

禹晓,李升,张晨,等.市售亚麻籽粉营养品质分析[J].轻工学报,2026,41(4):0-0.
YU X,LI S,ZHANG C,et al. Analysis of the nutritional quality of commercially available flaxseed flours[J].
Journal of Light Industry,2026,41(4):0-0. DOI:10.12187/2026.04.000

市售亚麻籽粉营养品质分析

禹晓¹,李升¹,张晨¹,杨帆¹,李楚瑜¹,陈亚淑²,邓乾春²,朱莹莹¹

1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院/冷链食品加工与安全控制教育部重点实验室,河南 郑州 450001;
2. 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

摘要:【目的】梳理亚麻籽全籽制粉的加工利用现况,解析品种、产地、加工方式等对市售亚麻籽粉营养品质的影响规律。【方法】对20种市售亚麻籽粉的基本信息、主要营养成分、极性和非极性脂质伴随物含量、体外抗氧化活性、脂质过氧化水平等进行分析,并结合多变量分析方法综合评价其营养品质特征及差异性。【结果】20种市售亚麻籽粉主要来自内蒙古、安徽等原料主产区,原料品种多为黄色亚麻籽,均采用熟化工艺生产,包装以小规格、脱氧、避光和低温贮藏为主。20种市售亚麻籽粉的主要营养成分、极性和非极性脂质伴随物含量均具有明显差异,其中粗蛋白、总脂质、 α -亚麻酸、生育酚、植物甾醇、总酚、黄酮和木酚素含量分别为7.99~22.10 g/100 g、11.10~48.68 g/100 g、5.28%~59.99%(以油计)、31.18~267.10 mg/100 g、225.41~523.99 mg/100 g、9.56~94.09 mg GAE/100 g、1.27~3.35 mg RE/100 g和3.91~42.56 mg/g。20种市售亚麻籽粉的体外抗氧化活性和脂质过氧化水平差异也较为明显,其中DPPH自由基清除能力(DPPH值)和铁还原氧化能力(FRAP值)分别为16.23~43.26 mg TE/g和1.15~3.17 mg TE/g,氢过氧化物(LPO)含量和硫代巴比妥酸反应物质(TBARS)值分别为10.23~510.38 μ mol/g和9.80~471.28 nmol/g。主成分分析和聚类分析结果显示,20种市售亚麻籽粉的品质差异主要由原料品种、产地及熟化方式决定。【结论】原料品种、产地主要影响市售亚麻籽粉的主要营养成分、极性和非极性脂质伴随物含量及体外抗氧化活性,而熟化方式则主要影响市售亚麻籽粉的脂质过氧化水平。

关键词:市售亚麻籽粉;主要营养成分;脂质伴随物;抗氧化活性;脂质过氧化水平;多变量分析

中图分类号:TS222 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)04-0000-00

0 引言

亚麻(*Linum usitatissimum* L.)又称胡麻,属亚麻科亚麻属一年或多年生草本植物,是世界十大油料作物之一,也是我国重要的经济作物和功能型油料作物。亚麻籽富含n-3系列唯一的必需多不饱

和脂肪酸— α -亚麻酸,其在油脂中的含量高达70%,在降血脂、改善记忆、促进机体生长发育、维持机体正常免疫力、视力和神经功能等方面具有重要作用。此外,亚麻籽还富含优质蛋白质、水溶性膳食纤维多糖、矿物质和维生素,以及木酚素、酚酸、植物甾醇、环亚油肽等多种生物活性物质,具有预

收稿日期:2025-10-30;修回日期:2026-03-05;出版日期:2026-08-15

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2024YFD1600104);国家自然科学基金项目(32472390)

作者简介:禹晓(1986—),女,河南省驻马店市人,郑州轻工业大学副教授,博士,主要研究方向为功能性脂质营养和递送。
E-mail:yuxiao@zzuli.edu.cn

通信作者:邓乾春(1979—),男,湖北省黄石市人,中国农业科学院油料作物研究所研究员,博士,主要研究方向为脂质化学与营养。
E-mail:dengquanchun@caas.cn

防心脑血管疾病、改善肠道健康、抑制激素相关性疾病等功效^[1]。亚麻籽除了富含抗氧化活性组分,自身也具有独特的物性特征:外种皮坚硬,具有复杂的多层细胞结构,且与胚乳结合致密,能够很好地隔绝胚子叶细胞内 α -亚麻酸与外界氧气接触发生氧化反应,延缓贮藏过程中品质劣变^[2]。因此,亚麻籽作为一种具有多重生物活性成分与营养促进作用的原料素材,在健康食品领域具有极大的开发利用潜力^[3]。除了特征组分提取和富集纯化,亚麻籽能全籽利用,即加工成粉、酱、乳等不同的产品形成,有望实现其主要营养成分和生物活性成分的共摄入和增效递送^[4]。随着市售亚麻籽粉等全籽产品类别逐渐增多,为明确其最适分类加工应用价值,对相关产品进行营养品质评价则显得尤为必要。

亚麻籽能否被当作普通食品直接食用或作为健康食品原料应用,生氰糖苷类化合物的脱除尤为关键。微波、烘焙等熟化处理不仅能够促进生氰糖苷类化合物的有效脱除,还能够实现活性脂质胞外释放、厌氧钝化脂肪酶、强化产品风味等^[5-7]。亚麻籽经熟化预处理后,可通过打磨脱胶、脱脂或不脱脂、低温粉碎等加工环节添加至食品体系。目前,以熟化亚麻籽作为营养强化剂应用于馒头、面包、面条、饼干等面制品的研究越来越多,其应用范围也逐步拓展至调味酱、酸奶、饮料等多组分多相复合食品体系^[3]。作为全籽化利用的主要形式之一,亚麻籽粉对改善我国亚麻籽消费群体集中、加工产品单一现况,以及增加亚麻籽的应用场景和食用频次均具有重要作用。

与其他油籽类似,亚麻籽中油脂的赋存位点也具有明显的空间异质性,主要分布于种仁胚子叶细胞内,而外种皮中的脂质仅占总脂质 18% 左右,主要以 α -亚麻酸为主^[8]。理论上,亚麻籽种皮坚韧且外表覆盖致密胶质层,能够很好地隔绝种仁胚子叶细胞内脂质与外界氧气接触发生氧化反应,但微波、烘焙等熟化处理能够诱导亚麻籽中油脂体原位塌陷,表现为膜破裂、中性脂质释放等^[9]。当亚麻籽以粉的形式存在时,粒度的减少能够破坏籽粒的外种皮和胚子叶细胞壁,即空间屏障效应被解除,油脂体中性脂质暴露等则可能加剧贮藏过程中 α -

亚麻酸的氧化易感性。已有研究^[10-11]表明,熟化处理能够影响亚麻籽中木酚素、生育酚、酚酸等内源性抗氧化脂质伴随物的组成结构,而粉碎处理则主要改变特定脂质伴随物的溶出释放、分布规律等,进而有效维持亚麻籽粉在贮藏期间的氧化稳定性。因此,选择适宜的亚麻籽原料、熟化方式和磨粉工艺,能最大限度地实现上述脂质伴随物的空间迁移和抗氧化活性的有效发挥。

鉴于此,本研究拟采集 20 份不同厂家生产的市售亚麻籽粉样品,针对主要营养成分、主要脂肪酸、脂质伴随物、体外抗氧化活性、脂质过氧化水平等进行比较分析,系统评估市售亚麻籽粉产品的营养品质现况,以期为亚麻籽粉品质控制和标准体系构建,以及亚麻籽全籽加工高质量发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

20 份市售亚麻籽粉样品,购自线下超市和线上商城,结合产品包装标识,并向厂家进一步确认原料品种、熟化方式等,产品的基本信息见表 1。水溶性维生素 E(纯度>97%)、 α -生育酚(纯度 $\geq$ 95%)、 γ -生育酚(纯度 $\geq$ 96%)、5 α -胆甾醇、2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)等,Sigma-Aldrich(上海)贸易有限公司;N,O-双(三甲基硅基)三氟乙酰胺(BSTFA,纯度 $\geq$ 99%)、1%三甲基氯硅烷(TMCS)衍生化试剂(纯度 $\geq$ 99%),美国 NU-CHEK 公司;丙二醛(MDA)试剂盒(纯度 $\geq$ 96%),南京建成生物公司;甲醇、异丙醇、正己烷、醋酸、乙腈,均为色谱纯,天津市富宇精细化工有限公司;其他分析纯试剂,天津市大茂化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

Scientz-10N 型冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司;HH-S6 型电热恒温水浴锅,北京科伟永兴仪器公司;DHG 型电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器公司;自动凯氏定氮仪、6890N 型气相色谱(GC)仪、1290 型超高效液相色谱(HPLC)仪,美国 Agilent 公司;Multiskan GO 型全波长酶标仪,美国 Thermo 公司;LC-6AD 型半制备液相色谱仪,

