DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260507004
引用格式: 张阔, 白雪, 张菊, 等. 基于主成分分析与逼近理想解排序法对不同种质来源紫苏籽品质综合评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 220–230.
Zhang Kuo, Bai Xue, Zhang Ju, et al. Comprehensive quality evaluation of *Perilla frutescens* seeds from different germplasm sources based on principal component analysis and technique for order preference by similarity to ideal solution [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 220–230. (in Chinese with English abstract).

基于主成分分析与逼近理想解排序法对不同种质来源紫苏籽品质综合评价

张 阔[1,2], 白 雪[2], 张 菊[1,2*], 刘灵娣[1*], 温春秀[1], 贾东升[1], 姜 涛[1]
(1. 河北省农林科学院经济作物研究所, 石家庄 050051; 2. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 石家庄 050061)

摘 要: 目的 结合主成分分析与逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS), 综合多指标对不同种质来源紫苏籽开展系统性品质评价, 筛选优质紫苏籽种质资源。**方法** 对 31 份紫苏种质资源的紫苏籽中总黄酮、迷迭香酸、千粒重、含水量、含油量与脂肪酸相对含量进行检测, 以主成分分析法筛选影响紫苏籽品质的关键指标, 采用 TOPSIS 进行品质综合评价, 系统聚类分析法进行资源分类。**结果** 31 份紫苏种质资源中 28 号种质紫苏籽的总黄酮、迷迭香酸含量均高于其他种质; 3 号种质含油量最高为 44.67%; 脂肪酸检测结果表明紫苏籽脂肪酸主要由棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、*α*-亚麻酸 5 种脂肪酸组成; 4 号种质资源的 *α*-亚麻酸相对含量最高, 为 75.47%。主成分分析提取了特征值大于 1 的 3 个主成分, 以载荷值绝对值大于 0.4 为筛选依据, 选取每个主成分上不同方向载荷值最大的指标作为品质综合评价关键指标, 进行 TOPSIS 综合评价; 根据相对贴近度排序可知综合品质最高的为 28 号种质, 同时具备高药用成分和良好油脂品质。系统聚类分析将 31 份紫苏籽划分为 4 类, 分别为高药用成分-优质油用型、药油均衡型、油用型和基础型。**结论** 本研究建立了紫苏籽品质的多指标综合评价方法, 为紫苏功能油脂开发与药用资源选育提供了理论依据。

关键词: 紫苏籽; 综合评价; 主成分分析; 逼近理想解排序法
中图分类号: TS201.4 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0220–11

Comprehensive quality evaluation of *Perilla frutescens* seeds from different germplasm sources based on principal component analysis and technique for order preference by similarity to ideal solution

ZHANG Kuo[1,2], BAI Xue[2], ZHANG Ju[1,2*], LIU Ling-Di[1*], WEN Chun-Xiu[1], JIA Dong-Sheng[1], JIANG Tao[1]

收稿日期: 2026-05-07
基金项目: 河北省农林科学院科技创新人才队伍建设项目(C26R0804); 国家现代农业产业技术体系“全草类药材”岗位项目(CARS-21); 河北省现代农业产业技术体系中药材产业创新团队“种质资源评价与应用”岗位项目(HBCT2023080206); 河北省重点研发计划项目(23372509D); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2024151)
第一作者: 张阔(2000—), 男, 硕士, 主要研究方向为中药材品质评价及开发利用。E-mail: 15530408755@163.com
***通信作者:** 张菊(1987—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为中药材品质评价及开发利用。E-mail: juzi437163804@163.com
刘灵娣(1978—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为中药材育种。E-mail: nkyliulingdi@126.com

(1. *Institute of Economic Crops*, *Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Shijiazhuang* 050051, *China*; 2. *College of Bioscience and Engineering*, *Hebei University of Economics and Business*, *Shijiazhuang* 050061, *China*)

ABSTRACT: Objective　To systematically evaluate the quality of *Perilla frutescens* seeds from diverse germplasm sources by integrating principal component analysis with the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) using a comprehensive multi-indicator framework, and to identify and screen for elite *Perilla frutescens* seed germplasm resources. **Methods**　The total flavonoids, rosmarinic acid, thousand-seed weight, moisture content, oil content and relative content of fatty acids in the seeds of 31 purple *Perilla frutescens* germplasms were tested. Principal component analysis was used to screen the key indicators affecting the quality of purple *Perilla frutescens* seeds, and　TOPSIS was employed for comprehensive quality evaluation. Systematic cluster analysis was used for resource classification. **Results**　The total flavonoids and rosmarinic acid contents of the 28th germplasm of purple *Perilla frutescens* seeds were significantly higher than those of other germplasms; the oil content of the 3th germplasm was the highest at 44.67%; the fatty acid test results indicated that the fatty acids in purple *Perilla frutescens* seeds were mainly composed of palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid and *α*-linolenic acid; the 4th germplasm resource had the highest *α*-linolenic acid content of 75.47%. Principal component analysis extracted 3 principal components with eigenvalues greater than 1. Based on the criterion that the absolute value of the loading value is greater than 0.4, the indicators with the largest loading values in different directions on each principal component were selected as the key indicators for comprehensive quality evaluation, and then the TOPSIS method was used for comprehensive evaluation. According to the relative proximity degree ranking, the 28th germplasm was the one with the highest comprehensive quality, possessing both high medicinal components and good oil quality. Systematic cluster analysis divided the 31 purple *Perilla frutescens* seeds into 4 categories: high medicinal component-high-quality oil use type, balanced medicinal and oil type, oil use specialized type and basic type. **Conclusion**　This study established a multi-index comprehensive evaluation method for the quality of purple *Perilla frutescens* seeds, providing a theoretical basis for the development of purple *Perilla frutescens* functional oils and the selection of medicinal resources.

KEY WORDS: *Perilla frutescens* seed; comprehensive evaluation; principal component analysis; technique for order preference by similarity to ideal solution

0　引　言

紫苏(*Perilla frutescens*)为唇形科一年生草本植物, 其籽粒富含 *α*-亚麻酸及多种生物活性物质[1], 是国内外公认的功能性油料资源[2–3]。有研究表明, 紫苏籽油在降低血清总胆固醇[4]、抗炎[5]、改善神经退行性疾病[6]方面具有显著生理活性, 而紫苏籽中黄酮和迷迭香酸等多酚类成分则是其抗氧化、抗菌及神经保护活性的关键物质基础[7–8]。这些活性成分不仅是决定紫苏籽营养品质与药用功效的核心要素, 也为其种质资源的精准评价提供了关键指标。目前许多学者对紫苏籽油的品质差异进行了研究, 例如许春芳等[9]对紫苏籽油的活性成分进行了检测与分析, 探明了不同产地的紫苏籽油活性成分的差异。罗建彪等[10]对冷榨紫苏籽油进行了品质评价和营养成分检测, 表明紫苏籽油可解决常见食用油中 *α*-亚麻酸含量低、功能营养物质缺乏等问题。然而, 以上研究多聚焦于紫苏籽的单一油脂品质, 缺乏对紫苏籽药用成分的综合评价, 难以全面反映不同来源紫苏种质苏籽的综合品质潜力。

主成分分析法(principal component analysis, PCA)是一种基于正交变换的多元统计分析方法, 该方法可在保留原始变量主要信息的前提下, 通过提取特征向量实现评价指标的压缩和降维, 以消除变量间的信息重叠和干扰[11–12]。逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)是一种多属性决策分析方法, 该方法通过构建正理想解与负理想解, 计算各评价对象与正、负理想解的相对贴近度以实现对多指标体系的综合排序。上述方法已在花生、油菜籽等作物种质资源综合评价中得以成功应用。

