

不同品种亚麻籽 8 种生物活性物质含量及其主成分分析

Determination and principal component analysis of 8 kinds of bioactive substances in different flaxseed varieties

孙 强¹ 王丽艳¹ 荆瑞勇¹ 郭永霞²

SUN Qiang¹ WANG Li-yan¹ JING Rui-yong¹ GUO Yong-xia²

(1. 黑龙江八一农垦大学, 黑龙江 大庆 163319; 2. 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319)

(1. Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 2. National

Research Center for Miscellaneous Grain Engineering Technology, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

摘要:目的:研究不同亚麻籽品种中生物活性物质含量的差异。方法:以 12 个亚麻籽品种为研究对象,测定亚麻籽中 8 种生物活性物质含量,并对其进行主成分分析,同时对亚麻籽品种进行聚类分析。结果:品种对亚麻籽生物活性物质的影响顺序为木酚素>总氰化物>黄酮>植物甾醇>总酚酸>生育酚>FRAP 值>DPPH 值。主成分分析可提取出 3 个主成分,累计贡献率达 82.925%,第一主成分主要由黄酮和 FRAP 值决定,第二主成分主要由木酚素和生育酚决定,第三主成分主要由总氰化物和总酚酸决定。聚类分析将 12 个亚麻籽品种划分为三大类,其综合评价价值依次降低,第 I 类包括坝亚 11、宁亚 17、坝亚 9、陇亚 8 和轮选 2;第 II 类包括陇亚 10、宁亚 16 和晋亚 7;第 III 类包括轮选 1、晋亚 8、伊亚 3 和伊亚 4。结论:综合评分坝亚 11 最高,具有较高的营养保健价值。

关键词:亚麻籽;生物活性物质;主成分分析

Abstract: Objective: This study aimed to investigate the difference of bioactivators from different flaxseed. Methods: 12 flaxseed varieties were used as study objectives, 8 kinds of bioactivators from different varieties of flaxseed were measured and analyzed by principal component and clustering. Results: The order of effect of flaxseed varieties on bioactive substances was as follows: lignan>total cyanide>flavone>phytosterol>total phenolic acid>tocopheronic acid>FRAP value>DPPH value. 3 principal components were extracted by principal component a-

nalysis and their accumulative contribution rate reach to 82.925%. The first, second and third principal component were mainly determined by flavone and FRAP values, lignan and tocopheronic acid, total cyanide and total phenolic acid, respectively. 12 flaxseed varieties were divided into three groups by clustering analysis, and their comprehensive assessment value reduced successively. Group I include Baya11, Ningya17, Baya9, Longya8 and Lunxuan2, Group II include Longya10, Ningya16 and Ningya16 and Jinya7, and Group III include Lunxuan1, Jinya8, Yiya3 and Yiya4. Conclusion: Comprehensive score of Baya11 is the highest, and it has higher nutritional value.

Keywords: flaxseed; bioactivator; principal component analysis

亚麻籽为亚麻的种子又称胡麻籽,不仅富含脂肪、蛋白质、氨基酸、糖类和矿物质等多种营养成分^[1-2],另外还含有生育酚、木酚素、黄酮、氰化物、植物甾醇等生物活性物质^[3]。其中木酚素能够诱导癌细胞凋亡^[4],具有抑制人体乳腺癌细胞生长、预防经期综合症、前列腺癌、骨质疏松等作用^[5-6]。生育酚是一种重要的脂溶性抗氧化剂,能够保护低密度的脂蛋白免于脂质过氧化,进而保持组织器官的完整性^[7-9]。另外生育酚能够抑制血小板增殖和血细胞粘附^[10],在一定程度上能够降低患帕金森、阿尔兹海默症和癌症等疾病的风险^[11]。甾醇在抗菌、抗肿瘤和预防心血管疾病方面有一定的功效^[12]。亚麻籽过去主要用来榨油,随着科学研究的不断深入,其营养保健功能越来越引起人们的重视^[13]。

通过前人研究发现,不同国家或产地的亚麻籽中生物活性物质含量具有明显差异^[14],这可能是导致不同的亚麻籽油在改善人类代谢性疾病方面存在不同效果的原因之一^[15-16]。在中国亚麻种植品种主要有陇亚、坝亚、宁亚、晋亚等系列品种,亚麻籽品种以及产地的不同可能

基金项目:黑龙江省自然科学基金面上项目(编号:C2018046);黑龙江八一农垦大学博士启动基金项目(编号:XDB2013-04)