表 1 20 种市售亚麻籽粉基本信息

Table 1 Basic information of 20 kinds of commercially available flaxseed flours

编号	原料品种	产地	熟化方式	包装形式	生产规格	贮藏方法	保质期/月
1 [#]	金色亚麻籽	陕西	微波熟制	真空袋装、避光	500 g/袋	阴凉干燥处,避免阳光直射	6
2 [#]	褐色亚麻籽	陕西	微波熟制	真空袋装、避光	250 g/袋	阴凉干燥处,避免阳光直射	6
3 [#]	黄色亚麻籽	内蒙古	微波熟制	食品级复合材质 铝箔袋装、避光	250 g/袋	阴凉干燥处,避免阳光直射	9
4 [#]	黄色亚麻籽	内蒙古	微波熟制	食品级复合材质 铝箔袋装、避光	300 g/袋	阴凉干燥处,开封后需冷藏	12
5 [#]	黄色亚麻籽	河北	低温烘焙	袋装、未避光	500 g/袋	冷藏	6
6 [#]	黄色亚麻籽	山东	低温烘焙	罐装、未避光	300 g/罐	阴凉干燥处,避免阳光直射	6
7 [#]	黄色亚麻籽	安徽	低温烘焙	罐装、未避光	230 g/罐	阴凉干燥处,避免阳光直射	12
8 [#]	黄色亚麻籽	安徽	低温烘焙	罐装、未避光	200 g/罐	阴凉干燥处,避免阳光直射	12
9 [#]	黄色亚麻籽	东北	低温烘焙	袋装、未避光	500 g/袋	冷藏或冷冻	6
10 [#]	褐色亚麻籽	内蒙古	低温烘焙	罐装、未避光	160 g/罐	冷藏	18
11 [#]	黄色亚麻籽	山东	低温烘焙	罐装、未避光	500 g/罐	阴凉干燥处,避免阳光直射	6
12 [#]	黄色亚麻籽	内蒙古	低温烘焙	罐装、未避光	250 g/罐	阴凉干燥处, 避免阳光直射或冷藏	12
13 [#]	黄色亚麻籽	内蒙古	低温烘焙	脱氧防护锁鲜袋装、避光	300 g/袋	阴凉干燥处, 避免阳光直射或冷藏	6
14 [#]	黄色亚麻籽	安徽	低温烘焙	罐装、未避光	500 g/罐	阴凉干燥处,避免阳光直射	6
15 [#]	黄色亚麻籽	美国	低温烘焙	袋装、避光	453 g/袋	阴凉干燥处,避免阳光直射	12
16 [#]	黄色亚麻籽	河北	低温烘焙	食品级复合材质 铝箔袋装、避光	250 g/袋	阴凉干燥处,避免阳光直射	9
17 [#]	褐色亚麻籽	东北	低温烘焙	食品级复合材质 铝箔袋装、避光	250 g/袋	阴凉干燥处,避免阳光直射	12
18 [#]	褐色亚麻籽	新西兰	低温烘焙	吸氧器脱氧袋装、未避光	250 g/袋	阴凉干燥处,避免阳光直射	12
19 [#]	黄色亚麻籽	内蒙古	高温炒制	食品级复合材质 铝箔袋装、避光	250 g/袋	阴凉干燥处, 避免阳光直射或冷藏	12
20 [#]	黄色亚麻籽	安徽	高温炒制	罐装、未避光	160 g/罐	阴凉干燥处,避免阳光直射	18

日本 Shimadzu 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 主要营养成分测定 亚麻籽粉中粗蛋白、总脂质和水分含量分别参考《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》(GB 5009.5—2025)^[12]、《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》(GB 5009.6—2016)^[13]和《食品安全国家标准 食品中水分的测定》(GB 5009.3—2016)^[14]中的方法进行测定。

1.3.2 主要脂肪酸组成测定 参考 Q. C. Deng 等^[15]的方法,并稍作修改。将亚麻籽粉与石油醚置于索氏抽提装置中,60 ℃抽提 8 h,将圆底烧瓶中的有机溶剂用 N₂ 吹干,获得亚麻籽油。称取 0.050 g 索氏提取亚麻籽油,加入 1 mL 0.5 mol/L 甲醇钠溶液后涡旋混匀,100 ℃加热 5 min,再转移至 5 mL 玻璃管中,加入 1 mL 三氟化硼,60 ℃水浴 30 min,再加入 1 mL 去离子水和 1 mL 正己烷,涡旋混匀 5 min,5000 r/min 离心 10 min,取上层清液,利用 GC 仪进

行分析检测。具体条件为:HP-INNOWAX 色谱柱(石英毛细管柱 30 m×0.32 mm×0.25 μm);升温程序为 50 ℃开始,保持 1 min,以 25 ℃/min 升温至 200 ℃,再以 3 ℃/min 升温至 230 ℃,保持 18 min;进样口和检测器温度均为 250 ℃,载气为 He,流速为 1.5 mL/min,分流比为 10:1。

1.3.3 非极性脂质伴随物测定 1)生育酚测定。参考 Y. X. Cong 等^[16]的方法。称取 2.00 g 索氏提取亚麻籽油,用正己烷定容至 25 mL,混匀,过 0.22 μm 滤膜后,利用 HPLC 仪进行分析检测。具体条件为:Inertsil HPLC COLUMN 硅胶型色谱柱(4.8 mm×250 mm×5 μm);流动相中,正己烷与异丙醇的体积比为 99.5:0.5;柱温为 30 ℃;进样量为 20 μL;流速为 1.0 mL/min。采用峰面积外标法定量生育酚异构体,总生育酚含量为不同构型生育酚含量总和。

2)植物甾醇测定。参考于坤等^[17]的方法。称取 1.00 g 索氏抽提亚麻籽油,置于 50 mL 离心管

中,依次加入 0.5 mL 质量浓度为 0.5 mg/mL 的 5 α -胆甾醇内标溶液、10 mL 浓度为 2 mol/L 的乙醇-KOH 溶液,密封后置于 60 $^{\circ}$ C 水浴摇床中反应 60 min;冷却后,加入 4 mL 去离子水和 10 mL 正己烷,涡旋混匀,5000 r/min 离心 10 min,取上清液,加入 1.5 g 无水 Na₂SO₄ 后静置,以去除水分;再加入 100 μ L BSTFA-TMCS 混合液(二者体积比为 99 : 1),105 $^{\circ}$ C 反应 15 min,冷却至室温后,加入 1 mL 正己烷,振荡混匀 1 min,利用 GC 仪进行分析检测。具体条件为:Agilent DB-5HT 色谱柱(毛细管柱 30.0 m $\times$ 220 μ m $\times$ 0.10 μ m);进样量为 1 μ L,进样口和检测器温度均为 320 $^{\circ}$ C;柱箱温度为 60 $^{\circ}$ C,保持 1 min,按照 40 $^{\circ}$ C/min 升温至 310 $^{\circ}$ C,保持 10 min;载气为 He,流量为 2.0 mL/min,分流比为 25 : 1,分流量为 50 mL/min。

1.3.4 极性脂质伴随物和抗氧化活性测定 1) 甲醇水提取物提取。准确称取 0.30 g 亚麻籽粉于 10 mL 离心管中,加入 5 mL 体积分数为 80%的甲醇水溶液,室温下涡旋提取 10 min,再超声辅助提取 10 min,7000 r/min 离心 15 min,取上清液,按上述步骤重复提取 2 次,合并上清液,即得甲醇水提取物,避光保存,备用。

2) 总酚和黄酮含量测定。总酚含量参考 X. Yu 等^[9]的方法进行测定。将 0.25 mL 甲醇水提取物置于 10 mL 比色管中,加入 2.5 mL 蒸馏水和 0.25 mL 福林酚试剂,摇匀,静置 3 min,加入 0.5 mL 饱和 Na₂CO₃ 溶液,避光静置 1 h,在 765 nm 波长处测定吸光度。测定结果以没食子酸当量(Gallic Acid Equivalent,GAE)表示,单位为 mg GAE/100 g。

黄酮含量参考 X. Yu 等^[18]的方法进行测定。将 0.45 mL 甲醇水提取物置于 10 mL 比色管中,依次加入 0.03 mL 质量分数为 5%的 NaNO₂ 溶液和 0.03 mL 质量分数为 10%的 Al(NO₃)₃ 溶液,混匀后静置 6 min,加入 0.4 mL 质量分数为 4%的 NaOH 溶液,用体积分数为 80%(如无特殊说明,下文百分号均指体积分数)的甲醇溶液定容至 1 mL,静置 15 min,在 503 nm 波长处测定吸光度。测定结果以芦丁当量(Rutin Equivalent,RE)表示,单位为 mg RE/100 g。

3) 木酚素含量测定。参考 C. Cheng 等^[19]方法,

将一定量甲醇水提取物用 0.22 μ m 滤膜过滤后,使用配备 PDA 检测器的 UPLC 仪进行分析检测。具体条件为:RP18 色谱柱(100 mm $\times$ 2.1 mm $\times$ 1.7 μ m);流动相 A 为 100%甲醇;流动相 B 为 0.5%醋酸水溶液;流速为 0.10 mL/min;检测器波长为 280 nm,进样量为 2.0 μ L;流速为 0.1 mL/min。梯度洗脱条件为 15%A,0~8 min;15%~28%A,8~12 min;28%~55%A,16~24 min;55%~85%A,24~28 min;85%~15%A,32~33 min;15%A,33~35 min。

