

不同品种亚麻籽组成及抗氧化特性分析

禹 晓¹, 黄沙沙¹, 程 晨², 黄凤洪², 邓乾春^{2*}, 黄庆德^{2*}

(1. 郑州轻工业学院食品与生物工程学院, 食品生产与安全河南省协同创新中心, 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: 分析了我国不同产区不同品种亚麻籽的组成及体外抗氧化特性。结果表明, 除基本组成成分外, 不同品种亚麻籽主要活性组分含量和体外抗氧化活性具有显著差异。 α -亚麻酸、木酚素、总酚酸、黄酮、生育酚、植物甾醇含量范围分别为 33.42% ~ 59.74%, 120 ~ 918mg/100g, 209 ~ 491mg/100g, 33.04 ~ 75.63mg/100g, 8.68 ~ 20.75mg/100g, 340 ~ 596mg/100g。亚麻籽提取物 DPPH 值和 FRAP 值分别为 4 357 ~ 8 146 μ mol Trolox/100g, 8 289 ~ 15 058 μ mol Trolox/100g。此外, 不同品种亚麻籽抗营养因子生氰糖苷含量差异较为显著 (5.57 ~ 11.34mg HCN/100g)。相关性分析结果表明, 亚麻籽提取物体外抗氧化活性与木酚素、总酚酸和黄酮含量具有显著相关性 ($p < 0.05$)。主成分分析和聚类分析结果表明, 亚麻籽主要酚类化合物及其抗氧化活性主要依赖于亚麻籽品种特性, 而非种植区域。

关键词: 亚麻籽; 活性组分; 抗氧化活性; 相关性分析; 主成分分析; 聚类分析
中图分类号: S563.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 – 9084(2018)06 – 0879 – 010

Composition and antioxidant characteristics of different flaxseed cultivars

YU Xiao¹, HUANG Sha-sha¹, CHENG Chen², HUANG Feng-hong², DENG Qian-chun^{2*}, HUANG Qing-de^{2*}
(1. College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Henan Collaborative Innovation Center for Food Production and Safety, Zhengzhou 450001, China; 2. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Wuhan 430062, China)

Abstract: This study aimed to evaluate the composition and *in vitro* antioxidant capacities of flaxseed cultivars grown in China. The results showed that a wide range of α -linolenic acid (33.42% – 59.74%), lignans (120 – 918mg/100g), total phenolic acids (209 – 491mg/100g), flavonoids (33.04 – 75.63mg/100g), tocopherols (8.68 – 20.75mg/100g) and phytosterols (340 – 596mg/100g) contents was obtained among the studied flaxseed cultivars except the basic components. The *in vitro* antioxidant capacities of flaxseed extracts evaluated by DPPH and FRAP methods varied from 4 357 to 8 146 μ mol Trolox/100g, and 8 289 to 15 058 μ mol Trolox/100g, respectively. The content of cyanogenic glucoside, the main antinutritional factor in flaxseed, ranged between 5.57 and 11.34 mg HCN/100g. Significant correlations were observed between the *in vitro* antioxidant capacities and contents of lignans, total phenolic acids and flavonoids ($p < 0.05$). Principal component analysis and cluster analysis suggested that the contents of bioactive components and *in vitro* antioxidant capacities mainly depended on the flaxseed cultivar specificity.

Key words: flaxseed; bioactive components; antioxidant capacity; correlation analysis; principal component analysis; cluster analysis

亚麻籽作为一种功能性食品原料正逐渐引起国内外学者的广泛关注。亚麻籽除了富含 α -亚麻酸

收稿日期: 2018-03-22
基金项目: 国家“十三五”重点研发计划子课题 (2017YFD0400200); 国家自然科学基金项目 (31771938; 31801502); 河南省科技攻关项目 (182102110391); 郑州轻工业学院博士启动基金项目 (2016BSJJ022)
作者简介: 禹 晓 (1986 –), 女, 讲师, 博士, 主要从事脂质化学与营养研究
* 通讯作者: 邓乾春 (1979 –), 男, 副研究员, 博士, 主要从事脂质化学与营养研究
黄庆德 (1964 –), 男, 研究员, 主要从事油料加工技术研究

(ALA)、蛋白质、可溶性膳食纤维外,还是木酚素、酚酸、植物甾醇、生育酚等活性植物化学物的重要来源^[1]。其中,ALA 能够基于增加其本身及其代谢产物 EPA/DPA/DHA 的累积改善机体脂代谢紊乱,激活抗炎性信号通路,从而抑制肥胖相关代谢疾病的进展^[2]。亚麻木酚素因具有弱雌激素效应能够诱导癌细胞凋亡,其较强的抗氧化活性也是预防代谢性疾病发生发展的重要机制^[3]。亚麻籽中的可溶性膳食纤维具有凝胶、起泡和乳化能力,也表现出较好的抗氧化活性^[4]。亚麻籽蛋白主要由高分子量的盐溶性球蛋白(11-12S, MW = 29 400kDa, 58%~66%)和低分子量的水溶性白蛋白(1.6-2.0S, MW = 16 000kDa 20%~42%)组成,其水解产物具有抑菌、抗氧化、预防心血管疾病等生理功能^[5,6]。同时,亚麻籽多酚、植物甾醇、生育酚等活性组分在降低年龄相关退行性疾病等方面的功能也逐渐被认可^[7]。

结合本课题组及国外其他学者研究发现,来自不同国家或种植区域的亚麻籽中生物活性组分,包括 ALA、木酚素、多酚、植物甾醇、生育酚等含量具有明显差异^[8]。而这种差异性也可能是导致亚麻籽油在改善代谢性疾病方面存在不一致的原因之一^[9,10]。我国是油用亚麻生产大国,2014 年产量达 3.87×10^5 t,仅次于加拿大,居世界第二位。其种植区域主要分布在西北的甘肃、宁夏、新疆以及华北的内蒙古、山西和河北等地,种植品种主要包括甘肃陇亚、天亚、定亚,山西晋亚,内蒙古内亚等系列品种。亚麻籽不同的遗传背景及种植环境可能导致亚麻籽主要生物活性组分及丰度的差异。基于此,本研究通过现代农业产业技术体系胡麻体系各试验站搜集的我国主产区亚麻籽品种,基于化学计量学方法分析不同种植区域不同品种的亚麻籽活性物质含量,筛选出亚麻籽内源性抗氧化体系的特异性组分,以期为我国亚麻籽的高值化加工提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料

通过现代农业产业技术体系胡麻体系各试验站搜集了我国亚麻主产区 78 个亚麻籽品种和 1 个加拿大转基因亚麻籽品种(不同亚麻籽品种的产区分布状况见表 1)。在此基础上,进一步选取有代表性的 30 个亚麻籽品种进行木酚素等活性组分及其抗氧化活性分析。

1.2 仪器与试剂

XS205 万分之一电子天平(瑞士 METTLER TO-

LEDO 公司), Waters 超高效液相色谱仪(美国 Waters 公司),台式恒温振荡器(太仓市强乐试验设备厂),Avanti-26XP 型高速离心机,DU800 型紫外-可见分光光度计(美国 Beckman Coulter 公司),Elmasonic E120H 超声波清洗器(德国 Elma 公司)。Agilent 6890 气相色谱仪(美国 Agilent 公司),L-8800 型全自动氨基酸分析仪(日本 Hitachi 公司)。

芦丁(R-5143, 95%), γ -生育酚(T-1782, 96%),2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ, 99%),6-羟基-2,5,7,8-四甲基苯并二氢吡喃-2-羧酸(Trolox, 97%),1,1-二苯基-2-硝基苦肼(DPPH, 95%),福林酚试剂和 5α -胆甾烷(97%)购自美国 Sigma 公司。Tri-SiL (HMDS: TMCS: Pyridine, 2:1:10) 试剂购于美国 Pierce 公司。木酚素(SDG, 98%)购自上海同田生物技术有限公司。植物甾醇(95%)购自西安蓝天生物工程有限责任公司。脂肪酸甲酯标准品购自美国 NU-CHEK-PREP 公司。色谱级甲醇、正己烷、乙腈和乙酸乙酯购自德国 Merck 公司,其它试剂为国产分析纯。

