

不同产地山桐子品质分析及综合评价

邹康,常云鹤,宋明发,刘晓燕,何劲,马立志

(贵阳学院食品与制药工程学院,贵阳550005)

摘要:旨在探究不同产地山桐子果实成分及油脂品质的差异性,对7个不同产地山桐子果实的基本成分及其油脂的品质指标进行测定,通过层次聚类分析对山桐子品质指标进行差异性分析,通过主成分分析对山桐子特征品质指标进行综合评价。结果表明:不同产地山桐子果实的含油率以及蛋白质、灰分、粗纤维、总糖、总酚、总黄酮含量存在一定差异;不同产地山桐子油的脂肪酸组成无显著差异,脂肪酸含量存在一定差异,但均为亚油酸含量最高(69.92%~74.96%),陕西汉中和云南威信的不饱和脂肪酸含量较高;陕西汉中山桐子油的角鲨烯、维生素E含量最高,分别为170.95、266.12 mg/100 g;四川泸州山桐子油的 β -谷甾醇含量(472.42 mg/100 g)最高;四川绵阳山桐子油的总酚含量(28.45 mg/100 g)最高;贵州榕江山桐子油的磷脂含量(4.29 mg/100 g)最高;聚类分析结果显示,陕西汉中、四川泸州、云南威信、贵州仁怀山桐子为一类,贵州贵阳、贵州榕江、四川绵阳山桐子为一类;主成分分析结果显示,陕西汉中山桐子综合得分最高,云南威信的次之。综上,产地是影响山桐子品质的因素之一。

关键词:山桐子;产地品质;脂肪酸组成;油脂伴随物;主成分分析

中图分类号:TS225.1;TS222+.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)01-0129-07

Quality analysis and comprehensive evaluation of *Idesia polycarpa* Maxim from different geographic regions

ZOU Kang, CHANG Yunhe, SONG Mingfa, LIU Xiaoyan, HE Jin, MA Lizhi

(Food and Pharmaceutical Engineering Institute, Guiyang University, Guiyang 550005, China)

Abstract: In order to explore the difference of fruit composition and oil quality of *Idesia polycarpa* Maxim from different geographic regions, the quality indexes of fruit and oil of *Idesia polycarpa* Maxim from 7 different geographic regions were determined, the differential analysis of quality indexes of *Idesia polycarpa* Maxim were analyzed by hierarchical cluster analysis, and the quality of *Idesia polycarpa* Maxim from different geographic regions was evaluated comprehensively by principal component analysis. The results showed that there were certain degree of differences in contents of oil, protein, ash, crude fiber, total sugar, total phenol and total flavone in fruit of *Idesia polycarpa* Maxim from different geographic regions. There was no significant difference in fatty acid composition of *Idesia polycarpa* Maxim oil from different geographic regions, with some difference in fatty acid content, but the content of linoleic acid was the highest (69.92% - 74.96%), and the content of unsaturated fatty acid was higher in Hanzhong, Shaanxi Province and Weixin, Yunnan Province. The contents of squalene and vitamin E in *Idesia polycarpa* Maxim oil from Hanzhong, Shaanxi Province were the highest (170.95, 266.12 mg/100 g,

respectively), and the content of β -sitosterol in *Idesia polycarpa* Maxim oil from Luzhou, Sichuan Province was the highest (472.42 mg/100 g). *Idesia polycarpa* Maxim oil from Mianyang, Sichuan Province had the highest total phenol content (28.45 mg/100 g). The highest phospholipid content (4.29 mg/100 g) was found

收稿日期:2023-06-29;修回日期:2024-07-27

基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2023]一般030);贵州林草发展有限公司横向项目(GZ-LFGS-HZ-026)

作者简介:邹康(1999),男,硕士研究生,研究方向为食品加工与安全(E-mail)485738862@qq.com。

通信作者:马立志,教授(E-mail)418829419@qq.com。

in *Idesia polycarpa* Maxim oil from Rongjiang, Guizhou Province. The cluster analysis results showed that the *Idesia polycarpa* Maxim from Hanzhong, Shaanxi Province, Luzhou, Sichuan Province, Weixin, Yunnan Province and Renhuai, Guizhou Province were in one category, the *Idesia polycarpa* Maxim from Guiyang, Guizhou Province, Rongjiang, Guizhou Province and Mianyang, Sichuan Province were in another category. The results of principal component analysis showed that the *Idesia polycarpa* Maxim in Hanzhong, Shaanxi Province had the highest comprehensive evaluation score, followed by Weixin, Yunnan Province. To sum up, the geographic region is one of the factors affecting the quality of *Idesia polycarpa* Maxim.

