孙鹏, 李南, 李硕. 基于主成分分析和聚类分析对呼伦贝尔地区不同品种油菜籽品质的综合评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 292−302. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010250

SUN Peng, LI Nan, LI Shuo. Comprehensive Evaluation of the Quality of Different Rapeseed Varieties in the Hulunbuir Region Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 292−302. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010250

· 分析检测 ·

基于主成分分析和聚类分析对呼伦贝尔地区不同品种油菜籽品质的综合评价

孙 鹏[1,2,3,*], 李 南[1], 李 硕[2,3]

（1.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;
2.农业农村部农产品及加工品质量检验测试中心（大庆）, 黑龙江大庆 163319;
3.国家杂粮工程技术中心, 黑龙江大庆 163319）

摘 要: 本研究对呼伦贝尔地区不同品种的油菜籽品质特性进行系统研究，并建立其评价体系。本试验选取 10 个不同品种的油菜籽，研究不同品种油菜籽各项指标间的差异性。同时采用相关性分析、主成分分析和聚类分析对油菜籽进行综合性评价，并建立品质评价模型。研究结果表明，不同品种油菜籽关键品质指标存在差异性（$P<0.05$），且品质指标间变异系数各不相同，范围为 3.07%~91.67%。其中，甾醇、维生素 E 及矿物质元素等指标变异系数较大，表现出品种间明显的营养结构差异。相关性分析结果显示，部分成分之间具有较强的相关性。由主成分分析发现，不同品种油菜籽的品质评价指标可由 6 个主成分表示，其累计方差贡献率为 85.330%，能够反映原指标的大部分信息。其中，陇油 10 综合得分最高，其次为青杂 7 和青杂 15，这三个品种在含油量、矿物质元素及甾醇类物质方面表现突出。同时，结合聚类分析结果可知，可将 10 个不同品种的油菜籽分为 6 类，其中第Ⅰ类的青杂 15、青杂 7 和陇油 10 的综合品质最优秀。本研究结果可为呼伦贝尔地区不同品种油菜籽品质评价提供参考，并为优良品种的选择及油菜籽资源的区域产业化发展提供理论依据。

关键词: 呼伦贝尔, 油菜籽, 主成分分析, 聚类分析, 品质评价

中图分类号: S565.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002−0306(2026)03−0292−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010250 本文网刊:

Comprehensive Evaluation of the Quality of Different Rapeseed Varieties in the Hulunbuir Region Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

SUN Peng[1,2,3,*], LI Nan[1], LI Shuo[2,3]

（1.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
2.Agricultural Products and Processed Products Testing Center, Ministry of Agriculture, Daqing 163319, China;
3.National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163319, China）

Abstract: This study conducted a systematic analysis of the quality characteristics of different rapeseed varieties from the Hulunbuir region and established a comprehensive evaluation system. Ten rapeseed varieties were selected, and the differences among various quality indicators were examined. Comprehensive evaluation was performed using correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis, leading to the development of a quality assessment model. The results showed significant differences ($P<0.05$) in key quality indicators among the varieties, with coefficients of variation ranging from 3.07% to 91.67%. Substantial variation was observed in indicators such as sterols, vitamin E, and mineral elements, reflecting clear differences in nutritional composition among varieties. Correlation analysis revealed strong

收稿日期: 2025−01−23

基金项目: 黑龙江省农业品牌创建工程协同创新推广体系。

作者简介/通信作者*: 孙鹏（1982−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品品质鉴评, E-mail: byndsunpeng@163.com。

correlations between certain components. PCA extracted six principal components, explaining 85.330% of the total variance, effectively representing the majority of the original information. Among the tested varieties, Longyou 10 had the highest comprehensive score, followed by Qingza 7 and Qingza 15, which exhibited superior performance in oil content, mineral elements, and sterol composition. Cluster analysis divided the ten varieties into six groups, among which group I, consisting of Qingza 15, Qingza 7, and Longyou 10, demonstrated the best overall quality. Collectively, this study provides a reference for evaluating the quality of different rapeseed varieties in Hulunbuir and offers a scientific basis for the selection of superior varieties and the regional industrial development of rapeseed resources.

Key words: Hulunbuir; rapeseed; principal component analysis; cluster analysis; quality evaluation

油菜籽是全球四大主要油料作物之一，被广泛应用于食用油、饲料和生物能源等领域。在中国，油菜是种植面积最大、分布最广、产量最高的油料作物[1]。呼伦贝尔地区由于其高纬度、昼夜温差大、日照时间长、有效积温利用率高的特点，有利于油料作物脂肪的积累，使该地区的油菜籽在品质上具有独特优势。目前，该地区的油菜籽生产不仅满足了地方市场需求，还向国内其他地区进行调运和销售，成为当地经济增长的重要推动力[2]。因此，系统评估呼伦贝尔地区油菜籽品质特征，对于优化品种布局、提升产品附加值具有重要意义。

近年来，国内外关于油菜籽品质的研究逐渐增多，主要聚焦于品种改良、栽培方式优化及环境因素对油菜籽的影响等方面。例如，国内研究表明，气候条件显著影响冬油菜的生长发育与产量，主要体现在生长周期缩短、物候期提前等方面[3]。国外相关研究表明，通过对油菜籽在干旱胁迫下种子萌发率、根长及幼苗活力等关键性状的筛选，可有效实现抗旱品种的改良与选育[4]。此外，近年来针对油菜籽营养成分的研究也取得了一定进展，如不饱和脂肪酸、甾醇和维生素 E 等成分的健康益处得到了进一步验证。然而，现有研究多聚焦于单一成分或特定影响因素，缺乏基于同一区域、多个品种的系统性品质比较，尤其是在呼伦贝尔地区，不同品种油菜籽的营养与功能品质尚未得到充分研究限制了区域油菜籽产业的精细化管理与价值提升。

针对上述研究不足，本研究采用差异性分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析多种统计方法，对呼伦贝尔地区不同品种油菜籽的品质特性进行系统评估，旨在揭示品种间的质量差异，并为油菜产业的优化管理和可持续发展提供理论依据。通过本研究，期望能够为呼伦贝尔地区油菜籽品质的提升提供具体指导，同时为其他类似生态区的油菜产业发展提供参考，助力地方农业产业化的可持续发展。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

油菜籽样品采自呼伦贝尔东部地区　如表 1 所示，样品采集时间为 2023 年 7 月~8 月，采集地理位置海拔为 1400 m，气候条件相似，日照充足。采集后的样品用清水冲洗干净，晾干后分装于无菌密封袋中，存放于−20 ℃ 冰箱中备用；硝酸、硫酸、氢氧化钠、硼酸、硫酸铜五水化合物、硫酸钾、氯仿、石油醚、无水乙醚、95% 乙醇等分析纯试剂　国药集团化学试剂有限公司；甲醇、无水乙醇、四氢呋喃、正庚烷等色谱级试剂　麦克林国药集团化学试剂有限公司；甾醇系列标准品、维生素 E 标准品、脂肪酸甲酯标准品等色谱级试剂　天津阿尔塔科技有限公司。

表 1　呼伦贝尔市不同品种油菜籽样本数量统计
Table 1　Statistics of sample quantity of different varieties of rapeseed in Hulunbuir City

品种名称	采集地(呼伦贝尔)	采集时间
青杂12	陈巴尔虎旗	2023年7月
三沣66	牙克石市	2023年7月
青杂5	海拉尔区	2023年7月
青杂15	新巴尔虎右旗	2023年7月
青杂7	额尔古纳市	2023年7月
陇油10	新巴尔虎左旗	2023年8月
NM88	鄂温克族自治区	2023年8月
阳光85	扎赉诺尔区	2023年8月
青杂3	根河市	2023年8月
青杂6	扎兰屯市	2023年8月

AR2130 电子分析天平　澳豪斯国际贸易有限公司(上海)；HH-8 数显恒温水浴锅　上海力辰仪器科技有限公司；HGK-55 全自动凯氏定氮仪　上海赫冠仪器有限公司；DGG-9240A 电热恒温鼓风干燥箱　上海森信实验仪器有限公司；MFLX544-12 马弗炉　上海马弗炉科技仪器有限公司；e2695 高效液相色谱仪　美国 Waters 公司；QTrap6500 三重四极杆质谱仪　美国 AB 公司；7890B 气相色谱仪、Agilent 7800 电感耦合等离子体质谱仪　安捷伦科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　理化成分含量测定

1.2.1.1　含油量测定　采用残余法，参照农业行业标准 NY/T 1285-2007《油料种籽含油量的测定》[5] 对油菜籽含油量进行测定。

1.2.1.2　蛋白质含量测定　采用凯氏定氮法，参照国家标准 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》[6] 对油菜籽中的蛋白质含量进行测定。

