桂酸、香草酸、咖啡酸,分别占总酚酸含量的47.45%、23.36%、9.2%、4.86%、4.58%、4.24%、2.92%、2.07%、1.32%^[29]。Herchi等报道亚麻籽油中酚酸类物质主要有香草酸、对羟基苯甲

酸、香豆酸甲酯、阿魏酸甲酯、阿魏酸、香草醛、反式 对羟基肉桂酸、反式芥子酸等^[10,23]。

表1 亚麻籽油脂肪酸组成
Table 1 Fatty acids composition of flaxseed oil

洲别 Continent	国别 Country	品种数 Variety number	脂肪酸组成 Fatty acid composition/%						参考文献 Ref.
			C16: 0	C18: 0	C18: 1	C18: 2	C18: 3	C14: 0	
亚洲 Asia	中国 China	1	6.11	5.11	33.14	9.9	45.28	-	[12]
		1	5.4	3.9	21.3	16.2	55.3	-	[13]
		1	5.83	3.27	20.18	16.22	53.06	-	[11]
非洲 Africa	突尼斯 Tunisia	3	5.80~9.36	4.72~7.31	19.46~24.22	15.01~21.04	37.19~53.80	-	[6]
		1	7.76 ^a	3.95 ^a	20.54 ^a	17.70 ^a	48.95 ^a	-	[14]
		3	5.6~7.6	3.1~3.6	20.9~22.1	18~19.2	47.4~50.75	0.6~0.8	[10]
大洋洲 Oceania	新西兰 New Zealand	1	4.38~5.22	3.46~4.12	18.21~18.50	15.60~15.88	56.28~57.08	-	[7]
		1	6.08	2.73	15.20	16.66	59.34	-	[15]
欧洲 Europe	土耳其 Turkey	1	6.86	4.59	未提供数据 No data was provided		58.31	-	[14]
		1	7.7	4.2	21.2	18.1	48.2	0.7	[16]
		1	7.2	4.4	24.4	17.4	46.1	0.5	[16]
北美洲 North America	加拿大 Canada	1	5.27	3.54	22.8	15.1	53.13	-	[9]
		1	5.30 ^a	4.38 ^a	25.29 ^a	14.87 ^a	50.10 ^a	-	[9]
		1	7.85 ^b	2.37 ^b	21.33 ^b	15.09 ^b	53.35 ^b	-	[16]
南美洲 South America	巴西 Brazil	3	-	2.76~3.62	18.6~20.67	14.58~16.47	53.18~57.0	-	[8]
		2	4.12/6.11	2.66/5.64	未提供数据 No data was provided		48.34/39.65	-	[8]

注/ Note: a: 亚麻籽皮油 Flaxseed hull oil; b: 脱皮亚麻籽仁油 Peeled flaxseed kernel oil

表2 亚麻籽和亚麻籽油中的木酚素含量
Table 2 Secoisolariciresinol diglucoside content of flaxseeds and flaxseed oil