Key words: *Idesia polycarpa* Maxim; geographic region quality; fatty acid composition; lipid concomitant; principal component analysis

山桐子是大风子科山桐子属木本油料作物,又称油葡萄、山梧桐等^[1],多生于海拔 200~1 800 m 的向阳平缓山地,因其产量高、含油率高,也被称为“树上油库”。山桐子油中不饱和脂肪酸占 80% 左右^[2],其中亚油酸含量在 70% 左右^[3],仅次于红花籽油。山桐子果及籽油中还存在天然活性成分,主要是多酚、角鲨烯、维生素 E、甾醇,具有抗氧化^[4]和增强免疫力的作用,能促进生长发育,调节血液胆固醇和甘油三酯水平^[5]。山桐子作为新兴的木本油料作物,因其产量和含油率高,营养丰富,且成本低,具有成为大宗油料储备的潜力,可代替草本油料保障国家粮油安全^[6]。目前,国内外对山桐子的研究主要聚集在品种选育、化学成分测定、油脂提取加工、食品安全性评价等方面,对不同产地山桐子组分含量差异的研究较少。

本文对 7 个不同产地的山桐子果实及其油脂的组分含量进行测定,运用层次聚类分析(Hierarchical cluster analysis, HCA)对不同产地山桐子的品质指标进行差异性分析,运用主成分分析(Principal component analysis, PCA)对山桐子品质特征指标进行综合评价,以期对山桐子的种植以及利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

山桐子果实,采摘于 2022 年 10—12 月之间,分别采自陕西汉中、四川绵阳、四川泸州、云南威信、贵州仁怀、贵州榕江、贵州贵阳。

37 种脂肪酸甲酯混标,上海安谱曜世标准技术服务有限公司;福林酚试剂,芦丁、没食子酸、角鲨烯、 β -谷甾醇、 δ -生育酚、 β -生育酚、 α -生育酚标准品,14% 三氟化硼-甲醇溶液,上海源叶生物科技有限公司;正己烷、甲醇均为色谱纯;其余试剂均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

Agilent 8890 气相色谱仪、Agilent LC1260 II 液相色谱仪,安捷伦科技有限公司;WBZ-10PLC 智能静态真空微波干燥机,贵阳新奇微波工业有限公司;JC-ZF-06(S)全自动脂肪测定仪,青岛聚创环保集团有限公司;OSB2200 旋转蒸发器,上海爱朗仪器有限公司;JC-NY20B 型全自动凯氏定氮仪(含消化炉),青岛精诚仪器仪表有限公司;Multiskan SkyHigh 1550 全波长酶标仪,百乐科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 山桐子干燥预处理

将山桐子果实采用分段式微波干燥,即 2 kW 干燥 50 min,2 kW 干燥 20 min,0.5 kW 干燥 10 min,0.3 kW 干燥 10 min,得山桐子干果(水分含量为 2%~5%),粉碎备用。

1.2.2 山桐子果实品质指标测定

含油率的测定参考 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中索氏抽提法,蛋白质含量的测定参考 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》,灰分含量的测定参考 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》,粗纤维含量的测定参照 GB/T 5009.10—2003《植物类食品中粗纤维的测定》,水分含量的测定参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中直接干燥法,总糖含量的测定参考文献[7],总酚含量的测定参考文献[8],总黄酮含量的测定参考文献[9]。

1.2.3 山桐子油品质指标测定

1.2.3.1 脂肪酸组成的测定

参考宋明发等^[10]的方法采用气相色谱法测定山桐子油的脂肪酸组成。气相色谱条件:SH-Rt-2560 毛细管色谱柱(100 m×0.25 mm×0.20 μ m),色谱柱流量 1.0 mL/min;氢火焰离子化检测器(FID);载气为氮气;分流进样,分流比 20:1;进样量

1 μL ;进样口温度 240 $^{\circ}\text{C}$;升温程序为初始温度 130 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min,以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升高至 240 $^{\circ}\text{C}$,保持 20 min。