综上所述, 现有研究多从紫苏籽油脂品质或单一活性成分角度开展评价, 对紫苏籽药用成分、油脂营养品质及农艺品质性状的综合关联分析仍相对不足, 难以全面反映不同种质来源紫苏籽的综合开发利用潜力。基于此, 本研究以 31 份紫苏种质资源的紫苏籽为材料, 系统测定其总黄酮、迷迭香酸含量、千粒重、含水量、含油量及主要脂肪酸组分, 从药用成分、油脂营养成分及基础品质性状等方面对不同种质紫苏籽进行综合表征。其中, 千粒重可反映籽粒饱满度和物质积累水平, 含水量则与紫苏籽的贮藏稳定性和加工适应性密切相关。在此基础上, 采用 PCA

筛选关键评价指标, 构建 TOPSIS 综合评价模型, 并结合系统聚类分析进行种质资源分类, 旨在建立科学、客观的紫苏籽品质评价方法, 以期为高药用价值与优质油用紫苏籽资源的筛选及遗传改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材 料

紫苏籽取自河北省农林科学院经济作物所药用植物研究中心资源库, 经河北省农林科学院温春秀研究员鉴定为唇形科植物紫苏的种子, 共 31 份, 编号及种质名称见表 1。

表 1 种质资源信息

Table 1 Information of germplasm resources

序号	种质名称	序号	种质名称	序号	种质名称
1	四川仪陇紫苏	12	油苏	23	成都野生紫苏
2	波叶绿心紫苏	13	多紫 2 号紫苏	24	日本紫苏
3	WL3 紫苏	14	广西回回苏	25	辽宁紫苏
4	多紫 1 号紫苏	15	甘肃兰州紫苏	26	辽宁白苏
5	贵州遵义紫苏	16	耳齿紫苏	27	蕲春紫苏
6	云南宣威田坝紫苏	17	川紫 1 号紫苏	28	蒙苏 68
7	冀紫 1 号紫苏	18	陕西商洛醛型紫苏	29	宽城紫苏
8	冀紫 2 号紫苏	19	甘肃武威天水紫苏	30	贵苏 3 号紫苏
9	波叶纯紫紫苏	20	甘肃武威庆阳全紫苏	31	贵苏 6 号紫苏
10	云南宣威文兴紫苏	21	甘肃武威庆阳半紫苏		
11	甘肃紫苏	22	承德紫苏		

1.1.2 试 剂

芦丁标准品(纯度≥98%, 合肥博美生物科技有限责任公司); 迷迭香酸标准品(纯度≥98%, 中国食品药品检定研究院); 甲醇(色谱纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 无水乙醇(分析纯, 天津市致远化学试剂有限公司); 亚硝酸钠(分析纯, 天津市恒兴化学试剂制造有限公司); 硝酸铝(分析纯, 天津福晨化学试剂有限公司); 氢氧化钠(分析纯, 天津益力化学试剂有限公司); 石油醚(分析纯, 天津市大茂化学试剂厂); 氢氧化钾(分析纯, 天津市永大化学试剂有限公司); 无水硫酸钠(分析纯, 厂家按实际试剂标签补充)。

1.2 仪器与设备

SpectraMax iD3 酶标仪(美国 Molecular Devices, Limited Liability 公司); SZC-101 型脂肪测定仪(上海纤检仪器有限公司); Waters e2695 高效液相色谱仪(美国 Waters Corporation 公司); Trace1300-ISQ QD 气相色谱质谱联用仪、AI1310 自动进样器、TG-FAME 色谱柱(50 m×0.25 mm, 0.2 μm)(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); 赛多利斯 ALC-210 分析天平(精度 0.001 g, 德国 Sartorius AG 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 亚硝酸钠-硝酸铝比色法测定总黄酮含量

样品前处理[13]: 称取 0.5 g 紫苏籽粉末, 加入 60%乙醇 10 mL, 在 50 ℃水浴中恒温提取 30 min 得紫苏籽萃取液, 冷却至室温离心取上清。芦丁标准溶液配制: 准确称取芦丁标准品, 用 60%乙醇溶液配制成质量浓度为 1.4 mg/mL 的芦丁标准溶液, 分别将上述标准溶液稀释成 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 和 1.2 mg/mL 的芦丁标准系列溶液。

标准曲线绘制及样品测定: 分别吸取 200 μL 芦丁标准系列溶液和待测样品置于 1.5 mL 离心管中, 加 100 μL 5%的亚硝酸钠溶液, 摇匀, 室温静置 6 min; 加 100 μL 10%的硝酸铝溶液, 摇匀, 室温静置 6 min; 加 800 μL 4%的氢氧化钠溶液, 摇匀, 室温静置 15 min, 吸取 200 μL 待测液于 96 孔板, 设置酶标仪在 510 nm 波长处测定吸光度值, 得到样品吸光度及标准曲线。

1.3.2 迷迭香酸含量测定

依照 2020 版《中国药典》中规定的迷迭香酸含量测定方法进行检测。

1.3.3 水分含量测定

参照《中国药典》通则 0832 水分测定第二法进行检测。取紫苏籽供试品约 2.0 g, 平铺于干燥至恒重的扁形称量瓶中(称量瓶重记为 m_0), 厚度不超过 5 mm, 精密称定(重量记为 m_1), 开启瓶盖在 105 ℃干燥 5 h, 将瓶盖盖好, 移置干燥器中, 冷却 30 min, 精密称定, 再在上述温度干燥 1 h, 放冷, 称重, 至连续两次称重的差异不超过 5 mg 为止, 精密称定(重量记为 m_2)。根据减失的重量, 计算供试品中含水量(%)。每个样品设置 3 个平行, 取平均值作为最终结果。紫苏籽水分含量按公式(1)计算。

$$含水量/\%=(m_1-m_2)/(m_1-m_0)\times 100\% \quad (1)$$

1.3.4 千粒重测定

参照 GB/T 3543.8—2025《农作物种子检验规程 第 8 部分: 播种质量 千粒重测定》进行测定。将紫苏籽样品充分混匀, 剔除破损粒、瘪粒及杂质后, 随机数取完整紫苏籽 100 粒, 置于电子天平上称重, 记为 m。每份种质资源设置 3 个平行, 取平均值计算千粒重。紫苏籽千粒重按式(2)计算。

$$千粒重/g=m\times 10 \quad (2)$$

式中: m 为 100 粒紫苏籽质量, g。

1.3.5 含油量测定

样品前处理: 称取 2.0 g 紫苏籽, 在 105 ℃温度下烘 30 min, 趁热加入 2.0 g 左右的脱脂细砂研磨至出油状后,

转入在底部已塞脱脂棉的滤纸筒内, 用少量石油醚将研钵清洗后并入滤纸筒内, 上部用脱脂棉压实。

紫苏籽油提取: 按照SZC-101型脂肪测定仪说明书进行操作: (1)铝杯测重。将清洗好的铝杯进行干燥、冷却、编号、称重并记录。(2)提取参数设定。设置浸泡(60 ℃, 3 h)、抽提(75 ℃, 2.5 h)、溶剂回收(90 ℃, 15 min)、烘干(110 ℃、45 min) 4 个阶段的温度和时间。(3)收取样品称重计算。关闭电源取出铝杯, 移入干燥器内冷却称量; 计算含油量, 使所得油脂最后两次称重, 重量差在 2 mg 以内。

1.3.6　脂肪酸含量测定

采用气相色谱-质谱仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)测定紫苏籽中脂肪酸含量, 参照NY/T 3110—2017《植物油料中全谱脂肪酸的测定 气相色谱-质谱法》与范鑫洋等[14]方法稍作修改。

甲酯化试剂配制: 称取 2.62 g 氢氧化钾, 加入 100 mL 无水甲醇中, 充分溶解后加入适量无水硫酸钠进行干燥, 过滤, 取澄清滤液, 即得氢氧化钾-甲醇溶液, 备用。