1.2.1.3　脂肪含量测定　采用索氏提取法，参照国家标准 GB 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》[7] 对油菜籽中的脂肪含量进行测定。

1.2.1.4 灰分含量的测定 采用灼烧法,参照国家标准 GB 5009.4-2016《食品中灰分的测定》[8] 对油菜籽中的灰分含量进行测定。

1.2.1.5 硫苷含量的测定 采用高效液相色谱法,参照农业行业标准 NY/T 1582-2007《油菜籽中硫代葡萄糖苷的测定》[9] 对油菜籽中的硫苷含量进行测定。

1.2.2 矿物质元素和维生素 E 含量测定

1.2.2.1 矿物质元素的含量测定 参考罗银等[10] 的方法:称取约 1 g 油菜籽粉碎成细粉末,将粉碎后的油菜籽样品置于微波消解罐中,加入 6.0 mL 硝酸,加盖放置过夜,旋紧盖子,放于微波消解仪中消解。程序升温条件如下:a.控制温度 120 ℃,升温时间 5 min,恒温时间 5 min。b.控制温度 160 ℃,升温时间 5 min,恒温时间 10 min。c.控制温度 190 ℃,升温时间 5 min,恒温时间 25 min。消解完冷却后取出,将消化罐盖子打开,放入赶酸器中,于 100 ℃ 加热 10 min,用纯水将消解液转移定容至 25 mL,混匀备用,同时做空白试验。优化电感耦合等离子体质谱仪条件,用标准调谐液对仪器进行调谐,使仪器保持最佳状态,以元素特定质量数(质荷比,m/z)定性,采用外标法定量,以待测元素质谱信号与内标元素质谱信号的强度比与待测元素的浓度成正比进行定量分析。电感耦合等离子体质谱仪重要参数设置条件:射频功率 1500 W,载气流速 1 L/min,辅助气流量 1.2 L/min,等离子体气流量 15 L/min,模拟电压 1500 V,脉冲电压 1100 V。

1.2.2.2 维生素 E 含量的测定 采用高效液相色谱法,参照国家标准 GB 26635-2011《动植物油脂 生育酚及生育三烯酚含量测定》[11] 对油菜籽中的维生素 E 含量进行测定。

1.2.3 甾醇含量的测定 采用液相色谱-质谱法,参照国家标准 GB/T 39995-2021《甾醇类物质的测定》[12] 对油菜籽中的甾醇含量进行测定。

1.2.4 脂肪酸含量的测定 参考冶梓芩等[13] 的方法:称取约 1 g 油菜籽粉碎成细粉末。将粉碎后的油菜籽样品与 1 mL 氯仿溶剂混合。料液比大约为 1 g/mL。并通过超声波振荡的方式提取,提取时间为 1~2 h,直到脂肪酸从油菜籽中完全溶解到溶剂中。提取完成后,通过分液漏斗分离溶剂与水层,收集溶剂层,即为含脂肪酸的溶液。色谱柱采用 Wonda Cap WAX(60 m×0.25 mm×0.25 μm);进样口和检测器温度设为 250 ℃;载气为氮气,流速为 1 mL/min;分流比为 46∶1;进样量为 1 μL。升温程序设置为:100 ℃ 保持 13 min,随后以 10 ℃/min,升温至 180 ℃ 并保持 6 min,再以 1 ℃/min 升温至 200 ℃ 保持 20 min,最后以 4 ℃/min 升温至 230 ℃ 并维持 10.5 min。各脂肪酸采用外标法定量,所有脂肪酸均在相同的提取与色谱分析条件下测定,并通过建立标准曲线对峰面积进行定量分析。

1.3 数据处理

每个样品测定 3 个平行,通过 Microsoft Excel 2023 对数据进行整合,数据分析采用 IBM SPSS Statistics 27 进行方差分析、主成分分析、聚类分析。使用 Origin 2024b 绘制相关性热图。

2 结果与分析

2.1 不同品种油菜籽理化成分含量比较

由表 2 可知,不同油菜籽品种含油量、脂肪、蛋白质、灰分、硫苷及脂肪酸芥酸含量具有差异性。含油量为 40.39%~44.60%,脂肪含量为 31.62%~37.79%,蛋白质含量为 19.18%~22.16%,灰分含量为 4.53~5.03 g/100 g,硫苷含量为 21.00~65.73 μmol/g,芥酸含量为 0.08%~1.28%。主要成分的变异系数为 3.07%~91.67%,其中硫苷及芥酸含量的变异系数最大,表明其含量在不同品种之间差异较为明显。

表 2 不同品种油菜籽的理化成分差异分析

Table 2 Analysis of physicochemical differences among different rapeseed varieties

品种	含油量(%)	脂肪(%)	蛋白质(%)	灰分(g/100 g)	硫苷(μmol/g)	芥酸(%)
青杂12	43.57±0.82^{ab}	32.44±2.95^{bc}	19.18±0.84^{b}	4.87±0.38^{ab}	22.27±2.50^{c}	0.42±0.04^{b}
三沣66	43.11±0.77^{ab}	34.90±1.15^{ab}	20.28±1.13^{ab}	4.90±0.10^{ab}	21.66±1.49^{c}	0.11±0.04^{b}
青杂5	43.47±0.48^{ab}	37.79±6.382^{a}	20.40±1.25^{ab}	4.53±0.38^{b}	25.42±4.95^{abc}	0.14±0.13^{b}
青杂15	42.36±1.20^{abc}	32.52±3.22^{abc}	21.50±2.06^{ab}	4.80±0.20^{ab}	65.73±23.18^{a}	0.36±0.22^{b}
青杂7	41.40±0.74^{bc}	35.39±0.41^{ab}	21.71±0.65^{ab}	4.73±0.12^{ab}	33.92±8.67^{abc}	1.28±0.81^{a}
陇油10	44.60±2.22^{a}	37.06±1.29^{a}	20.02±1.84^{ab}	4.87±0.21^{ab}	47.22±33.26^{abc}	0.32±0.05^{b}
NM88	42.03±1.83^{abc}	35.23±1.37^{ab}	20.90±1.86^{ab}	4.60±0.20^{ab}	26.48±2.57^{abc}	0.08±0.03^{b}
阳光85	44.21±2.40^{a}	36.76±1.76^{ab}	19.56±1.33^{ab}	4.57±0.12^{ab}	21.00±1.53^{c}	0.20±0.13^{b}
青杂3	42.27±0.89^{abc}	32.42±0.99^{abc}	22.16±0.83^{a}	5.03±0.32^{a}	52.79±24.85^{ab}	0.32±0.16^{b}
青杂6	40.39±0.27^{c}	31.62±0.93^{bc}	21.73±1.16^{ab}	4.87±0.31^{ab}	29.97±5.74^{abc}	0.36±0.35^{b}
均值	42.74	34.61	20.74	4.78	34.65	0.36
最大值	44.60	37.79	22.16	5.03	65.73	1.28
最小值	40.39	31.62	19.18	4.53	21.00	0.08
标准差	1.31	2.14	0.96	0.16	15.70	0.33
变异系数(%)	3.07	6.18	4.63	3.35	45.31	91.67

注:同列相同的字母表示差异不显著(P>0.05),不同的字母表示差异显著(P<0.05),表3~表8同。

油菜籽中的含油量和脂肪是衡量营养价值和经济效益的重要指标，10 个品种中含油量最高的是陇油 10，最低的品种为青杂 6，平均值为 42.74%。脂肪含量最高的品种是青杂 5，最低的品种为青杂 6，平均值为 34.61%。蛋白质含量最高的品种是青杂 3，最低的品种是青杂 12，平均值为 20.74%。灰分反映无机盐和矿物质水平，含量最高的品种是青杂 3，最低的品种是青杂 5，平均值为 4.78 g/100 g。

双低油菜籽和常规油菜籽之间的主要区别在于它们各自的芥酸和硫苷含量[14]。根据农业行业标准 NY/T 1795-2009《双低油菜籽等级规范》[15] 和 NY 414-2000《低油酸低芥酸菜籽》[16] 的规定，样品被划分为五个等级。具体标准如下：第一等级要求含油量不低于 43%、硫苷含量不超过 35 μmol/g、芥酸含量不超过 3%；第二等级要求含油量不低于 42%、硫苷含量不超过 35 μmol/g、芥酸含量不超过 3%；第三等级要求含油量不低于 41%、硫苷含量不超过 45 μmol/g、芥酸含量不超过 5%；第四等级要求含油量不低于 39%、硫苷含量不超过 45 μmol/g、芥酸含量不超过 5%；第五等级要求含油量不低于 37%、硫苷含量不超过 45 μmol/g、芥酸含量不超过 5%。根据这些分级标准，在本研究中，青杂 12、三汪 66、青杂 5 和阳光 85 的含油量、硫苷含量和芥酸含量均符合第一等级要求，因此被划分为第一等级；NM88 符合第二等级标准，因而被划分为第二等级；青杂 7 符合第三等级要求，故被划分为第三等级。然而，青杂 15、陇油 10 和青杂 3 的硫苷含量分别为 65.73、47.22 和 52.79 μmol/g，均超过 35 μmol/g 的限制，因此不符合双低油菜籽标准，未纳入分级。硫苷含量未能符合标准，可能与遗传背景和环境因素的共同作用有关。