洲别 Continent	国别 Country	品种数 Variety number	提取方法 Extraction method	木酚素含量 Secoisolariciresinol diglucoside content	参考文献 Ref.
亚洲 Asia	中国 China	1	正己烷脱脂, 50% 乙醇提取 Defatted by Hexane, then extracted by ethanol-water (50%) mixture	全籽 Whole seed 5.47mg/g, 仁 Dehulled seed 2.95 mg/g, 皮 Hull 12.17 mg/g	[21]
非洲 Africa	突尼斯 Tunisia	3	氯仿-甲醇提取油脂, 正己烷溶解, SPE 分离 Seed oil obtained by CHCl ₃ -MeOH, dissolved in Hexane, then methanol-water mixture was added, and SPE separation	0.093~0.11 μg/g 籽油 Seed oil	[23]
	埃及 Egypt	1	超临界 CO ₂ 萃取亚麻籽油, 二甲基甲酰胺溶解, 甲醇提取 Seed oil obtained by supercritical CO ₂ extraction and extracted by methanol, and dissolved in dimethyl formamide solvent	32.28 μg/g 籽油 Seed oil	[10]
欧洲 Europe	瑞士 Switzerland	6	正己烷脱脂, 甲醇和酶法共同水解 Flax seed sample was defatted with n-hexane, methanolysis and enzymatic hydrolysis	4.957~10.062mg/g 籽 Seed	[25]
	瑞典南部 Southern Sweden	17	正己烷脱脂, 碱水解, 95% 乙醇萃取 Flax seed sample was defatted with n-hexane, alkaline hydrolysis, then the extraction by ethanol (95%)	14.8~25.9 mg(+) - SDG/g 脱脂粉 Defatted powder 2.5~5.0 mg(-) - SDG/g 脱脂粉 Defatted powder	[24]
	瑞典中部 Central Sweden	10	正己烷脱脂, 碱水解, 95% 乙醇萃取 Flax seed sample was defatted with n-hexane, alkaline hydrolysis, then the extraction by ethanol (95%)	11.9~19.8mg(+) - SDG/g 脱脂粉 Defatted powder 2.2~4.1 mg(-) - SDG/g 脱脂粉 Defatted powder	[18]
	瑞典 Sweden	14	用 1:1 的 1,4-二氧杂环己烷和 95% 乙醇提取, 碱水解并硫酸酸化后, 固相萃取 Extraction with 1,4-dioxane/95% ethanol (1:1, V/V), and the extract was subjected to base hydrolysis, the hydrolyzed extract was then passed through a reversed-phase column	6.1~13.3mg/g 全籽 Seed; 11.7~24.1mg/g 脱脂粉 Defatted powder	[18]
丹麦 Denmark	15	分别用丙酮、冷榨、乙醇、正己烷、石油醚和超临界 CO ₂ 脱脂, 碱水解后甲醇提取 Extraction with acetone, cold pressed, n-hexane, petroleum ether and supercritical CO ₂ After alkaline hydrolysis, and extracted by methanol	8.4~12.7mg/g 全籽 Seed; 14.4~20.8mg/g 脱脂粉 Defatted powder	[22]	
北美洲 North America	加拿大 Canada	1	分别用丙酮、冷榨、乙醇、正己烷、石油醚和超临界 CO ₂ 脱脂, 碱水解后甲醇提取 Extraction with acetone, cold pressed, n-hexane, petroleum ether and supercritical CO ₂ After alkaline hydrolysis, and extracted by methanol	20.19mg/g, 45.93mg/g, 27.52mg/g, 51.72mg/g, 47.71mg/g, 53.08mg/g 脱脂亚麻籽皮脱脂粉 Defatted hull	[22]

亚麻籽及其油脂中总酚含量如表3所示。由于亚麻籽中多酚种类较多,在溶解性、结合形式上有较大的差异,提取以及分析测定方法对其影响较大,Ribeiro等研究表明采用纯水、90%乙醇和水提酶解等不同溶剂提取和样品处理方法得到的亚麻籽脱脂粉的总酚含量分别为90、83和975mg单宁酸/100g^[30],差异非常显著,其他报道的脱脂粉总酚含量集中在162~383mg没食子酸/100g范围内^[14,15];亚麻籽油提取工艺对其中多酚含量也会产生一定的影响,Khattab等对比了正己烷、超临界CO₂和加速溶剂萃取三种制油方式,结果表明超临界CO₂萃取油脂多酚含量最高(47.58mg/kg),是正己烷提取油脂的3.03倍^[10,31],只有Teh等报道亚麻籽油中酚酸含量高达136.93mg没食子酸/100g油^[7]。表明亚麻籽多酚在皮、仁、脱脂粉、油脂中均有分布,但主要存在于脱脂粉中,而品种对其含量影响较小^[14,25,28,31]。

4 植物甾醇

植物甾醇是一种存在于植物细胞膜中的重要成分,具有降胆固醇、抗癌、抗炎、抗菌等功能^[33],结构上分为4-无甲基甾醇、4-甲基甾醇、4-4'-双甲基甾醇三类^[34,35],通常以4-无甲基甾醇含量最高,而其他两类甾醇含量较低^[36]。亚麻籽中含有的甾醇(表4)以4-无甲基甾醇为主,如谷甾醇、豆甾醇、菜油甾醇、燕麦甾醇等,占不皂化物的47.5%,此外还含有少量的4-甲基甾醇,如钝叶大戟甾醇、环桉烯醇、芦竹甾醇、柠檬二烯醇等,占不皂化物的12.8%^[37];Herchi等则报道亚麻籽油中含有环木菠萝烯醇、2,4-亚甲基环木菠萝烷醇等4-4'-双甲基甾醇以及钝叶醇、枸橼固二烯醇等4-甲基甾醇^[33]。植物甾醇在亚麻籽皮、仁和油中均有分布,但主要存在于油脂中。冯妹元等报道油脂中甾醇含量为441.83mg/100g^[38],Herchi等报道非洲三个品种要高于我国品种,其中籽油中含量为492.0~722.6mg/100g^[33],皮油中甾醇含量为260mg/100g^[32];亚麻籽中植物甾醇含量则为183mg/100g和210mg/100g^[39],要低于报道的油脂中的含量。因此亚麻籽油中因富含植物甾醇使其营养价值得到提升。