1.3 基本理化特性测定

水分、灰分、总糖、粗脂肪、粗蛋白、氨基酸组成、总氰化物、矿物质含量分别按照国家标准 GB 5009.3-2016、GB/T 5505-2008、GB/T 15672-2009、GB 5009.6-2016、GB 5009.5-2016 和 GB/T 5009.124-2003、GB/T 13084-2006 和 GB/T 14924.12-2001 规定的检测方法测定。

1.4 ALA 含量测定

采用索氏抽提法提取亚麻籽油,油脂脂肪酸甲酯的制备采用 GB/T17376-2008 法,脂肪酸甲酯的气相色谱分析采用 GB/T17377-2008 法。测定条件:安捷伦 6890 型气相色谱仪,氢火焰离子化检测器(FID),HP-INNOWax (30m $\times$ 0.32mm $\times$ 0.25 μ m) 色谱柱,载气为 N_2 (1.5mL/min),进样体积 1 μ L,分流比 80:1,进样口温度 260 $^{\circ}$ C;升温程序条件为 210 $^{\circ}$ C 保持 9min,以 20 $^{\circ}$ C/min 升至 230 $^{\circ}$ C,保持 10min。

1.5 体外抗氧化活性测定

1.5.1 极性抗氧化组分提取 亚麻籽中极性抗氧化成分的提取参考 Koski 等方法^[12],并稍作修改。准确称取 2.5g 全脂亚麻籽粉,加入 25mL 甲醇-水溶液(V/V, 1:1),超声提取 15min,5 000g 离心 10min,分离上层清液,重复操作 3 次,合并上层清液用甲醇定容至 100mL,4 $^{\circ}$ C 储藏备用。

1.5.2 DPPH 法 DPPH 法测定亚麻籽提取物自由基清除能力参考 Szydłowska-Czernecka 等方法^[13],

并稍作修改。吸取 0.5 mL 提取物,加入 2.5 mL DP-PH 甲醇溶液(38.0 $\mu\text{g/mL}$),漩涡混匀,避光静置 30 min,紫外-可见分光光度计在 515 nm 处测定吸光度值(以甲醇为空白)。DPPH 清除率(%) = $[(A_{\text{control}} - A_{\text{sample}})/A_{\text{sample}}] \times 100\%$ (其中: A_{control} 为空白样的吸光值, A_{sample} 为测定样品的吸光值)。将 Trolox 标准溶液浓度(X : $\mu\text{g/mL}$)与其对应 DPPH 清除率(Y)进行线性回归得到方程 $Y = 0.0195X - 0.0103$, $R^2 = 0.999$ 。测定结果以 μmol Trolox 当量/100 g 样品表示。

1.5.3 FRAP 法 FRAP 法测定亚麻籽提取物总抗氧化能力参考 Szydlowska - Czerniak 等方法^[14],并稍作修改。FRAP 工作液(2.5 mL 10 mmol/L TPTZ/HCl 溶液, 2.5 mL 20 mmol/L FeCl_3 溶液和 25 mL 0.1 mol/L 醋酸缓冲液, pH 3.6),现配现用,测试前置 37℃ 水浴锅温育 10 min。取 1.0 mL 提取物和 2 mL 温育后的 FRAP 工作液于 10 mL 比色管中,双蒸水定容,漩涡混匀,避光静置 20 min,紫外-可见分光光度计在 593 nm 处测定吸光度值。将 Trolox 标准溶液浓度(X : $\mu\text{g/mL}$)与其对应的吸光度值(Y)进行线性回归得到方程: $Y = 0.0102X - 0.0790$, $R^2 = 0.9993$ 。测定结果以 μmol Trolox 当量/100 g 样品表示。

1.6 总酚酸和黄酮含量测定

采用 Folin - Ciocalteu 比色法测定提取物中总酚酸含量^[12],并稍作修改。取 0.5 mL 提取物至 25 mL 比色管中,加入 1 mL Folin - Ciocalteu 试剂和 3 mL 饱和碳酸钠溶液(20%, m/V),双蒸水定容,漩涡混匀,避光静置 1 h,紫外分光光度计在 765 nm 处测定吸光度值。测定结果以 mg 没食子酸当量(GAE)/100 g 样品表示。黄酮含量的测定参考 Kim 等方法^[15],并稍作修改。吸取 1 mL 提取物至 10 mL 比色管中,分别加入 0.3 mL 亚硝酸钠溶液(5%)和硝酸铝溶液(10%),漩涡混匀,静置 5 min,甲醇-水溶液(1:1, V/V)定容,静置 5 min,紫外-可见分光光度计在 503 nm 处测定吸光度值。测定结果以 mg 芦丁当量/100 g 样品表示。

1.7 木酚素含量测定

木酚素含量测定参考 Eliasson 等方法^[16],并稍作修改。称取 0.25 g 脱脂粉,加入 5 mL 40% 乙醇溶液,超声提取 30 min,3 500 g 离心 15 min,重复提取 3 次,合并上清液。再加入 10 mL 0.3 mol/L 氢氧化钠溶液,超声水解 30 min。最后用 3.0 mol/L 硫酸调节碱水解液 pH 值至 3~5,双蒸水定容至 25 mL,经 0.22 μm 滤膜过滤后直接进样分析。

液相色谱条件:Waters 超高效液相色谱仪,二级阵列检测器;Waters Acquity BEH C18 (1.7 μm , 100 mm $\times$ 2.1 mm) 色谱柱;流动相为 0.1% 磷酸盐缓冲液(A 相, pH 2.8)和乙腈(B 相);梯度洗脱程序为:0 min (95:5, V/V) ~ 11.8 min (35:65, V/V) ~ 13.6 min (15:85, V/V) ~ 16.0 min (95:5, V/V);流速 0.208 mL/min;进样体积 2.5 μL ;检测波长 280 nm。

1.8 生育酚含量测定

准确称取 0.1 g(精确至 0.000 1 g)索氏抽提亚麻籽油,分别加入 1 mL 0.05 g/mL 抗坏血酸溶液,5 mL 无水乙醇和 0.5 mL 14.26 mol/L 氢氧化钾溶液,置于恒温摇床 70℃ 皂化 30 min。冷却至室温后,再加入 3 mL 双蒸水,5 mL 正己烷/乙酸乙酯溶液(85:15, V/V),漩涡提取 5 min,1 500 g 离心 15 min。重复提取 3 次,合并上清液后 N_2 吹干,复溶于 100 μL 流动相,3 500 g 离心 5 min,取上清进样分析。

液相色谱条件:Waters 超高效液相色谱仪,二级阵列检测器;Zorbax Eclipse XDB - C18 (1.8 μm , 100 mm $\times$ 2.1 mm) 色谱柱;流动相为乙腈/甲醇/乙酸乙酯(60:20:20, $V/V/V$),流速 0.30 mL/min;检测波长 300 nm;进样体积 2.0 μL ,外标法定量。

1.9 植物甾醇含量测定

植物甾醇含量的测定参考 Azadmard - Damirchi 等方法^[17],并稍作修改。称取 0.03 g(精确至 0.000 1 g)索氏抽提亚麻籽油至 10 mL 具塞玻璃离心管内,再加入 150 μL 0.5 mg/mL 5α -胆甾烷(内标)和 3 mL 2 mol/L 氢氧化钠/乙醇溶液,漩涡混匀,置于恒温摇床 70℃ 加热 15 min。室温冷却后,分别加入 2 mL 双蒸水和 1.5 mL 正己烷,漩涡提取 5 min,1 500 g 离心 10 min。重复提取 3 次,合并上清液, N_2 吹干,再加入 100 μL Tri - Sil,超声辅助衍生化 30 min, N_2 吹干后复溶于 1.5 mL 正己烷,气相色谱分析,内标法定量。