4) 体外抗氧化活性测定。DPPH 自由基清除能力(DPPH 值)参考 A. Szydlowska-Czerniak 等^[20]的方法进行测定。称取适量 DPPH 标准品溶于甲醇并稀释至 1 mmol/L。取 0.4 mL 甲醇水提取物,加入 0.26 mL 浓度为 1.0 mmol/L 的 DPPH-甲醇溶液,涡旋混匀,25 $^{\circ}$ C 避光孵育 30 min,在 517 nm 波长处测定吸光度。以甲醇为空白对照,将水溶性维生素 E 标准溶液质量浓度(X)与其对应 DPPH 值(Y)进行线性回归,得到方程 $Y=0.028\ 0X-0.049\ 1$, $R^2=0.994\ 5$ 。测定结果以水溶性维生素 E 当量(Trolox Equivalent,TE)表示,单位为 mg TE/g。

铁离子还原能力(FRAP 值)参考 A. Szydlowska-Czerniak 等^[20]的方法进行测定。取 0.02 mL 甲醇水提取物,加入 0.28 mL 温育后的 FRAP 工作液,37 $^{\circ}$ C 避光孵育 20 min 后,在 593 nm 处测定吸光度。将水溶性维生素 E 标准溶液质量浓度(X)与其对应 FRAP 值(Y)进行线性回归,得到方程 $Y=0.758\ 6X-0.112\ 2$, $R^2=0.997\ 1$ 。测定结果以水溶性维生素 E 当量(Trolox Equivalent,TE)表示,单位为 mg TE/g。

1.3.5 亚麻籽粉脂质氧化产物测定 称取 0.2 g 亚麻籽粉与 1 mL 正己烷混合,涡旋 5 min,1000 r/min 离心 5 min,取下层有机相用 N₂ 吹干,获得亚麻籽油。参考 R. Homma 等^[21]的方法,将该亚麻籽油与 2.8 mL 甲醇-丁醇溶液(V(甲醇):V(丁醇)=2 : 1)混合,加入 15 μ L 浓度为 3.94 mol/L 的硫氰酸铵溶液和 15 μ L 浓度为 0.072 mol/L 的 Fe²⁺ 溶液,涡旋混匀,室温孵育 20 min,在 510 nm 波长处测定吸光度。样品中初级氧化产物——脂质氢过氧化物(LPO)含量采用外标法定量,以过氧化氢异丙苯当量表示,单位为 μ mol/g。将该亚麻籽油与 2.0 mL 浓度为

0.145 mol/L 硫代巴比妥酸(TBA)溶液混合,沸水浴加热 15 min 后冷却,5000 r/min 离心 15 min,在 532 nm 波长处测定吸光度。样品中次级氧化产物——硫代巴比妥酸反应物质(TBARS)值采用外标法定量,以 1,1,3,3-四乙氧基丙烷当量表示,单位为 nmol/g。

1.4 数据统计分析

上述实验结果以(平均值±标准差)表示($n=3$)。采用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),利用 Duncan 多重比较检验评估各组之间差异,显著性水平设定为 $P<0.05$ 。使用 Origin 2021 软件作图,通过 Hiplot Pro 软件绘制聚类分析图。

2 结果与分析

2.1 市售亚麻籽粉基本信息分析

20 种市售亚麻籽粉基本信息见表 1。由表 1 可知,20 种市售亚麻籽粉中,6 种产自内蒙古,4 种产自安徽,2 种产自国外,其余样品产自河北、陕西、山东等。因此,亚麻籽粉的产地已从亚麻籽主产区辐射到其他地区^[22]。20 种亚麻籽粉均采用熟化工艺生产,同步实现了原料中抗营养因子去除、关键营养成分溶出、产品风味改善,以及贮藏过程中氧化稳定性增强等效果^[23]。其中,1[#]—4[#]亚麻籽粉采用微波熟制工艺,19[#]和 20[#]采用高温炒制工艺,剩余 15 种亚麻籽粉则采用低温烘焙工艺。值得注意的是,17[#]亚麻籽粉采用了熟化、脱脂及制药级蛋白粉车间打粉技术。因此,不同亚麻籽粉生产工艺均有所差异,但大多采用低温熟化和磨粉工艺,最大限度地保留了亚麻籽中的营养成分,减少了 α -亚麻酸的热氧化损失,并同时实现了亚麻籽中生氰糖苷、植酸等抗营养因子的有效消减。已有研究^[24-25]发现,与传统蒸煮、烘焙相比,微波处理能够同时启动生氰糖苷水解和氢氰酸挥发性溢出,对二者的脱除率高达 90%以上,因此在保证亚麻籽(粉)食用安全性方面具有极为显著的技术优势。

20 种亚麻籽粉的包装形式主要分为罐装和袋装两类,其中,8 种为罐装,包装规格不统一,规格范围为 160~500 g/罐;其余 12 种为袋装,包装规格较为统一,大多为 500 g/袋或 250 g/袋,分为避光、不

避光、抽真空等包装形式。其中,1[#]和 2[#]为真空袋装且避光,13[#]为脱氧防护锁鲜袋装且避光,18[#]采用吸氧器脱氧袋装但未避光,3[#]、4[#]、16[#]、17[#]和 19[#]采用食品级复合材质铝箔袋装且避光。20 种市售亚麻籽粉的保质期均在 6 个月及以上,其中 10[#]和 20[#]亚麻籽粉的保质期长达 18 个月。20 种市售亚麻籽粉的贮藏条件基本均标识为阴凉干燥处避光,其中 5[#]、4[#]、12[#]、13[#]和 19[#]标识为冷藏,9[#]标识为冷藏或冷冻。因此,尽管不同厂家亚麻籽粉产品所采用的包装形式有所不同,但多数包装以小规格、脱氧、避光和低温贮藏为主。

2.2 市售亚麻籽粉主要营养成分分析

20 种市售亚麻籽粉主要营养成分见表 2。由表 2 可知,20 种市售亚麻籽粉中水分含量为 1.95~7.13 g/100 g,其中 7[#]、8[#]、15[#]、18[#]和 20[#]亚麻籽粉中水分含量较大,为 5.69~7.13 g/100 g;1[#]、5[#]、9[#]、10[#]、13[#]、14[#]和 16[#]亚麻籽粉中水分含量较小,为 1.95~2.02 g/100 g。亚麻籽因较高的脂肪含量,被认为是一种低水分含量油籽。笔者前期研究^[22]发现,不同品种成熟亚麻籽的水分含量为 6.75%~9.09%,这主要归因于亚麻籽不同的品种、产地和收获成熟度。除了原料差异化的初始水分含量,亚麻籽粉加工过程中的熟化方式、温度、时间等参数也会进一步降低原料中的水分含量,并最终导致不同市售亚麻籽粉产品水分含量之间的差异性^[6]。亚麻籽粉的适度超低水分状态能够有效抑制包括脂氧合酶在内的脂质过氧化反应,且能够降低生育酚、酚酸等非酶类自由基清除剂的消耗,进而延缓贮藏过程中的品质劣变^[2]。

亚麻籽中碳水化合物主要为膳食纤维,包括外种皮黏多糖等可溶性膳食纤维及纤维素、半纤维素、木质素等不溶性纤维,仅含少量淀粉和可溶性糖。20 种市售亚麻籽粉中碳水化合物含量范围为 25.48~69.30 g/100 g,其中 7[#]、9[#]、10[#]、14[#]和 17[#]亚麻籽粉中碳水化合物含量较高,为 59.01~69.30 g/100 g,其中 9[#]亚麻籽粉中碳水化合物含量最高,为 69.30 g/100 g;2[#]、15[#]、18[#]和 19[#]亚麻籽粉中碳水化合物含量较低,为 25.48~29.93 g/100 g,2[#]亚麻籽粉中碳水化合物含量最低,为 25.48 g/100 g。

表 2 20 种市售亚麻籽粉主要营养成分
Table 2 Main nutritional ingredients of twenty commercially available flaxseed flours