5 脂溶性维生素

亚麻籽中主要的脂溶性维生素为维生素E,是一类包括生育酚、生育三烯酚及其它能够显示d- α -生育酚活性的衍生物的总称。表5所示数据表明亚麻籽中生育酚以 γ -生育酚为主,占90%以上。

不同区域和品种对亚麻籽总生育酚含量的影响较小,亚麻籽油中总生育酚含量为17.4~43.4mg/100g,但Bozan等报道的亚麻籽油中总生育酚含量高达79.4mg/100g^[15],可能与品种和测定方法等因素有关。不同提取工艺对生育酚含量的影响相对较小,Khattab等报道的结果表明分别采用正己烷、超临界CO₂和加速溶剂萃取得到的亚麻籽油中生育酚含量为34.47~34.82mg/100g^[10]。亚麻籽油还含有生育三烯酚类物质,Herch等报道三种亚麻籽油中 γ -生育三烯酚的含量为10.5~26.4mg/kg油^[6];Bozan等报道亚麻籽中 α -生育三烯酚和 γ -生育三烯酚含量分别为0.12mg/100g、0.16mg/100g亚麻籽^[15]。

除了维生素E外,亚麻籽油中还存在其他脂溶性维生素,如Herch等报道亚麻籽油中类胡萝卜素含量为2.75~3.63mg/kg^[6],Teh等报道亚麻籽油中叶黄素和 β -胡萝卜素含量分别为6.78mg/kg、0.06mg/100g^[7]。

6 亚麻籽和亚麻籽油的氧化稳定性

由于亚麻籽和亚麻籽油中均含有高含量的多不饱和脂肪酸,鉴于 α -亚麻酸在光、热、氧、水分等环境作用下的氧化不稳定性,对其贮藏、运输、食用品质等均会产生显著影响,因此如何维系其自身氧化稳定性,抵御外在环境因素的干扰显得尤为重要。研究者采用DPPH(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)、FRAP(ferric reducing antioxidant power)、ORAC(oxygen radical absorption capacity)和ABTS(3-ethyl-benzothiazoline-6-sulfonic acid)不同评价体系表明亚麻籽或亚麻籽油不同溶剂提取得到的物质均具有一定的抗氧化活性,但其结果会受到较多因素影响(表6)。Sargi等报道同一品种亚麻籽在不同抗氧化评价体系中,ABTS体系抗氧化能力最强,其次为DPPH体系,最低的为FRAP,因此对不同类别自由基的清除能力有较大差异,同时该研究也报道了不同品种的亚麻籽其提取物抗氧化活性也存在一定的差异^[8];由于亚麻籽或其油脂中存在种类较多、极性不同的抗氧化成分,因此提取液极性不同对其抗氧化能力也会产生一定的影响,亚麻籽脱脂粉70%甲醇提取液FRAP和ORAC值均高于蒸馏水提取物^[40];Barthet等也报道甲醇、丙酮和蒸馏水提取物其DPPH和ORAC值具有显著差异,与提取物中的酚酸类物质含量具有显著相关性^[16]。不同工艺对亚麻籽油抗氧化活性也产生了显著影响,Oomah等采用化学发光法评价了采用丙酮、冷榨、乙醇、石

油醚、正己烷和超临界 CO₂ 萃取亚麻籽皮油的抗氧化能力,结果表明超临界 CO₂ 萃取亚麻籽皮油的抗氧化活性最强,而石油醚、正己烷、冷榨获得的油脂其抗氧化活性最弱^[22]。此外由于亚麻籽中木酚素、多酚等物质均以结合态存在,进行模拟消化水解后其抗氧化活性也显著增强^[40]。Teh 等采用 DSC 法测定冷榨大麻油、亚麻籽油及菜籽油的氧化稳定性,根据融化温度和结晶温度及 ΔH 值的不同,三种油脂的氧化稳定性顺序为菜籽油 > 亚麻油 > 大麻油^[7]。

由上分析可知,亚麻籽或亚麻籽油均具有一定的抗氧化活性和氧化稳定性,其形成机制可能与以下因素有关:(1)生育酚类物质可以抑制油脂过氧化,通过释放羟基上的活泼氢,使其与自由基结合,