GC 测定条件:Agilent 6890 型气相色谱仪,氢火焰离子化检测器(FID),DB - 5HP(30 m $\times$ 0.32 mm $\times$ 0.10 μm) 色谱柱,进样口和检测器温度分别为 260℃ 和 310℃,进样体积 1 μL ,分流比为 25:1,载气为 N_2 (2.0 mL/min);升温程序为初始温度 60℃,以 40℃/min 升至 310℃,保持 6 min。

1.10 统计分析

采用 SPSS12.0 软件包进行数据统计分析,结果以均值 $\pm$ SD 表示。采用单因素方差分析(One - way analysis of variance, ANOVA)进行统计学差异检验,显著性水平 $p < 0.05$ 。相关性分析、主成分分析和聚类分析用 MetaboAnalyst 3.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同品种亚麻籽基本组分比较分析

2.1.1 水分、粗脂肪及 ALA 含量 如表 1 所示,79 个亚麻籽品种水分含量为 6.75% ~ 9.09% ,高于土耳其和巴西南部的两个亚麻籽品种水分含量^[18,19]。粗脂肪含量为 33.93% ~ 44.71% ,品种间存在差异,但不同种植区域间亚麻籽粗脂肪含量无统计学差异。ALA 是亚麻籽发挥其生物活性的重要物质基础。不同品种 ALA 含量为 33.42% ~ 59.74% ,略

高于 Dixit 和 Singh 等报道印度亚麻籽 ALA 含量 (33.22% ~ 54.79%)^[20~22,25]。就不同种植区域而言,产自山西的 5 个亚麻籽品种和产自甘肃平凉和兰州的 23 个亚麻籽品种 ALA 含量低于产自新疆、宁夏、内蒙和河北的亚麻籽品种 ALA 含量,这可能与不同种植区域亚麻籽中催化 ALA 合成的关键酶,即 $\Delta 15$ 去饱和酶的活性存在差异有关^[22,23,26,27]。此外,收获成熟度也是影响亚麻籽中 ALA 含量的重要因素之一^[24,28]。

表 1 不同亚麻籽品种水分、粗脂肪及 α -亚麻酸 (ALA) 含量
Table 1 Moisture, total fat and α -linolenic acid (ALA) contents of different flaxseed cultivars

种植区域 Grouping area		品种数 Cultivar number	水分 Moisture/%		粗脂肪 Crude fat/%		α -亚麻酸 ALA/%	
			范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
新疆 Xinjiang	伊犁 Yili	3	7.68 ~ 8.34	7.93	38.84 ~ 41.05	39.87	47.77 ~ 50.02	48.91
宁夏 Ningxia	固原 Guyuan	5	8.09 ~ 8.81	8.54	36.44 ~ 40.66	38.66	48.21 ~ 52.43	50.19
甘肃 Gansu	兰州 Lanzhou	6	7.98 ~ 8.84	8.36	35.52 ~ 39.25	37.55	33.42 ~ 50.76	46.22
	定西 Dingxi	5	8.34 ~ 9.07	8.79	37.61 ~ 41.97	39.75	40.89 ~ 59.69	48.16
	白银 Baiyin	12	7.93 ~ 8.81	8.35	37.52 ~ 42.40	39.52	47.16 ~ 53.17	49.43
	平凉 Pingliang	18	8.10 ~ 8.91	8.59	33.93 ~ 43.36	36.33	35.71 ~ 59.35	41.6
内蒙古 Inner Mongolia	鄂尔多斯 Ordos	14	7.95 ~ 9.09	8.53	35.61 ~ 39.55	38.11	46.40 ~ 52.64	49.66
	乌兰察布 Ulanqab	7	7.94 ~ 8.63	8.42	38.32 ~ 43.49	41.34	46.06 ~ 59.74	50.37
河北 Hebei	张家口 Zhangjiakou	4	6.75 ~ 7.45	7.07	39.18 ~ 44.71	41.71	48.56 ~ 55.90	53.14
山西 Shanxi	大同 Datong	5	7.40 ~ 7.94	7.75	35.12 ~ 36.73	36.1	39.02 ~ 43.47	42.13

2.1.2 总糖、灰分及矿物质含量 如表 2 所示,30 个亚麻籽品种的总糖含量为 30.21% ~ 36.93% ,略低于 Singh 等^[21]、Gopalan 等^[25]和 Mazza 等^[26]研究结果,可能归因于不同亚麻籽品种和检测方法的差异。不同品种亚麻籽粗灰分含量为 3.31% ~ 5.95% ,基本与其他学者报道的结果相当^[18,21,27]。

不同品种亚麻籽中矿物质含量差异较为明显,这可能与种植土壤环境、气候条件等生态因素有关。其中 Mn、Fe、Cu 和 Zn 含量分别为 15.9 ~ 38.0mg/100g,2.5 ~ 10.8mg/100g,0.3 ~ 1.2mg/100g 和 1.1 ~ 4.1mg/100g,基本与 Carraro 等研究结果一致^[28]。

表 2 不同亚麻籽品种总糖、灰分、粗蛋白及矿物质含量
Table 2 Total sugar, ash, crude protein and mineral contents of different flaxseed cultivars

种植区域 Grouping area		品种数 Cultivar number	总糖		灰分		粗蛋白		矿物质								
			Total carbohydrate/%		Ash/%		Crude protein/%		Minerals/(mg/100g)								
			范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	Na	Mg	K	Ca	P	Mn	Fe	Cu	Zn
新疆 Xinjiang	伊犁 Yili	2	33.69 ~ 36.93	35.31	3.85 ~ 3.98	3.91	30.11 ~ 31.14	30.63	30.3 ~ 31.1	221.3 ~ 245.4	576.8 ~ 589.7	151.9 ~ 169.1	685.9 ~ 734.6	25.9 ~ 32.9	2.7 ~ 4.1	0.9 ~ 1.1	2.5 ~ 3.1
			宁夏 Ningxia	固原 Guyuan	4	33.77 ~ 36.69	35.56	3.44 ~ 3.83	3.69	29.15 ~ 31.55	30.46	52.6 ~ 71.8	263.8 ~ 287.3	499.4 ~ 624.5	119.7 ~ 137.8	634.5 ~ 688.7	22.6 ~ 24.0
甘肃 Gansu	白银 Baiyin	4	34.78 ~ 35.62			35.22	3.83 ~ 5.95	4.58	25.95 ~ 28.84	27.34	28.8 ~ 92.9	222.2 ~ 244.7	542.5 ~ 547.9	125.2 ~ 262.6	562.8 ~ 683.5	21.2 ~ 35.2	4.6 ~ 6.3
			平凉 Pingliang	5	35.41 ~ 36.82	35.84	3.83 ~ 3.97	3.9	26.19 ~ 29.97	28.25	46.2 ~ 70.1	230.9 ~ 246.1	518.0 ~ 606.1	176.5 ~ 199.3	667.6 ~ 860.3	27.5 ~ 38.0	2.9 ~ 4.9
内蒙古 Inner Mongolia	鄂尔多斯 Ordos	3	32.11 ~ 33.67		32.77	4.55 ~ 5.92	5.01	29.96 ~ 34.27	32.44	24.4 ~ 66.7	241.0 ~ 259.7	553.6 ~ 743.4	163.2 ~ 249.7	593.3 ~ 1016.1	21.9 ~ 34.4	2.5 ~ 6.8	0.8 ~ 1.1
			乌兰察布 Ulanqab	3	31.34 ~ 31.98	31.71	3.73 ~ 4.24	3.93	29.33 ~ 32.99	31.24	78.8 ~ 109.5	231.4 ~ 285.1	379.0 ~ 567.6	92.2 ~ 116.3	622.7 ~ 698.3	19.2 ~ 21.6	2.8 ~ 4.2
河北 Hebei	张家口 Zhangjiakou	4	30.21 ~ 34.83		32.88	3.49 ~ 4.18	3.77	28.97 ~ 31.13	30.27	50.8 ~ 62.6	242.6 ~ 281.8	455.0 ~ 620.6	125.1 ~ 171.1	639.2 ~ 756.6	22.4 ~ 26.9	3.3 ~ 5.2	0.7 ~ 0.8
			山西 Shanxi	大同 Datong	2	30.95 ~ 36.63	34.34	3.31 ~ 3.70	3.49	27.35 ~ 33.73	29.58	59.1 ~ 109.1	220.3 ~ 906.4	344.6 ~ 494.3	94.3 ~ 214.0	517.4 ~ 795.3	15.9 ~ 20.5
			33.36 ~ 34.84			34.10	4.10 ~ 4.40	4.25	31.74 ~ 32.49	32.11	52.5 ~ 78.2	259.8 ~ 261.4	625.1 ~ 652.9	169.9 ~ 187.6	757.9 ~ 786.2	22.2 ~ 25.0	5.6 ~ 6.2