1.2.3.2 活性物质含量的测定

角鲨烯:参考张红霞等^[11]的方法,并稍作修改。称取 0.3 g 山桐子油(精确到 0.1 mg)于 250 mL 平底烧瓶中,加入 6 mL 2% 的氢氧化钠-甲醇溶液,于冷凝回流装置中在 60~65 $^{\circ}\text{C}$ 水浴回流至油滴消失,取出平底烧瓶冷却至室温,加入 7 mL 14% 的三氟化硼-甲醇溶液,装上回流管,于水浴中煮沸 2 min;取出平底烧瓶冷却,加入 5 mL 正己烷再装上回流管,继续煮沸 1 min;取出平底烧瓶冷却至室温,加入 20 mL 饱和氯化钠溶液,摇晃 20 s,静置,吸取上层清液于试管中并定容至 3 mL,加适量无水硫酸钠除水后,过 0.22 μm 有机滤膜,进气相色谱仪分析。气相色谱条件:升温程序为初始温度 130 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min,以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 240 $^{\circ}\text{C}$,保持 60 min;其他条件与 1.2.3.1 色谱条件一致。

维生素 E:参考 GB 5009.82—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 A、D、E 的测定》测定维生素 E 含量。色谱条件:Inertsil ODS-3 色谱柱(4.6 mm \times 250 mm, 5 μm);柱温 20 $^{\circ}\text{C}$;流动相为 100% 甲醇(用前需超声脱气);流速 0.8 mL/min;二极管阵列检测器,检测波长 294 nm;进样量 20 μL 。

β -谷甾醇:参考林树真等^[12]的方法,并略作修改。称取 5 g 油样于 250 mL 平底烧瓶中,加入 1 g 抗坏血酸和 30 mL 无水乙醇,混匀,加入 10 mL KOH 溶液(质量分数 50%),边加边振摇,混匀后于 80 $^{\circ}\text{C}$

水浴锅恒温搅拌皂化 60 min,皂化后立即冷却至室温。用 30 mL 水将皂化液转入 250 mL 分液漏斗中,加入 50 mL 乙醚摇晃萃取,静置,取上层,将下层溶液转移至另一漏斗中加入 50 mL 乙醚重复萃取一次,合并两次上层醚液。用 50 mL 10% 乙醇溶液洗涤醚液,剧烈摇动,静置,弃去下层乙醇溶液,重复洗涤至洗涤液为中性。将上层醚液转移至含有无水硫酸钠的漏斗中,去除残留水分,再用 30 mL 乙醚冲洗分液漏斗及无水硫酸钠,将全部醚液转入蒸馏瓶中,经旋转蒸发去除乙醚,用无水乙醇定容至 25 mL 试管中,涡旋混匀,过 0.22 μm 微孔滤膜,进液相色谱仪分析。液相色谱条件:流速 1 mL/min;检测波长 205 nm;柱温 30 $^{\circ}\text{C}$;其他条件与测定维生素 E 的色谱条件一致。

总酚:参考文献[13]测定。

1.2.3.3 磷脂含量测定

磷脂含量参考 GB/T 5537—2008《粮油检验 磷脂含量的测定》进行测定。

1.2.4 数据处理与分析

每组实验进行 3 次平行测定,结果以“平均值 \pm 偏差”表示。采用 Excel 2019 进行数据处理,用 SPSS 25 软件对数据进行 PCA 和显著性分析,运用 Origin 2021 绘制聚类热图。

2 结果与分析

2.1 不同产地山桐子果实品质指标

2.1.1 基本成分

不同产地山桐子果实的基本成分如表 1 所示。

表 1 不同产地山桐子果实的基本成分

Table 1 Basic components of *Idesia polycarpa* fruit from different geographic regions

产地	含油率	蛋白质	灰分	粗纤维	水分
陕西汉中	24.06 \pm 0.54 ^d	5.50 \pm 0.10 ^{ab}	4.07 \pm 0.28 ^d	23.08 \pm 0.20 ^e	56.44 \pm 0.11 ^d
四川绵阳	30.85 \pm 1.65 ^b	4.95 \pm 0.07 ^c	3.53 \pm 0.10 ^e	19.97 \pm 0.52 ^d	57.31 \pm 0.15 ^b
四川泸州	23.87 \pm 0.72 ^d	5.68 \pm 0.09 ^a	5.12 \pm 0.08 ^b	24.55 \pm 0.35 ^e	56.95 \pm 0.06 ^e
云南威信	26.86 \pm 0.46 ^c	4.21 \pm 0.10 ^e	4.53 \pm 0.10 ^c	24.44 \pm 1.33 ^e	56.35 \pm 0.09 ^d
贵州仁怀	32.77 \pm 0.57 ^a	4.98 \pm 0.15 ^c	5.02 \pm 0.13 ^b	23.69 \pm 1.11 ^e	58.27 \pm 0.16 ^a
贵州贵阳	22.78 \pm 0.88 ^d	4.58 \pm 0.25 ^d	4.95 \pm 0.02 ^b	28.12 \pm 0.28 ^a	55.39 \pm 0.27 ^e
贵州榕江	20.85 \pm 0.80 ^e	5.36 \pm 0.22 ^b	6.20 \pm 0.25 ^a	26.73 \pm 0.87 ^b	43.70 \pm 0.16 ^f