作者简介:孙强,男,黑龙江八一农垦大学副教授,博士。

通信作者:郭永霞(1970—),女,黑龙江八一农垦大学教授,博士。

E-mail:gyxia@163.com

收稿日期:2021-06-02 **改回日期:**2022-06-05

是导致亚麻籽主要生物活性物质组分和丰度差异的主要原因之一^[3]。而关于利用多种生物活性物质成分对不同品种亚麻籽进行分析研究目前鲜有报道。

研究拟以 6 个产地的 12 个亚麻籽品种为研究对象,测定亚麻籽中总酚酸、木酚素、黄酮、总氰化物、植物甾醇、生育酚含量以及体外抗氧化活性 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 值 8 个活性成分,并对其进行主成分分析,以期为中国亚麻籽深加工提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

亚麻籽:6 个产地、12 个品种,具体信息见表 1。

表 1 亚麻籽品种信息[†]

Table 1 Information of flaxseed varieties

品种名称	产地	品种名称	产地
伊亚 3	新疆伊犁	陇亚 8	甘肃白银
伊亚 4	新疆伊犁	陇亚 10	甘肃白银
宁亚 16	宁夏固原	晋亚 7	山西大同
宁亚 17	宁夏固原	晋亚 8	山西大同
轮选 1	内蒙古鄂尔多斯	坝亚 9	河北张家口
轮选 2	内蒙古鄂尔多斯	坝亚 11	河北张家口

[†] 轮选 1 和轮选 2 由内蒙古自治区农牧业科学院提供,其余品种由黑龙江省科学院大庆分院提供。

1.2 仪器与试剂

紫外—可见分光光度计:DU800 型,美国 Beckman Coulter 公司;

气相色谱仪:Agilent 6890 型,美国 Agilent 公司;

超声波清洗器:Elmasonic E120H 型,德国 Elma 公司;

超高效液相色谱仪:UPLC 型,美国 Waters 公司;

脂肪测定仪:SZC-101 型,上海纤检仪器有限公司;

芦丁(R-5143)、1,1-二苯基-2-硝基苦肼(DPPH):95%,美国 Sigma 公司;

2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ):99%,美国 Sigma 公司;

γ-生育酚(T-1782):96%,美国 Sigma 公司;

6-羟基-2,5,7,8-四甲基苯并二氢吡喃-2-羧酸(Trolox)、5α-胆甾烷:97%,美国 Sigma 公司;

植物甾醇:95%,西安蓝天生物工程有限责任公司;

木酚素(SDG):98%,上海同田生物技术有限公司。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 木酚素含量 参考 Eliasson 等^[17]的液相色谱法,稍做修改。准确称取 0.25 g 脱脂亚麻籽粉,加入 40%乙醇溶液 5 mL,超声提取 30 min,4 000×g 离心 20 min,重复提取 3 次,合并上清液。加入 0.3 mol/L 氢氧化钠溶液 10 mL,超声波水解 30 min。用 3.0 mol/L 硫酸溶液调节 pH 值至 3~5,双蒸水定容至 25 mL,经 0.22 μm 滤膜过滤后进样分析。

1.3.2 总酚酸含量 参考 Koski 等^[18]的 Folin-Ciocalleu 比色法,稍加修改。取 0.5 mL 提取物加入 25 mL 比色管中,再加入 Folin-Ciocalleu 试剂 1 mL 和饱和碳酸钠溶液(20 g/100 mL)3 mL,用双蒸水定容至 25 mL,漩涡混匀后,避光静置 1 h,765 nm 处测定吸光度值。

1.3.3 黄酮含量 参考 Kim 等^[19]的比色法,稍加修改。吸取 1 mL 提取物放入 10 mL 比色管中,分别加入 0.3 mL 的 5%亚硝酸钠溶液和 0.3 mL 的 10%硝酸铝溶液,混匀后静置 5 min,用甲醇—水(V_{甲醇}:V_水=1:1)溶液定容,静置 5 min,紫外可见分光光度计在 503 nm 处测定吸光度值。

1.3.4 植物甾醇含量 参考 Azadmard-Damirchi 等^[20]的气相色谱法,稍加修改。精确称取 0.03 g 索氏抽提亚麻籽油放入 10 mL 具塞离心管内,再加入 0.5 mg/mL 5α-胆甾烷 150 μL 和 3 mL 的 2 mol/L 氢氧化钠—乙醇溶液,漩涡混匀,于 70 ℃恒温摇床加热 15 min。待室温冷却后分别加入 1.5 mL 正己烷和 2 mL 双蒸水,漩涡提取 5 min 后 1 500×g 离心 10 min。重复提取 3 次,合并上清液,用 N₂吹干后再加入 100 μL 的 Tri-Sil 溶液,超声辅助衍生化 30 min,N₂吹干,复溶于 1.5 mL 的正己烷,进行气相色谱分析,用内标法进行定量。