2.1.3 粗蛋白及氨基酸组成 蛋白质含量是亚麻籽的重要品质指标。如表 2 所示,不同品种亚麻籽粗蛋白含量 25.95% ~ 34.27% ,与 Singh 等研究结果基本一致^[1]。如表 3 所示,不同品种亚麻籽中总

氨基酸含量为 14.84% ~ 25.71%。就不同种植区域而言,产自甘肃定西的亚麻籽品种总氨基酸和必须氨基酸含量较低,分别为 14.84% ~ 20.63% 和 5.00% ~ 6.97%。而产自山西大同的亚麻籽品种则

表 3 不同亚麻籽品种氨基酸组成及含量
Table 3 Amino acid content and composition of flaxseed cultivars

氨基酸组成 Amino acid composition /%	新疆	宁夏	甘肃			内蒙古		河北	山西
	Xinjiang	Ningxia	Gansu			Inner Mongolia		Hebei	Shanxi
	伊犁 Yili 2	固原 Guyuan 4	定西 Dingxi 3	白银 Baiyin 4	平凉 Pingliang 5	鄂尔多斯 Ordos 3	乌兰察布 Ulanqab 3	张家口 Zhangjia 4	大同 Datong 2
天冬氨酸 Asp	2.17 ~ 2.22	2.18 ~ 2.35	1.45 ~ 2.00	1.82 ~ 2.14	1.78 ~ 2.50	2.29 ~ 2.38	2.12 ~ 2.34	1.99 ~ 2.46	2.39 ~ 2.52
苏氨酸 Thr *	0.81 ~ 0.82	0.84 ~ 0.90	0.55 ~ 0.77	0.69 ~ 0.82	0.72 ~ 0.90	0.87 ~ 0.89	0.80 ~ 87	0.76 ~ 0.91	0.91 ~ 0.92
丝氨酸 Ser	0.99 ~ 1.01	1.02 ~ 1.09	0.67 ~ 0.94	0.83 ~ 0.99	0.86 ~ 1.11	1.06 ~ 1.10	0.98 ~ 1.09	0.93 ~ 1.12	1.11 ~ 1.13
谷氨酸 Glu	4.84 ~ 5.11	4.87 ~ 5.21	3.20 ~ 4.36	3.98 ~ 4.76	3.96 ~ 5.47	5.17 ~ 5.46	4.63 ~ 5.24	4.39 ~ 5.65	5.39 ~ 5.70
甘氨酸 Gly	1.38 ~ 1.42	1.39 ~ 1.48	0.92 ~ 1.29	1.19 ~ 1.36	1.18 ~ 1.51	1.45 ~ 1.50	1.31 ~ 1.43	1.27 ~ 1.54	1.53 ~ 1.56
丙氨酸 Ala	1.07 ~ 1.09	1.10 ~ 1.17	0.72 ~ 1.02	0.94 ~ 1.08	0.93 ~ 1.22	1.15 ~ 1.18	1.04 ~ 1.14	1.01 ~ 1.24	1.21 ~ 1.25
半胱氨酸 Cys	0.22 ~ 0.25	0.15 ~ 0.25	0.10 ~ 0.14	0.13 ~ 0.28	0.12 ~ 0.19	0.16 ~ 0.21	0.16 ~ 0.18	0.14 ~ 0.19	0.18 ~ 0.19
缬氨酸 Val *	1.16 ~ 1.17	1.14 ~ 1.26	0.76 ~ 1.06	0.97 ~ 1.12	0.96 ~ 1.26	1.20 ~ 1.26	1.12 ~ 1.21	1.05 ~ 1.28	1.27 ~ 1.31
蛋氨酸 Met *	0.34 ~ 0.35	0.32 ~ 0.37	0.23 ~ 0.32	0.28 ~ 0.32	0.24 ~ 0.34	0.34 ~ 0.36	0.33 ~ 0.35	0.25 ~ 0.35	0.34 ~ 0.65
异亮氨酸 Ile *	1.01 ~ 1.03	1.01 ~ 1.10	0.66 ~ 0.93	0.85 ~ 0.98	0.83 ~ 1.13	1.07 ~ 1.13	0.98 ~ 1.07	0.94 ~ 1.16	1.12 ~ 1.15
亮氨酸 Leu *	1.39 ~ 1.43	1.40 ~ 1.52	0.94 ~ 1.31	1.18 ~ 1.36	1.17 ~ 1.51	1.50 ~ 1.52	1.34 ~ 1.46	1.28 ~ 1.56	1.54 ~ 1.57
酪氨酸 Tyr	0.64 ~ 0.71	0.55 ~ 0.64	0.42 ~ 0.51	0.48 ~ 0.56	0.49 ~ 0.65	0.57 ~ 0.63	0.52 ~ 0.56	0.49 ~ 0.63	0.61 ~ 0.75
苯丙氨酸 Phe *	1.17 ~ 1.94	1.32 ~ 1.51	0.88 ~ 1.23	1.11 ~ 1.39	1.22 ~ 1.45	1.40 ~ 1.43	1.36 ~ 1.42	1.24 ~ 1.48	1.47 ~ 1.57
赖氨酸 Lys *	0.95 ~ 0.96	0.98 ~ 1.01	0.64 ~ 0.88	0.81 ~ 0.96	0.82 ~ 1.04	1.00 ~ 1.04	0.90 ~ 0.98	0.85 ~ 1.03	1.07 ~ 1.07
游离 NH3	0.54 ~ 0.57	0.55 ~ 0.58	0.37 ~ 0.51	0.45 ~ 0.53	0.43 ~ 0.71	0.58 ~ 0.62	0.51 ~ 0.57	0.46 ~ 0.64	0.57 ~ 0.61
组氨酸 His *	0.48 ~ 0.49	0.52 ~ 0.57	0.34 ~ 0.47	0.43 ~ 0.50	0.44 ~ 0.57	0.54 ~ 0.56	0.50 ~ 0.54	0.46 ~ 0.56	0.56 ~ 0.58
精氨酸 Arg	2.22 ~ 2.31	2.24 ~ 2.41	1.48 ~ 2.04	1.86 ~ 2.17	1.83 ~ 2.60	2.39 ~ 2.52	2.18 ~ 2.45	2.06 ~ 2.61	2.59 ~ 2.69
脯氨酸 Pro	0.80 ~ 0.82	0.80 ~ 0.86	0.52 ~ 0.74	0.61 ~ 0.81	0.69 ~ 0.89	0.82 ~ 0.85	0.80 ~ 0.83	0.70 ~ 0.87	0.86 ~ 0.94
总计 Total	22.24 ~ 23.66	22.46 ~ 24.14	14.84 ~ 20.63	18.63 ~ 24.91	18.80 ~ 24.91	23.59 ~ 24.60	21.56 ~ 23.66	20.34 ~ 25.28	24.89 ~ 25.71