样品前处理: 称取均匀紫苏籽粉末 0.4 g 移入 10 mL 具塞试管中, 加入 2 mL 石油醚, 加入 1 mL 甲酯化试剂; 涡旋振荡, 静置反应 1 h; 再次涡旋振荡, 加入 2 mL 纯水; 静置 30 min 分层, 以 4200 r/min 离心 3 min, 取上清液, 用石油醚稀释 20 倍, GC-MS 测定。

GC-MS 条件: TG-FAME 色谱柱(50 m×0.25 mm, 0.2 μm); 程序升温: 初始温度 120 ℃, 保持 1 min, 以 7 ℃/min 升温至 195 ℃, 保持 10 min, 以 3 ℃/min 升温至 230 ℃; 进样模式: 分流; 分流比: 30:1; 进样口温度: 240 ℃; 载气类型及流速: 高纯氦气, 恒流模式, 流速为 1.0 mL/min; 进样体积: 1.0 μL。质谱分析设定条件: 采用电子轰击电离源(electron ionization, EI); 离子源能量 70 eV; 离子源温度 280 ℃; 扫描模式, 全扫描模式; 质量扫描范围, 50~500 amu; 溶剂延迟 3 min。质谱分析设定条件: 单四极杆质谱; 离子源温度: 250 ℃; 质谱传输线温度: 280 ℃。

以上实验每份种质资源设置 3 组平行实验。

1.4　数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 26 进行单因素方差分析与系统聚类分析, 采用 Graphpad Prism 11 绘制柱形图, 采用 SPSSAU 在线分析软件进行主成分分析与 TOPSIS 评价。

2　结果与分析

2.1　不同紫苏种质资源的紫苏籽中药用成分含量

检测了 31 份紫苏种质资源的紫苏籽中总黄酮、迷迭香酸含量, 由图 1、图 2 可知, 31 份紫苏籽样品的总黄酮、迷迭香酸的含量具有明显差异。总黄酮的含量范围为 3.42~16.16 mg/g, 迷迭香酸含量范围为 1.23~3.51 mg/g。研究表明, 紫苏籽中黄酮、迷迭香酸具有抗炎、抗菌、神经保护活性, 这些成分含量一定程度上决定了其药用价值。28 号紫苏种质资源的紫苏籽中总黄酮、迷迭香酸含量均为最高, 分别为 16.16 mg/g 和 3.51 mg/g, 意味着 28 号种质资源药用价值突出。

2.2　不同紫苏种质资源的紫苏籽千粒重与含水量

千粒重是反映种子大小、籽粒饱满度及干物质积累水平的重要指标, 含水量则直接关系到紫苏籽的采后贮藏稳定性和加工利用效果。由图 3 和图 4 可知, 31 份紫苏种质资源的紫苏籽千粒重和含水量均存在明显差异。

31 份紫苏籽样品的千粒重均值为 2.01 g, 变异系数为 52.91%, 范围为 0.80~4.08 g, 表明不同种质间在籽粒大小和充实度方面差异较大。其中, 19 号种质千粒重最高, 为

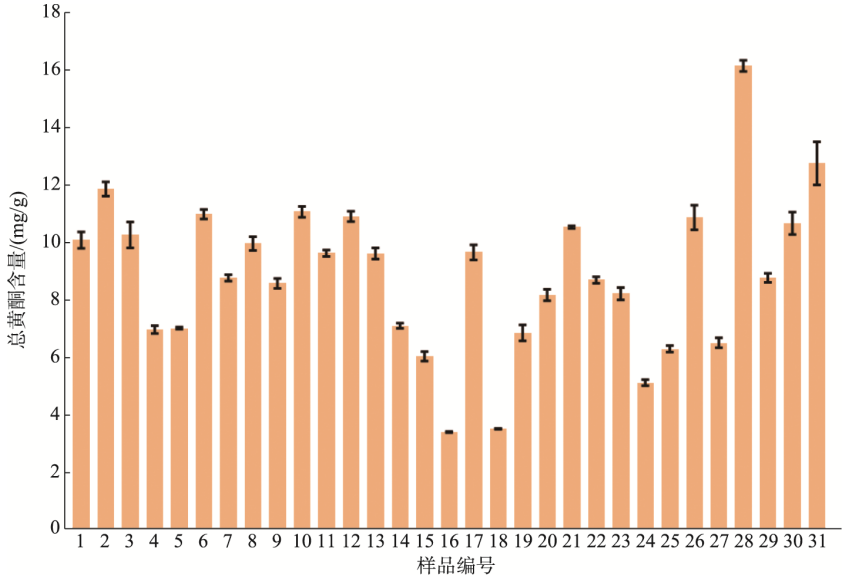


图 1　不同种质紫苏籽总黄酮含量

Fig.1　Total flavonoid content of *Perilla frutescens* seeds from different germplasms

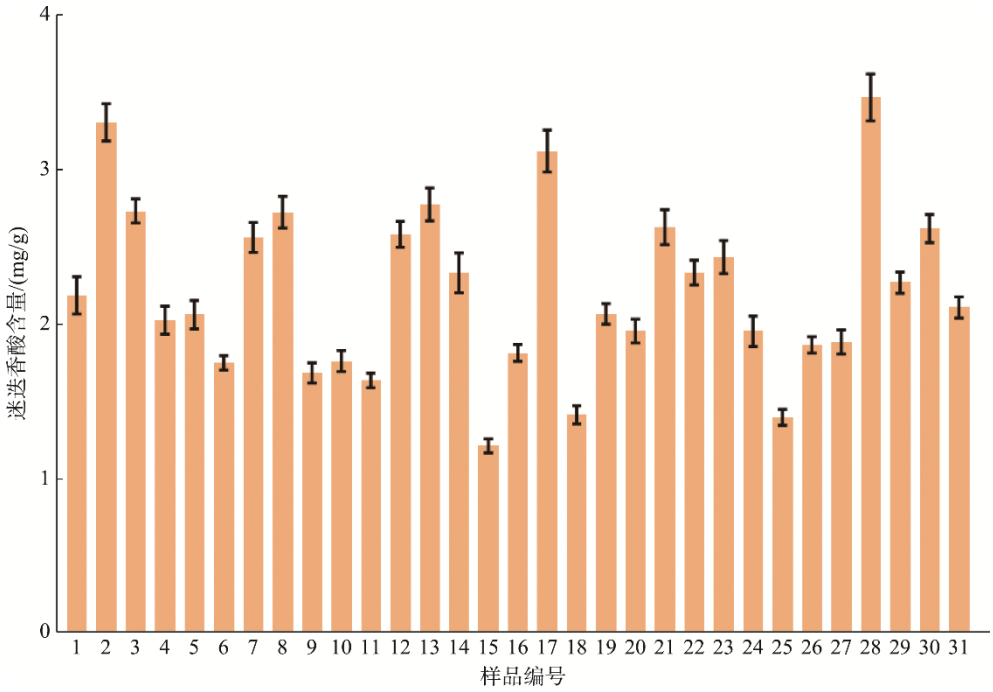


图 2 不同种质紫苏籽迷迭香酸含量

Fig.2 Rosmarinic acid content of *Perilla frutescens* seeds from different germplasms

(4.08±0.04) g; 其次为 3 号、22 号和 26 号种质, 分别为(3.57±0.05) g、(3.51±0.11) g 和(3.49±0.05) g; 12 号、21 号、29 号和 15 号种质千粒重也相对较高, 均在 3.10 g 以上。14 号种质千粒重最低, 为(0.80±0.06) g, 25 号、2 号、20 号、13 号和 23 号种质也处于较低水平, 说明不同种质在籽粒饱满度和物质积累能力方面存在较明显差异。

由图 4 可知, 31 份紫苏籽样品的含水量均值为 7.34%, 变异系数为 18.43%, 范围为 5.10%~10.46%, 整体波动较为明显。其中, 14 号种质含水量最高, 为 10.46%±0.07%, 1 号种质次之, 为 10.34%±0.07%, 24 号种质也处于较高水平, 为 9.59%±0.07%; 而 6 号种质含水量最低, 为 5.10%±0.06%, 11 号、3 号、26 号、16 号和 29 号种质含水量也相对较低。含水量较低的种质在贮藏过程中更有利于降低霉变、酸败及脂质氧化风险, 而含水量较高的种质则需要其在保存和加工前进一步进行干燥处理。