从而抑制脂质的氧化^[41]。(2)酚酸类物质的酚羟基结构特别是邻苯二酚或邻苯三酚中的邻位酚羟基很容易被氧化成醌类结构,使其对活性氧等自由基具有很强的捕捉能力^[42,43]。(3)植物甾醇结构分子侧链上有一个亚乙基,能快速形成一个自由基,此自由基可异构化为一个叔自由基,该叔自由基比脂肪酸碳中心自由基更稳定,可阻断脂肪酸链氧化反应^[44]。但亚麻籽尤其是亚麻籽油中的抗氧化物质含量均不高,单一成分难以发挥抗氧化活性;Villanueva 等认为如果抗氧化剂的种类丰富多样,通过小瀑布缓冲效应可以起到一定的抗氧化活性,而单一抗氧化剂含量过高反而会引起“抗氧化应激”效应^[45],因此亚麻籽和亚麻籽油中丰富的抗氧化成分是其维持其氧化稳定性的重要因素。

表3 亚麻籽和亚麻籽油中的多酚含量
Table 3 Polyphenol content of flaxseeds and flaxseed oil

洲别 Continent	国别 Country	品种数 Variety number	提取部位 Extraction site	提取方法 Extraction method	总酚含量 Polyphenol content	参考 文献 Ref.
	突尼斯 Tunisia	3	亚麻籽 Seed	甲醇水提取多酚 Extracted by methanol - water mixture	14.23 ~ 16.64mg 咖啡酸/kg 油 Caffeic acid 14.23 - 16.64mg/kg in oil	[31]
		1	亚麻籽皮油 Hull oil	60% 甲醇提取多酚 Extracted by methanol - water (60%) mixture	624mg 没食子酸/kg 油 Gallic acid 624mg/kg in oil	[32]
		3	脱脂粉 Defatted powder	蒸馏水萃取多酚 Extracted by deionized water	162 ~ 362mg 没食子酸/100g Gallic acid 162 - 362mg/100g	[14]
非洲 Africa	埃及 Egypt	1		正己烷萃取亚麻籽油, 甲醇萃取总酚 Seed oil obtained by n - hexane solvent extraction, extracted by methanol	15.69mg/kg (in oil)	
		1	亚麻籽 Seed	超临界 CO ₂ 萃取亚麻籽油, 甲醇萃取总酚 Seed oil obtained by supercritical fluid extraction, extracted by methanol	47.58mg/kg (in oil)	[10]
		1		加速溶剂萃取亚麻籽油, 甲醇萃取总酚 Seed oil obtained by accelerated solvent extraction, extracted by methanol	20.88mg/kg (in oil)	
北美洲 North America	加拿大 Canada	1	亚麻籽 Seed	采用水、水/甲醇、甲醇、甲醇/水萃取 Extracted by water, water/ methanol, methanol, methanol/water	117, 92, 190, 161mg 没食子酸/100g Gallic acid 117, 92, 190 and 161mg/100g respect.	[29]
		1	脱脂粉 Defatted powder		159, 90, 120, 67mg 没食子酸/100g Gallic acid 159, 90, 120 and 67mg/100g respect.	
		8	亚麻籽 Seed	甲醇萃取总酚 Extracted by methanol	总酚酸 790mg - 1030mg 绿原酸/100g 籽	[28]
南美洲 South America	巴西 Brazil	1		纯水提取多酚 Total phenolics was extracted by water	90mg 单宁酸/100g Gallotannic acid 90mg/100g	
		1	脱脂粉 Defatted powder	90% 乙醇提取多酚 Extracted by ethanol (90%)	83mg 单宁酸/100g Gallotannic acid 83mg/100g	[30]
		1		酶解, 90% 乙醇提取多酚 Enzymatic hydrolysis, then extracted by ethanol (90%)	975mg 单宁酸/100g Gallotannic acid 975mg/100g	
欧洲 Europe	立陶宛 Lithuania	1	脱脂粉 Defatted powder	蒸馏水萃取总酚 Extracted by deionized water	352mg 没食子酸/100g Gallic acid 352mg/100g	[14]
	法国 France	1			185mg 没食子酸/100g Gallic acid 185mg/100g	
	土耳其 Turkey	1	脱脂粉 Defatted powder	乙酸乙酯萃取游离总酚 Extracted by the ethyl acetate	383mg 没食子酸/100g Gallic acid 383mg/100g	[15]
	瑞士 Switzerland	6	脱脂粉 Defatted powder	1:1 乙醇和水提取 Extracted by ethanol (50%)	10.7 ~ 23.16mg 对香豆酸/100g, 10.23 ~ 25.97mg 阿魏酸/100g, 10.7 ~ 23.16mg p - coumaric acid/100g; 10.23 ~ 25.97mg ferulic acid/100g	[25]
大洋洲 Oceania	新西兰 New Zealand	1	亚麻籽油 Seed oil	60% 甲醇萃取总酚 Extracted by methanol (60%)	1 369.3mg 没食子酸/kg 油 1 369.3mg gallic acid/kg in oil	[7]