两者含量较高,分别为 24.89% ~ 25.71% 和8.28% ~ 8.83%。

2.2 不同品种亚麻籽主要抗氧化组分及体外抗氧化活性比较分析

如表 4 所示,30 个亚麻籽木酚素含量为 120 ~ 918 mg/100g。其中,亚麻籽品种定亚 9212、伊亚 4、黄胡麻、定亚 21 和晋亚 8 木酚素含量最低,而坝亚 9 和坝亚 11 木酚素含量最高。Thompson 等^[29]和 Mlder 等^[30]分别报道了新西兰和加拿大亚麻籽木酚素含量,分别为 301.1mg/100g 和 379.0mg/100g。就不同种植区域而言,产自河北张家口的亚麻籽品种含有较高含量的木酚素,均值达 721mg/100g。此外,亚麻籽成熟过程伴随着催化木酚素合成酶的表达和活性的改变。因此,收获成熟度也是影响亚麻籽木酚素含量的另一个关键因素^[31]。

经甲醇/水提取的亚麻籽提取物除了含有木酚素大分子外,还含有酚酸和黄酮类物质。全脂亚麻籽中主要酚酸为阿魏酸和对香豆酸,黄酮化合物主要是草棉黄素-3,8-O-双葡萄糖苷^[32,33]。如表 4 所示,30 个亚麻籽品种总酚酸含量为 209 ~ 491mg/100g,明显高于 Quezada 等报道的亚麻籽中总酚酸含量(153.87mg/100g)。定亚 21、定亚 9212 和天亚 2 总酚酸含量最低,而陇亚 8 和陇亚 9 则含有较高的总酚含量。

不同品种亚麻籽总黄酮含量为 33.04 ~ 75.63 mg/100g,基本与 Oomah 等报道的研究结果一致(35

~ 71mg/100 g)^[34],但低于 Quezada 等研究结果(170mg/100g)^[35]。本研究中黄酮含量较低的亚麻籽品种为伊亚 4、轮选 1、定亚 21、定亚 9212、坝亚 12 和晋亚 8,而含量较高的亚麻籽品种为宁亚 17、陇亚 9、定亚 14、定亚 17、坝亚 11 和加拿大 GM。就不同的种植区域而言,产自甘肃白银的亚麻籽品种总酚酸和黄酮含量最高,均值分别为 426mg/100g 和 64mg/100g。尽管不同种植区域及遗传背景差异一定程度上解释了不同品种亚麻籽总酚酸和黄酮含量的差别,但不同提取方法(加热/酶法提取 + 碱水解/酸水解)、提取溶剂(甲醇/水/乙腈)和提取基质(脱脂粉/全脂粉)也会影响亚麻籽中酚类化合物的溶出^[32,36]。

亚麻籽中生育酚主要以 γ -生育酚为主。不同品种亚麻籽生育酚含量为 8.68mg/100g (坝亚 11) ~ 20.75mg/100g (定亚),高于 Quezada 等报道的研究结果(6.5mg/100g)^[35]。亚麻籽中植物甾醇主要为 β -谷甾醇、菜油甾醇、豆甾醇和 $\Delta 5$ -燕麦甾醇,其中以 β -谷甾醇为主。不同品种亚麻籽植物甾醇总量为 340mg/100g(定亚 21) ~ 596mg/100g(轮选 1)。除了遗传背景引起的植物甾醇含量的差异外,收获成熟期不同也能够影响亚麻籽中植物甾醇的富集。Herchi 等研究发现,产自突尼斯的 3 个品种亚麻籽植物甾醇含量从开花后第 7d 的 1 336.22 ~ 1 977.92mg/100g 油降至开花后第 60d(收获期)的 492.03 ~ 722.66mg/100 g 油^[37]。

表 4 不同亚麻籽品种体外抗氧化活性、主要抗氧化组分及总氰化物含量
Table 4 *in vitro* antioxidant capacities and contents of main antioxidant components and HCN of different flaxseed cultivars

种植区域 Growing areas		品种 Cultivar	DPPH /(μmol Trolox/100g)	FRAP /(μmol Trolox/100g)	木酚素 Lignans /(mg/100g)	总酚 Total phenolics /(mg/100g)	黄酮 Flavonoids /(mg/100g)	植物甾醇 Phytosterols /(mg/100g)	生育酚 Tocopherols /(mg/100g)	总氰化物 Total cyanide /(mg HCN/100g)
新疆 Xinjiang	伊犁 Yili	伊亚 4 Yiya4	5 027 ± 279d	8 289 ± 376d	280 ± 22e	295 ± 2ce	33.08 ± 1.94c	595 ± 63a	12.59 ± 2.77b	11.34 ± 1.01ae
		伊亚 3 Yiya3	7 022 ± 91bf	10 797 ± 534be	367 ± 52d	372 ± 5bf	50.01 ± 4.12bd	423 ± 46b	14.84 ± 0.28b	6.28 ± 0.18b
内蒙 Inner Mongolia	鄂尔多斯 Ordos	轮选 1 Lunxuan1	6 660 ± 66bf	10 647 ± 258be	384 ± 11d	340 ± 8ce	40.05 ± 5.79c	596 ± 10a	13.77 ± 0.06b	7.84 ± 0.01b
		轮选 2 Lunxuan2	8146 ± 55ag	14 336 ± 259af	567 ± 52c	408 ± 34bf	60.88 ± 0.45bd	449 ± 12a	13.75 ± 0.76b	6.24 ± 0.23b
		农科院 091 Nongkeyuan 091	7 282 ± 661af	13 278 ± 1 116af	412 ± 10d	389 ± 18bf	62.59 ± 2.21ad	519 ± 80a	12.66 ± 0.65b	6.58 ± 0.59b
	乌兰察布 Ulanqab	轮选 3 Lunxuan3	6 636 ± 169bf	11 469 ± 1 092be	339 ± 31d	357 ± 40bf	57.62 ± 4.15bd	463 ± 9a	17.63 ± 0.28a	6.24 ± 0.95b
		同亚 11 Tongya11	6 798 ± 386bf	11 992 ± 1 074be	415 ± 1d	318 ± 5ce	52.16 ± 2.00bd	532 ± 40a	15.02 ± 0.45b	5.57 ± 1.19b
宁夏 Ningxia	固原 Guyuan	黄胡麻 Huanghuma	5 829 ± 82ce	11 307 ± 74be	271 ± 16e	297 ± 16ce	48.56 ± 2.22bd	476 ± 24a	15.71 ± 2.49b	6.33 ± 0.01b
		宁亚 14 Ningya14	7 277 ± 165af	13 580 ± 205af	522 ± 22c	400 ± 2bf	65.90 ± 1.10ae	444 ± 3a	17.01 ± 0.01a	6.75 ± 0.11b
		宁亚 15 Ningya 15	7 736 ± 150ag	15 058 ± 230ag	408 ± 1d	376 ± 3bf	55.64 ± 0.99bd	486 ± 28a	11.97 ± 0.28c	6.33 ± 0.95b
		宁亚 16 Ningya16	6 911 ± 163bf	13 132 ± 253af	483 ± 8c	340 ± 9ce	56.09 ± 1.06bd	459 ± 92a	14.07 ± 0.16b	7.17 ± 0.24b
		宁亚 17 Ningya17	8 059 ± 77ag	14 833 ± 281af	706 ± 62b	401 ± 6bf	67.22 ± 6.87ae	410 ± 54b	15.24 ± 0.39b	9.95 ± 0.83ad
甘肃 Gansu	定西 Dingxi	9135	7 887 ± 9ag	14 170 ± 158af	481 ± 4c	333 ± 50ce	62.83 ± 1.77ad	459 ± 1a	14.22 ± 0.95b	6.54 ± 0.42b
		定亚 17 Dingya17	6 043 ± 457ce	11 197 ± 782be	582 ± 10c	333 ± 23ce	60.71 ± 2.23bd	400 ± 22b	17.55 ± 0.95a	6.87 ± 0.66b
		定亚 22 Dingya 22	6 197 ± 390be	12 601 ± 339be	488 ± 42c	375 ± 5bf	62.66 ± 1.18ad	343 ± 33b	14.92 ± 0.05b	8.10 ± 0.72b
	白银 Baiyin	陇亚 8 Longya8	7 197 ± 120af	13 560 ± 381af	633 ± 81b	453 ± 1ag	65.59 ± 0.06ae	344 ± 9b	17.48 ± 1.05a	7.55 ± 0.30b
		陇亚 9 Longya9	6 367 ± 245be	11 220 ± 657be	682 ± 19b	491 ± 1ag	75.63 ± 1.89ae	381 ± 11b	12.78 ± 0.18b	7.59 ± 0.12b
		陇亚 10 Longya10	5 822 ± 43ce	11 903 ± 281be	454 ± 31d	415 ± 4bf	57.02 ± 5.05bd	363 ± 13b	15.47 ± 0.38b	8.52 ± 1.19ac
		陇亚 11 Longya11	5 644 ± 9ce	11 555 ± 49be	542 ± 2c	344 ± 3ce	55.91 ± 3.00bd	474 ± 20a	17.11 ± 1.72a	7.17 ± 0.48b
	平凉 Pingliang	陇亚 21 Longya21	4 357 ± 175d	10 524 ± 149ce	294 ± 41e	256 ± 1d	43.98 ± 2.16c	340 ± 5b	14.67 ± 0.47b	7.30 ± 0.54b
		定亚 8710 Dingya8710	6 698 ± 140bf	12 944 ± 557af	507 ± 15c	392 ± 20bf	63.21 ± 0.10ae	455 ± 58a	20.75 ± 0.80a	9.66 ± 0.06ad
		定亚 9212 Dingya9212	5 249 ± 90cd	10 269 ± 40cd	120 ± 14f	209 ± 1d	36.69 ± 0.01c	400 ± 11b	13.63 ± 3.14b	8.06 ± 0.06b
河北 Hebei	张家口 Zhangjiakou	天亚 2 Tianya2	4 895 ± 342d	10 364 ± 422cd	336 ± 1d	265 ± 8d	52.87 ± 0.08bd	539 ± 16a	14.17 ± 1.03b	10.55 ± 1.19ae
		加拿大 GM Canada GM	7 576 ± 217af	13 722 ± 640af	578 ± 6c	384 ± 10bf	64.85 ± 3.68ae	484 ± 37a	11.65 ± 1.07c	9.02 ± 0.24ad
		坝亚 9 Bya9	7 106 ± 110bf	12 173 ± 613be	918 ± 24a	368 ± 10bf	53.41 ± 7.27bd	520 ± 7a	11.30 ± 0.73c	9.61 ± 1.07ad
		坝亚 11 Bya11	6 837 ± 184bf	13 014 ± 582af	916 ± 15a	377 ± 1bf	64.15 ± 1.73ae	431 ± 20a	8.68 ± 1.27c	7.21 ± 0.30b
		坝亚 12 Bya12	6 223 ± 251be	12 544 ± 287be	589 ± 24b	310 ± 10ce	33.04 ± 7.99c	360 ± 41b	10.41 ± 1.12c	8.31 ± 0.41b
山西 Shanxi	大同 Datong	轮选 3 Lunxuan3	6 331 ± 71be	11 856 ± 85be	462 ± 16c	331 ± 4ce	58.32 ± 4.00bd	454 ± 29a	9.46 ± 1.00c	8.10 ± 1.31b
		晋亚 7 Jinya7	6 818 ± 90bf	13 956 ± 619af	345 ± 4d	337 ± 5ce	52.66 ± 5.44bd	514 ± 15a	15.95 ± 0.79b	9.62 ± 1.31ad
		晋亚 8 Jinya8	5869 ± 232ce	12782 ± 871bf	304 ± 43e	284 ± 8ce	45.37 ± 2.91c	393 ± 9b	12.68 ± 0.19b	8.31 ± 0.42b