2.3 不同紫苏种质资源的紫苏籽中脂肪酸组成及含油量

使用 GC-MS 分析紫苏籽的脂肪酸组成, 结果见表 2, 31 份紫苏籽样品中脂肪酸组成主要为棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和 *α*-亚麻酸, 其中 *α*-亚麻酸相对含量明显高于其他脂肪酸, 此结果与曾小峰等[15]研究结果相同。由表 2 可知, 棕榈酸相对含量范围为 4.17%~6.40%, 变异系数为 11.18%; 硬脂酸相对含量范围为 0.68%~2.12%, 变异系数为 30.54%; 油酸相对含量范围为 7.52%~19.60%, 变异系数为 24.89%; 亚油酸相对含量范围为 8.71%~15.41%, 变异系数为 12.59%; *α*-亚麻酸相对含量范围为 61.04%~75.47%, 变异系数为 5.58%。紫苏籽作为油料作物, 其含油量是衡量油用品质的指标之一, 31 份种质资源的含油量范围为 25.53%~44.67%。其中 3 号和 29 号的含油量分别达到了 44.67%和 42.76%。

2.4 主成分分析

PCA 可以通过降维来消除重叠信息, 并将紫苏籽原有的多个品质指标转化成少数几个重要的主成分, 并且保留原指标包含的主要信息, 根据主成分的载荷值可筛选出关键指标, 从而更好地评价紫苏籽的综合品质。将测得的紫苏籽药用成分、脂肪酸相对含量、含油量以及千粒重、含水量进行主成分分析, 结果如表 3 所示, 按照特征值大于 1 的原则提取前 3 个主成分, 其方差贡献率分别为 45.810%、20.127%、12.797%, 累计贡献率达到 78.734%, 表明上述 3 个主成分可以代表大部分原始指标变量信息。各个指标在主成分上的载荷值见表 4, 载荷值绝对值大于 0.4 即说明该项和主成分有对应关系。3 个主成分中, 对主成分 1 贡献率最大的分别为 *α*-亚麻酸相对含量和千粒重, 对主成分 2 贡献率最大的为迷迭香酸含量, 对主成分 3 贡献率最大的为亚油酸相对含量。因此, 选取 *α*-亚麻酸相对含量、千粒重、迷迭香酸含量、亚油酸相对含量作为种质资源评价的关键指标。

2.5 TOPSIS 分析

TOPSIS 通过构建评价指标的正理想解与负理想解, 计算各评价对象与理想解的相对贴近度, 其中与正理想解

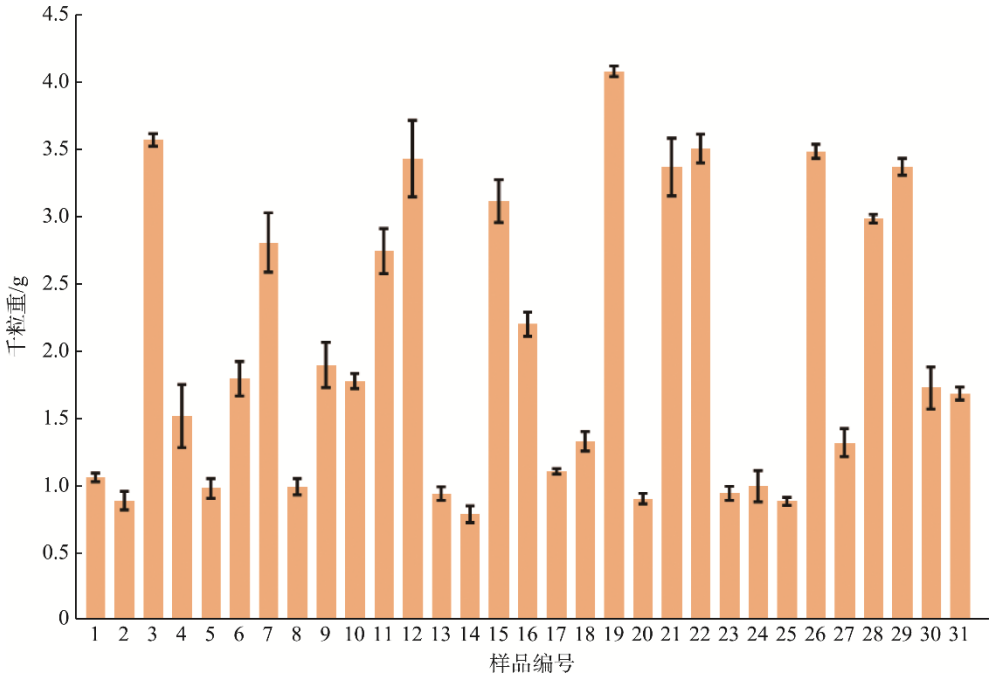


图 3　不同种质紫苏籽千粒重

Fig.3　Thousand-seed weight of *Perilla frutescens* seeds from different germplasms

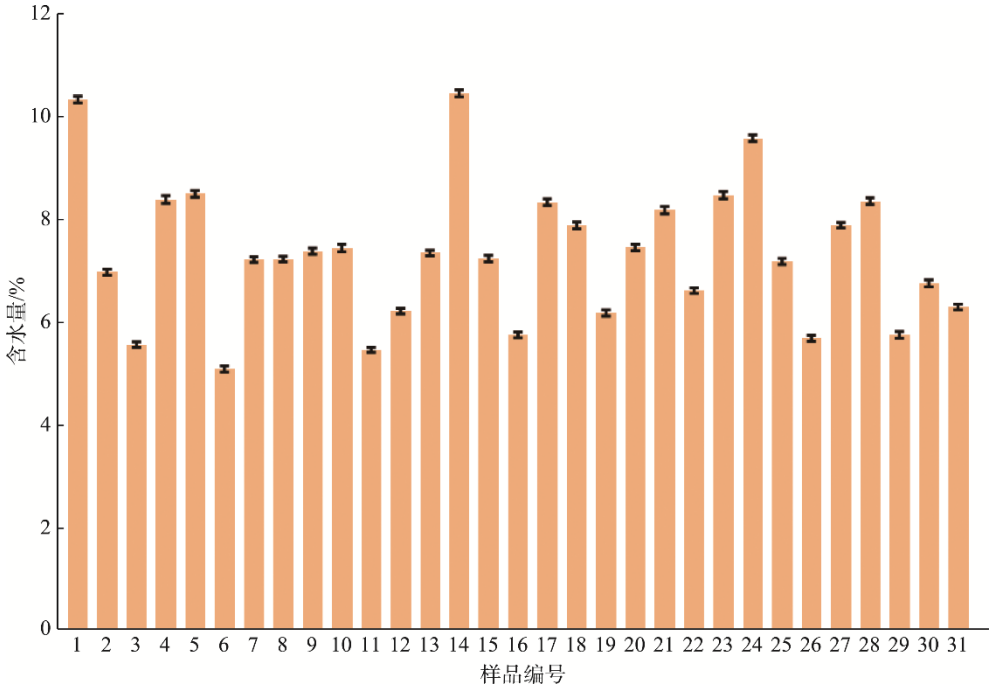


图 4　不同种质紫苏籽含水量

Fig.4　Moisture content of *Perilla frutescens* seeds from different germplasms

表 2　脂肪酸相对组成及含油量(%)

Table 2　Fatty acid relative composition and oil content (%)