1.3.5 总氰化物含量 按 GB 7486—87 执行。

1.3.6 生育酚含量 参考禹晓等^[3]的液相色谱法,稍加修改,精确称取 0.1 g 亚麻籽油,分别加入 1 mL 的 0.05 g/mL 维生素 C 溶液,无水乙醇 5 mL 和 0.5 mL 的 14.26 mol/L 氢氧化钾溶液,置于 70 ℃恒温摇床上皂化 30 min。冷却至室温后,加入双蒸水 3 mL,正己烷—乙酸乙酯(V_{乙酸乙酯}:V_{正己烷}=15:85)溶液 5 mL,漩涡提取 5 min 后 1 500×g 离心 15 min。重复提取 3 次后合并上清液,用 N₂吹干,复溶于 100 μL 乙腈—甲醇—乙酸乙酯溶液(V_{乙腈}:V_{甲醇}:V_{乙酸乙酯}=60:20:20)中,3 500×g 离心 10 min,取上清液进样分析。

1.3.7 DPPH 自由基清除能力 参考 Szydłowska-Czerniak 等^[21]的方法,稍作修改。吸取 0.5 mL 提取物,加入 2.5 mL 38.0 μg/mL 的 DPPH 甲醇溶液,漩涡混匀,避光静置 30 min 后 515 nm 处测定吸光度值,以甲醇为空白对照。

1.3.8 总抗氧化能力 参考 Szydłowska-Czerniak 等^[22]的方法,稍加修改。取提取物 1.0 mL 和温育后的 FRAP 工作液 2 mL 于 10 mL 比色管中,双蒸水定容 10 mL 后漩涡混匀,避光静置 20 min 后在 593 nm 处测定吸光度值。

1.4 数据处理及统计分析

1.4.1 隶属函数值

$$U(X_j) = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \tag{1}$$

式中:

U(X_j)——第 j 个综合指标的隶属函数值;

X_j ——第 j 个综合指标, $j=1,2,\cdots,n$;

$X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ ——第 j 个综合指标的最小值与最大值^[23]。

1.4.2 权重

$$W_j = \frac{R_j}{\sum_{j=1}^n R_j}, \quad (2)$$

式中:

W_j ——第 j 个综合指标的权重;

R_j ——第 j 个综合指标的贡献率^[24]。

1.4.3 综合评价

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j)W_j], \quad (3)$$

式中:

D ——不同品种亚麻籽的综合评价^[25]。

1.4.4 数据统计及分析

(1) 数据统计与整理:采用 Excel 2013 统计软件;差异性分析、相关性分析和主成分分析(PCA)采用 R 语言,自编程序。

(2) 聚类分析:采用 SPSS 20.0 数据分析软件,采用分析中分类下的系统聚类分析。

2 结果与分析

2.1 生物活性物质测定与分析

由表 2 可知,不同品种亚麻籽所含木酚素的差异最

表 2 8 种生物活性物质分析[†]

Table 2 Analysis of 8 kinds of bioactivators

品种	木酚素含量/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)	总酚酸含量/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)	黄酮含量/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)	植物甾醇含量/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)
伊亚 3	369.24±22.21 ^{cd}	278.32±6.41 ^e	51.02±3.88 ^{abcd}	425.36±5.90 ^{bc}
伊亚 4	281.35±4.63 ^d	298.74±10.91 ^{cde}	34.01±0.21 ^d	594.36±6.70 ^a
宁亚 16	485.62±12.58 ^{bed}	343.91±10.67 ^{bede}	58.02±2.27 ^{abc}	461.32±17.02 ^{bc}
宁亚 17	708.24±21.71 ^{ab}	406.12±3.82 ^{ab}	68.03±2.05 ^a	414.38±6.89 ^{bc}
轮选 1	390.16±9.39 ^{cd}	346.28±6.13 ^{bede}	41.09±2.49 ^{cd}	601.37±16.32 ^a
轮选 2	575.24±11.13 ^{bed}	411.84±12.57 ^{ab}	62.13±2.87 ^{ab}	452.73±13.00 ^{bc}
陇亚 8	642.61±20.69 ^{abc}	467.43±5.52 ^a	66.61±3.69 ^a	351.21±11.17 ^c
陇亚 10	461.31±14.45 ^{bed}	421.37±4.77 ^{ab}	59.01±2.66 ^{ab}	371.25±8.60 ^c
晋亚 7	364.13±17.12 ^{cd}	341.84±2.76 ^{bede}	53.34±4.17 ^{abc}	515.43±11.18 ^{ab}
晋亚 8	318.63±7.03 ^d	288.84±11.89 ^{de}	46.21±3.00 ^{bcd}	401.31±14.53 ^{bc}
坝亚 9	925.34±13.00 ^a	378.21±8.53 ^{abcd}	54.36±4.98 ^{abc}	525.13±12.16 ^{ab}
坝亚 11	931.33±10.98 ^a	381.26±12.22 ^{abc}	66.36±3.26 ^a	442.37±21.45 ^{bc}
平均值	537.77	363.68	55.02	463.02
变异系数/%	41.55	15.95	19.30	17.48