注:同一列不同字母表示有显著性差异,显著性水平为 p < 0.05
Note: Different alphabets in same column indicated significant differences, the significant level was p < 0.05

30 个品种亚麻籽提取物的体外抗氧化活性差异较大,DPPH 值为 4 357 ~ 8 146μmol Trolox /100g, FRAP 值为 8 289 ~ 15 058μmol Trolox /100g。其中, 宁亚 15、9135、轮选 2 和宁亚 17 表现出较高的体外抗氧化活性,而伊亚 4、定亚 21、天亚 2 和定亚 9212 的总抗氧化活性较低。本研究结果低于 Quezada 等报道的产自美国的亚麻籽抗氧化活性 (DPPH =

12 000μmol Trolox /100g) ^[35]。产自甘肃平凉的亚麻籽品种抗氧化活性较低,DPPH 和 FRAP 值分别为 5 755 μmol Trolox /100g 和 9 543μmol Trolox/ 100g;而产自宁夏固原的亚麻籽品种显现出最大的 DPPH 和 FRAP 值,分别为 7 496μmol Trolox/100g 和 14 151μmol Trolox/100g。

2.3 不同品种亚麻籽主要抗营养因子总氰化物含量比较分析

亚麻籽除了富含木酚素等生物活性组分外,还含有抗营养因子生氰糖苷类化合物,主要存在于亚麻籽壳和皮中,包括龙胆二糖丙酮氰醇、龙胆二糖甲乙酮氰醇、亚麻苦苷和百脉根甙^[38]。由表 4 可知,不同品种亚麻籽 HCN 含量为 5.57 ~ 11.34mg/100g,低于 Feng 等研究结果(19.8 ~ 37.7mg HCN/100g)^[11]。本研究中同亚 11、轮选 2、轮选 3、伊亚 3、农科院 091、黄胡麻、宁亚 14 - 16、9135、定亚 17、陇亚 11、定亚 21 和坝亚 HCN 含量较低,为 5.57 ~ 7.30mg/100g,而宁亚 17、天亚 2 和伊亚 4 则含有较高含量的 HCN,分别为 9.95mg/100g、10.55mg/100g 和 11.34mg/100g。就不同种植区域而言,产自甘肃平凉、河北张家口和山西大同亚麻籽品种含有较高的 HCN 含量,而产自内蒙和宁夏固原(宁亚 17 除外)HCN 含量较低。Oomah 等采用 HPLC 法定量亚麻籽中总氰化物含量为 309 ~ 311mg/100g^[27,39],主要归因于亚麻籽品种、检测方法等不同。

2.4 不同品种亚麻籽体外抗氧化活性和各组分多变量分析

2.4.1 相关性分析结果 如表 5 所示,不同品种亚麻籽 FRAP 和 DPPH 值与亚麻籽中总酚酸($r = 0.483/0.625, p < 0.01$)、黄酮($r = 0.564/0.555, p < 0.01$)、木酚素($r = 0.416, p < 0.05; 0.482, p < 0.01$)含量具有显著相关性。但这一相关性相对低于其他油籽体外抗氧化活性和总酚含量之间相关性,这可能与亚麻籽中酚类化合物主要以木酚素大分子复合物形式存在有关^[40,36]。此外,亚麻籽木酚素与总酚酸($r = 0.627, p < 0.01$)、黄酮($r = 0.561, p < 0.01$)含量均具有显著相关性,表明木酚素可能与酚酸和

表 5 不同品种亚麻籽抗氧化活性与生物活性组分含量相关性分析

Table 5 Corrections between antioxidant capacities and contents of bioactive components of different flaxseed cultivars

	木酚素 /(mg/100g)	总酚酸 /(mg/100g)	黄酮 /(mg/100g)
ALA/%	0.412 *	0.301	0.325
木酚素/(mg/100g)	-	0.627 **	0.561 **
总酚酸/(mg/100g)	-	-	0.775 **
DPPH/(μmol Trolox/100g)	0.482 **	0.625 **	0.555 **
FRAP/(μmol Trolox/100g)	0.416 *	0.483 **	0.564 **

注:** 在 0.01 水平上具有极显著相关关系; * 在 0.05 水平上具有显著相关关系
Note: ** Correlation was highly significant at 0.01 level; * Correlation was significant at 0.05 level