编号	水分含量/ (g·(100 g) ⁻¹)	粗蛋白含量/ (g·(100 g) ⁻¹)	碳水化合物含量/ (g·(100 g) ⁻¹)	总脂质含量/ (g·(100 g) ⁻¹)	棕榈酸 含量/%	硬脂酸 含量/%	油酸 含量/%	亚油酸 含量/%	α-亚麻 酸含量/%
1 [#]	1.98±0.04 ^j	17.72±0.17 ^c	31.92±0.10 ⁱ	44.38±0.31 ^{ef}	6.66±0.01 ^{bc}	0.18±0.10 ^{ab}	17.33±0.13 ^k	12.89±0.25 ^m	55.65±0.48 ^c
2 [#]	2.70±0.19 ^h	19.46±0.07 ^b	25.48±0.13 ^k	48.36±0.28 ^a	5.70±0.01 ^{lj}	0.15±0.02 ^{abc}	24.26±0.01 ^d	17.92±0.02 ^j	52.11±0.01 ^{ce}
3 [#]	2.99±0.02 ^g	9.32±0.03 ^{hi}	39.24±0.02 ^f	44.45±0.31 ^{ef}	6.55±0.01 ^{cdefg}	0.13±0.01 ^{bc}	26.73±0.43 ^c	59.34±0.45 ^f	5.97±0.01 ^j
4 [#]	3.76±0.04 ^f	13.25±0.03 ^e	35.42±0.03 ^g	43.56±0.67 ^{fg}	6.36±0.02 ^{fgh}	0.19±0.01 ^{ab}	23.09±0.38 ^e	64.99±0.32 ^e	5.54±0.03 ^{jk}
5 [#]	2.02±0.11 ^j	15.59±0.04 ^d	41.33±0.07 ^e	37.06±0.39 ⁱ	6.63±0.01 ^{bcd}	0.22±0.06 ^{ab}	20.05±0.04 ^{ghi}	67.86±0.07 ^{cd}	5.44±0.01 ^{jk}
6 [#]	2.48±0.04 ⁱ	10.22±0.08 ^{gh}	36.82±0.06 ^{fg}	46.48±0.50 ^{bc}	6.57±0.09 ^{cdef}	0.20±0.12 ^{ab}	19.05±1.41 ^j	69.03±1.23 ^a	5.34±0.07 ^{jk}
7 [#]	5.69±0.09 ^d	7.99±0.01 ⁱ	63.22±0.05 ^b	19.10±0.40 ^k	6.54±0.01 ^{cdefg}	0.21±0.09 ^{ab}	20.83±0.01 ^{fg}	67.10±0.01 ^d	5.51±0.01 ^{jk}
8 [#]	5.89±0.07 ^c	8.33±0.06 ⁱ	33.27±0.06 ^h	48.52±0.48 ^a	6.62±0.05 ^{bcd}	0.25±0.14 ^{ab}	19.62±0.73 ^{hij}	68.43±0.62 ^{abc}	5.31±0.05 ^{jk}
9 [#]	1.95±0.01 ^j	12.20±0.04 ^{ef}	69.30±0.03 ^a	12.55±0.60 ⁿ	6.35±0.01 ^{gh}	0.14±0.03 ^{abc}	19.16±0.01 ^{ij}	68.65±0.01 ^{ab}	5.82±0.01 ^{jk}
10 [#]	1.99±0.07 ^j	12.18±0.06 ^{ef}	64.09±0.06 ^b	17.73±0.40 ^l	6.59±0.01 ^{cde}	0.18±0.05 ^{ab}	19.94±0.01 ^{ghij}	68.09±0.01 ^{bc}	5.36±0.01 ^{jk}
11 [#]	2.73±0.05 ^h	9.65±0.06 ^{hi}	38.06±0.05 ^{fg}	45.56±0.21 ^{cd}	6.98±0.01 ^a	0.15±0.01 ^{abc}	28.81±0.08 ^a	54.92±0.02 ^g	8.00±0.01 ⁱ
12 [#]	2.96±0.06 ^g	11.17±0.04 ^{fg}	37.00±0.05 ^{fg}	44.86±0.53 ^{de}	6.40±0.02 ^{efgh}	0.28±0.09 ^a	20.93±0.14 ^f	67.22±0.10 ^d	5.44±0.01 ^{jk}
13 [#]	1.97±0.06 ^j	8.97±0.02 ^{hi}	41.88±0.04 ^c	43.17±0.50 ^g	6.27±0.05 ^{hi}	0.15±0.01 ^{abc}	17.61±0.86 ^k	49.26±0.52 ⁱ	26.84±0.28 ^g
14 [#]	2.00±0.03 ^j	11.92±0.05 ^{fg}	59.01±0.04 ^c	23.07±0.72 ^j	6.11±0.01 ^b	0.18±0.05 ^{ab}	19.99±0.01 ^{shi}	51.39±0.01 ^h	22.49±0.01 ^h
15 [#]	6.50±0.01 ^b	15.15±0.04 ^d	25.66±0.03 ^k	48.68±0.32 ^a	4.73±0.01 ^k	0.20±0.04 ^{ab}	27.67±0.01 ^b	16.49±0.01 ^k	51.09±0.01 ^f
16 [#]	2.02±0.11 ^j	12.43±0.04 ^{ef}	40.95±0.07 ^e	40.59±0.29 ^h	5.99±0.42 ⁱ	0.21±0.01 ^{ab}	24.24±0.41 ^d	25.83±0.53 ^l	21.92±1.37 ^d
17 [#]	4.48±0.03 ^e	20.80±0.05 ^a	59.61±0.04 ^c	11.10±0.35 ^o	6.82±0.21 ^{ab}	0.01±0.01 ^c	23.30±0.59 ^e	15.18±0.08 ^l	54.68±0.29 ^d
18 [#]	6.97±0.04 ^a	17.60±0.08 ^c	25.75±0.06 ^k	45.68±0.33 ^{cd}	5.74±0.06 ^j	0.29±0.01 ^a	17.57±0.29 ^k	16.68±0.40 ^k	59.99±0.64 ^a
19 [#]	2.75±0.10 ^h	16.56±0.03 ^{cd}	29.93±0.06 ^j	46.76±0.14 ^{bc}	6.54±0.04 ^{cdefg}	0.22±0.01 ^{ab}	19.85±0.54 ^{hij}	68.32±0.46 ^{abc}	5.28±0.03 ^k
20 [#]	7.13±0.16 ^a	22.10±0.07 ^a	51.58±0.11 ^d	15.19±0.41 ^m	6.33±0.49 ^{defgh}	0.21±0.08 ^{ab}	20.31±0.46 ^{fgh}	14.94±0.24 ^l	58.31±0.24 ^b

注:同列数据后不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$);碳水化合物含量数据采用差减法获取。

亚麻籽蛋白主要由高分子质量的盐溶性球蛋白(11S,70%~85%)和低分子质量的水溶性清蛋白(2S,15%~30%)组成。20 种市售亚麻籽粉中粗蛋白含量为 7.99~22.10 g/100 g,其中 1[#]、2[#]、5[#]、15[#]和 17[#]—20[#] 亚麻籽粉中粗蛋白含量相对较高,为 15.15~22.10 g/100 g;3[#]、7[#]、8[#]、11[#]和 13[#]亚麻籽粉中粗蛋白含量较低,为 7.99~9.65 g/100 g,明显低于笔者前期针对不同品种亚麻籽测定的粗蛋白含量(25.95~34.27 g/100 g)^[22]。20 种市售亚麻籽粉未表现出明显的区域特异性。值得注意的是,17[#]亚麻籽粉采用脱脂工艺制得,粗蛋白含量较高,而 7[#]亚麻籽粉采用四次研磨和独特滤渣技术,粗蛋白含量最低。除了亚麻籽的品种和产地,亚麻籽粉加工过程中的脱脂工艺也能明显影响产品中粗蛋白含量。

亚麻籽脂质主要分布于种仁胚子叶细胞内,以预乳化油脂体形式存在,外种皮中脂质仅占 15%。20 种市售亚麻籽粉中总脂质含量为 11.10~48.68 g/100 g,表现出明显的产品间差异性。其中

1[#]—4[#]、6[#]、8[#]、11[#]—13[#]、15[#]、18[#]和 19[#] 亚麻籽粉中总脂质含量较高,为 43.17~48.68 g/100 g;9[#]、10[#]、17[#]和 20[#] 亚麻籽粉中总脂质含量较低,为 11.10~17.73 g/100 g。值得注意的是,17[#]亚麻籽粉为脱脂粉,总脂质含量最低。通过上述数据分析和市场调查可知,目前大部分市售亚麻籽粉由全籽制得,少部分市售亚麻籽粉可能选择“干法脱胶”、“轻压榨”制得,仅个别市售亚麻籽粉采用脱脂粕制得。笔者前期研究^[22]发现,不同品种亚麻籽中总脂质含量范围为 33.93~44.71 g/100 g,是一种典型的高含油作物。因此,除了亚麻籽的品种、产地等因素,亚麻籽粉加工过程中的脱皮、脱脂、筛分等关键操作单元均会影响产品中总脂质含量。20 种市售亚麻籽粉中棕榈酸含量为 4.73%~6.98%,硬脂酸含量为 0.01%~0.29%,油酸含量为 17.33%~28.81%,亚油酸含量为 12.89%~69.03%,α-亚麻酸含量为 5.28%~59.99%(以油计)。这明显不同于笔者前期针对国内主栽品种亚麻籽主要脂肪酸组成的研究,其中 α-亚麻酸含量为 33.42%~59.74%(以油