品种	总氰化物含量/ (10 ⁻² mg HCN · g ⁻¹)	生育酚含量/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)	DPPH 自由基清除率/ (10 ⁻² μmol Trolox · g ⁻¹)	FRAP/ (10 ⁻² μmol Trolox · g ⁻¹)
伊亚 3	6.34±0.31 ^c	15.02±1.52 ^{abc}	7 035.26±41.76 ^{abc}	10 821.34±58.54 ^{cde}
伊亚 4	12.06±1.31 ^a	14.09±0.26 ^{abc}	5 031.26±24.46 ^d	8 342.67±83.87 ^e
宁亚 16	7.21±0.60 ^{bc}	15.03±1.87 ^{abc}	7 001.32±202.16 ^{abc}	13 148.25±127.53 ^{abcd}
宁亚 17	10.06±1.22 ^{ab}	15.34±1.54 ^{abc}	8 065.21±109.49 ^{ab}	14 864.39±322.23 ^a
轮选 1	7.91±0.69 ^{bc}	14.01±1.05 ^{abc}	6 664.62±335.06 ^{bc}	10 668.23±84.28 ^{de}
轮选 2	6.41±0.42 ^c	13.81±2.14 ^{bc}	8 155.29±153.84 ^a	14 378.94±49.68 ^{ab}
陇亚 8	7.64±0.14 ^{bc}	17.62±0.89 ^a	7 213.21±67.21 ^{abc}	13 589.21±95.96 ^{abc}
陇亚 10	8.81±0.84 ^{bc}	16.24±0.72 ^{ab}	5 849.42±79.08 ^{cd}	11 921.28±151.57 ^{bed}
晋亚 7	9.71±0.64 ^{ab}	16.35±1.18 ^{ab}	6 843.61±217.13 ^{abc}	13 988.34±237.06 ^{ab}
晋亚 8	8.42±0.33 ^{bc}	13.41±1.72 ^{bc}	5 885.21±296.86 ^{cd}	12 791.23±415.20 ^{abcd}
坝亚 9	9.71±0.88 ^{ab}	12.35±1.26 ^{cd}	7 142.36±274.19 ^{abc}	12 184.28±275.30 ^{abcd}
坝亚 11	7.33±0.45 ^{bc}	8.86±1.16 ^d	6 842.31±63.75 ^{abc}	13 086.37±162.76 ^{abcd}
平均值	8.47	14.34	6 810.76	12 482.04
变异系数/%	19.91	15.68	13.07	14.74

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

大,含量为 281.35~931.33 mg/100 g;总酚酸含量为 278.32~467.43 mg/100 g;黄酮含量为 34.01~68.03 mg/100 g,与 Oomah 等^[26]报道的研究结果基本一致(35~71 mg/100 g);植物甾醇含量为 351.21~601.37 mg/100 g;总氰化物含量为 6.34~12.06 mg/100 g;生育酚含量为 8.86~17.62 mg/100 g;12 个品种亚麻籽提取物体外抗氧化活性也有一定的差异,DPPH 自由基清除率为 5 031.26~8 155.29 $\mu\text{mol Trolox}/100\text{ g}$,低于美国的亚麻籽抗氧化活性(12 000 $\mu\text{mol Trolox}/100\text{ g}$)^[27];FRAP 值为 8 342.67~14 864.39 $\mu\text{mol Trolox}/100\text{ g}$ 。8 种生物活性物质最大值与最小值之间均存在显著性差异。8 种生物活性物质的变异系数不同,木酚素的变异系数最大为 41.55%,说明亚麻籽品种对木酚素含量影响最大,DPPH 自由基清除率的变异系数最小为 13.07%,说明亚麻籽品种对 DPPH 自由基清除率的影响最小,通过变异系数大小可知,不同亚麻籽品种对 8 种生物活性物质的影响顺序为木酚素含量>总氰化物含量>黄酮含量>植物甾醇含量>总酚酸含量>生育酸含量>FRAP 值>DPPH 自由基清除率。

2.2 生物活性物质之间的相关性分析

由表 3 可知,木酚素含量与总酚酸含量、黄酮含量之间的相关系数为 0.581 和 0.681,呈显著正相关;黄酮含量

与总酚酸含量的相关系数为 0.753,呈极显著正相关;植物甾醇含量与黄酮含量的相关系数为-0.712,呈极显著负相关;黄酮含量与 DPPH 自由基清除率、FRAP 值的相关系数为 0.712,0.827,呈极显著正相关;DPPH 自由基清除率与 FRAP 值的相关系数为 0.754,呈极显著正相关。其余各物质之间呈现不同程度的相关性,相关性均不显著。