黄酮协同构建亚麻籽内源性抗氧化体系。值得注意的是,亚麻籽 ALA 与木酚素表现出显著的线性关系($r = 0.412, p < 0.05$)。

2.4.2 主成分分析结果 将 30 个品种的亚麻籽的组成指标进行主成分分析,计算主成分的贡献率和累计贡献率(图 1)。根据累计贡献率大于 85% 的原则选择主成分,分析结果表明,第 1 ~ 4 主成分累积贡献率为 84.7%,第 1 主成分(PC1)贡献率为 56.5%,主要由 DPPH、FRAP、总酚、黄酮和木酚素含量决定;第 2 主成分(PC2)贡献率为 13.1%,主要由生育酚和 HCN 含量决定;第 3 和第 4 主成分(PC3 和 PC4)贡献率分别为 9.1% 和 5.9%,主要由粗蛋白和植物甾醇含量决定。产自同一种植区域的不同品种亚麻籽的数据点表现出明显的分散性,表明亚麻籽遗传背景(品种特异性)可能对亚麻籽的抗氧化活性和活性组分含量具有重要影响。其中,

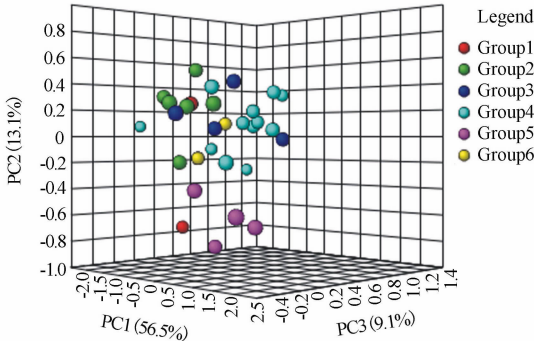


图 1 30 个亚麻籽品种的主成分分析图
Fig.1 Principal component analysis diagram of thirty flaxseed cultivars

亚麻籽品种 9135 和加拿大 GM 具有最大的抗氧化活性、总酚酸、黄酮、木酚素和 ALA 含量,而定亚 21、9212、伊亚 4 和天亚 2 则含有最低的抗氧化活性、总酚酸、黄酮、木酚素和 ALA 含量。同一种植区域亲缘关系较近的亚麻籽品种如新疆伊亚 3 - 4、内蒙古轮选 1 - 3、宁夏宁亚 14 - 17 抗氧化活性、总酚、黄酮、木酚素和 ALA 含量差异也较为明显。

2.4.3 聚类分析结果 通过聚类分析,根据抗氧化活性、总酚酸、黄酮、木酚素、ALA 等含量将 30 个亚麻籽主要分为 3 大类(图 2)。第一类为亚麻品种具有高 HCN 和粗蛋白含量,低抗氧化活性、总酚酸、黄酮、木酚素、植物甾醇、ALA 和总糖含量;第二类为亚麻品种具有低 HCN、高植物甾醇和 ALA 含量;第三类为亚麻品种具有低灰分、粗蛋白和生育酚含量,高抗氧化活性、总酚酸、黄酮、木酚素、植物甾醇、ALA 和总糖含量。

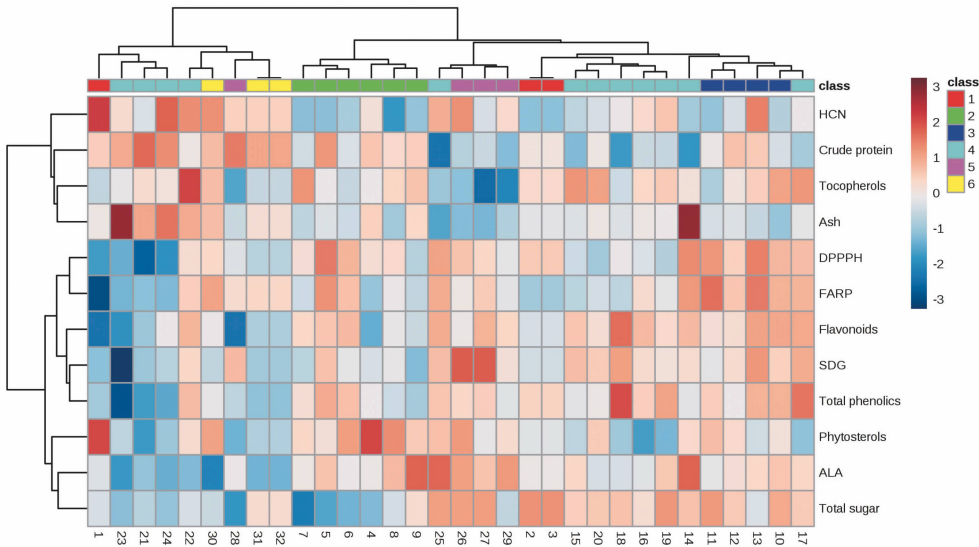


图2 30个亚麻籽品种的聚类分析图
Fig.2 Hierarchical cluster analysis diagram of thirty flaxseed cultivars

3 结论

我国不同品种亚麻籽 α -亚麻酸、木酚素、总酚、黄酮、生育酚、植物甾醇等主要活性成分含量和体外抗氧化活性具有明显的差异性。此外,亚麻籽中抗营养因子生氰糖苷含量也具有明显的品种特异性。相关性分析结果表明,亚麻木酚素、多酚和黄酮协同构建亚麻籽内源性抗氧化体系。主成分分析和聚类分析将不同品种亚麻籽基于抗氧化活性及生物活性组分含量差异进行分类,有利于指导亚麻籽特异性的高值化加工。建议产自河北张家口的高ALA和木酚素含量亚麻籽可直接作为保健食品的原料;而产自山西大同的低ALA含量亚麻籽则作为烹调用亚麻籽油的原料。

参考文献:

[1] Singh K K, Mridula D, Rehal J, et al. Flaxseed: a potential source of food, feed and fiber[J]. Crit Rev Food Sci Nutr,2011,51(3):210-222.

[2] Deckelbaum R J, Torrejon C. The omega-3 fatty acid nutritional landscape: health benefits and sources[J]. J Nutr,2012,142(3):587-591.

[3] Adolphe J L, Whiting S J, Juurlink B H, et al. Health effects with consumption of the flax lignan secoisolaricresinol diglucoside[J]. Brit J Nutr,2010,103(7):929-938.

[4] Bouaziz F, Koubaa M, Barba F J, et al. Antioxidant properties of water-soluble gum from flaxseed hulls[J]. Antioxidants,2016,5(26):1-10.

[5] Ayad A A, Alli I. Characterization and properties of flaxseed protein fractions[D]. Montreal: McGill University, 2010.

[6] Doyen A, Udenigwe C C, Mitchell P L, et al. Anti-diabetic and antihypertensive activities of two flaxseed protein hydrolysate fractions revealed following their simultaneous separation by electrodialysis with ultrafiltration membranes[J]. Food Chem,2014,145(7):66-76.

[7] Kris-Etherton P M, Hecker K D, Bonanome A, et al. Bioactive compounds in foods: their role in the prevention of cardiovascular disease and cancer[J]. Am J Chinese Med,2002,113(9):71-88.

[8] 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.

[9] Enos R T, Velázquez K T, McClellan J L, et al. Lowering the dietary omega-6: omega-3 does not hinder non-alcoholic fatty-liver disease development in a murine model[J]. Nutr Res,2015,35(5):449-459.