综合比较发现，陇油 10 的含油量最高，经济效益优越；青杂 5 脂肪含量最高，营养价值较高；青杂 3 在蛋白质和灰分含量方面表现突出，品质稳定；青杂 12、三汪 66、青杂 5 和阳光 85 的含油量、硫苷及芥酸含量均符合双低油菜籽第一等级标准，具有良好的开发潜力。在满足双低标准前提下，优选含油量高、脂肪丰富且抗营养因子含量低的品种，将有助于高品质健康型植物油的选育与推广；硫苷超标品种可作为育种改良材料进一步利用。

2.2　不同品种油菜籽矿物质与维生素 E 成分分析

由表 3 可知，不同油菜籽品种钾、钙、铁、钠含量具有差异性。钾含量为 6355.88~9519.75 mg/100 g、钙含量为 2186.80~3671.35 mg/100 g、铁含量为 124.41~424.53 mg/100 g、钠含量为 1.98~3.96 mg/100 g。主要成分的变异系数 13.98%~39.31%，说明不同成分在不同品种中的变异程度不同。其中，铁的变异系数最大，表明其含量在不同品种之间差异最为显著。

矿物质元素是维持植物正常代谢所必需的营养元素[17]。10 个品种中钾含量最高的是青杂 7，最低的品种为青杂 12，平均值为 8173.28 mg/100 g。钙含量最高的品种是青杂 6，最低的品种为青杂 12，平均值为 2895.81 mg/100 g。铁含量最高的品种为青杂 6 号，最低的品种为青杂 5，平均值为 221.24 mg/100 g。钠含量最高的品种是陇油 10，最低的品种为三汪 66，平均值为 2.84 mg/100 g。

表 3　不同品种油菜籽的矿物质差异分析

Table 3　Analysis of mineral differences among different rapeseed varieties

品种	钾 (mg/100 g)	钙 (mg/100 g)	铁 (mg/100 g)	钠 (mg/100 g)
青杂12	6355.88±23.11^{f}	2186.80±40.86^{f}	240.91±32.85^{c}	2.22±0.76^{ab}
三汪66	7757.03±104.50^{cd}	2803.87±69.71^{cd}	220.31±21.73^{cd}	1.98±0.37^{b}
青杂5	9489.98±17.07^{a}	3285.06±42.59^{b}	124.41±13.66^{g}	3.02±0.36^{ab}
青杂15	7678.24±48.08^{cd}	3065.41±111.52^{c}	230.41±34.76^{c}	2.63±0.79^{ab}
青杂7	9519.75±54.81^{a}	3097.66±48.65^{c}	282.18±35.99^{b}	3.37±0.78^{ab}
陇油10	8957.18±32.20^{b}	3254.10±48.40^{b}	146.23±28.13^{g}	3.96±1.89^{a}
NM88	8712.70±16.25^{bc}	2362.89±95.77^{ef}	206.04±17.69^{de}	3.18±1.22^{ab}
阳光85	7051.67±21.39^{e}	3129.17±36.04^{bc}	173.52±27.99^{ef}	2.15±0.58^{ab}
青杂3	7476.82±62.44^{de}	2601.58±33.24^{de}	163.88±47.53^{fg}	2.45±1.00^{ab}
青杂6	8733.59±23.11^{bc}	3671.35±84.55^{a}	424.53±46.83^{a}	3.46±0.79^{ab}
均值	8173.28	2895.81	221.24	2.84
最大值	9519.75	3671.35	424.53	3.96
最小值	6355.88	2186.80	124.41	1.98
标准差	1142.37	475.28	86.96	0.70
变异系数(%)	13.98	16.41	39.31	24.65

维生素 E(V_E)又名生育酚，是生育酚和生育三烯酚的总称，自然存在的维生素 E 包含 α、β、γ、δ-生育酚和 α、β、γ、δ-生育三烯酚这 8 种类型[18]；油菜中的维生素 E 主要以 α-生育酚(α-T)和 γ-生育酚(γ-T)为主，而 δ、β-生育酚(δ、β-T)含量较少，不足 1%[19]。

表 4　不同品种油菜籽的维生素 E 成分差异分析

Table 4　Analysis of vitamin E component differences among different rapeseed varieties

品种	α-T (mg/100 g)	γ-T (mg/100 g)	δ-T (mg/100 g)	V_E的含量 (mg/100 g)	α-T/γ-T
青杂12	7.25±0.17^{bc}	15.15±0.73^{cd}	1.40±0.33^{cd}	23.80±0.95^{d}	0.48±0.03^{bcd}
三汪66	7.17±0.52^{bc}	16.04±1.29^{bcd}	2.60±0.25^{ab}	25.81±1.39^{d}	0.45±0.05^{bcd}
青杂5	8.21±1.57^{b}	18.32±1.78^{ab}	2.95±1.37^{a}	29.48±1.70^{ab}	0.45±0.09^{bcd}
青杂15	7.90±1.06^{b}	14.66±1.79^{de}	1.73±0.73^{bc}	24.29±1.64^{d}	0.55±0.10^{ab}
青杂7	7.36±0.46^{bc}	18.52±1.11^{a}	2.91±0.31^{a}	28.79±1.51^{bc}	0.40±0.03^{d}
陇油10	6.30±0.22^{c}	12.31±1.50^{e}	1.32±0.23^{cd}	19.93±1.30^{e}	0.52±0.07^{abc}
NM88	7.71±0.41^{b}	15.24±0.83^{cd}	2.67±1.01^{ab}	25.62±1.93^{d}	0.51±0.02^{abc}
阳光85	7.47±0.70^{bc}	17.37±2.08^{abc}	1.12±0.20^{cd}	25.96±2.36^{d}	0.43±0.04^{cd}
青杂3	11.48±0.95^{a}	19.66±0.62^{a}	0.58±0.04^{d}	31.72±1.09^{a}	0.58±0.05^{a}
青杂6	8.10±0.62^{b}	18.01±1.01^{ab}	0.39±0.13^{d}	26.50±1.43^{cd}	0.45±0.03^{bcd}
均值	7.80	16.49	1.75	25.59	0.48
最大值	11.48	19.66	2.95	31.72	0.58
最小值	6.30	12.31	0.39	19.93	0.40
标准差	1.34	2.35	0.98	3.25	0.05
变异系数(%)	17.20	14.30	56.00	12.70	10.4

本研究共检测到四种生育酚，其中 β-T 含量极低，在样品检测中低于检出限，因此在数据分析中予以忽略。由表 4 可知，不同油菜籽品种的维生素 E 含量具有差异性。α-T 含量为 6.30~11.48 mg/100 g、γ-T 含量为 12.31~19.66 mg/100 g、δ-T 含量为 0.39~2.95 mg/100 g、V_E 的含量为 19.93~31.72 mg/100 g、α-T/γ-T 的数值为 0.40~0.58。油菜籽中高 V_E 含量和高 α-T/γ-T 比率是油菜籽品种评价的重要指标[20]。10 个品种中 V_E 的含量以及 α-T/γ-T 比率最高的品种是青杂 3。

综合比较发现，青杂 7 在钾含量上表现最为突出，表明营养物质积累能力强；青杂 6 在钙和铁含量方面均为最高，具有较高的营养价值；陇油 10 的钠含量最高，而三沣 66 最低，可作为低钠品种的参考材料；青杂 3 的维生素 E 含量最高，抗氧化能力最显著。因此，优选矿物质元素丰富且维生素 E 含量高的品种，有助于开发高营养、抗氧化型植物油产品，为油菜籽资源的品质提升和功能利用提供理论依据。

2.3 不同品种油菜籽甾醇含量比较

由表 5 可知，不同油菜籽品种中甾醇类成分含量具有差异性。菜籽甾醇含量为 348.32~893.27 mg/kg，麦角甾醇含量为 3.23~8.67 mg/kg，菜油甾醇含量为 508.72~1784.20 mg/kg，豆甾醇含量为 5.01~24.71 mg/kg，β-谷甾醇为 1320.15~3641.60 mg/kg，豆烷甾醇为 6.74~63.00 mg/kg，胆固醇含量为 5.33~23.02 mg/kg。主要成分的变异系数在 27.02%~75.96% 之间，其中豆烷甾醇的变异系数最大，说明该成分在不同品种中差异最为明显。