注:同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)

Note: Different letters in the same column indicate significant difference ($p < 0.05$)

由表 1 可知,不同产地山桐子果实的含油率为 20.85%~32.77%,蛋白质含量为 4.21%~5.68%,灰分含量为 3.53%~6.20%,粗纤维含量为 19.97%~28.12%,水分含量为 43.70%~58.27%。其中:贵州仁怀和四川绵阳山桐子果实的含油率较高,分别达到了 32.77% 和 30.85%,且二者间有显著差异

($p < 0.05$),贵州榕江山桐子果实的含油率最低,为 20.85%;四川泸州和陕西汉中山桐子果实的蛋白质含量最高,而云南威信的最低,前者比后者分别高出 1.47 个百分点和 1.29 百分点;贵州榕江山桐子果实的灰分含量最高,为 6.20%,四川绵阳的最低,为 3.53%;贵州贵阳山桐子果实的粗纤维含量最高,为

28.12%,四川绵阳的最低,为19.97%;贵州仁怀山桐子果实的水分含量最高,为58.27%,贵州榕江的最低,为43.70%。

2.1.2 总糖、总酚、总黄酮含量

不同产地山桐子果实的总糖、总酚、总黄酮含量如表2所示。

表2 不同产地山桐子果实的总糖、总酚、总黄酮含量

产地	总糖	总酚	总黄酮
陕西汉中	145.01 ± 8.49 ^{ab}	43.92 ± 1.13 ^c	24.44 ± 0.79 ^b
四川绵阳	129.48 ± 3.70 ^{bc}	57.02 ± 0.45 ^b	35.86 ± 2.33 ^a
四川泸州	138.15 ± 3.30 ^{bc}	54.72 ± 3.41 ^{bc}	40.16 ± 2.36 ^a
云南威信	131.61 ± 5.80 ^{bc}	49.80 ± 0.82 ^d	27.84 ± 0.73 ^b
贵州仁怀	125.26 ± 6.30 ^c	52.22 ± 0.99 ^{cd}	38.24 ± 0.78 ^a
贵州贵阳	154.92 ± 9.25 ^a	63.88 ± 2.52 ^a	37.62 ± 1.00 ^a
贵州榕江	135.76 ± 5.90 ^{bc}	52.97 ± 1.01 ^{bed}	29.24 ± 2.35 ^b

注:同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)

Note: Different letters in the same column indicate significant difference ($p < 0.05$)