表 4 亚麻籽和亚麻籽油中植物甾醇含量
Table 4 Phytosterol content of flaxseeds and flaxseed oil

洲别 Continent	国别 Country	品种数 Variety number	提取部位 Extraction site	植物甾醇总量 Total phytosterols	植物甾醇单体 Phytosterol							其他甾醇 Another phytosterols	参考文献 Ref.
					菜籽甾醇 Brassicaterol	菜油甾醇 Campesterol	豆甾醇 Stigmasterol	β-谷甾醇 β-Sitosterol	燕麦甾醇 Avenasterols	β-谷甾醇醇 β-sitostanol	菜油烷醇 Campestanol		
亚洲 Asia	中国 China	1	亚麻籽油 Seed oil	441.83 mg/100g	9.33 mg/100g	112.06 mg/100g	53.53 mg/100g	237.5 mg/100g	-	29.59 mg/100g	-	[38]	
	中国 China	1	亚麻籽仁 Dehulled seed	47.5% ^a 12.8% ^c	0.2% ^b	31.2% ^b	10.2% ^b	57.6% ^b	0.1% ^b		d	[37]	
非洲 Afrika	埃及 Egypt	3	亚麻籽 Seed	11.6-17% ^e		3.2-3.9% ^e	3.1-3.6% ^e	2.8-4.7% ^e					
欧洲 Europe	立陶宛 Lithuania	1	亚麻籽 Seed	13.2% ^e	-	3.7% ^e	3.3% ^e	3.2% ^e		-		[14]	
	法国 France	1	亚麻籽 Seed	13% ^e		3.3% ^e	3% ^e	3.1% ^e					
北美洲 North America	美国 America	1	亚麻籽粉 Seed powder	183 mg/100g		40.2 mg/100g	8.6 mg/100g	83.6 mg/100g	21.6 mg/100g	<1.3 mg/100g	2.7 mg/100g	26.0 mg/100g	
		1	亚麻籽 Seed	210 mg/100g		49.7 mg/100g	14.2 mg/100g	96.0 mg/100g	20.9 mg/100g	<1.3 mg/100g	2.9 mg/100g	26.5 mg/100g	

注: a 为 4-无甲基甾醇在不皂化物中含量; b 为不同单体占 4-无甲基甾醇的含量; c 为 4-甲基甾醇在不皂化物中含量; d 在 4-甲基甾醇中的含量, 钝叶大戟甾醇 13.4%、环烷烯醇 1.9%、芦竹甾醇 45.9%、柠檬二烯醇 16.0%、e 为甾醇在总不皂化物的含量
Note: a; level of 4-demethyl sterols in unsaponified compounds; b; level of individual isomer in 4-methyl sterols; c; level of 4-methyl sterols in unsaponified compounds; d; the main 4-methyl sterols: obtusifoliol (13.4%), cycloolecalenol (1.9%), gramisterol (45.9%), citrostadienol (16.0%); e; level of phytosterols in unsaponified compounds

表 5 亚麻籽和亚麻籽油中生育酚含量
Table 5 Vitamin E content of flaxseeds and flaxseed oil/(mg/100g)

洲别 Continent	国别 Country	品种数 Variety number	提取部位 Extraction site	维生素 E Vitamin E					参考文献 Ref.
				α-生育酚 α-tocopherol	β-生育酚 β-tocopherol	γ-生育酚 γ-tocopherol	δ-生育酚 δ-tocopherol	总生育酚 Total tocopherols	
亚洲 Asia	中国 China	4	亚麻籽 Seed	0.65~0.98	-	19.57~36.02	0.86~1.03	21.08~36.02	[12]
非洲 Afrika	突尼斯 Tunisia	3	亚麻籽油 Seed oil	-	-	35.5~43.4	-	35.5~43.4 ^a	[6]
	埃及 Egypt	3	亚麻籽油 Seed oil	-	-	-	-	17.9~24.5	[14]
	埃及 Egypt	1	正己烷萃取 亚麻籽油 ^b n-hexane solvent extraction	0.66		32.18	1.86	34.70	
	埃及 Egypt	1	超临界 CO ₂ 萃 取亚麻籽油 ^b Supercritical fluid extraction	0.62		32.30	1.90	34.82	[10]
欧洲 Europe	埃及 Egypt	1	加速溶剂萃 取亚麻籽油 ^b Accelerated solvent extraction	0.60		32.10	1.77	34.47	
	土耳其 Turkey	1	亚麻籽油 Seed oil	0.59	-	75.67	-	79.4	[15]
	土耳其 Turkey	1	亚麻籽 Seed	0.10	-	13.93	-	14.6 ^a	
大洋洲 Oceania	立陶宛 Lithuania	1	亚麻籽油 Seed oil					24.2	[10]
	法国 France	1	亚麻籽油 Seed oil					17.4	
大洋洲 Oceania	新西兰 New Zealand	1	亚麻籽油 Seed oil	-	-	37	-	37	[7]