编号	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	α-亚麻酸	含油量
1	5.57 ± 0.33^{f}	0.87 ± 0.08^{qr}	11.09 ± 0.73^{no}	13.87 ± 0.70^{c}	68.60 ± 1.80^{klmn}	25.53 ± 0.54^{i}
2	4.70 ± 0.14^{lm}	0.91 ± 0.02^{qr}	8.63 ± 0.03^{st}	12.19 ± 0.13^{gh}	73.57 ± 0.09^{bc}	30.04 ± 0.31^{efg}
3	6.02 ± 0.13^{cd}	1.08 ± 0.02^{o}	19.60 ± 0.22^{a}	12.26 ± 0.01^{fgh}	61.04 ± 0.07^{t}	44.67 ± 0.25^{a}

表 2(续)

编号	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	α-亚麻酸	含油量
4	4.46±0.04^{no}	0.68±0.01^{s}	7.52±0.05^{u}	11.87±0.02^{hi}	75.47±0.11^{a}	29.83±0.36^{fgh}
5	4.29±0.13^{op}	0.82±0.13^{r}	9.06±1.35^{s}	12.78±0.80^{e}	73.05±2.15^{d}	28.01±0.64^{ghi}
6	6.15±0.07^{bc}	1.03±0.08^{op}	12.90±0.21^{ij}	9.77±0.17^{l}	70.15±0.49^{defg}	33.95±1.19^{cde}
7	4.95±0.31^{jk}	0.84±0.23^{qr}	14.30±0.68^{fg}	9.38±0.42^{l}	70.53±1.18^{def}	29.06±1.23^{fghi}
8	5.31±0.19^{gh}	1.66±0.08^{gh}	10.54±0.33^{opq}	13.29±0.33^{d}	69.19±0.93^{ijklm}	29.04±0.80^{fghi}
9	4.95±0.05^{jk}	1.52±0.01^{ijk}	10.37±0.01^{pq}	13.57±0.02^{cd}	69.60±0.08^{fghij}	31.12±0.12^{defg}
10	5.73±0.03^{ef}	1.91±0.01^{cd}	10.84±0.02^{nop}	12.51±0.03^{efg}	68.99±0.08^{gklmn}	35.49±2.89^{c}
11	6.24±0.04^{ab}	1.70±0.01^{fg}	16.85±0.07^{cd}	13.87±0.04^{c}	61.33±0.16^{t}	42.43±2.08^{ab}
12	6.40±0.04^{a}	1.37±0.01^{lmn}	17.87±0.09^{b}	9.61±0.01^{l}	64.74±0.09^{q}	34.58±7.84^{cd}
13	4.17±0.12^{p}	0.70±0.06^{s}	8.11±0.15^{t}	12.51±0.17^{efg}	74.52±0.49^{ab}	32.37±6.49^{cdef}
14	5.30±0.11^{gh}	0.92±0.08^{qr}	11.42±0.19^{mn}	12.29±0.17^{fgh}	70.08±0.55^{defg}	25.56±3.09^{i}
15	5.58±0.05^{f}	1.65±0.06^{gh}	19.11±0.02^{a}	8.71±0.03^{m}	64.94±0.12^{q}	31.36±0.47^{defg}
16	5.96±0.06^{d}	1.31±0.04^{n}	10.27±0.03^{qr}	12.49±0.01^{efg}	69.97±0.13^{defgh}	39.05±0.75^{b}
17	4.78±0.02^{kl}	1.46±0.01^{jkl}	11.21±0.01^{n}	11.87±0.03^{hi}	70.69±0.02^{de}	30.16±0.78^{efg}
18	4.59±0.03^{mn}	1.34±0.01^{mn}	12.11±0.01^{kl}	13.48±0.04^{cd}	68.48±0.01^{lmno}	31.07±0.38^{defg}
19	5.83±0.02^{de}	1.44±0.01^{klm}	16.76±0.01^{d}	11.24±0.02^{jk}	64.74±0.01^{q}	41.66±0.35^{ab}
20	5.16±0.12^{hi}	1.79±0.09^{ef}	11.80±0.29^{lm}	12.65±0.32^{ef}	68.61±0.79^{klmn}	30.80±0.49^{defg}
21	5.39±0.08^{g}	2.12±0.03^{a}	17.33±0.11^{c}	10.95±0.03^{k}	64.21±0.13^{qr}	29.50±1.41^{fghi}
22	5.94±0.01^{d}	1.91±0.01^{cd}	16.68±0.07^{d}	12.52±0.06^{efg}	62.95±0.11^{s}	40.93±0.21^{ab}
23	5.26±0.02^{gh}	1.86±0.02^{cde}	14.33±0.02^{fg}	14.49±0.05^{b}	64.06±0.10^{qr}	27.86±0.09^{ghi}
24	5.01±0.03^{ij}	1.82±0.02^{de}	12.82±0.08^{ij}	12.24±0.09^{fgh}	68.10±0.21^{mno}	28.21±0.53^{ghi}
25	5.34±0.03^{gh}	1.56±0.01^{hij}	11.81±0.03^{lm}	14.69±0.02^{b}	66.60±0.06^{p}	27.25±0.74^{ghi}
26	5.99±0.05^{cd}	1.63±0.01^{gh}	14.62±0.09^{f}	15.41±0.06^{a}	62.35±0.19^{s}	41.86±0.55^{ab}
27	5.23±0.03^{gh}	1.95±0.01^{bc}	13.83±0.02^{gh}	11.53±0.04^{ij}	67.46±0.04^{op}	25.79±0.58^{hi}
28	4.79±0.03^{kl}	0.95±0.00^{pq}	12.50±0.03^{jk}	10.95±0.01^{k}	70.80±0.02^{de}	40.23±1.95^{b}
29	5.90±0.02^{de}	2.04±0.01^{ab}	16.13±0.07^{e}	12.63±0.04^{ef}	63.30±0.14^{rs}	42.76±1.17^{ab}
30	5.73±0.03^{ef}	1.94±0.01^{bc}	9.81±0.01^{r}	12.82±0.01^{e}	69.70±0.04^{efghi}	40.51±0.78^{b}
31	5.93±0.04^{d}	1.60±0.00^{ghi}	13.32±0.05^{hi}	11.23±0.04^{jk}	67.92±0.10^{no}	42.69±0.74^{ab}

注: 同列相同的字母为差异不显著(P>0.05), 不同的字母为差异显著(P<0.05)。

表 3 主成分特征值及方差解释率

Table 3 Eigenvalues and variance contribution rates of principal components

编号	特征根			主成分提取		
	特征根	方差解释率/%	累积/%	特征根	方差解释率/%	累积/%
1	4.123	45.810	45.810	4.123	45.810	45.810
2	1.811	20.127	65.937	1.811	20.127	65.937
3	1.152	12.797	78.734	1.152	12.797	78.734
4	0.855	9.505	88.239	-	-	-
5	0.466	5.176	93.415	-	-	-
6	0.256	2.843	96.258	-	-	-
7	0.216	2.400	98.658	-	-	-
8	0.117	1.295	99.953	-	-	-
9	0.004	0.047	100.000	-	-	-

注: -表示无此数据。

表 4 载荷系数表

Table 4 Table of load factor

名称	载荷系数		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3
总黄酮	0.230	0.834	0.219
迷迭香酸	–0.105	0.879	0.031
棕榈酸	0.840	–0.142	0.101
油酸	0.843	–0.134	–0.377
亚油酸	–0.191	–0.361	0.834
α-亚麻酸	–0.827	0.321	–0.044
含油量	0.788	0.223	0.374
千粒重	0.872	0.133	–0.208
含水量	–0.735	–0.051	–0.266

距离越近, 与负理想解距离越远, 则相对贴近度越大, 代表种质资源综合评价越高[15]。根据主成分分析, 对提取的 3 个主成分中贡献率最大的指标作为关键指标进行 TOPSIS 分析, 结果如表 5, 评价最高的种质资源为 28 号, 表明 28 号是 31 份种质中药用成分与油用品质兼优的种质资源。