表3 不同产地山桐子油的脂肪酸组成及相对含量

脂肪酸	陕西汉中	四川绵阳	四川泸州	云南威信	贵州仁怀	贵州贵阳	贵州榕江
C16:0	14.06 ± 0.02 ^e	15.18 ± 0.11 ^c	16.09 ± 0.04 ^b	13.58 ± 0.03 ^f	14.63 ± 0.04 ^d	15.91 ± 0.15 ^b	18.35 ± 0.27 ^a
C16:1	2.07 ± 0.03 ^f	5.18 ± 0.03 ^a	2.62 ± 0.06 ^d	2.29 ± 0.04 ^e	2.93 ± 0.06 ^c	4.97 ± 0.08 ^b	2.66 ± 0.15 ^d
C18:0	1.58 ± 0.06 ^d	1.71 ± 0.10 ^c	2.68 ± 0.14 ^a	2.17 ± 0.14 ^b	2.29 ± 0.09 ^b	1.63 ± 0.08 ^c	1.48 ± 0.03 ^d
C18:1	5.28 ± 0.08 ^c	6.42 ± 0.01 ^a	5.86 ± 0.07 ^b	5.18 ± 0.15 ^c	5.16 ± 0.04 ^c	5.85 ± 0.05 ^b	4.40 ± 0.19 ^d
C18:2	74.96 ± 0.15 ^a	69.92 ± 0.11 ^e	70.98 ± 0.05 ^c	74.78 ± 0.02 ^a	73.06 ± 0.02 ^b	70.20 ± 0.37 ^d	70.49 ± 0.32 ^d
C18:3	1.29 ± 0.01 ^b	0.98 ± 0.03 ^e	1.14 ± 0.03 ^c	1.16 ± 0.06 ^c	1.06 ± 0.05 ^d	1.01 ± 0.02 ^{de}	1.58 ± 0.07 ^a
C22:1	0.77 ± 0.03 ^b	0.61 ± 0.03 ^c	0.64 ± 0.03 ^c	0.84 ± 0.01 ^b	0.87 ± 0.07 ^b	0.42 ± 0.04 ^d	1.03 ± 0.05 ^a
SFA	15.63 ± 0.08 ^e	16.89 ± 0.21 ^d	18.76 ± 0.19 ^b	15.74 ± 0.13 ^e	16.92 ± 0.06 ^d	17.55 ± 0.20 ^c	19.84 ± 0.28 ^a
UFA	84.37 ± 0.08 ^a	83.11 ± 0.21 ^b	81.24 ± 0.19 ^c	84.26 ± 0.13 ^a	83.08 ± 0.06 ^b	82.45 ± 0.20 ^b	80.16 ± 0.28 ^d
MUFA	8.12 ± 0.08 ^e	12.21 ± 0.07 ^a	9.12 ± 0.16 ^c	8.31 ± 0.18 ^d	8.96 ± 0.02 ^c	11.25 ± 0.15 ^b	8.10 ± 0.08 ^c
PUFA	76.25 ± 0.16 ^a	70.90 ± 0.14 ^c	72.12 ± 0.03 ^c	75.95 ± 0.06 ^a	74.12 ± 0.06 ^b	71.21 ± 0.35 ^d	72.06 ± 0.25 ^c

注:UFA. 不饱和脂肪酸;SFA. 饱和脂肪酸;MUFA. 单不饱和脂肪酸;PUFA. 多不饱和脂肪酸;同行不同字母表示差异显著($p < 0.05$)

Note: UFA. Unsaturated fatty acids; SFA. Saturated fatty acids; MUFA. Monounsaturated fatty acids; PUFA. Polyunsaturated fatty acids. Different letters in the same line indicated significant difference ($p < 0.05$)

由表3可知:不同产地山桐子油中的脂肪酸组成一致,为棕榈酸(C16:0)、油酸(C18:1)、亚油酸(C18:2)、亚麻酸(C18:3)、棕榈油酸(C16:1)、硬脂酸(C18:0)、芥酸(C22:1),其中亚油酸含量最高,为69.92%~74.96%,与张欢^[16]对山桐子油脂肪酸组成检测结果基本一致;不同产地山桐子油的脂肪酸相对含量存在一定差异。不同产地山桐子油的SFA含量在15.63%~19.84%之间,主要为棕榈酸,其中贵州榕江山桐子油的SFA含量最高,陕西汉中和

由表2可知,贵州贵阳与陕西汉中山桐子果实的总糖含量最高,分别达到了154.92 mg/g和145.01 mg/g,显著高于贵州仁怀的($p < 0.05$),分别高出29.66 mg/g和19.75 mg/g。贵州贵阳山桐子果实的总酚含量也最高,为63.88 mg/g,显著高于陕西汉中的($p < 0.05$)。多酚含量易受环境温度影响,较高的环境温度更有利于总酚的积累,有研究表明,山桐子多酚可通过增强抗氧化活性、减轻肝损伤、调节脂质代谢、抗氧化和调节炎症相关基因表达达到显著的降脂作用^[14]。黄酮类化合物具有抗氧化、免疫调节、抑菌^[15]等作用,利用价值较高。四川泸州山桐子果实的总黄酮含量最高,为40.16 mg/g,显著高于陕西汉中、云南威信和贵州榕江的($p < 0.05$),黄酮类化合物的组成及结构还需进一步探究。

2.2 不同产地山桐子油品质指标

2.2.1 脂肪酸组成与相对含量

不同产地山桐子油的脂肪酸组成与相对含量如表3所示。

云南威信的最低。不同产地山桐子油的UFA含量在80.16%~84.37%之间,其中陕西汉中和云南威信的UFA含量最高,贵州榕江的最低。不同产地山桐子油的MUFA含量在8.10%~12.21%之间,PUFA含量在70.90%~76.25%之间。

2.2.2 活性物质与磷脂含量

不同产地山桐子油的活性物质、磷脂含量见表4。

表 4 不同产地山桐子油的活性物质、磷脂含量

Table 4 Active substance and phospholipid contents of *Idesia polycarpa* oil from different geographic regions