甾醇类化合物是评价油脂营养价值和功能活性的关键指标[21]，具有降血脂、抗氧化和调节免疫等多种生理活性[22]。10 个品种中菜籽甾醇含量最高的品种是青杂 15，最低的品种是三沣 66，平均值为 636.57 mg/kg。麦角甾醇含量最高的品种是青杂 15，最低的品种是青杂 3，平均值为 6.11 mg/kg。菜油甾醇含量最高的品种是青杂 5，最低的品种是三沣 66，平均值为 1166.89 mg/kg。豆甾醇含量最高的品种是青杂 12，最低的品种是青杂 3，平均值为 16.47 mg/kg。β-谷甾醇是油菜籽中含量最多的一类甾醇：在青杂 15 中含量最高，在三沣 66 中含量最低，平均值为 2678.59 mg/kg；豆烷甾醇含量差异最显著，最高的品种是陇油 10，最低的品种是三沣 66，平均值为 20.13 mg/kg。相对而言，胆固醇作为动物来源的固醇，高胆固醇水平与心血管疾病风险的增加密切相关[23]。因此，其含量越低越有利于人体健康。含量最高的品种是青杂 5，最低的是三沣 66，平均值为 11.71 mg/kg。

综合比较发现，青杂 15 在 β-谷甾醇、菜籽甾醇、麦角甾醇等多项成分上表现突出，且胆固醇含量处于中低水平；青杂 5 菜油甾醇含量最高，功能性强；三沣 66 虽甾醇总量较低，但其胆固醇含量最低，适合作为低胆固醇研究参考品种。因此，优选甾醇含量高且胆固醇含量低的品种对开发高品质、健康型植物油具有重要意义。

2.4 不同品种油菜籽饱和脂肪酸含量比较

由表 6 可知，10 个品种之间的大部分饱和脂肪酸含量差异不显著。肉豆蔻酸含量为 0.02%~0.05%，棕榈酸为 3.63%~17.95%，十七烷酸为 0.01%~0.06%，硬脂酸为 1.44%~2.59%，花生酸为 0.58%~1.22%，山俞酸为 0.06%~0.22%，木焦油酸为 0.06%~0.10%。各成分的变异系数为 11.11%~93.95%，其中棕榈酸的变异系数最大，说明其含量在不同品种间差异最为显著。

肉豆蔻酸是短链脂肪酸，含量最高的品种是青杂 6 号，最低的品种是三沣 66，平均值为 0.04%。棕榈酸含量最高的品种是青杂 12，最低的品种是青杂 15，平均值为 4.79%。十七烷酸作为奇数碳链脂肪

表 5 不同品种油菜籽的甾醇差异分析

Table 5 Analysis of sterol differences among different rapeseed varieties

品种	菜籽甾醇(mg/kg)	麦角甾醇(mg/kg)	菜油甾醇(mg/kg)	豆甾醇(mg/kg)	β-谷甾醇(mg/kg)	豆烷甾醇(mg/kg)	胆固醇(mg/kg)
青杂12	802.78±5.24^{c}	8.07±0.75^{b}	1684.01±3.97^{a}	24.71±2.82^{a}	3194.71±5.50^{c}	16.78±2.75^{ab}	15.32±2.93^{b}
三沣66	348.32±2.70^{j}	5.92±0.22^{j}	508.72±7.11^{b}	8.25±0.78^{g}	1320.15±19.10^{g}	6.74±1.28^{b}	5.33±0.95^{g}
青杂5	892.13±4.75^{b}	4.86±0.96^{f}	1784.20±10.07^{a}	24.01±1.52^{a}	3412.23±117.78^{b}	17.59±0.25^{ab}	23.02±0.80^{a}
青杂15	893.27±4.20^{a}	8.67±0.44^{a}	1704.10±7.89^{b}	22.33±0.37^{b}	3641.60±5.85^{a}	19.67±1.42^{a}	13.50±1.62^{c}
青杂7	597.05±3.17^{f}	5.88±0.29^{e}	1016.40±8.88^{d}	16.61±0.38^{d}	1525.18±20.30^{f}	16.11±1.65^{ab}	15.13±0.61^{b}
陇油10	477.60±2.35^{i}	5.62±0.64^{d}	1268.46±58.20^{e}	18.33±0.95^{c}	2830.44±13.36^{d}	63.00±82.49^{a}	11.72±1.11^{d}
NM88	535.09±1.70^{g}	7.05±0.26^{c}	1211.94±10.48^{f}	11.86±0.77^{f}	2003.24±2.99^{e}	12.11±1.82^{b}	6.24±0.86^{f}
阳光85	704.60±5.21^{d}	4.56±0.33^{f}	778.25±3.20^{d}	17.61±0.64^{d}	3556.55±22.66^{a}	16.03±1.89^{ab}	11.61±0.42^{d}
青杂3	617.46±3.03^{e}	3.23±0.90^{g}	603.35±3.02^{i}	5.01±0.84^{h}	3181.97±3.17^{c}	16.72±2.76^{ab}	9.50±0.51^{e}
青杂6	498.36±6.01^{h}	7.20±0.69^{c}	1108.42±7.10^{i}	15.98±1.43^{e}	2120.83±10.99^{e}	11.92±0.82^{b}	6.77±0.11^{f}
均值	636.57	6.11	1166.89	16.47	2678.59	20.13	11.71
最大值	893.27	8.67	1784.20	24.71	3641.60	63.00	23.02
最小值	348.32	3.23	508.72	5.01	1320.15	6.74	5.33
标准差	172.01	1.74	434.89	6.68	881.34	15.29	5.34
变异系数(%)	27.02	28.48	37.27	40.56	32.90	75.96	45.60

表 6　不同品种油菜籽的饱和脂肪酸差异分析

Table 6　Analysis of saturated fatty acid differences among different rapeseed varieties

品种	肉豆蔻酸(%)	棕榈酸(%)	十七烷酸(%)	硬脂酸(%)	花生酸(%)	山俞酸(%)	木焦油酸(%)
青杂12	0.04±0.04^{a}	17.95±22.92^{a}	0.01±0.02^{c}	1.44±0.18^{a}	0.58±0.55^{b}	0.06±0.10^{d}	0.10±0.11^{a}
三沣66	0.02±0.02^{a}	3.86±0.19^{b}	0.03±0.00^{b}	2.15±0.36^{a}	0.98±0.01^{a}	0.20±0.01^{abc}	0.09±0.01^{a}
青杂5	0.04±0.01^{a}	3.80±0.14^{b}	0.03±0.00^{b}	2.59±0.07^{a}	0.97±0.26^{a}	0.21±0.03^{ab}	0.09±0.00^{a}
青杂15	0.04±0.00^{a}	3.63±0.05^{b}	0.03±0.01^{b}	2.16±0.74^{a}	1.12±0.10^{a}	0.22±0.02^{a}	0.10±0.00^{a}
青杂7	0.04±0.01^{a}	3.85±0.22^{b}	0.03±0.01^{b}	2.09±0.65^{a}	1.12±0.06^{a}	0.20±0.02^{abc}	0.09±0.01^{a}
陇油10	0.04±0.01^{a}	3.70±0.08^{b}	0.03±0.01^{b}	2.28±0.75^{a}	1.11±0.08^{a}	0.15±0.01^{abcd}	0.07±0.00^{a}
NM88	0.04±0.00^{a}	3.70±0.23^{b}	0.05±0.02^{ab}	1.54±0.61^{a}	0.89±0.03^{ab}	0.13±0.02^{bcd}	0.06±0.00^{a}
阳光85	0.04±0.01^{a}	3.73±0.27^{b}	0.05±0.01^{a}	1.67±1.18^{a}	1.05±0.03^{a}	0.13±0.00^{bcd}	0.09±0.03^{a}
青杂3	0.04±0.00^{a}	3.84±0.08^{b}	0.06±0.01^{a}	1.72±0.94^{a}	1.22±0.20^{a}	0.16±0.06^{abc}	0.08±0.03^{a}
青杂6	0.05±0.00^{a}	3.80±0.17^{b}	–	1.59±0.19^{a}	1.10±0.15^{a}	0.12±0.09^{cd}	0.10±0.04^{a}
均值	0.04	4.79	0.04	1.92	1.01	0.15	0.09
最大值	0.05	17.95	0.06	2.59	1.22	0.22	0.10
最小值	0.02	3.63	0.01	1.44	0.58	0.06	0.06
标准差	0.01	4.50	0.01	0.38	0.19	0.05	0.01
变异系数(%)	25.00	93.95	25.00	19.79	18.81	33.33	11.11