注: a 不包括生育三烯酚含量; b 文献中报道的单位为 mg/g, 笔者认为应该是 mg/100g, 原文中单位有误; c 包括 α, γ, δ-生育三烯酚, 分别为 0.12、0.16 和 0.31mg/100g

Note: a; level of vitamin E (not including tocotrienols); b; we considered that the concentration of tocopherols should be expressed as mg/100g (the concentration was labeled as mg/g in the original paper); c; level of vitamin E including α-Tocotrienol (0.12mg/100g), γ-tocotrienol (0.16mg/100g) and δ-tocotrienol (0.31mg/100g)

7 结论与展望

近年来, 亚麻籽或者亚麻籽油已经被开发成形态种类多样的工业化食品、保健食品或者医药产品, 广泛而深入的营养评价表明 α-亚麻酸、木酚素、亚

麻籽胶等功能成分是吸引人们关注的重要物质基础, 因此了解影响这些功能成分含量、结构和活性变化的关键因素显得尤为重要。通过现有文献分析表明, 其影响主要表现在以下几个方面: (1) 亚麻籽种植区域广泛, 包括亚洲、非洲、大洋洲、欧洲、北美洲

和南美洲等 6 个洲,不同区域其品质差异较为显著;(2)品种不同, α -亚麻酸、木酚素、生育酚含量存在较大差异,但多酚含量差异较小;(3)就加工部位而言,脂肪酸组成接近,木酚素主要存在于皮中,多酚存在于脱脂粉中,植物甾醇和生育酚的差异则未见报道;(4)加工工艺如精炼步骤和溶剂提取方式对

油脂营养会产生显著影响,如随着精炼步骤的增加会导致其中生育酚、植物甾醇等活性成分的严重丧失,而超临界萃取等一些新型提取方式更有利于活性成分的保留;此外多酚、木酚素的提取工艺对其结构、含量会产生显著影响。

表 6 亚麻籽及亚麻籽油体外抗氧化活性
Table 6 Antioxidant activity in vitro of flaxseeds and flaxseed oil

洲别 Continent	国别 Country	品种数 Variety number	提取部位 Extraction site	提取方法 Extraction method	抗氧化体系 Antioxidant system				参考 文献 Ref.
					DPPH	FRAP	ORAC	ABTS	
北美洲 North America	加拿大 Canada	3	亚麻籽粕 Defatted seed	采用甲醇、丙酮、水提取 Methanol extraction, acetone extraction, water extraction	35.6% ~ 63.5%	-	0.23 ~ 0.65 mmol TE/g 干基	-	[16]
南美洲 South America	巴西 Brazil	1	亚麻籽 脱脂粉 Defatted powder	70% 甲醇提取 Methanolic (70%) extraction	-	体外消化前、消化后 Before and after in vitro digestion 3.9, 12.2 FeSO ₄ (FS)/g	体外消化前、消化后 Before and after in vitro digestion 27.0, 279.4 μ mol TE/g	-	[40]
		1	亚麻籽 脱脂粉 Defatted powder	蒸馏水提取 Water extraction	-	体外消化前、消化后 Before and after in vitro digestion 5.9, 18.1 FeSO ₄ (FS)/g	体外消化前、消化后 Before and after in vitro digestion 40.9, 188.4 μ mol TE/g	-	
		1	亚麻籽 Seed	工作液直接提取 Working solution extraction	1.16 mmol Trolox/g	0.33 mmo Trolox/g	-	3.38 mmol Trolox/g	[8]
		1	亚麻籽 Seed	工作液直接提取 Working solution extraction	1.56 mmol Trolox/g	0.76 mmo Trolox/g	-	3.7 mmol Trolox/g	
非洲 Africa	突尼斯 Tunisia	1	亚麻籽皮油 Hull oil	甲醇提取 Methanolic extraction	78.55%	-	-	-	[32]