表 5　TOPSIS 评价结果

Table 5　Evaluation results of TOPSIS

样品编号	正理想解距离 D+	负理想解距离 D–	相对接近度 C	排序结果	样品编号	正理想解距离 D+	负理想解距离 D–	相对接近度 C	排序结果
1	0.430	0.335	0.438	19	17	0.391	0.402	0.507	12
2	0.390	0.467	0.545	2	18	0.483	0.289	0.374	25
3	0.384	0.427	0.527	4	19	0.383	0.418	0.522	6
4	0.401	0.392	0.495	13	20	0.473	0.279	0.371	26
5	0.433	0.361	0.454	17	21	0.366	0.386	0.513	9
6	0.471	0.257	0.353	28	22	0.369	0.397	0.518	7
7	0.364	0.380	0.511	10	23	0.469	0.338	0.419	20
8	0.404	0.372	0.479	15	24	0.476	0.259	0.353	29
9	0.405	0.333	0.451	18	25	0.526	0.308	0.370	27
10	0.423	0.290	0.407	23	26	0.397	0.447	0.530	3
11	0.464	0.332	0.417	21	27	0.473	0.231	0.329	31
12	0.398	0.378	0.488	14	28	0.264	0.497	0.653	1
13	0.392	0.434	0.525	5	29	0.369	0.384	0.510	11
14	0.452	0.318	0.413	22	30	0.345	0.370	0.518	8
15	0.542	0.275	0.337	30	31	0.430	0.262	0.379	24
16	0.382	0.327	0.461	16					

2.6　系统聚类分析

根据 TOPSIS 分析的相对贴合度对 31 份紫苏种质资源的紫苏籽进行系统聚类分析, 结果如图 5, 当欧式距离为 3 时可以将 31 份种质分为 4 类, 每一类包括的编号及特点见表 6。

第I类仅包括 28 号种质, 其 TOPSIS 相对贴近度为 0.653, 综合品质在 31 份种质中排名最高。该种质在总黄酮含量(16.162 mg/g)、迷迭香酸含量(3.516 mg/g)、含油量(39.658%)和千粒重(2.988 g)上均处于各类别平均水平之上, 且 α-亚麻酸相对含量(70.804%)也较高, 表现出药用成分含量最高、油脂品质优良且籽粒饱满的综合特性。该种质可作为药食兼用型紫苏籽育种的优选亲本, 尤其适合同时追求高活性成分和高含油量的定向改良。

第II类包括 22、30、19、3、13、26、7、29、21、17、2、4、12 和 8 号共 14 份种质, 其相对贴近度为 0.479~0.545, 综合品质整体良好。该类种质的平均总黄酮含量(9.619 mg/g)和迷迭香酸含量(2.588 mg/g)低于第I类, 含油量(35.496%)和千粒重(2.491 g)也处于较高水平, 表明其药用和油用品质协调性较好。尽管部分种质在单项指标上存在不足, 但具有突出的单一优势, 例如 4 号种质含油量虽偏低, 却拥有最高的 α-亚麻酸相对含量; 2 号种质千粒重虽较低, 但药用成分含量较高。因此, 此类资源既可作为综合品质改良

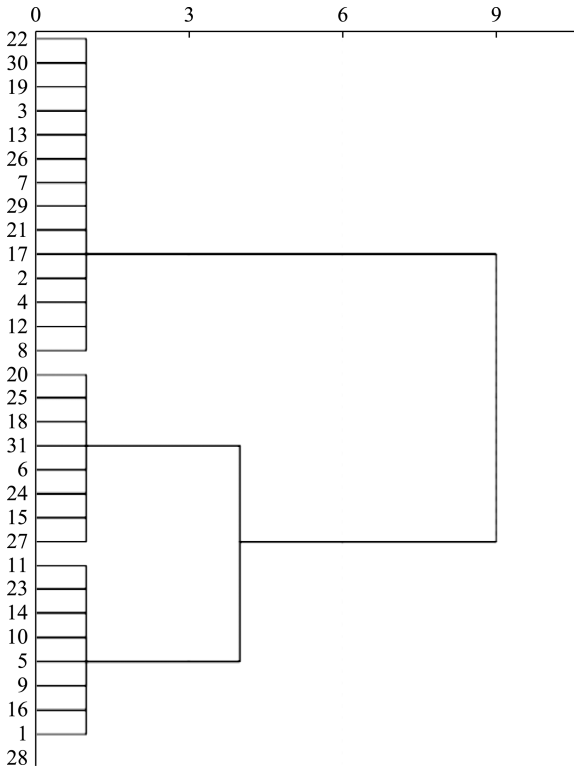


图 5　31 个紫苏籽种质资源系统聚类分析

Fig.5　Cluster analysis of 31 *Perilla frutescens* seed germplasm resources

的基础材料，也可针对特定目标(如高 α-亚麻酸或高药用成分)进行选择性利用。

第III类包括 11、23、14、10、5、9、16 和 1 号共 8 份种质，其相对贴近度为 0.407~0.461，综合品质处于中等水平。该类种质的平均总黄酮含量(8.155 mg/g)和迷迭香酸含量(2.021 mg/g)较低，含油量(31.881%)和千粒重(1.555 g)也明显低于前两类，但亚油酸(13.233%)和 α-亚麻酸(68.210%)相对含量在各类别中相对较高，显示出较好的油脂脂肪酸组成。尽管该类种质的药用成分积累能力较弱，但其较高的不饱和脂肪酸比例使其在油用品质方面仍具一定潜力，可作为改善紫苏籽油脂营养品质的候选资源。

第IV类包括 20、25、18、31、6、24、15 和 27 号共 8 份种质，其相对贴近度为 0.329 ~ 0.379，综合品质中等偏差。该类种质的总黄酮(7.440 mg/g)、迷迭香酸(1.742 mg/g)、含油量(31.387%)和千粒重(1.510 g)均为各类别最低，但其亚油酸(11.787%)和 α-亚麻酸(67.784%)相对含量仍保持在较高水平。整体而言，该类种质药用价值和油脂积累能力较弱，综合表现不突出，但其中部分种质可能含有特殊的脂肪酸组成或适应性强等特性，可作为种质改良的基础材料或用于特定环境条件下的栽培应用。

表 6 聚类结果及特点

Table 6 Clustering results and characteristics

分类	TOPSIS 分析相对接近度 C	种质编号	平均总黄酮含量/(mg/g)	平均迷迭香酸含量/(mg/g)	平均亚油酸相对含量/%	平均 α-亚麻酸相对含量/%	平均含油量/%	平均千粒重/g	特点
I	0.653	28	16.162	3.516	10.952	70.804	40.230	2.988	高药用成分-优质油用型(综合品质优秀): 药用成分含量最高同时兼具高含油量与 α-亚麻酸含量，且籽粒饱满个头大，为最优种质
II	0.479~0.545	22、30、19、3、13、26、7、29、21、17、2、4、12、8	9.619	2.588	12.038	67.640	35.496	2.491	药油均衡型(综合品质良好): 普遍具有较高的药用成分含量及优秀的油用品质，籽粒个头大，具较高的含油量和千粒重
III	0.407~0.461	11、23、14、10、5、9、16、1	8.155	2.021	13.233	68.210	31.881	1.555	油用型(综合品质中等): 药用成分含量较低，但具备较好的油用品质; 且亚油酸和 α-亚麻酸含量较高
IV	0.329~0.379	20、25、18、31、6、24、15、27	7.440	1.742	11.787	67.784	31.387	1.510	基础型(综合品质中等偏差): 具备较低的药用成分含量及含油量; 但亚油酸和 α-亚麻酸含量较高

3 讨 论

本研究检测了 31 份紫苏种质资源的紫苏籽的药用成分含量、千粒重、含水量、脂肪酸含量及含油量，通过 PCA 筛选出了影响紫苏籽品质的核心评价指标，构建了基于 TOPSIS 法的综合评价模型。结果表明，31 份紫苏籽在药用成分和油用成分含量上均存在较大变异系数，不同种质资源间差异明显，为紫苏种质改良和优质种质选育提供了资源基础。