注: “–”表示含量<0.00066, 未检出。

酸, 含量最高的品种是青杂 3, 最低的品种是青杂 12, 平均值为 0.04%。硬脂酸是细胞膜重要组分, 含量最高的品种是青杂 5, 最低的是青杂 12, 平均值为 1.92%。花生酸具有调节血脂功能, 含量最高的品种是青杂 3, 最低的是青杂 12, 平均值为 1.01%。山俞酸和木焦油酸均属于长链脂肪酸, 其中山俞酸在青杂 15 中含量最高, 平均值为 0.15%; 木焦油酸在青杂 12、青杂 15 与青杂 6 号之间含量无显著差异, 平均值为 0.09%。

尽管饱和脂肪酸是油菜籽油脂的重要组成成分, 其在植物体内主要承担能量储存与细胞膜稳定的生理功能[24], 但目前普遍认为过量摄入饱和脂肪酸对人体健康有负面影响[25]。因此, 适量摄入饱和脂肪酸对于维持健康至关重要。综合比较发现, 青杂 12 在棕榈酸含量上显著高于其他品种(P<0.05), 而十七烷酸、硬脂酸、花生酸和山俞酸含量较低; 青杂 5 的硬脂酸含量最高, 而青杂 3 的花生酸含量最高; 青杂 15 和青杂 5 在山俞酸含量上表现突出。因此, 在植物油生产中, 选择饱和脂肪酸含量较低的品种可能更有利于健康, 而高饱和脂肪酸品种需谨慎使用。这为油菜籽资源的品质优化和健康食用油开发提供了重要参考依据。

2.5　不同品种油菜籽不饱和脂肪酸含量比较

不饱和脂肪酸主要分为单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸[26]。由表 7 和表 8 可知, 不同油菜籽品种的单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸含量部分存在差异。在单不饱和脂肪酸中, 棕榈油酸含量为 0.14%~0.21%, 油酸含量为 58.44%~65.24%, 花生一烯酸含量为 58.44%~65.41%, 二十二碳一烯酸含量为 0.01%~0.07%, 十七碳一烯酸含量为 0.08%~

表 7　不同品种油菜籽的单不饱和脂肪酸含量差异分析

Table 7　Analysis of monounsaturated fatty acid content differences among different rapeseed varieties

品种	棕榈油酸(%)	油酸(%)	花生一烯酸(%)	二十二碳一烯酸(%)	十七碳一烯酸(%)
青杂12	0.17±0.17^{a}	58.44±4.82^{b}	58.44±4.82^{a}	0.01±0.01^{c}	0.36±0.35^{a}
三沣66	0.16±0.01^{a}	62.73±2.32^{ab}	63.45±2.78^{a}	0.02±0.01^{bc}	0.10±0.00^{b}
青杂5	0.15±0.018^{a}	63.47±1.94^{a}	63.47±1.94^{a}	0.03±0.02^{abc}	0.09±0.01^{b}
青杂15	0.14±0.01^{a}	62.68±1.21^{ab}	62.68±1.22^{a}	0.03±0.01^{abc}	0.09±0.01^{b}
青杂7	0.16±0.00^{a}	60.92±1.83^{ab}	61.91±0.85^{a}	0.05±0.03^{ab}	0.09±0.01^{b}
陇油10	0.16±0.02^{a}	62.13±2.14^{ab}	62.13±2.14^{a}	0.07±0.02^{a}	0.08±0.02^{b}
NM88	0.17±0.00^{a}	65.24±2.24^{a}	65.41±3.14^{a}	0.04±0.01^{ab}	0.08±0.01^{b}
阳光85	0.16±0.02^{a}	62.82±2.54^{ab}	62.81±2.54^{a}	0.01±0.02^{c}	0.09±0.02^{b}
青杂3	0.17±0.01^{a}	61.43±1.61^{ab}	61.43±1.61^{a}	0.05±0.01^{ab}	0.09±0.02^{b}
青杂6	0.21±0.05^{a}	62.91±0.81^{ab}	62.91±0.81^{a}	0.06±0.05^{ab}	0.14±0.12^{b}
均值	0.17	62.30	62.56	0.04	0.11
最大值	0.21	65.24	65.41	0.07	0.36
最小值	0.14	58.44	58.44	0.01	0.08
标准差	0.02	1.76	2.00	0.02	0.09
变异系数(%)	11.52	2.83	3.19	51.35	76.58

表 8 不同品种油菜籽的多不饱和脂肪酸含量差异分析

Table 8 Analysis of polyunsaturated fatty acid content differences among different rapeseed varieties

品种	亚油酸(%)	亚麻酸(%)	花生二烯酸(%)	二十二碳二烯酸(%)
青杂12	21.64±2.50^{a}	8.80±0.64^{ab}	0.02±0.04^{a}	0.03±0.05^{b}
三沣66	18.77±1.03^{ab}	9.66±0.52^{ab}	0.05±0.00^{a}	0.09±0.01^{a}
青杂5	18.42±0.99^{b}	9.11±0.52^{ab}	0.03±0.03^{a}	0.07±0.01^{a}
青杂15	18.40±0.33^{b}	9.99±0.64^{a}	0.06±0.01^{a}	0.09±0.01^{a}
青杂7	19.45±1.74^{ab}	9.74±0.83^{ab}	0.07±0.01^{a}	0.08±0.01^{a}
陇油10	18.87±1.77^{ab}	10.03±0.75^{a}	0.07±0.04^{a}	0.08±0.02^{a}
NM88	18.66±1.05^{b}	8.41±0.49^{b}	0.06±0.04^{a}	0.09±0.01^{a}
阳光85	19.10±2.44^{ab}	9.91±1.01^{a}	0.08±0.05^{a}	0.08±0.01^{a}
青杂3	19.90±0.95^{ab}	9.97±1.42^{a}	0.05±0.05^{a}	0.09±0.01^{a}
青杂6	19.24±0.90^{ab}	9.23±0.13^{ab}	0.05±0.09^{a}	0.10±0.00^{a}
均值	19.35	9.49	0.06	0.08
最大值	21.64	10.03	0.08	0.10
最小值	18.40	8.41	0.02	0.03
标准差	1.04	0.57	0.02	0.02
变异系数(%)	5.38	6.05	35.19	23.75

0.36%。在多不饱和脂肪酸中，亚油酸含量为 18.40%~21.64%，亚麻酸为 8.41%~10.03%，花生二烯酸为 0.02%~0.08%，二十二碳二烯酸为 0.03%~0.10%。主要成分的变异系数为 2.83%~76.58%，其中十七碳一烯酸和花生二烯酸的变异系数分别在单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸中最大。

在单不饱和脂肪酸中，油酸是主要成分，具有降低低密度脂蛋白的作用[27]，其含量最高的品种是 NM88，最低的品种是青杂 12，平均值为 62.30%。棕榈油酸含量最高的品种是青杂 6，最低的品种是青杂 15，平均值为 0.17%。在多不饱和脂肪酸中，亚油酸是必需脂肪酸，对心血管健康有益[28]，含量最高的品种是青杂 12，最低的品种是青杂 15，平均值为 19.345%。亚麻酸具有抗炎作用，含量最高的品种是陇油 10，最低的品种是 NM88，平均值为 9.49%。花生二烯酸和二十二碳二烯酸含量较低，且各品种油菜籽间的差异未达到统计学显著性。

总体而言，油菜籽中油酸、亚油酸和亚麻酸是最主要的不饱和脂肪酸，尤其是油酸含量丰富的油菜籽在营养脂质结构上具有良好基础，具备作为健康植物油开发原料的潜力。

2.6 不同品种油菜籽各成分相关性分析

对 10 个油菜籽品种的 34 种成分含量进行皮尔逊相关性分析，结果如图 1 所示。相关性热图以颜色深浅表示相关系数大小，红色代表正相关，蓝色代表负相关，分析显示，不同成分间存在显著或极显著的协同或拮抗关系。其中，硫苷与蛋白质、花生酸、二十二碳一烯酸；芥酸与花生一烯酸、胆固醇、菜油甾醇、豆烷甾醇、豆甾醇、花生一烯酸；棕榈酸与棕榈油酸、亚油酸、十七碳一烯酸；钠与钾；铁与麦角甾