国外目前对亚麻籽加工品质特性进行了较为系统的研究,我国作为亚麻籽的主要生产国之一,亚麻籽种植区域分布广泛,种植品种较多。随着我国居民生活水平的提高和健康意识的增强,个性化产品的需求将会越来越旺盛,亚麻籽作为一种富含特色生物活性成分且极具开发潜力的功能原料,如何在现有基础上,针对年龄层次、慢性疾病类型、风味口感要求和产品形态特征的不同,开发出更有针对性的高附加值产品,在以后的研究中也需更为深入和系统地了解区域、品种、加工部位和加工工艺等因素对我国亚麻籽品质的影响,并考察其生物活性变化及其与各营养成分的相关性,揭示籽和油中关键活性成分及其发挥抗氧化活性的物质基础,为实现亚麻籽的分类加工、特性化加工和高值化加工提供基础研究支撑和原料,有利于将我国资源优势转化为技术、产品、产业优势,提升亚麻籽种植的比较效益,促进亚麻籽产业的健康快速发展。

参考文献:

- [1] <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>[OL].
[2] [http://flaxcouncil.ca/wp-content/uploads/2015/04/F-](http://flaxcouncil.ca/wp-content/uploads/2015/04/F-lax_SmrtCh-Chinese_M.pdf)

- [lax_SmrtCh-Chinese_M.pdf](http://flaxcouncil.ca/wp-content/uploads/2015/04/F-lax_SmrtCh-Chinese_M.pdf)[OL].
[3] <http://flaxcouncil.ca/food/flax-food-products-list/>[OL].
[4] Tonial I B, Matsushita M, Furuya W M, et al. Fatty acid contents in fractions of neutral lipids and phospholipids of fillets of tilapia treated with flaxseed oil[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2012, 89(8): 1495 - 1500.
[5] 禹晓,邓乾春,黄凤洪,等.不同 α -亚麻酸含量油脂对高脂模型大鼠脂质水平及氧化损伤的影响[J].营养学报,2011,33(2):129-137.
[6] Herchi W, Sakouhi F, Boukhchina S, et al. Changes in fatty acids, tocopherols, carotenoids and chlorophylls content during flaxseed development[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2011, 88(7): 1011 - 1017.
[7] Teh S S, Birch J. Physicochemical and quality characteristics of cold-pressed hemp, flax and canola seed oils[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2013, 30(1):26-31.
[8] Sargi S C, Silva B C, Santos H M C, et al. Antioxidant capacity and chemical composition in seeds rich in omega-3: chia, flax, and perilla[J]. Food Science and Tech-