2.3 主成分分析

2.3.1 主成分提取 以 8 种生物活性物质和 12 个亚麻籽品种构成 8×12 矩阵,利用 R 语言对其进行主成分分析,结果见图 1 和表 4。由表 4 可知,前 3 个主成分对应的特征值大于 1,其方差贡献率分别为 51.270%,18.685%,12.970%,由此可见第 1 主成分起到了主要作用,累计方差贡献率达到 82.925%。故可提取出 3 个主成分,3 个主成分定义为 $P_{CA,1}$ 、 $P_{CA,2}$ 、 $P_{CA,3}$,由表 5 可知其对应特征向量分别为:

$$P_{CA,1}=0.333x_1+0.378x_2+0.480x_3-0.335x_4-0.247x_5+0.020x_6+0.398x_7+0.428x_8, \quad (4)$$

$$P_{CA,2}=0.530x_1-0.071x_2+0.349x_4+0.039x_5-0.760x_6+0.070x_7-0.084x_8, \quad (5)$$

$$P_{CA,3}=0.249x_1+0.463x_2+0.074x_3+0.149x_4+0.790x_5+0.227x_6-0.135x_7+0.004x_8. \quad (6)$$

由图 1、表 4 和表 5 可知, $P_{CA,1}$ 的方差贡献率为 51.270%,

表 3 生物活性物质之间的相关性[†]

Table 3 Correlation between the different kinds of bioactivators

指标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
x_1	1.000							
x_2	0.581*	1.000						
x_3	0.681*	0.753**	1.000					
x_4	-0.204	-0.448	-0.712**	1.000				
x_5	-0.122	-0.130	-0.409	0.433	1.000			
x_6	-0.500	0.221	0.031	-0.268	0.093	1.000		
x_7	0.525	0.481	0.712**	-0.272	-0.485	0.041	1.000	
x_8	0.443	0.557	0.827**	-0.557	-0.339	0.108	0.754**	1.000

[†] x_1 : 木酚素含量, x_2 : 总酚酸含量, x_3 : 黄酮含量, x_4 : 植物甾醇含量, x_5 : 总氰化物含量, x_6 : 生育酚含量, x_7 : DPPH 自由基清除率, x_8 : FRAP 值; ** . 在 0.01 水平(双侧)极显著相关; * . 在 0.05 水平(双侧)显著相关。

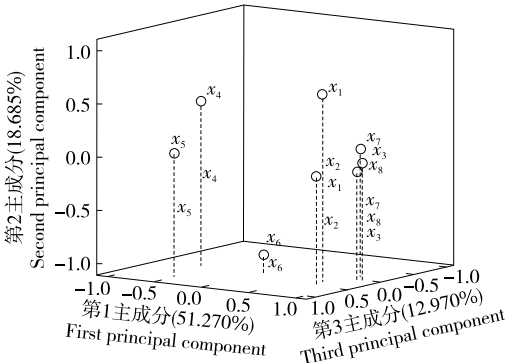


图 1 主成分图

Figure 1 Principal component diagram

在 $P_{CA,1}$ 的表达式中,黄酮含量(x_3)和 FRAP 值(x_8)的系数较大,分别为 0.480 和 0.428,可知 $P_{CA,1}$ 主要由黄酮含量和 FRAP 值决定; $P_{CA,2}$ 的方差贡献率为 18.685%,在 $P_{CA,2}$ 的表达式中,木酚素含量(x_1)和生育酚含量(x_6)系数较大,分别为 0.530 和 0.760,可知 $P_{CA,2}$ 主要由木酚素和生育酚含量决定; $P_{CA,3}$ 的方差贡献率为 12.970%,在 $P_{CA,3}$ 的表达式中,总氰化物(x_5)含量和总酚酸(x_2)含量系数较大,分别为 0.790 和 0.463,可知 $P_{CA,3}$ 主要由总氰化物和总酚酸含量决定。

2.3.2 亚麻籽基于生物活性物质的综合评价

(1) 隶属函数分析:根据式(1)可计算出每个品种亚

表 4 主成分的特征值、贡献率和累计贡献率

Table 4 Eigenvalue of the principal components the contribution rate and the rate of cumulative contributions

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
$P_{CA,1}$	4.102	51.270	51.270
$P_{CA,2}$	1.495	18.685	69.955
$P_{CA,3}$	1.038	12.970	82.925

麻籽综合指标(即主成分)的隶属函数值(表 6)。从表 6 可知,对 $P_{CA,1}$ 而言,陇亚 8 的 $U(X_1)$ 值最大为 1.000,说明陇亚 8 在 $P_{CA,1}$ 上评分最高,而伊亚 4 的 $U(X_1)$ 值最小为 0,说明伊亚 4 在 $P_{CA,1}$ 上评分最低;对 $P_{CA,2}$ 而言,坝亚 11 的 $U(X_2)$ 值最大为 1.000,说明坝亚 11 在 $P_{CA,2}$ 上评分最高,而陇亚 8 的 $U(X_2)$ 值最小为 0,说明陇亚 8 在 $P_{CA,2}$ 上评分最低;对 $P_{CA,3}$ 而言,伊亚 4 的 $U(X_3)$ 值最大为 1.000,说明伊亚 4 在 $P_{CA,3}$ 上评分最高,而伊亚 3 的 $U(X_3)$ 值最小为 0,说明伊亚 3 在 $P_{CA,3}$ 上评分最低。