计)^[26]。此外,1[#]、2[#]、15[#]、17[#]、18[#]和20[#]亚麻籽粉中 α -亚麻酸含量较高,为51.09%~59.99%;3[#]—8[#]、10[#]—12[#]、19[#]亚麻籽粉中 α -亚麻酸含量较低,为5.28%~5.97%。亚麻籽粉中脂肪酸组成的差异主要与品种、产地等因素有关,而熟化工艺对亚麻籽粉中脂肪酸组成的影响较小^[11,26]。其中品种、产地差异主要源于脂肪酸去饱和酶(FAD₂和FAD₃)与温度、光照等环境因子的交互作用,对 α -亚麻酸合成与累积形成差异化调控。值得注意的是,*LuFAD3A*和*LuFAD3B*是控制亚麻籽中亚麻酸含量的主要基因,二者均携带的导致蛋白编码区改变的点突变是导致Solin亚麻品种低 α -亚麻酸含量的主要原因^[27]。低 α -亚麻酸含量的亚麻籽品种主要分布于加拿大、美国等亚麻主产国,近年来在中国亦有推广种植。综上可知,为了能够降低亚麻籽粉脂质过氧化水平,延缓贮藏期间的品质劣变,低 α -亚麻酸含量品种成为制备亚麻籽粉的主要原料。

2.3 市售亚麻籽粉非极性脂质伴随物含量分析

20种市售亚麻籽粉中非极性脂质伴随物含量如图1所示,其中MV为微波熟制, LB为低温烘焙, HS为高温炒制,下同。由图1a)可知,20种市售亚麻籽粉中总生育酚含量为31.18~267.10 mg/100 g, γ -生育酚含量为6.57~178.96 mg/100 g, β -生育酚含量为24.61~88.14 mg/100 g。其中1[#]、2[#]、4[#]、16[#]和18[#]亚麻籽粉中总生育酚含量较高,为192.40~267.10 mg/100 g,而5[#]、9[#]、10[#]和17[#]亚麻籽粉中总生育酚含量较低,为31.18~51.81 mg/100 g。值得注意的是,9[#]、10[#]和17[#]亚麻籽粉中总脂质含量均低于20.00 g/100 g,且17[#]为脱脂亚麻籽粉,总脂质含量仅为11.10 g/100 g,总生育酚含量较低。生育酚主要位于油籽油脂体内膜磷脂单分子层或膜内中性脂质基质中,能有效抑制多不饱和脂肪酸氧化。微波、烘焙等熟化处理能够诱导油脂体界面膜塌陷及膜内中性脂质溢出,进而改变生育酚在塌陷油脂体与中性脂质之间的分布规律,但不影响亚麻籽粉中总生育酚含量。相较而言,亚麻籽品种、产地及脱脂程度是影响亚麻籽粉产品中总生育酚含量的关键因素^[28-29]。

由图1b)可知,20种市售亚麻籽粉中总植物甾醇

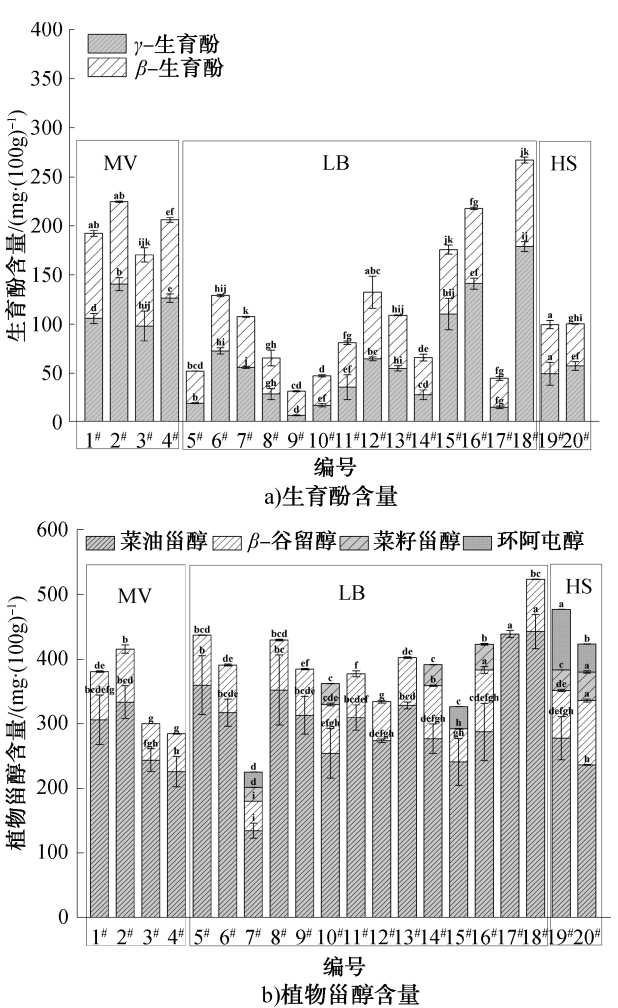


图1 20种市售亚麻籽粉中非极性脂质伴随物含量
Fig. 1 Contents of non-polar lipid concomitants of twenty commercially available flaxseed flours

醇含量为225.41~523.99 mg/100 g,主要为菜油甾醇和 β -谷甾醇,其次为菜籽甾醇、环阿屯醇,占比分别为58.24%~100.00%、0~26.14%、0~11.57%和0~19.63%。其中2[#]、5[#]、8[#]、16[#]—19[#]亚麻籽粉中总植物甾醇含量较高,为415.97~523.99 mg/100 g;3[#]、4[#]和7[#]亚麻籽粉中总植物甾醇含量较低,为225.41~300.51 mg/100 g。值得注意的是,18[#]亚麻籽粉中总植物甾醇含量最高,为523.99 mg/100 g,菜油甾醇占比达84.55%。仅有7[#]、10[#]、14[#]、16[#]、19[#]和20[#]亚麻籽粉中检出菜籽甾醇,含量为21.41~44.12 mg/100 g;7[#]、15[#]、19[#]和20[#]亚麻籽粉中检出环阿屯醇,含量为23.59~93.74 mg/100 g。已有研究^[30]表明,加热会降低油脂中植物甾醇含量:当加热温度较低时,植物甾醇相对稳定;随着加热温度升高,植物甾醇含量会显著下降。然而,油籽中植

物甾醇含量主要受遗传背景和生态环境协同调控,二者通过调控甲羟戊酸途径关键限速酶—甲基戊二酰辅酶 A(HMG-CoA)还原酶的基因表达水平,并与温度、光照、水分等环境因子交互作用,最终实现植物甾醇差异化合成与累积^[29]。

2.4 市售亚麻籽粉极性脂质伴随物含量分析

20 种市售亚麻籽粉中极性脂质伴随物含量如图 2 所示。由图 2a)可知,20 种市售亚麻籽粉中总酚含量为 9.56~94.09 mg GAE/100 g,黄酮含量为 1.27~3.35 mg RE/100 g。其中 3[#]、5[#]、6[#]、12[#]和 17[#]亚麻籽粉中总酚含量较高,为 46.67~94.09 mg GAE/100 g,而 7[#]—10[#]和 16[#]亚麻籽粉中总酚含量较低,为 9.56~24.51 mg GAE/100 g。此外,5[#]、6[#]、10[#]、11[#]和 14[#]—17[#]亚麻籽粉中黄酮含量较高,为 2.03~3.35 mg RE/100 g,而 4[#]、7[#]、8[#]、12[#]、13[#]和 20[#]亚麻籽粉中黄酮含量较低,为 1.27~1.69 mg RE/100 g。由图 2b)可知,20 种市售亚麻籽粉中木酚素含量存在明显差异,为 3.91~42.56 mg/g。其中 8[#]、9[#]、11[#]和 17[#]亚麻籽粉中木酚素含量较高,为 20.52~42.56 mg/g,而 7[#]、15[#]、16[#]、18[#]和 20[#]亚麻籽粉中木酚素含量较低,为 3.91~6.20 mg/g。此外,黄色亚麻籽粉中总酚、黄酮含量均较低,产自内蒙古、陕西、美国和新西兰的亚麻籽粉中总酚含量均较高,产自安徽的亚麻籽粉中总酚含量较低,仍待进一步搜集样品以证实不同品种、产地对亚麻籽粉总酚、黄酮和木酚素含量的影响规律。

除了受遗传背景和生态环境的影响,脱脂程度等也能够显著影响亚麻籽粉中总酚、黄酮和木酚素含量^[22,31-32]。其中,17[#]亚麻籽粉由脱脂亚麻籽制得,其总酚、黄酮和木酚素含量远高于其他样品,这主要归因于脱脂过程增加了极性脂质伴随物在饼粕中的驻留时间,且制药级蛋白打粉工艺可最大限度地破坏亚麻籽细胞结构完整性,促进提取过程中酚类化合物的溶出释放效率。值得注意的是,亚麻籽中主要酚类化合物——木酚素存在于外种皮骨片层细胞壁中,游离态酚酸则主要富集在籽仁中胚子叶细胞内蛋白体或油脂体膜上^[33-35]。微波、烘烤、蒸汽爆破等预处理均能破坏亚麻籽外种皮多层细胞结构,诱导油脂体膜原位塌陷和蛋白体结构变