主成分分析将 10 个品质指标降维至 3 个独立主成分，累计贡献率达 78.734%。主成分 1 贡献率为 45.810%，以千粒重(0.872)、油酸(0.843)、棕榈酸(0.840)、含油量(0.788)及 α-亚麻酸(–0.827)、含水量(–0.735)的高载荷为特征，主要反映紫苏籽的油脂积累效率及籽粒饱满度。α-亚麻酸呈负向载荷表明其与棕榈酸、油酸及含油量在种质间存在此消彼长关系，揭示高含油量种质与高 α-亚麻酸种质在资源分布上可能存在分化趋势。α-亚麻酸作为人体必需脂肪酸，在降低心血管疾病风险[16]、抗炎[17]及神经保护[18–19]方面具有明确功效，是决定紫苏籽油脂营养价值的核心成分。千粒重作为主成分 1 上正向载荷最大的指标，不仅是产量指标，还与紫苏籽的油脂品质存在显著关联。多项研究表明，紫苏籽含油率与千粒重呈显著正相关[20]，千粒重较大的种质通常具有更高的含油量和 α-亚麻酸含量[21]，在油用品质方面更具优势。主成分 2 贡献率为 20.127%，以迷迭香酸(0.879)和总黄酮(0.834)的高正载荷为特征，主要反映紫苏籽中酚酸和黄酮类药用活性成分的富集程度，可视为紫苏籽“药用品质维度”的综合表征。研究表明，迷迭香酸、木犀草素等酚酸和黄酮类成分是紫苏籽发挥抗氧化、抗炎、抗病毒等多种生物活性的关键物质成分[22–25]。主成分 3 贡献率为 12.797%，以亚油酸载荷最高(0.834)，反映亚油酸

含量的独立变异信息。亚油酸虽在紫苏籽中含量远低于 α-亚麻酸, 但同为人体必需脂肪酸, 其参与人体内多种代谢过程, 在降低胆固醇、预防心血管疾病方面具有较高的保健价值, 其生理功能不可忽视[26–27]; 且在孙新茹等[8]对紫苏籽质量标志物预测的结果中亚油酸与 α-亚麻酸同样为脂肪酸类的质量标志物。

根据“以载荷绝对值最大为各主成分代表性指标”的筛选原则[28], 结合载荷值正负方向实际意义, 本研究选取千粒重、α-亚麻酸(主成分 1)、迷迭香酸(主成分 2)和亚油酸(主成分 3)作为综合评价的核心指标。该 4 个指标分别从油脂积累及营养品质、药用成分水平和脂肪酸组成结构 3 个维度反映紫苏籽综合品质, 既实现了从 10 个原始指标向 3 个代表性指标的降维转换, 避免了信息冗余, 又确保了评价体系的生物学合理性, 为 TOPSIS 综合评价模型的构建奠定了数据基础。

TOPSIS 法对样本量及数据分布无严格要求, 在种质资源综合评价中具有良好适用性[29–30]。基于主成分分析提取的 4 个核心指标构建的 TOPSIS 综合评价结果显示, 28 号种质的相对贴近度最高(0.653), 综合排序第 1; 2 号(0.545)、26 号(0.530)、3 号(0.527)和 13 号(0.525)分别排序第 2 到 5。值得关注的是, 28 号种质的总黄酮和迷迭香酸含量在所有供试种质中均处最高水平, 其 TOPSIS 排序第 1, 进一步验证了该种质在药用成分方面的独特优势。此外, 26 号种质虽在聚类分析中被归为第II类, 但其 TOPSIS 排序跃居第 3, 反映出该类种质在核心品质维度上的综合协调性较为突出, 表明 TOPSIS 综合评价能够更灵敏地捕捉各主成分维度上的综合表现。

将 TOPSIS 排序结果与系统聚类分析对比发现, 两种方法在整体趋势上具有较好一致性, 但也存在一定差异。第I类(含 28 号种质)综合品质最优, TOPSIS 排序第 1; 第II类包含 2 号、3 号、13 号、26 号等 14 份种质, 相对贴近度为 0.479~0.545, 是筛选优质油用和药油兼用型种质的重点类群; 第III类和第IV类综合品质逐级递减。聚类分析以综合品质均值为基础进行宏观类型划分, 而 TOPSIS 排序则能揭示同一类别内部种质间的精细化差异。例如, 第II类中 2 号种质排序第 2, 而 12 号种质排序第 14, 二者综合品质差距明显。因此, 将聚类分析与 TOPSIS 排序联合使用, 既能实现种质资源的宏观类型划分, 又能为类群内部的优先级筛选提供量化依据, 二者互为补充, 有助于提高优异种质鉴定的准确性和利用效率。

总体而言, 本研究将 PCA、TOPSIS 和系统聚类分析相结合, 实现了紫苏籽品质评价指标的科学筛选、种质综合品质的量化排序和资源类型的系统划分。与传统单项指标评价相比, 该多方法联用策略能够从多维度综合评估种质品质, 有效区分不同种质资源的优势特征和适宜利用方向。其中, 28 号、2 号、26 号和 3 号种质综合品质表现优异, 分别在高药用成分、高含油量及高 α-亚麻酸含量等方面各具特色, 可作为紫苏籽功能油脂开发、药用活性成分利用及高营养价值品种选育的优选亲本材料。同时, 本研究建立的评价体系也为其他药用植物或油料作物种质资源的综合评估提供了方法论参考。

需要指出的是, 本研究主要基于单一年份和单一点位收获的 31 份种质籽粒品质指标进行评价, 尚未涉及多年多点试验、产量稳定性、环境互作效应及加工适应性等生产应用层面的考量。后续研究应结合多年多点田间试验、活性成分生物效价的体内外验证、油脂加工特性评价以及分子标记辅助育种等手段, 对优选种质进行更为系统和全面的评估, 以进一步提高优异种质筛选结果的稳定性和实际应用价值。

4　结　论

本研究通过 PCA 筛选出千粒重、α-亚麻酸、迷迭香酸及亚油酸含量作为紫苏籽品质综合评价的核心指标, 构建了基于 TOPSIS 法的综合评价方法, 系统评价了 31 份紫苏种质资源的紫苏籽的综合品质。结果表明, 来自内蒙古鄂伦春旗大杨树的 28 号种质紫苏籽在药用成分与油脂品质上表现最优, 可作为高药用价值与优质油用兼用型种质重点开发利用。本研究建立的量化评价方法为不同种质来源的紫苏籽资源的精准化开发利用提供了理论依据。

参考文献

[1] 郝熙, 李伟, 张海鹏, 等. 酶辅助超声优化提取紫苏籽多酚及其抗氧化和酶抑制活性[J]. 中国调味品, 2025, 50(2): 112–120.
Hao Xi, Li Wei, Zhang Haipeng, et al. Optimization of extraction of polyphenols from *Perilla* seeds by enzyme-assisted ultrasound and their antioxidant and enzyme inhibitory activities [J]. China Condiment, 2025, 50(2): 112–120.

[2] Wen Jing, Chai Xudong, Huang Xusheng, et al. PfPAH1-1 gene enhances plant tolerance to low phosphate stress by modulating cell membrane lipid remodeling [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2025, 221: 109593.

[3] 陈雪梅, 胡博, 唐晓姝, 等. 紫苏籽油对小鼠肠道微生物及抗氧化能力的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 271–277.
Chen Xuemei, Hu Bo, Tang Xiaoshu, et al. Effects of *Perilla* seed oil on intestinal microorganisms and antioxidant capacity in mice [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(16): 271–277.

[4] Sun Kean, Ma Tingjun. Study on the lipid-lowering capacity of α-linolenic acid from *Perilla* seed oil in oleic acid-induced HepG2 cells [J]. Food Chemistry Advances, 2025, 6: 100871.