- nology (Campinas), 2013, 33(3):541-548.
- [9] Oomah B D, Mazza G. Effect of dehulling on chemical composition and physical properties of flaxseed[J]. LWT - Food Science and Technology, 1997, 30(2):135-140.
- [10] Khattab R Y, Zeitoun M A: Quality evaluation of flaxseed oil obtained by different extraction techniques[J]. LWT - Food Science and Technology 2013, 53:338-345.
- [11] 王常青,任海伟,张国华. 亚麻籽油精炼过程中脂肪酸和 VE 的变化分析[J]. 中国油脂, 2008, 33(3):14-16.
- [12] 安建平,牛一川. 亚麻籽粒中主要脂肪酸和蛋白质积累过程研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(7):1308-1311.
- [13] 王俊国,王新宇. 亚麻(籽)油的精炼技术研究[J]. 粮油加工, 2007, 1:47-48.
- [14] El - Beltagi H, Salama Z A, El - Hariri D M, et al. Evaluation of fatty acids profile and the content of some secondary metabolites in seeds of different flax cultivars (*Linum usitatissimum* L.) [J]. General and Applied Plant Physiology, 2007, 33(3-4):187-202.
- [15] Bozan B, Temelli F. Chemical composition and oxidative stability of flax, safflower and poppy seed and seed oils [J]. Bioresource Technology, 2008, 99:6354-6359.
- [16] Barthet V J, Klensporf - Pawlik D, Przybylski R. Antioxidant activity of flaxseed meal components[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2014, 94:593-602.
- [17] Willfor S M, Smeds A I, Holmbom B R. Chromatographic analysis of lignans[J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1112(1-2):64-77.
- [18] Johnsson P, Kamal - Eldin A, Lundgren L N, et al. HPLC method for analysis of secoisolariciresinol diglucoside in flaxseeds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48:5216-5219.
- [19] Westcott N D, Muir A D. Flax seed lignan in disease prevention and health promotion[J]. Phytochemistry Reviews, 2003, 2(3):401-417.
- [20] Li X, Yuan J P, Xu S P, et al. Separation and determination of secoisolariciresinol diglucoside oligomers and their hydrolysates in the flaxseed extract by high - performance liquid chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 2008, 1185(2):223-232.
- [21] Zhang W B, Xu S Y, Wang Z, et al. Demucilaging and dehulling flaxseed with a wet process[J]. LWT - Food Science and Technology, 2009, 42(6):1193-1198.
- [22] Oomah B D, Sitter L. Characteristics of flaxseed hull oil [J]. Food Chemistry, 2009, 114(2):623-628.
- [23] Herchi W, Sawalha S, Arrúez - Román D, et al. Determination of phenolic and other polar compounds in flaxseed oil using liquid chromatography coupled with time - of - flight mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2011, 126(1):332-338.
- [24] Eliasson C, Kamal - Eldin A, Andersson R, et al. High - performance liquid chromatographic analysis of secoisolariciresinol diglucoside and hydroxycinnamic acid glucosides in flaxseed by alkaline extraction[J]. Journal of Chromatography A, 2003, 1012(2):151-159.
- [25] Kraushofer T, Sontag G. Determination of some phenolic compounds in flax seed and nettle roots by HPLC with coulometric electrode array detection[J]. European Food Research and Technology, 2002, 215(6):529-533.
- [26] Ribereau - Gayon P. Plant Phenolics [M]. Oliver and Boyd, Edinburgh, 1972.
- [27] Dabrowski K J, Sosulski F W. Composition of free and hydrolyzable phenolic acids in defatted flours of ten oilseeds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1984, 32(1):128-130.
- [28] Oomah B D, Kenaschuk E O, Mazza G, et al. Phenolic acids in flaxseed [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(8):2016-2019.
- [29] Alu' datt M H, Rababah T, Ereifej K, et al. Distribution, antioxidant and characterisation of phenolic compounds in soybeans, flaxseed and olives [J]. Food Chemistry, 2013, 139(1-4):93-99.
- [30] Ribeiro B D, Barreto D W, Coelho M A Z, et al. Enzyme - enhanced extraction of phenolic compounds and proteins from flaxseed meal [J]. ISRN Biotechnology, 2012, 2013:1-6.
- [31] Herchi W, Sakouhi F, Arrúez - Román D, et al. Changes in the content of phenolic compounds in flaxseed oil during development [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2011, 88(8):1135-1142.
- [32] Herchi W, Al Hujaili A D, Sakouhi F, et al. Flaxseed hull: chemical composition and antioxidant activity during development [J]. Journal of Oleo Science, 2014, 63(7):681-689.
- [33] Herchi W, Harrabi S, Sebei K, et al. Phytosterols accumulation in the seeds of *Linum usitatissimum* L. [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47(10):880-885.
- [34] Grunwald C. Plant sterols [J]. Annual Review of Plant Biology, 1975, 26:209-236.
- [35] 金俊,张俊辉,金青哲,等. 植物油中甾醇含量、存在形式及其在掺伪检验中的作用[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(6):118-122.

- [36] Piironen V, Torvo J, Lampi A M. Plant sterols in cereals and cereal products[J]. *Cereal Chemistry*, 2002, 79(1):148 - 154.
- [37] 李 和, 李惠琳. 芥菜籽油和亚麻仁油中脂肪酸和皂化物成分的分析[J]. *中国油料作物学报*, 1998, 20:86 - 89.
- [38] 冯妹元, 韩军花, 刘成梅, 等. 常见精练油中植物甾醇测定方法的建立及含量分析[J]. *中国食品卫生杂志*, 2006, 18:197 - 201.
- [39] Phillips K M, Ruggio D M, Ashraf - Khorassani M. Phytosterol composition of nuts and seeds commonly consumed in the United States[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2005, 53:9 436 - 9 445.
- [40] Silva F G D, O' Callaghan Y, O' Brien N M, et al. Antioxidant capacity of flaxseed products; the effect of in vitro digestion[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2013, 68(1):24 - 30.
- [41] Oomah B D, Kenaschuk E O, Mazza G, et al. Tocopherols in flaxseed[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45(6):2 076 - 2 080.
- [42] Mertz C, Gancel AL, Gunata Z, et al. Phenolic compounds, carotenoids and antioxidant activity of three tropical fruits[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2009, 22(5):381 - 387.
- [43] Coşkuner Y, Karababa E. Some physical properties of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(3):1 067 - 1 073.
- [44] 赵雁武, 王宪伟, 黄滢璋, 等. 苹果籽油中植物甾醇抗氧化活性研究[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2012, 40(9):221 - 226.
- [45] Villanueva C, Kross R D. Antioxidant - induced stress[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2012, 13(2):2 091 - 2 109.

(责任编辑:郭学兰)