(2) 权重的确定:根据 3 个主成分贡献率的大小, $P_{CA,1}$

表 5 主成分的特征向量与载荷矩阵[†]

Table 5 Principal component eigenvectors and loading matrix

指标	$P_{CA,1}$		$P_{CA,2}$		$P_{CA,3}$	
	特征向量	载荷	特征向量	载荷	特征向量	载荷
x_1	0.333	0.675	0.530	0.648	0.249	0.254
x_2	0.378	0.765	-0.071	-0.087	0.463	0.472
x_3	0.480	0.973	0.000	0.000	0.074	0.075
x_4	-0.335	-0.678	0.349	0.427	0.149	0.152
x_5	-0.247	-0.501	0.039	0.048	0.790	0.805
x_6	0.020	0.040	-0.760	-0.930	0.227	0.231
x_7	0.398	0.806	0.070	0.086	-0.135	-0.138
x_8	0.428	0.867	-0.084	-0.103	0.004	0.004

[†] x_1 :木酚素含量, x_2 :总酚酸含量, x_3 :黄酮含量, x_4 :植物甾醇含量, x_5 :总氰化物含量, x_6 :生育酚含量, x_7 :DPPH 自由基清除率, x_8 :FRAP 值。

的贡献率为 51.270%, $P_{CA,2}$ 的贡献率为 18.685%, $P_{CA,3}$ 的贡献率为 12.970%,可用式(2)计算出各主成分的权重,3 个主成分的权重分别为 0.618,0.225,0.156(表 6)。

表 6 综合指标值、权重、隶属函数值、D 值及品质排序

Table 6 Comprehensive index values, weightiness, subordinative function values and D values and quality rank

品种	综合指标值			隶属函数值			D 值	排序
	$P_{CA,1}$	$P_{CA,2}$	$P_{CA,3}$	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$		
伊亚 3	-0.395	-0.525	-1.899	0.541	0.209	0.000	0.382	11
伊亚 4	-2.265	0.211	1.192	0.000	0.427	1.000	0.252	12
宁亚 16	0.181	-0.314	-0.733	0.708	0.272	0.377	0.558	7
宁亚 17	1.092	-0.137	1.168	0.972	0.324	0.992	0.828	2
轮选 1	-0.960	0.359	-0.414	0.378	0.471	0.481	0.414	9
轮选 2	1.024	0.112	-0.749	0.952	0.398	0.372	0.736	5
陇亚 8	1.189	-1.232	0.691	1.000	0.000	0.838	0.749	4
陇亚 10	0.113	-1.088	0.718	0.688	0.042	0.847	0.567	6
晋亚 7	-0.244	-0.716	0.491	0.585	0.153	0.773	0.517	8
晋亚 8	-0.642	-0.382	-0.974	0.470	0.252	0.299	0.394	10
坝亚 9	0.131	1.564	0.971	0.694	0.827	0.929	0.760	3
坝亚 11	0.777	2.148	-0.462	0.881	1.000	0.465	0.842	1
指标权重				0.618	0.225	0.156		

(3) 综合评价:根据式(3)计算出综合评价值即 D 值的大小(表 6),根据 D 值对 12 个亚麻籽品种进行排序,其顺序为:坝亚 11>宁亚 17>坝亚 9>陇亚 8>轮选 2>陇亚 10>宁亚 16>晋亚 7>轮选 1>晋亚 8>伊亚 3>伊亚 4。

2.3.3 聚类分析 采用组间联接法对表 6 中的 D 值进行聚类分析,建立了聚类树状图(图 2),从图中可以看出聚类分析将其划分为三大类,其综合评价值依次降低。第 I 类包括坝亚 11、宁亚 17、坝亚 9、陇亚 8 和轮选 2;第 II 类包括陇亚 10、宁亚 16 和晋亚 7;第 III 类包括轮选 1、晋亚 8、伊亚 3 和伊亚 4。