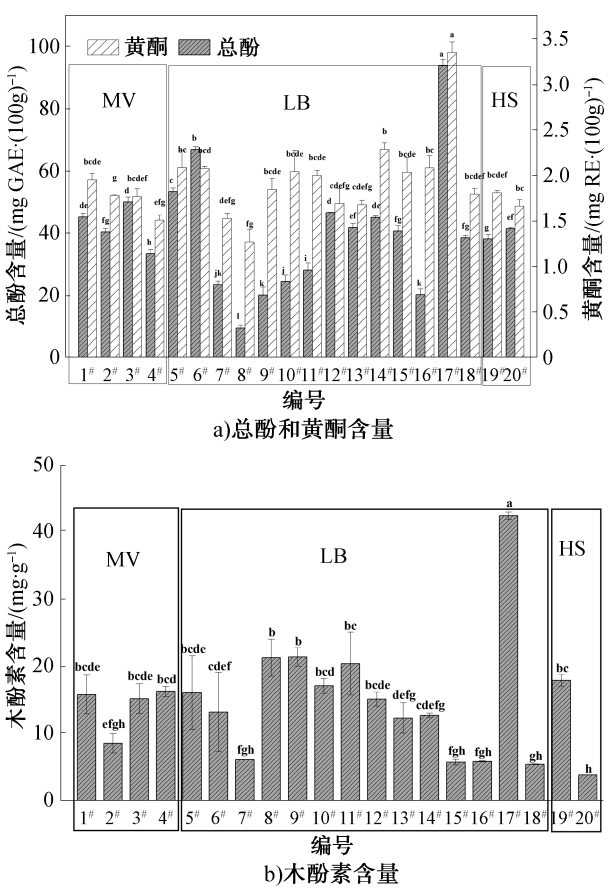


图 2 20 种市售亚麻籽粉中极性脂质伴随物含量
Fig. 2 Contents of polar lipid concomitant of twenty commercially available flaxseed flours

性,促进木酚素、酚酸的溶出和释放,但过度熟化处理也会导致酚类化合物,尤其是游离态酚酸的氧化消耗^[9,11,19]。

2.5 市售亚麻籽粉体外抗氧化活性和脂质过氧化水平分析

20 种市售亚麻籽粉体外抗氧化活性和脂质过氧化水平如图 3 所示。由图 3a)可知,20 种市售亚麻籽粉的 DPPH 值为 16.23~43.26 mg TE/g,FRAP 值为 1.15~3.17 mg TE/g。其中 1[#]、3[#]、5[#]、6[#]、11[#]和 14[#]亚麻籽粉的 DPPH 值较高,为 41.43~43.26 mg TE/g;4[#]、7[#]、8[#]和 10[#]亚麻籽粉的 DPPH 值较低,为 16.23~24.09 mg TE/g。此外,1[#]—3[#]、12[#]和 17[#]亚麻籽粉的 FRAP 值较高,为 2.09~3.17 mg TE/g,其中 17[#]亚麻籽粉的 FRAP 值远高于其他样品。总体而言,亚麻籽粉的体外抗氧化活性与总酚、黄酮含量呈正相关关系。除了遗传背景和生态环境的影响,烘焙、微波等熟化处理能够通过影响亚麻籽中

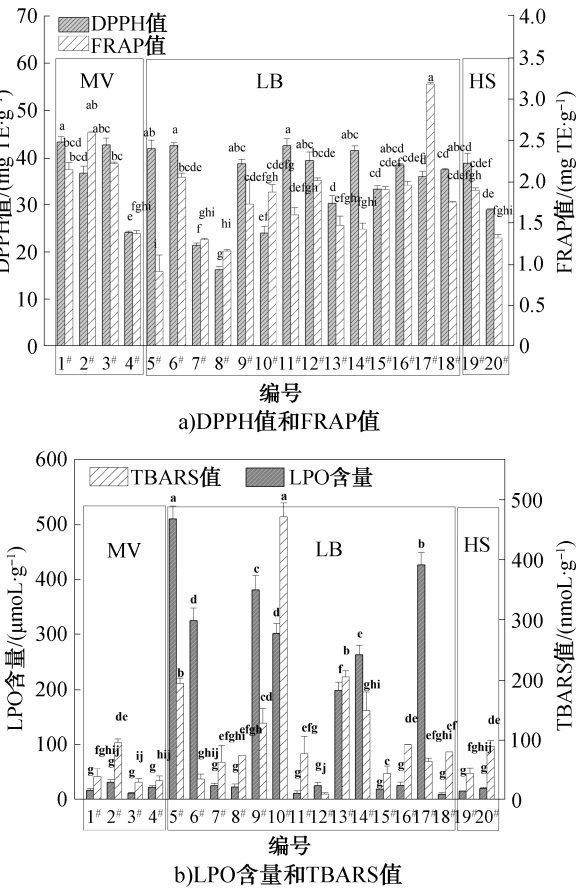


图3 20种市售亚麻籽粉体外抗氧化活性和脂质过氧化水平

Fig. 3 *In vitro* antioxidant activities and lipid oxidation levels of twenty commercially available flaxseed flours

酚类化合物的赋存形态,即变构增效,使总酚、黄酮含量与体外抗氧化活性之间的关系更加复杂化^[11]。

由图3b)可知,20种市售亚麻籽粉的脂质过氧化水平差异明显,LPO含量为10.23~510.38 $\mu\text{mol/g}$,TBARS值为9.80~471.28 nmol/g 。其中5[#]、6[#]、9[#]、10[#]、13[#]、14[#]和17[#]亚麻籽粉中LPO含量较高,为198.71~510.38 $\mu\text{mol/g}$,而其他13种亚麻籽粉中LPO含量均低于32.09 $\mu\text{mol/g}$ 。与其他油籽不同,亚麻籽外种皮具有多层细胞结构且覆有致密胶质层,能够有效阻隔外界氧气,而脂代谢酶类介导的多不饱和脂肪酸的脂质过氧化可能是启动亚麻籽贮藏过程中品质劣变的主要驱动因素^[3,35]。对于不同熟化方式,微波、烘焙等处理的时间和温度会显著影响亚麻籽粉的氧化产物累积量,但受多重因素制约,工艺参数对氧化水平的调控效果存在不确定性。笔者前期研究^[25]发现,适宜水分调质和微波处

理能够降低熟化亚麻籽中脂质过氧化产物含量,但总脂质、 α -亚麻酸含量及初始氧化水平等均能够影响熟化过程中亚麻籽的氧化易感性。此外,磨粉处理能够破坏亚麻籽细胞结构完整性,增大不饱和脂肪酸与氧气的接触面积,加速脂质过氧化进程;同时,磨粉处理也会改变生育酚、酚酸等抗氧化成分在亚麻籽中的赋存位点,有利于其在塌陷油脂体释放的中性脂质中驻留,降低亚麻籽粉中多不饱和脂肪酸的氧化速率^[36]。

2.6 市售亚麻籽粉多变量分析

将20种市售亚麻籽粉的主要营养成分、极性和非极性脂质伴随物、体外抗氧化活性、脂质过氧化水平进行主成分(PCA)分析,计算主成分的贡献率和累积贡献率。20种市售亚麻籽粉的PCA分析和聚类分析结果如图4所示,其中S1为陕西,A为安徽,N为内蒙古,H为河北,S2为山东,W为美国、新西兰,D为东北,Y为黄色亚麻籽,B为褐色亚麻籽。由图4a)可知,第一主成分(PC1)、第二主成分(PC2)和第三主成分(PC3)的累积贡献率为67.7%,其中PC1的贡献率为30.7%,主要由粗蛋白、总酚、黄酮、木酚素、LPO、生育酚、植物甾醇和碳水化合物含量,以及体外抗氧化活性决定;PC2的贡献率为21.8%,主要由总脂质含量决定;PC3的贡献率为15.2%,主要由水分、 α -亚麻酸含量及TBARS值决定。20种市售亚麻籽粉的数据点表现出明显分散性,表明亚麻籽粉在主要营养成分、极性和非极性脂质伴随物、体外抗氧化活性、脂质过氧化水平等品质属性上存在较大差异,这可能由原料品种、产地及熟化方式不同所致。

由图4b)可知,根据水分、粗蛋白、总脂质、 α -亚麻酸、总酚、黄酮、木酚素、植物甾醇和生育酚含量,以及体外抗氧化活性、脂质过氧化水平将20种市售亚麻籽粉分为三大类。第一类亚麻籽粉具有高水分和粗蛋白含量,低体外抗氧化活性,低总酚、黄酮、木酚素、植物甾醇和 α -亚麻酸含量,包括7[#]、8[#]、15[#]、17[#]、18[#]和20[#]亚麻籽粉;第二类亚麻籽粉具有低水分含量,高总脂质、植物甾醇和 α -亚麻酸含量,包括1[#]、4[#]、13[#]和19[#]亚麻籽粉;第三类亚麻籽粉具有低水分、粗蛋白和生育酚含量,高体外抗氧化活