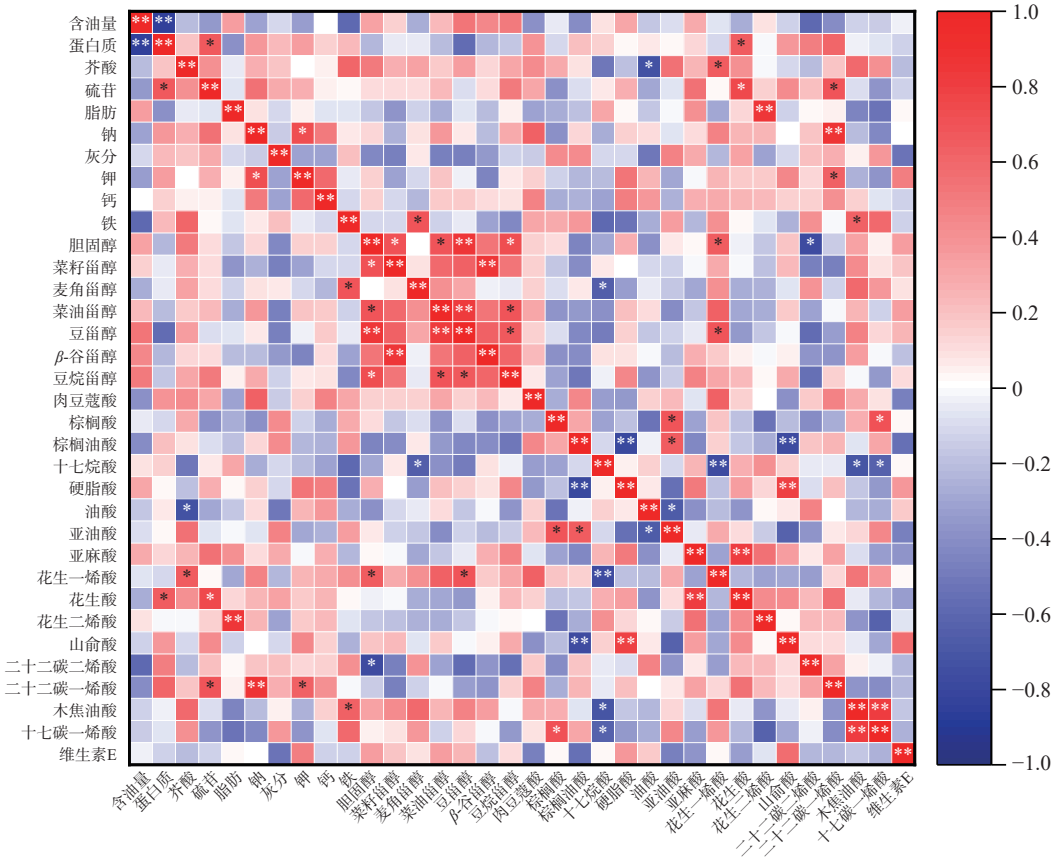


图 1 油菜籽各组分相关分析热图

Fig.1 Heatmap of correlation analysis of components in rapeseed

注：*为 P<0.05；**为 P<0.01。

醇、木焦油酸呈正相关，其中部分相关性达到显著水平（$P<0.05$）。结果表明，硫苷含量较高的油菜品种可能具有较高的蛋白质水平，同时伴随特定脂肪酸的积累，这可能影响品种的营养价值和风味特征。芥酸含量较高的品种可能伴随甾醇类物质的增加，而甾醇作为重要的生物活性成分，可能影响油脂的氧化稳定性及功能特性。棕榈酸含量较高的品种可能具有更高的不饱和脂肪酸水平，这对于提高油品的营养品质可能具有一定的积极作用。矿物元素的积累可能与甾醇的代谢有关。另外，脂肪与花生二烯酸；钠与二十二碳一烯酸；胆固醇与豆甾醇；β-谷甾醇与菜籽甾醇；山俞酸与硬脂酸呈极显著正相关（$P<0.01$）。结果表明，油菜籽中的脂肪酸、甾醇及矿物元素在代谢和积累过程中可能具有共同的生物合成途径或调控机制。这些成分的协同变化不仅影响油脂的营养价值和氧化稳定性，还可能对品种的选择和改良提供重要依据。因此，这些发现为油菜品种的品质评价和选育提供了有力支持，未来可进一步探究其代谢机制，以优化油菜品种的脂质组成，提升油品的营养价值和市场竞争力。

综合上述分析结果，发现不同品种的油菜籽中的指标之间具有一定的相关性，且各指标测定值所呈现的信息出现重叠现象，因此可进行主成分分析和聚类分析，通过降维的思维来简化数据，进而提高评价的精准性。

2.7　不同品种油菜籽主成分分析

主成分分析是一种常用于数据降维的多变量统计方法，能够在减少变量数量的同时最大程度保留原始信息，将具有相关性的多个变量简化为少数独立的综合变量，从而有效地将数据可视化[29]。由于不同品种油菜籽的品质指标之间存在差异，为了消除各数据之间量纲对结果产生的影响，需要对各数据进行标准化处理[30]。根据特征值大于 1，对 10 个品种的 34 个指标进行主成分分析。根据表 9 和图 2 所示，共提取出 6 个主成分，每个主成分的特征值分别为 9.238、6.116、5.06、3.529、2.777、2.292，累计贡献率达 85.330%。

为了更清晰地揭示各指标与主成分因子之间的关系，得到因子载荷矩阵[31]。如表 10 所示，载荷值为正值表示该指标对主成分的影响是正向的，为负值则为负向的影响，载荷值绝对值越大表明对该主成分的影响越深[32]。因此，选择载荷绝对值大于 0.6 的指标为解释指标，主成分 1 主要代表的物质是豆甾醇、

表 9　主成分的特征值与方差贡献率

Table 9　Eigenvalue and contribution rate of principal components

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差百分比（%）	累计百分比（%）	合计	方差百分比（%）	累计百分比（%）
1	9.238	27.170	27.170	9.238	27.170	27.170
2	6.116	17.987	45.157	6.116	17.987	45.157
3	5.060	14.881	60.038	5.060	14.881	60.038
4	3.529	10.381	70.419	3.529	10.381	70.419
5	2.777	8.168	78.588	2.777	8.168	78.588
6	2.292	6.742	85.330	2.292	6.742	85.330

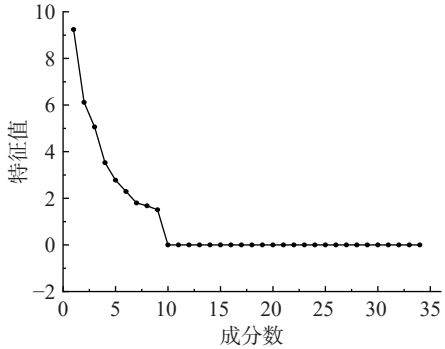


图 2　油菜籽各组分碎石图

Fig.2　Crushed stone diagram of various components in rapeseed

表 10　主成分因子载荷矩阵

Table 10　Principal component factor load matrix

指标	主成分					
	1	2	3	4	5	6
含油量（X1）	−0.221	−0.747	−0.255	0.263	0.375	0.009
蛋白质（X2）	0.567	0.42	0.295	0.097	−0.43	−0.03
芥酸（X3）	−0.004	0.277	0.327	0.217	−0.083	0.658
硫苷（X4）	0.338	−0.063	0.304	0.66	−0.229	−0.043
脂肪（X5）	0.325	0.04	−0.513	0.201	0.477	0.268
钠（X6）	0.351	0.275	0.638	0.052	0.501	0.11
灰分（X7）	−0.005	0.467	−0.298	0.568	−0.225	0.27
钾（X8）	0.55	0.041	0.631	−0.327	0.268	0.237
钙（X9）	0.313	0.502	0.537	0.018	−0.056	−0.195
铁（X10）	−0.083	0.899	0.188	−0.166	−0.2	0.066
胆固醇（X11）	−0.397	−0.554	0.63	0.081	−0.065	0.105
菜籽甾醇（X12）	−0.506	−0.473	0.483	0.14	−0.303	−0.311
麦角甾醇（X13）	−0.421	0.268	0.269	−0.236	−0.021	0.078
菜油甾醇（X14）	−0.533	−0.255	0.711	−0.079	0.129	−0.117
豆甾醇（X15）	−0.609	−0.279	0.644	0.008	0.132	−0.021
β-谷甾醇（X16）	−0.347	−0.478	0.22	0.507	−0.083	−0.581
豆烷甾醇（X17）	0.148	−0.209	0.248	0.571	0.666	0.145
肉豆蔻酸（X18）	−0.147	0.411	0.58	0.256	0.24	−0.478
棕榈酸（X19）	−0.956	0.081	−0.166	0.084	0.079	0.153
棕榈油酸（X20）	−0.065	0.904	−0.074	−0.098	0.163	−0.237
十七烷酸（X21）	0.48	−0.502	−0.444	0.128	0.011	−0.236
硬脂酸（X22）	0.372	−0.579	0.498	−0.019	−0.106	0.352
油酸（X23）	0.668	−0.136	0.086	−0.52	0.122	−0.466
亚油酸（X24）	−0.777	0.31	−0.295	0.307	0.03	0.181
亚麻酸（X25）	0.463	−0.183	−0.016	0.721	−0.274	0.197
花生一烯酸（X26）	−0.742	0.288	0.546	0.034	0.177	0.083
花生酸（X27）	0.867	0.058	0.193	0.369	−0.213	−0.067
花生二烯酸（X28）	0.701	−0.018	−0.108	0.222	0.237	0.004
山俞酸（X29）	0.612	−0.403	0.358	−0.099	−0.468	0.301
二十二碳二烯酸（X30）	0.889	0.257	0.079	−0.16	−0.134	−0.192
二十二碳一烯酸（X31）	0.556	0.441	0.393	0.288	0.37	0.116
木焦油酸（X32）	−0.475	0.187	0.264	0.113	−0.666	0.08
十七碳一烯酸（X33）	−0.953	0.231	−0.126	0.058	0.021	0.108
维生素E（X34）	0.105	−0.491	0.156	−0.671	0.003	0.483