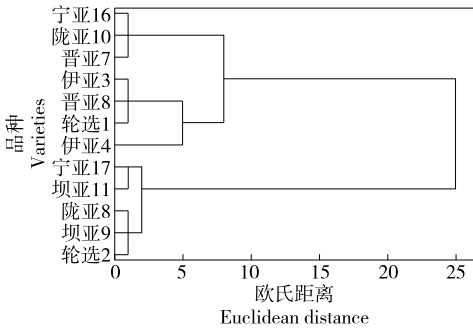


图 2 聚类树状图

Figure 2 Clustering dendrogram

3 结论

亚麻品种对亚麻籽内的生物活性物质有一定的影响,主成分分析得出第一主成分主要由黄酮含量和 FRAP 值决定,第二主成分主要由木酚素含量和生育酚含量决定,第三主成分主要由总氰化物含量和总酚酸含量决定,综合评分坝亚 11 最高,具有较高的营养保健价值,聚类分析 12 个亚麻籽品种可划分为三大类。该结论仅针对以上的 8 种生物活性物质得出的,有关亚麻籽内其他生物活性物质还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 胡晓军, 李群, 许光映, 等. 亚麻籽中主要营养成分的分布研究[J]. 中国油脂, 2012, 37(12): 64-66.
- HU X J, LI Q, XU G Y, et al. Distribution of the main nutritional components in linseed[J]. China Oils and Fats, 2012, 37(12): 64-66.
- [2] 兴丽, 赵凤敏, 曹有福, 等. 不同产地亚麻籽矿物质元素及脂肪酸组成的主成分分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2 538-2 543.
- XING L, ZHAO F M, CAO Y F, et al. Principal component analysis of mineral elements and fatty acids composition in flaxseed from ten different regions[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(9): 2 538-2 543.
- [3] 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.
- [4] ADOLPHE J L, WHITING S J, JUURLINK B H, et al. Health effects with consumption of the flax lignan secoisolariciresinol diglucoside[J]. Brit J Nutr, 2010, 103(7): 929-938.
- [5] 古丽娜·巴克, 迪丽胡玛·吐尔逊, 阿拉努尔·库尔班, 等. 不同浓度 SDG 对奶牛乳腺上皮细胞增殖及泌乳能力的影响[J]. 草食家畜, 2017(6): 5-10.
- GULIA B, DILIHUMA T, AILANUER K, et al. Effects of different concentrations of sdg on the mammary gland epithelial cells proliferation and lactating capacity in cow[J]. Grass-Feeding Livestock, 2017(6): 5-10.
- [6] NACI D, IGNACIO C. Testing the SDG targets on water and sanitation using the world trade model with a waste, wastewater, and recycling framework[J]. Ecological Economics, 2019, 165: 1-11.
- [7] VERLEYEN T, VERHE R, HUYGHEBAERT A, et al. Identification of α -tocopherol oxidation products in triolein at elevated temperatures[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 49(3): 1 508-1 511.
- [8] JIANG Q. Natural forms of vitamin E as effective agents for cancer prevention and therapy [J]. Advances in Nutrition, 2017, 8(6): 850-867.
- [9] RAEDERSTORFF D, WYSS A, CALDER P C, et al. Vitamin E function and requirements in relation to PUFA[J]. British Journal of Nutrition, 2015, 114(8): 1 113-1 122.
- [10] 周筱丹. 维生素 E 对蛋鸡维生素 A 关键转运蛋白和分解酶的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011: 3.
- ZHOU X D. The effect of vitamin E on key transporter and catabolic enzyme of vitamin A in laying hens[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011: 3.
- [11] GALLI F, AZZI A, BIRRINGER M, et al. Vitamin E: Emerging aspects and new directions[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2017, 102: 16-36.
- [12] PIIRONEN V, LINDSAY D G, MIETTINEN T A, et al. Plant sterols: Biosynthesis, biological function and their importance to human nutrition[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2000, 80(7): 939-966.
- [13] 林凤英, 林志光, 邱国亮, 等. 亚麻籽的功能成分及应用研究进展[J]. 食品工业, 2014, 35(2): 220-223.
- LIN F Y, LIN Z G, QIU G L, et al. Progress and application research in functional components of flaxseed[J]. The Food Industry, 2014, 35(2): 220-223.
- [14] 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.
- DENG Q C, MA F L, WEI X S, et al. Progress of studies on quality characteristics of flaxseed processing[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2016, 38(1): 126-134.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] ELIASSEN 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, 1 012(2): 151-159.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] AZADMARD-DAMIRCHI S, HABIBI-NODEH F, HESARI J, et al. Effect of pretreatment with microwaves on oxidative stability and nutraceuticals content of oil from rape-seed[J]. Food Chem, 2010, 121(4): 1 211-1 215.