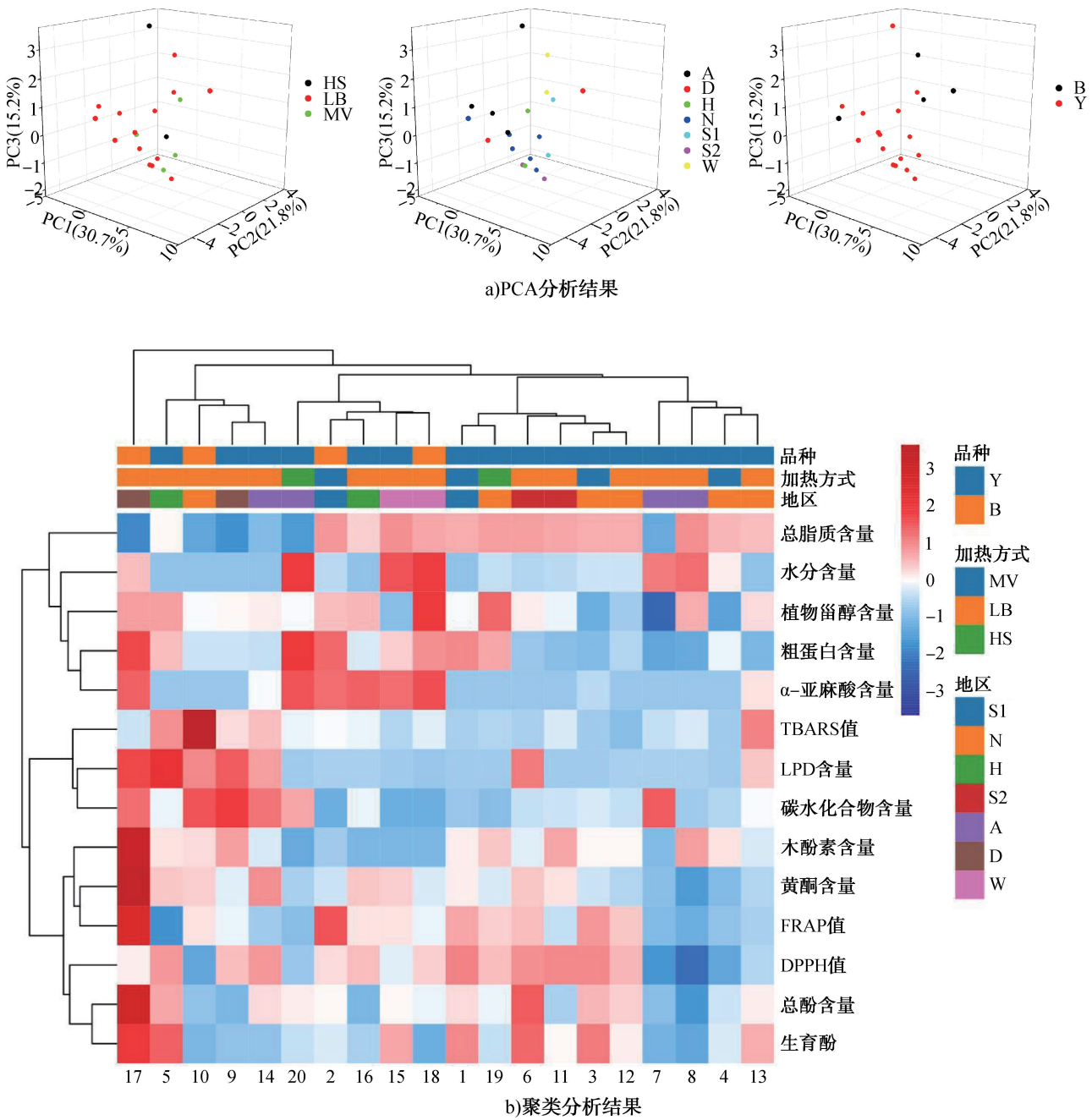


图 4 20 种市售亚麻籽粉的 PCA 分析和聚类分析结果

Fig. 4 PCA analysis and cluster analysis results of twenty kinds of commercially available flaxseed flours

性,高总酚、黄酮、木酚素、植物甾醇和 α -亚麻酸含量,包括 2[#]、3[#]、5[#]、6[#]、9[#]、10[#]—12[#]、14[#]和 16[#]亚麻籽粉;17[#]亚麻籽粉由脱脂粕制得,水分、植物甾醇、总酚、黄酮和木酚素含量,以及体外抗氧化活性均较高,而总脂质、 α -亚麻酸和生育酚含量均较低。就品种而言,黄色亚麻籽粉具有较高的植物甾醇、 α -亚麻酸含量及 FRAP 值;除了脱脂产品,其余黄色亚麻籽粉的总酚、黄酮含量及脂质过氧化水平均较低;在原料品种和产地属性一致的前提下,采用

微波熟制工艺的亚麻籽粉中总酚、黄酮、植物甾醇和木酚素含量,以及体外抗氧化活性均较高,而脂质过氧化水平均较低。遗传背景和生态环境的互动优化是提升亚麻籽粉营养品质的主要策略,而适宜微波熟化和低温梯度磨粉工艺能够促进多不饱和脂肪酸与极性抗氧化成分接触,缓解贮藏过程中“去区室化”效应诱导的非酶活性氧化与酶促脂质过氧化,降低亚麻籽粉品质劣变速率。

4 结论

本研究比较了 20 种市售亚麻籽粉的基本信息、主要营养成分、极性和非极性脂质伴随物含量、体外抗氧化活性、脂质过氧化水平等,借助多变量分析系统梳理了这些亚麻籽粉的营养品质,得出以下结论:20 种市售亚麻籽粉主要来自内蒙古、安徽等原料主产区,且主要以黄色亚麻籽为原料;包装形式以袋装和罐装为主,保质期标识为 6~18 个月,主要采用低温烘焙、微波熟制等熟化工艺,部分产品采用脱脂亚麻籽为原料。20 种市售亚麻籽粉中粗蛋白、总脂质、 α -亚麻酸、生育酚、植物甾醇、总酚、黄酮和木酚素含量,以及体外抗氧化活性、脂质过氧化水平均表现出明显差异性,这主要归因于差异化的原料品种和产地,以及熟化和磨粉处理工艺。PCA 分析和聚类分析表明,在原料品种和产地一致的前提下,微波熟制工艺能够促进亚麻籽粉中极性和非极性脂质伴随物溶出释放,提升其体外抗氧化活性,降低脂质过氧化产物水平,有利于亚麻籽粉高值化加工。本研究可为依托市售亚麻籽粉营养品质构建亚麻籽粉品质控制方案与标准体系提供数据支撑,同时为后续采用干法脱胶、微波熟化、低温轻压榨、梯度磨粉等工艺改良亚麻籽粉营养与感官品质提供理论依据与技术参考。

参考文献:

[1] 邹仙果,关晓倩,郑森,等. 亚麻籽主要功能成分及其生物活性研究进展[J]. 食品与发酵工业,2024,50(3):366-373.
ZOU X G, GUAN X Q, ZHENG M, et al. Research progress on main functional components and biological activity of *Linum usitatissimum* L[J]. Food and Fermentation Industries,2024,50(3):366-373.

[2] 禹晓,孙好嵩,乔好,等. 不同品种亚麻籽物性学特性、脂代谢关键酶活性和抗营养因子分析[J]. 中国油料作物学报,2025,47(6):1533-1543.
YU X,SUN H H,QIAO H,et al. Physical properties,anti-nutritional factors, and key enzyme activities related to lipid metabolism of different flaxseed varieties [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2025,47(6):1533-1543.

[3] ZHANG S, CHEN Y S, MCCLEMENTS D J, et al.

Composition, processing, and quality control of whole flaxseed products used to fortify foods[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,2023,22(1):587-614.

[4] KAUSER S, HUSSAIN A, ASHRAF S, et al. Flaxseed (*Linum usitatissimum*); phytochemistry, pharmacological characteristics and functional food applications[J]. Food Chemistry Advances,2024,4:100573.

[5] MUEED A, SHIBLI S, JAHANGIR M, et al. A comprehensive review of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.): health-affecting compounds, mechanism of toxicity, detoxification, anticancer and potential risk [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition,2023,63(32):11081-11104.

[6] 韩国玮,吕虹霞,田欢,等. 焙烤和微波两种不同加工方式对亚麻籽品质的影响比较分析[J]. 中国调味品,2024,49(5):71-75.
HAN G W, LYU H X, TIAN H, et al. Comparative analysis of effects of two different processing methods roasting and microwave on quality of flaxseed[J]. China Condiment,2024,49(5):71-75.

[7] 禹晓,黄沙沙,聂成镇,等. 亚麻籽酚类化合物抗氧化和油相迁移特性研究进展[J]. 中国油料作物学报,2019,41(4):643-649.
YU X,HUANG S S,NIE C Z,et al. Research progress on antioxidant potential and migration characteristics into oil phase for flaxseed phenolic compounds [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2019,41(4):643-649.

[8] OOMAH B D, SITTER L. Characteristics of flaxseed hull oil[J]. Food Chemistry,2009,114(2):623-628.

[9] YU X,NIE C Z,ZHAO P,et al. Influences of microwave exposure to flaxseed on the physicochemical stability of oil bodies; implication of interface remodeling [J]. Food Chemistry,2022,368:130802.

[10] MALCOLMSON L J, PRZYBYLSKI R, DAUN J K. Storage stability of milled flaxseed[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society,2000,77(3):235-238.