表 11 不同品种油菜籽品质综合得分及排名

Table 11 Comprehensive score and ranking of different varieties of rapeseed quality

品种	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y	排名
青杂12	−2.667	−0.492	−0.625	0.370	0.021	0.279	−0.807	7
三沣66	0.649	−0.182	−1.443	−1.057	−0.998	1.049	−1.406	9
青杂5	−0.467	2.015	0.999	−0.999	−0.027	−0.477	0.251	4
青杂15	0.145	0.720	0.849	0.587	−1.144	−0.133	0.275	3
青杂7	0.358	−0.246	0.684	0.069	−0.447	1.917	1.730	2
陇油10	0.599	0.321	0.140	1.629	1.766	0.761	3.576	1
NM88	0.462	−0.196	−0.604	−1.435	1.457	−0.382	−0.517	5
阳光85	0.142	0.378	−1.012	0.312	0.306	−1.017	−0.806	6
青杂3	0.704	−0.415	−0.592	1.121	−1.062	−1.272	−1.483	10
青杂6	0.075	−1.903	1.605	−0.595	0.127	−0.725	−0.813	8

棕榈酸、油酸、亚油酸、花生一烯酸、花生酸、花生二烯酸、山俞酸、二十二碳二烯酸、十七碳一烯酸；主成分 2 主要代表物质是含油量、铁、棕榈油酸；主成分 3 主要代表物质是钠、钾、胆固醇、菜籽甾醇、豆甾醇；主成分 4 主要代表物质是硫苷、亚麻酸、维生素 E；主成分 5 主要代表物质是豆烷甾醇、木焦油酸；主成分 6 主要代表物质是芥酸。

各品种主成分得分根据标准化后的 34 个指标及主成分载荷矩阵计算，设 6 个主成分为 Y1-Y6，得到各个主成分与 34 个指标的线性方程为：

Y1=−0.022X1+0.060X2−0.003X3+0.037X4+0.040X5+...+0.062X29+0.096X30+0056X31−0.052X32−0.101X33+0.006X34

Y2=−0.098X1+0.046X2+0.035X3-0.017X4+0.041X5−...−0.085X29+0.029X30+0.049X31+0.018X32+0.049X33−0.088X34

Y3=−0.099X1+0.095X2+0.069X3+0.065X4−0.100X5+...+0.054X29+0.048X30+0.103X31+0.065X32−0.025X33+0.011X34

Y4=0.103X1+0.003X2+0.074X3+0.179X4+0.085X5−...−0.033X29−0.065X30+0.082X31+0.007X32+0.021X33−0.160X34

Y5=0.110X1−0.144X2−0.074X3−0.094X4+0.138X5+...−0.164X29−0.011X30+0.121X31−0.234X32−0.013X33+0.003X34

Y6=0.009X1−0.047X2+0.269X3−0.036X4+0.157X5+...+0.126X29−0.047X30+0.052X31+0.012X32+0.026X33+0.247X34

以 6 个主成分所对应的方差贡献率为权重，可得到综合评价函数：Y=0.27170Y1+0.45157Y2+0.60038Y3+0.70419Y4+0.78588Y5+0.85330Y6

其中，Y 值越大，表明该品种的油菜籽综合品质越好，各品种油菜籽的因子得分、综合评分及排名如表 11 所示。不同品种的油菜籽排序从高到低依次为陇油 10、青杂 7、青杂 15、青杂 5、NM88、阳光 85、青杂 12、青杂 6、三沣 66、青杂 3。

2.8 聚类分析

根据油菜籽品质指标测定结果，采用组间联接法进行系统聚类分析，以欧式距离为度量标准，对 10 个油菜籽品种进行聚类，得到聚类谱系图。如图 3 所示，当距离系数为 5 时，可将 10 个油菜籽品种划分为 6 类，其中青杂 15、青杂 7 和陇油 10 聚为第Ⅰ类；NM88、阳光 85 和青杂 5 聚为第Ⅱ类；青杂 3 为第Ⅲ类；青杂 6 为第Ⅳ类；三沣 66 为第Ⅴ类；青杂 12 为第Ⅵ类。

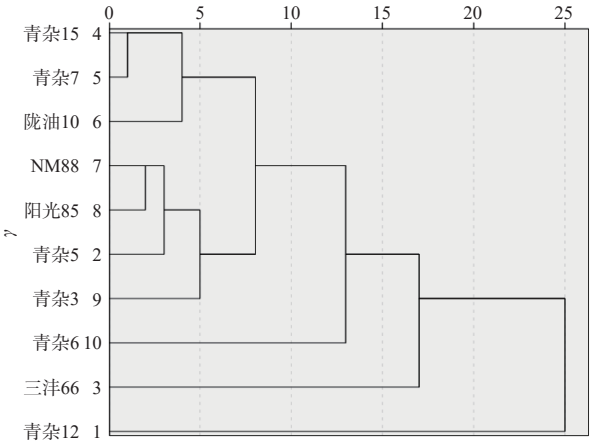


图 3 不同油菜籽品种系统聚类谱系图

Fig.3 Cluster dendrogram of different rapeseed cultivars

结合各品种主要品质指标及主成分综合得分结果综合分析，第Ⅰ类油菜籽样品在含油量、矿物质元素、甾醇含量方面表现突出，且综合得分均为正值，说明其整体品质较优，适合作为高营养型油料开发品种；第Ⅱ类品种的不饱和脂肪酸含量较高，尤其在油酸、亚麻酸等营养脂质结构方面优势明显，适宜用于高品质植物油的定向开发；第Ⅲ类青杂 3 在维生素 E 含量上表现良好，但由于硫苷和芥酸含量偏高，拉低了整体得分；第Ⅳ类青杂 6 在芥酸和饱和脂肪酸含量方面偏高，营养品质相对较低；第Ⅴ类三沣 66 的芥酸、硫苷均处于高值，综合品质一般；第Ⅵ类青杂 12 则在甾醇含量上具有一定优势，但其不饱和脂肪酸、蛋白质和矿物质含量相对较低，导致品质结构不均衡。

3 结论

本研究对呼伦贝尔地区 10 个油菜籽品种的理

化成分、矿物质元素、维生素 E、甾醇和脂肪酸组成的品质指标进行了系统测定与分析，结果表明不同品种油菜籽在品质指标上存在差异性。通过指标间相关性分析发现，不同营养成分之间存在一定程度的相关性，部分指标间信息存在重叠。采用主成分分析对指标进行降维处理，共提取了 6 个主成分，构建综合评分模型，并对 10 个油菜籽品种进行品质排序，综合得分由高到低依次为：陇油 10、青杂 7、青杂 15、青杂 5、NM88、阳光 85、青杂 12、青杂 6、三沣 66、青杂 3。基于主成分得分结果进行系统聚类分析，将 10 个油菜籽品种划分为 6 类。其中，第Ⅰ类的青杂 15、青杂 7 和陇油 10 在油酸、甾醇和矿物质元素方面表现优异，综合品质较高，适宜作为高营养油料品种推广种植；第Ⅱ类的 NM88、阳光 85 和青杂 5 不饱和脂肪酸含量较高，尤其油酸与亚麻酸水平优越，适宜用于高品质食用油开发；第Ⅲ类青杂 3 和第Ⅳ类青杂 6 则在部分指标上表现良好，但硫苷、芥酸和饱和脂肪酸含量偏高，营养安全性相对较低；第Ⅴ类的三沣 66 综合得分较低，矿物质成分和甾醇含量较少，营养结构不理想，不推荐直接开发为食用油品种；第Ⅵ类的青杂 12 在甾醇方面具有一定优势，但整体营养分布不均衡，适宜在特定功能方向上加以利用。本研究为呼伦贝尔地区油菜籽品质综合评价及功能型油料品种的筛选提供了理论依据，也为区域油料资源的差异化开发与精准利用提供了数据支撑。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] GUO Qi, YUE Xiaofeng, QI Xin, et al. A study of the pesticide residues in rapeseeds in China: Levels, distribution and health risk assessment[J]. Environmental Research, 2024, 246: 118110.