(下转第 145 页)

- MIAO Y X, LIAO M X, SUN A H, et al. Extraction of total flavonoids from *Dendrobium officinale* flowers by ultrasonic-ethanol synergistic and its antioxidant activity[J]. *China Brewing*, 2019, 38(4): 155-159.
- [15] 全颖莹, 黄冰冰, 贝佳炎, 等. 红豆树叶总黄酮提取工艺优化及抗氧化性研究[J]. *中国野生植物资源*, 2021, 40(8): 20-26.
- QUAN Y X, HUANG B B, BEI J Y, et al. Optimization of extracting process of total flavonoids from the leaves of *Ormosia hosiei* and the antioxidant activity [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2021, 40(8): 20-26.
- [16] 寇亮, 李璐, 陆丽娜, 等. 响应面法优化柠条锦鸡儿总黄酮超声提取工艺及其体外抗氧化性研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(17): 225-231.
- KOU L, LI L, LU L N, et al. Optimization of extraction of total flavonoids from *Caragana korshinskii* kom with ultrasound technology by response surface analysis and evaluation of its antioxidant activity in vitro[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(17): 225-231.
- [17] 项昭保, 伍晓玲, 钟雪. 响应面优化超声波辅助乙醇提取橄榄叶总黄酮的工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(10): 211-215.
- XIANG Z B, WU X L, ZHONG X. Ultrasonic-assisted ethanol extraction techniques of the total flavonoids from the leaves of *Cannarium album* by response surface methodology [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(10): 211-215.
- [18] 钟尉方, 王岳鸿, 刘红英. 响应面法优化盐地碱蓬草总黄酮提取工艺研究[J]. *核农学报*, 2015, 29(6): 1 135-1 141.
- ZHONG W F, WANG Y H, LIU H Y. Optimization of extraction process of total flavonoids from *Suaeda salsa* by response surface methodology[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(6): 1 135-1 141.
- [19] FEI P, XU Y F, ZHAO S J, et al. Olive oil polyphenol extract inhibits vegetative cells of *Bacillus cereus* isolated from raw milk[J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(5): 3 894-3 902.
- [20] LI R, FEI P, MAN C X, et al. Tea polyphenols inactivate *Cronobacter sakazakii* isolated from powdered infant formula[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(2): 1 019-1 028.
- [21] BRAMATI L, AQUILANO F, PIETTA P. Unfermented rooibos tea: Quantitative characterization of flavonoids by HPLC-UV and determination of the total antioxidant activity[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2003, 51(25): 7 472-7 474.
- [22] 杨沛, 刘碧林, 杨洋, 等. 头花蓼中总黄酮的提取及对鸡脯肉的抑菌效果[J]. *食品工业*, 2021, 42(7): 142-145.
- YANG P, LIU B L, TANG Y, et al. The extraction of total flavonoids from *Polygonum capitatum* and its antibacterial effect on preserved chicken breast meat[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(7): 142-145.
- [23] 董飞, 郭晓农. 藜麦种子总黄酮的提取及体外抑菌作用[J]. *甘肃农业科技*, 2018(4): 14-18.
- DONG F, GUO X N. Extraction and antimicrobial activity of total flavonoids from *Chenopodium quinoa* seeds[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2018(4): 14-18.
- [24] 楚策, 刘小幸, 武春晓, 等. 紫叶李皮中总黄酮提取工艺优化及其抑菌作用的研究[J]. *现代预防医学*, 2018, 45(10): 1 850-1 854.
- CHU C, LIU X X, WU C X, et al. Optimization of extraction process of total flavonoids from *Prunus cerasifera* and its antibacterial effect[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2018, 45(10): 1 850-1 854.
- [25] 吴萌萌, 刘怡, 严馨, 等. 苦荞麸皮黄酮提取物及有效成分的抑菌活性[J]. *食品与生物技术学报*, 2021, 40(11): 77-83.
- WU M M, LIU Y, YAN X, et al. Optimization of extraction process of total flavonoids from *Prunus cerasifera* and its antibacterial effect[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2021, 40(11): 77-83.
- [26] SHI C, SUN Y, ZHENG Z W, et al. Antimicrobial activity of syringic acid against *Cronobacter sakazakii* and its effect on cell membrane[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197: 100-106.
- [27] JOSHI S S, HOWELL A B, D'SOUZA D H. *Cronobacter sakazakii* reduction by blueberry proanthocyanidins[J]. *Food Microbiology*, 2014, 39(5): 127-131.
- (上接第 45 页)
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 王丽艳, 王鑫森, 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.
- [24] 王丽艳, 孙强, 王鑫森, 等. 不同亚麻籽品种氨基酸含量测定及品质综合评价[J]. *食品与机械*, 2021, 37(9): 53-59, 72.
- WANG L Y, SUN Q, WANG X M, et al. Measurement of amino acid and comprehensive quality assessment of different flaxseed variety[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(9): 53-59, 72.
- [25] 王丽艳, 王鑫森, 荆瑞勇, 等. 市售 15 个产区黑木耳营养品质综合评价[J]. *食品与机械*, 2021, 37(5): 227-232.
- WANG L Y, WANG X M, JING R Y, et al. Comprehensive evaluation of nutrition quality of commercial *Auricularia auricular* from 15 production area[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(5): 227-232.
- [26] OOMAH B D, MAZZA G, KENASUHU E O. Flavonoid content of flaxseed. Influence of cultivar and environment[J]. *Euphytica*, 1996, 90(2): 163-167.
- [27] 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.