[11] 秦晓鹏,黄沙沙,聂成镇,等. 微波处理对萌动亚麻籽酚类化合物油相迁移的影响[J]. 食品科学技术学报,2022,40(3):124-136.
QIN X P, HUANG S S, NIE C Z, et al. Effect of microwave treatment on oil phase migration of phenolic compounds in germinated flaxseed[J]. Journal of Food Science and Technology,2022,40(3):124-136.

[12] GB 5009.5—2025 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S].
GB 5009.5—2025 Determination of protein in national food safety standards[S].

[13] GB 5009.6—2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S].
GB 5009.6—2016 Determination of fat in food safety

· 12 ·

轻工学报® 2026 年 8 月 第 41 卷 第 4 期

national standard food[S].

[14] GB 5009.3—2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S].

GB 5009.3—2016 Determination of moisture in food according to national food safety standards[S].

[15] DENG Q C, YU X, MA F L, et al. Comparative analysis of the *in-vitro* antioxidant activity and bioactive compounds of flaxseed in China according to variety and geographical origin[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup3): S2708–S2722.

[16] CONG Y X, ZHENG M M, HUANG F H, et al. Sinapic acid derivatives in microwave-pretreated rapeseeds and minor components in oils[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2020, 87: 103394.

[17] 于坤, 禹晓, 程晨, 等. 制油工艺对亚麻籽油品质及脂质伴随物含量的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 233–243.

YU K, YU X, CHENG C, et al. Effects of processing techniques on the quality properties and lipid concomitants of flaxseed oil [J]. Food Science, 2020, 41 (16): 233–243.

[18] YU X, HUANG S S, NIE C Z, et al. Effects of atmospheric pressure plasma jet on the physicochemical, functional, and antioxidant properties of flaxseed protein[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(7): 2010–2019.

[19] CHENG C, WANG L, YU X, et al. Structural identification and antioxidative activity evaluation of flaxseed lignan macromolecules: structure-activity correlation [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(6): 3224–3235.

[20] SZYDŁOWSKA-CZERNIAK A, DIANOCZKI C, RECSEG K, et al. Determination of antioxidant capacities of vegetable oils by ferric-ion spectrophotometric methods [J]. Talanta, 2008, 76(4): 899–905.

[21] HOMMA R, SUZUKI K, CUI L Q, et al. Impact of association colloids on lipid oxidation in triacylglycerols and fatty acid ethyl esters[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(46): 10161–10169.

[22] 禹晓, 黄沙沙, 程晨, 等. 不同品种亚麻籽组成及抗氧化特性分析[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(6): 879–888.

YU X, HUANG S S, CHENG C, et al. Composition and antioxidant characteristics of different flaxseed cultivars [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(6): 879–888.

[23] 王楠, 韩建征, 马燕, 等. 熟化方式及储存条件对亚麻籽粉氧化稳定性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(16): 242–249.

WANG N, HAN J Z, MA Y, et al. Effects of curing method and storage condition on oxidation stability of flaxseed powder[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14 (16): 242–249.

[24] 曹伟伟, 黄庆德, 田光晶, 等. 微波预处理亚麻籽对其压榨饼生氰糖苷含量及压榨油品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(9): 134–138.

CAO W W, HUANG Q D, TIAN G J, et al. Effects of microwave pretreatment on the content of cyanogenic glucosides in pressed flaxseed cakes and the quality of pressed oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(9): 134–138.

[25] QIN X P, YANG F, SUN H H, et al. The physicochemical stability and *in vivo* gastrointestinal digestion of flaxseed milk: implication of microwave on flaxseed [J]. Food Chemistry, 2023, 424: 136362.

[26] 王丽艳, 王鑫淼, 荆瑞勇, 等. 不同品种亚麻籽营养成分分析与品质综合评价[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 26–32.

WANG L Y, WANG X M, JING R Y, et al. Comprehensive quality evaluation and analysis of nutrition components of various flaxseed[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 26–32.

[27] THAMBUGALA D, RAGUPATHY R, CLOUTIER S. Structural organization of fatty acid desaturase loci in linseed lines with contrasting linolenic acid contents[J]. Functional & Integrative Genomics, 2016, 16 (4): 429–439.

[28] OBRANOVIĆ M, ŠKEVIN D, KRALJIĆ K, et al. Influence of climate, variety and production process on tocopherols, plastochromanol-8 and pigments in flaxseed oil[J]. Food Technology and Biotechnology, 2015, 53(4): 496–504.

[29] 王广婕, 赵焕宇, 苏成成, 等. 油脂体的组成、结构及氧化稳定性研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 293–302.

WANG G J, ZHAO H Y, SU C C, et al. Research progress on composition, structure and oxidative stability of oil bodies[J]. Food Science, 2023, 44(21): 293–302.

[30] 马艳芳, 朱志鑫, 梁梓豪, 等. 加热对花生油中植物甾醇含量影响研究[J]. 食品与营养科学, 2018, 7(2): 137–144.

MA Y F, ZHU Z X, LIANG Z H, et al. Effect of heating on phytosterol content in peanut oil[J]. Hans Journal of Food and Nutrition Science, 2018, 7(2): 137–144.

[31] CHENG L, LIU X Y, MA Y, et al. Effects of different processing methods on phenolic compounds in flaxseed meal[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101934.

[32] HUANG X Q, WANG N, MA Y, et al. Flaxseed polyphenols: effects of varieties on its composition and antioxidant capacity [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101597.

[33] HERCHI W, ARRÁEZ-ROMÁN D, TRABELSI H, et al. Phenolic compounds in flaxseed: a review of their properties and analytical methods. An overview of the last decade[J]. Journal of Oleo Science, 2014, 63(1): 7–14.

[34] TSE T J, GUO Y J, SHIM Y Y, et al. Availability of bioactive flax lignan from foods and supplements [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63 (29) : 9843–9858.

[35] 赵冉, 岳杨, 陈亚淑, 等. 亚麻籽乳制备过程中内源酶与关键香气的变化规律 [J]. 农业工程学报, 2025, 41 (8) : 318–326.

ZHAO R, YUE Y, CHEN Y S, et al. Changes of endogenous enzymes and key aromas in the preparation of flaxseed milk [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41 (8) : 318–326.

[36] MANDALARI G, GERVASI T, ROSENBERG D W, et al. Effect of nuts on gastrointestinal health [J]. Nutrients, 2023, 15 (7) : 1733.

Analysis of the nutritional quality of commercially available flaxseed flours

YU Xiao¹, LI Sheng¹, ZHANG Chen¹, YANG Fan¹, LI Chuyu¹, CHEN Yashu², DENG Qianchun², ZHU Yingying¹

1. College of Food and Bioengineering/Key Laboratory of Cold Chain Food Processing and Safety Control, Ministry of Education, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China

Abstract: [Objective] Determined to explore the influence of variety, origin, processing method on the nutritional quality of commercially available flaxseed flours. **[Methods]** The basic information, main nutritional components, content of polar and non-polar lipid concomitants, *in vitro* antioxidant activities and lipid peroxidation levels of commercially available flaxseed flours were analyzed. Combined with multivariate analysis, the nutritional quality and inter-product variations were systematically evaluated. **[Results]** Twenty kinds of commercially available flaxseed flours were mainly from Inner Mongolia, Anhui and other main raw material producing areas. The raw material varieties are mostly yellow flaxseed, which are produced by ripening process. The packaging is mainly small size, deoxidization, dark and low temperature storage. There were significant differences in main nutritional components and specific lipid concomitants among twenty commercially available flaxseed flours. In which, the contents of crude proteins, total lipids, α -linolenic acid, tocopherols, phytosterols, total phenolic acids, flavonoids and lignans were in the range of 7.99 ~ 22.10 g/100 g, 11.10 ~ 48.68 g/100 g, 5.28% ~ 59.99% (in oil), 31.18 ~ 267.10 mg/100 g, 225.41 ~ 523.99 mg/100 g, 9.56 ~ 94.09 mg GAE/100 g, 1.27 ~ 3.35 mg RE/100 g and 3.91 ~ 42.56 mg/g, respectively. Moreover, the *in vitro* antioxidant activities and lipid peroxidation levels of these flaxseed flours also manifested obvious difference, with the values of 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl free radical (DPPH), ferric reducing antioxidant power (FRAP), hydrogen peroxide (LPO) and thiobarbiturate reactive substances (TBARS) for these flaxseed flours varied from 16.23 ~ 43.26 mg TE/g, 1.15 ~ 3.17 mg TE/g, 10.23 ~ 510.38 μ mol/g and 9.8 ~ 471.28 nmol/g, respectively. The multivariate analyses, including principal component analysis and cluster analysis, classified these flaxseed flours based on the raw material varieties, producing areas and maturation method . **[Conclusion]** The variety origin of raw materials largely contributed to the contents of main nutrients, polar and nonpolar lipid concomitants and *in vitro* antioxidant activities, whereas the maturation method affected the lipid peroxidation levels of the commercially available flaxseed flours.

Key words: flaxseed flours; main nutrients; lipid concomitants; antioxidant activity; lipid peroxidation level; multivariate analysis

[责任编辑:杨晓娟]