[2] 董文俊. 内蒙古呼伦贝尔地区“双低”油菜籽、粕在奶牛日粮中应用的研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学, 2006. [DONG W J. Research on the application of "double-low" rapeseed and meal in dairy cow diets in Hulunbuir region, Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2006.]

[3] LI Xinhao, CHEN Chang, YANG Xue, et al. The optimisation of rapeseed yield and growth duration through adaptive crop management in climate change: Evidence from China[J]. Italian Journal of Agronomy, 2022, 17(4): 2104.

[4] BOUCHYOUA A, KOUIGHAT M, HAFID A, et al. Evaluation of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes for tolerance to PEG (polyethylene glycol) induced drought at germination and early seedling growth[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 15: 100928.

[5] 中华人民共和国农业部. NY/T 1285-2007 油料种籽含量的测定[S]. 北京：中国标准出版社, 2007. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1285-2007 determination of seed content of oilseeds[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

[6] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京：中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, China Food and Drug Administration. GB 5009.5-2016 Determination of protein in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]

[7] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.6-2016 食品中脂肪的测定[S]. 北京：中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.6-2016 Determination of fats in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

[8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.4-2016 食品中灰分的测定[S]. 北京：中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.4-2016 Determination of ash in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

[9] 中华人民共和国农业部. NY/T 1582-2007 油菜籽中硫代葡萄糖苷的测定[S]. 北京：中国标准出版社, 2016. [Ministry of Agriculture of the People Republic of China. NY/T 1582-2007 determination of glucosinolates in rapeseed[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

[10] 罗银, 万浩, 李茜茜. ICP-MS 法同时测定垫江县地产铁皮石斛中 10 种矿物质元素[J]. 现代食品, 2024(16): 173−175. [LUO Yin, WAN Hao, LI Qianqian. Simultaneous determination of ten mineral elements in *Dendrobium officinale* grown in Dianjiang County by ICP-MS method[J]. Modern Food, 2024(16): 173−175.]

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 26635-2011 动植物油脂 生育酚及生育三烯酚含量测定[S]. 北京：中国标准出版社, 2011. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 26635-2011 Animal and vegetable oils and fats determination of tocopherols and tocotrienols[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.]

[12] 国家市场监督管理总局. GB/T 39995-2021 甾醇类物质的测定[S]. 北京：中国标准出版社, 2021. [National Technical Committee for Standardization of Biochemical Testing. GB/T 39995-2021 Determination of sterols[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.]

[13] 冶梓芩, 王进英, 马桂兰, 等. 青海亚麻籽油脂肪酸组成分析及产地溯源[J]. 食品科技, 2023, 48(8): 172−179. [YE Ziqin, WANG Jinying, MA Guilan, et al. Analysis of fatty acid composition and origin traceability of Qinghai flaxseed oil[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(8): 172−179.]

[14] HANSEN J Ø, ØVERLAND M, SKREDE A, et al. A meta-analysis of the effects of dietary canola/double low rapeseed meal on growth performance of weanling and growing-finishing pigs[J]. Animal Feed Science and Technology, 2020, 259: 114302.

[15] 中华人民共和国农业部. NY/T 1795-2009 双低油菜籽等级规格[S]. 北京：中华人民共和国农业部, 2009. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1795-2009 Specifications for double low rapeseed grades[S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2009.]

[16] 中华人民共和国农业部. NY 414-2000 低芥酸低硫苷油菜种子[S]. 北京：中华人民共和国农业部, 2000. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY 414-2000 Canola seeds[S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2000.]

[17] MOULICK S P, JAHAN F, AL MAMUN M Z U, et al. *Boerhavia diffusa* and *Coccinia grandis*: Two indigenous vegeta-

bles as a source of essential minerals, vitamins, amino acids, and fatty acids[J]. Applied Food Research, 2024, 4(2): 100494.
[18] 肖泽琳. 油菜籽维生素 E 含量遗传解析及油菜芽活性功能初探[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022. [XIAO Z L. Genetic analysis of vitamin E content in rapeseed and preliminary study on the active functions of rapeseed buds[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.]
[19] 杨陈, 汤虎, 韩领, 等. 油菜籽活性成分和功能特性的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2017, 23(1): 35−38. [YANG Chen, TANG Hu, HAN Ling, et al. Research progress on bioactive components and physiological functions of rapeseed[J]. Food and Nutrition in China, 2017, 23(1): 35−38.]
[20] 李源龙. 油菜籽生育酚和脂肪酸组分相关性研究及调控生育酚合成关键基因的等位多态性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. [LI Yuanlong. Correlations between tocopherol and fatty acid components and allelic variations of the major loci regulating tocopherol biosynthesis in *Brassica* oilseeds[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.]
[21] GARCIA-LLATAS G, ALEGRÍA A, BARBERÁ R, et al. Current methodologies for phytosterol analysis in foods[J]. Microchemical Journal, 2021, 168: 106377.
[22] BENESCH M G K, McELHANEY R N. A comparative calorimetric study of the effects of cholesterol and the plant sterols campesterol and brassicasterol on the thermotropic phase behavior of dipalmitoylphosphatidylcholine bilayer membranes[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes, 2014, 1838(7): 1941−1949.
[23] LEE H, PARK J, KWON S H, et al. Dietary cholesterol intake is not associated with the development of chronic kidney disease: Results from two Korean cohort studies[J]. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 2024, 34(5): 1198−1206.
[24] SANDERS C, DOBSON S, MARANGONI A G. Effect of saturated and unsaturated fat on the physical properties of plant-based cheese[J]. Current Research in Food Science, 2024, 9: 100832.
[25] 于宏影, 闫晓娜, 王晓红, 等. 不同东北茶藨子种质资源果实脂肪酸分析及评价[J]. 安徽农业大学学报, 2025, 52(1): 24−30. [YU Hongying, YAN Xiaona, WANG Xiaohong, et al. Analysis and evaluation of fatty acids in fruits of different germplasm resources of *Ribes mandshuricum*[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2025, 52(1): 24−30.]
[26] SAMARANAYAKE M D W, ABEYSEKERA W K S M, HEWAJULIGE I G N, et al. Saturated, monounsaturated and polyunsaturated fatty acid profiles of commercially important traditional and new improved red and white rice varieties of Sri Lanka[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 130: 106154.
[27] CALDERÓN GUZMÁN D, JUÁREZ OLGUÍN H, OSNAYA BRIZUELA N, et al. Oleic acid reduces oxidative stress in rat brain induced by some anticancer drugs[J]. Chemico-Biological Interactions, 2024, 398: 111086.
[28] TOIVIO L, LINDÉN J, SALMENKARI H, et al. Ketogenic diets with disparate fat sources protect from experimental colitis with pronounced benefit from linoleic acid over saturated fatty acids[J]. Current Developments in Nutrition, 2024, 8: 103433.
[29] 罗密, 尹旺, 邓仁菊, 等. 基于主成分分析和聚类分析对不同品种甘薯淀粉与粉条品质的综合评价[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 246−257. [LUO Mi, YIN Wang, DENG Renju, et al. Comprehensive evaluation of starch and noodles quality of different sweet potato varieties based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 246−257.]
[30] 钟思彦, 邹波, 林锦波, 等. 不同品种黄皮果实营养成分及加工特性评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 253−263. [ZHONG Siyan, ZOU Bo, LIN Jinbo, et al. Evaluation of nutrient composition and processing characteristics of different varieties of wampee[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 253−263.]
[31] 雷月, 宫彦龙, 唐会会, 等. 基于主成分和聚类分析的不同品种贵州禾酿酒适宜性品质评价[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 289−300. [LEI Yue, GONG Yanlong, TANG Huihui, et al. Evaluation of brewing suitability quality of different Guizhou He varieties based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 289−300.]
[32] 马尚玄, 胡小静, 付镓榕, 等. 云南澳洲坚果果实品质分析与综合评价[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 259−271. [MA Shangxuan, HU Xiaojing, FU Jiarong, et al. Analysis and comprehensive evaluation of fruit quality of Macadamia nut in Yunnan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 259−271.]