[5] Pothinam S, Putpim C, Siriwoharn T, et al. Effects of *Perilla* seed oil on blood lipids, oxidative stress, and inflammation in hyperlipidemic rats [J]. Foods, 2025, 14(8): 1380.

[6] Techaniyom P, Korsirikoon C, Rungruang T, et al. Cold-pressed *Perilla* seed oil: investigating its protective influence on the gut-brain axis in mice with rotenone-induced Parkinson’s disease [J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12(9): 6259–6283.

[7] Ravaria P, Saxena P, Laksmi Bs S, et al. Molecular mechanisms of neuroprotective offerings by rosmarinic acid against neurodegenerative

and other CNS pathologies [J]. Phytotherapy Research, 2023, 37(5): 2119–2143.

[8] 孙新茹, 李鑫蕊, 王玉清, 等. 紫苏子化学成分和药理作用的研究进展及其质量标志物预测[J]. 天然产物研究与开发, 2025, 37(4): 768–791, 658.
Sun Xinru, Li Xinrui, Wang Yuqing, et al. Research progress of chemical compositions and pharmacological actions of *Perillae Fructus* and prediction of its quality markers [J]. Natural Product Research and Development, 2025, 37(4): 768–791, 658.

[9] 许春芳, 董喆, 郑明明, 等. 不同产地的紫苏籽油活性成分检测与主成分分析[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(2): 275–282.
Xu Chunfang, Dong Zhe, Zheng Mingming, et al. Active compound and principal component analysis of *Perilla* seed oils from different production areas [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(2): 275–282.

[10] 罗建彪, 余顺波, 周思璇, 等. 冷榨紫苏油的营养成分与质量评价[J]. 贵州农业科学, 2025, 53(8): 107–114.
Luo Jianbiao, Yu Shunbo, Zhou Sixuan, et al. Evaluation on the nutrient components and quality of cold-pressed *Perilla oil* [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2025, 53(8): 107–114.

[11] 于沐, 杨海棠, 胡延岭, 等. 基于主成分分析与聚类分析的花生新品种(系)脂肪酸综合评价[J]. 四川农业大学学报, 2025, 43(1): 120–127.
Yu Mu, Yang Haitang, Hu Yanling, et al. Comprehensive evaluation of fatty acids in new peanut varieties (lines) based on principal component analysis and cluster analysis [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2025, 43(1): 120–127.

[12] 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.
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.

[13] 张倩, 张菊. 多指标综合评分法优化冠突散囊菌发酵酸枣叶茶工艺[J]. 食品科技, 2024, 49(12): 54–62.
Zhang Qian, Zhang Ju. Optimization of fermentation technology of *Ziziphus jujuba* leaf tea by *Eurotium* cristatum using multi-index comprehensive scoring method [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(12): 54–62.

[14] 范鑫洋, 张香美, 康晶, 等. 不同比例克鲁维酵母对低盐发酵香肠品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(2): 227–233.
Fan Xinyang, Zhang Xiangmei, Kang Jing, et al. Effect of different proportions of *Kluyveromyces* on quality characteristic of low-salt fermented sausages [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(2): 227–233.

[15] 曾小峰, 盖智星, 颜蜜, 等. 蒸汽爆破预处理对压榨紫苏籽油品质和风味的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(7): 257–263.
Zeng Xiaofeng, Gai Zhixing, Yan Mi, et al. Effect of steam explosion pretreatment on the quality and flavor of pressed *Perilla* seed oil [J]. Food Science, 2025, 46(7): 257–263.

[16] Cambiaggi L, Chakravarty A, Noureddine N, et al. The role of α-linolenic acid and its oxylipins in human cardiovascular diseases [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(7): 6110.

[17] Prado T P D, Zanchetta F C, Rosa Maria A C, et al. Therapeutic effect of alpha linolenic acid on cutaneous wound healing in hyperglycemic mice: involvement of neurotrophins [J]. Pharmaceutics, 2025, 17(11): 1427.

[18] Yuan Qianghua, Xie Fan, Huang Wei, et al. The review of alpha-linolenic acid: sources, metabolism, and pharmacology [J]. Phytotherapy Research, 2022, 36(1): 164–188.

[19] Sala-Vila A, Fleming J, Kris-Etherton P, et al. Impact of α-linolenic acid, the vegetable ω-3 fatty acid, on cardiovascular disease and cognition [J]. Advances in Nutrition, 2022, 13(5): 1584–1602.

[20] 李会珍, 刘艳, 李晓君, 等. 不同品种紫苏种子营养成分及脂肪酸组分分析[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 276–280.
Li Huizhen, Liu Yan, Li Xiaojun, et al. Analysis on nutrient constituents and fatty acids of different *Perilla* varieties [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(3): 276–280.

[21] 王玉昆, 原远, 王斌, 等. 转录组和脂质代谢组联合分析不同紫苏 α-亚麻酸合成调控差异[J]. 生物技术通报, 2026, 42(4): 129–140.
Wang Yukun, Yuan Yuan, Wang Bin, et al. Integrated analysis of transcriptome and lipid metabolome reveals the differences in α-linolenic acid synthesis regulation in different *Perilla frutescens* [J]. Biotechnology Bulletin, 2026, 42(4): 129–140.

[22] Yi Dandan, Wang Zhiyong, Peng Mu. Comprehensive review of *Perilla frutescens*: chemical composition, pharmacological mechanisms, and industrial applications in food and health products [J]. Foods, 2025, 14(7): 1252.

[23] Zhang Jin, Zhao Linlu, He Jieyi, et al. Protect effects of *Perilla* seed extract and its active ingredient luteolin against inflammatory bowel disease model *via* the PI3K/AKT signal pathway *in vivo* and *in vitro* [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(8): 3564.

[24] Kim D H, Lee J H. Comparative evaluation of phenolic phytochemicals from *Perilla* seeds of diverse species and screening for their tyrosinase inhibitory and antioxidant properties [J]. South African Journal of Botany, 2019, 123: 341–350.

[25] Pattananandecha T, Apichai S, Sukkho T, et al. *Perilla* seed meal extract enriched with rosmarinic acid and luteolin: natural active pharmaceutical ingredients (NAPIs) for osteoprotective effects [J]. Antioxidants, 2025, 14(8): 973.

[26] 蒋瑜, 熊文珂, 殷俊玲, 等. 膳食中 ω-3 和 ω-6 多不饱和脂肪酸摄入与心血管健康的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(11): 1–5.
Jiang Yu, Xiong Wenke, Yin Junling, et al. Research progress on dietary intake of ω-3 and ω-6 polyunsaturated fatty acidbalance and cardiovascular health [J]. Cereals & Oils, 2016, 29(11): 1–5.

[27] Berkowitz L, Araneda P, Cofré G, et al. The controversial role of linoleic acid in cardiometabolic health: from molecular pathways to human studies [J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 12: 1728865.

[28] Jolliffe I T, Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments [J]. Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2016, 374(2065): 20150202.

[29] 高树广, 胡敏杰, 徐东阳, 等. 黄淮区芝麻新品种(系)主要性状综合分析与评价[J]. 种子, 2025, 44(9): 181–188.
Gao Shuguang, Hu Minjie, Xu Dongyang, et al. Comprehensive analysis and evaluation of main characters of new *Sesamum indicum* varieties (lines) in Huanghuai district [J]. Seed, 2025, 44(9): 181–188.

[30] 叶艳萍, 李凯茜, 毕亚楠, 等. 基于熵权-逼近理想解排序法综合评价我国主产区猕猴桃的品质[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 205–217.
Ye Yanping, Li Kaixi, Bi Yanan, et al. Comprehensive evaluation of *Actinidia chinensis* Planch quality in major producing areas of China based on entropy weight-technique for order preference by similarity to ideal solution method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(12): 205–217.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)