[10] Barre D E, Mizier-Barre K A, Griscti O, et al. Flaxseed oil supplementation manipulates correlations between serum individual mol% free fatty acid levels and insulin resistance in type 2 diabetics. Insulin resistance and percent remaining pancreatic β -cell function are

- unaffected[J]. *Endocrine Regulations*, 2016, 50(4): 183 – 193.
- [11] Feng D, Shen Y, Chavez E R. Effectiveness of different processing methods in reducing hydrogen cyanide content of flaxseed [J]. *J Sci Food Agr*, 2003, 83(8): 836 – 841.
- [12] Koski A, Psomiadou E, Tsimidou M, et al. Oxidative stability and minor constituents of virgin olive oil and cold – pressed rapeseed oil[J]. *Eur Food Res Technol*, 2002, 214(4): 294 – 298.
- [13] Szydłowska – Czerniak A, Trokowski K, Karlovits G, et al. Determination of antioxidant capacity, phenolic acids, and fatty acid composition of rapeseed varieties [J]. *J Agr Food Chem*, 2010, 58(13): 7 502 – 7 509.
- [14] 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.
- [15] Kim D O, Jeong S W, Lee C Y. Antioxidant capacity of phenolic phytochemicals from various cultivars of plums [J]. *Food Chem*, 2003, 81(3): 321 – 326.
- [16] Eliasson C, Kamaleldin A, Andersson R, et al. High – performance liquid chromatographic analysis of secoisolariciresinol diglucoside and hydroxycinnamic acid glucosides in flaxseed by alkaline extraction[J]. *J Chromatogr A*, 2003, 1012(2): 151 – 159.
- [17] Azadmard – Damirchi S, Habibi – Nodeh F, Hesari J, et al. Effect of pretreatment with microwaves on oxidative stability and nutraceuticals content of oil from rapeseed[J]. *Food Chem*, 2010, 121(4): 1 211 – 1 215.
- [18] Bozan B, Temelli F. Chemical composition and oxidative stability of flax, safflower and poppy seed and seed oils[J]. *Bioresource Technol*, 2008, 99(14): 6 354 – 6 359.
- [19] 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 Sci Technol (Campinas)*, 2013, 33(3): 541 – 548.
- [20] Dixit S, Kendurkar P S, Vajpeyi M, et al. Variability in elite linseed (*Linum usitatissimum* L.) germplasm for oil content and fatty acid composition[J]. *Indian J Agr Sci*, 2007, 20(1): 35 – 37.
- [21] Singh K K, Mridula D, Barnwal P, et al. Selected engineering and biochemical properties of 11 flaxseed varieties[J]. *Food Bioprocess Tech*, 2011, 6(2): 598 – 605.
- [22] Banik M, Duguid S, Cloutier S. Transcript profiling and gene characterization of three fatty acid desaturase genes in high, moderate, and low linolenic acid genotypes of flax (*Linum usitatissimum* L.) and their role in linolenic acid accumulation [J]. *Genome*, 2011, 54(6): 471 – 483.
- [23] Rajwade A V, Kadoo N Y, Borikar S P, et al. Differential transcriptional activity of *SAD*, *FAD2* and *FAD3* desaturase genes in developing seeds of linseed contributes to varietal variation in α – linolenic acid content [J]. *Phytochemistry*, 2014, 98: 41 – 53.
- [24] Herchi W, Bouali I, Bahashwan S, et al. Changes in phospholipid composition, protein content and chemical properties of flaxseed oil during development[J]. *Plant Physiol Bioch*, 2012, 54: 1 – 5.
- [25] Gopalan C, Rama Sastri BV, Balasubramanian S C. Nutritive value of Indian food[J]. *Teaching Public Administration*, 2004, 27(1): 53 – 54.
- [26] Mazza G. Production, processing and uses of Canadian flax[C]// First CGNA International Workshop, Temuco, Chile, August, 2008. 3 – 6.
- [27] Oomah B D, Mazza G. Compositional changes during commercial processing of flaxseed[J]. *Ind Crop Prod*, 1998, 9(1): 29 – 37.
- [28] Carraro J C C, Dantas M I D, Espeschit A C R, et al. Flaxseed and human health: Reviewing Benefits and Adverse Effects [J]. *Food Rev Int*, 2012, 28(2): 203 – 230.
- [29] Thompson L U, Boucher B A, Liu Z, et al. Phytoestrogen content of foods consumed in Canada, including isoflavones, lignans, and coumestanol[J]. *Nutr Cancer*, 2006, 54(2): 184 – 201.
- [30] Milder I E J, Arts I C W, Putte B V D, et al. Lignan contents of Dutch plant foods: a database including lariciresinol, pinioresinol, secoisolariciresinol and matairesinol[J]. *Brit J Nutr*, 2007, 93(3): 393 – 402.
- [31] Herchi W, Sakouhi F, Arraez – Roman D, et al. Changes in the content of phenolic compounds in flaxseed oil during development[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2011, 88(8): 1 135 – 1 142.
- [32] Alu Datt M H, Rababah T, Ereifej K, et al. Distribution, antioxidant and characterisation of phenolic compounds in soybeans, flaxseed and olives [J]. *Food Chem*, 2013, 139(1 – 4): 93 – 99.
- [33] Ibrahim R K, Shaw M. Phenolic constituents of the oil flax (*Linum usitatissimum*) [J]. *Phytochemistry*, 1970, 9(8): 1 855 – 1 858.
- [34] Oomah B D, Mazza G, Kenasuhuk E O. Flavonoid content of flaxseed. Influence of cultivar and environment [J]. *Euphytica*, 1996, 90(2): 163 – 167.
- [35] Quezada N, Cherian G. Lipid characterization and antioxidant status of the seeds and meals of *Camelina sativa* and flax[J]. *Eur J Lipid Sci Tech*, 2012, 114(8):

974 – 982.

[36]

Barthet V J, KlensporfPawlik D, Przybylski R. Activity of flax seed antioxidant system components[J]. Can J Plant Sci,2014,94(3):593 – 602.

[37]

Herchi W, Harrabi S, Sebei K, et al. Phytosterols accumulation in the seeds of *Linum usitatissimum* L. [J]. Plant Physiol Bioch,2009,47(10):880 – 885.

[38]

Imran M, Anjum F M, Butt M S, et al. Reduction of cyanogenic compounds in flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) meal using thermal treatment[J]. Int J Food Prop, 2013,16(8):1 809 – 1 818.

[39]

Oomah B D, Mazza G. Effect of dehulling on chemical composition and physical properties of flaxseed[J]. LWT – Food Sci Tech,1997,30(2):135 – 140.

[40]

Szydlowska – Czerniak A, Bartkowiak – Broda I, KarlovičI, et al. Antioxidant capacity, total phenolics, glucosinolates and colour parameters of rapeseed cultivars[J]. Food Chem,2011,127(2):556 – 563.

(责任编辑:肖唐华)

(上接第 865 页)

[21]

王瑞东,姜存仓,刘桂东,等. 常规与缓释硼肥连施及停施对脐橙硼营养的影[J]. 中国南方果树,2014,43(2):41 – 43.

[22]

Muhammad S S,Khanif Y M,Fauziah C I,et al. Comparative evaluation of colemanite and sodium pentaborate as boron sources for rice grown in flooded calcareous soil [J]. Sustainable Agri Res,2013,2(2):134 – 141.

[23]

鲍士旦,江荣风,杨超光,等. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000,116 – 125.

[24]

朱 芸,陆志峰,肖文豪,等. 硼肥用量对油菜产量与硼养分吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料,2017(4):129 – 133.

[25]

Hussain M,Khan M A,Khan M B,et al. Boron application improves growth, yield and net economic return of rice[J]. Rice Sci,2012,19(3):259 – 262.

[26]

杨学光. 棕壤花生硼肥施用效果和使用技术研究[J]. 花生科技,1998(1):20 – 22.

[27]

刘 铮,朱其清,唐丽华,等. 我国缺乏微量元素的土壤及其区域分布[J]. 土壤学报,1982,19(3):209 – 223.

[28]

Havlin J L,Beaton J D,Tisdale S L,et al (Eds). Soil fertility and fertilizers – an introduction to nutrient management[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006, 279 – 280.

[29]

Byers D E,Mikkelsen R L,Cox F R. Greehouse evaluation of four boron fertilizer materials[J]. J Plant Nutr, 2001,24(4/5):717 – 725.

(责任编辑:王丽芳)