产地	角鲨烯	β -谷甾醇	维生素 E	总酚	磷脂
陕西汉中	170.95 ± 1.54 ^a	418.64 ± 0.33 ^c	266.12 ± 0.47 ^a	22.19 ± 1.60 ^b	1.96 ± 0.08 ^d
四川绵阳	135.34 ± 8.41 ^b	268.59 ± 0.61 ^f	138.75 ± 0.39 ^e	28.45 ± 0.35 ^a	3.94 ± 0.08 ^e
四川泸州	79.51 ± 1.08 ^d	472.42 ± 0.85 ^a	244.92 ± 1.45 ^b	28.02 ± 0.80 ^a	1.10 ± 0.02 ^e
云南威信	72.18 ± 0.53 ^e	452.83 ± 0.93 ^b	218.11 ± 1.65 ^c	19.31 ± 0.86 ^c	1.17 ± 0.01 ^e
贵州仁怀	64.22 ± 1.54 ^f	401.79 ± 0.74 ^d	195.71 ± 2.90 ^d	16.92 ± 0.60 ^d	0.82 ± 0.01 ^f
贵州贵阳	71.15 ± 0.71 ^e	262.89 ± 3.49 ^g	39.75 ± 0.37 ^g	26.92 ± 0.75 ^a	4.05 ± 0.01 ^b
贵州榕江	96.72 ± 1.06 ^c	298.47 ± 0.07 ^e	71.05 ± 0.07 ^f	20.64 ± 0.17 ^c	4.29 ± 0.01 ^a

注:同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)

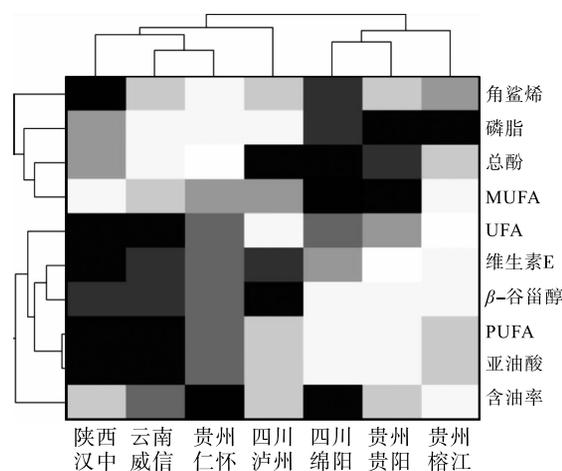
Note: Different letters in the same column indicate significant difference ($p < 0.05$)

由表 4 可知,不同产地山桐子油的活性物质含量具有明显差异。不同产地山桐子油的角鲨烯含量在 64.22 ~ 170.95 mg/100 g 之间,其中陕西汉中的角鲨烯含量最高,为 170.95 mg/100 g,贵州仁怀的最低,为 64.22 mg/100 g;不同产地山桐子油的 β -谷甾醇含量在 262.89 ~ 472.42 mg/100 g 之间,其中四川泸州的 β -谷甾醇含量最高,为 472.42 mg/100 g,贵州贵阳的最低,为 262.89 mg/100 g;不同产地山桐子油的维生素 E 含量在 39.75 ~ 266.12 mg/100 g 之间,其中贵州贵阳的维生素 E 含量最低,陕西汉中的最高;不同产地山桐子油的总酚含量在 16.92 ~ 28.45 mg/100 g 之间,其中四川绵阳、四川泸州、贵州贵阳的总酚含量分别为 28.45、28.02、26.92 mg/100 g,显著高于贵州仁怀的(16.92 mg/100 g) ($p < 0.05$)。总酚具有抗氧化作用,曹子伦等^[17]发现总酚含量与油脂的 DPPH、ABTS 自由基清除率均存在显著正相关($p < 0.05$)。磷脂会降低油脂的储藏稳定性,因此在精炼过程中一般需要脱胶处理以降低磷脂含量。不同产地山桐子油的磷脂含量在 0.82 ~ 4.29 mg/100 g 之间,其中贵州榕江的最高,为 4.29 mg/100 g,贵州仁怀的最低,为 0.82 mg/100 g。综上,产地对山桐子油活性物质含量影响较大,与 Zhang 等^[18]对 5 个不同地区山桐子中生育酚、 β -谷甾醇、总酚含量的测定结果一致。而不同产地山桐子油活性物质含量的差异,可能与山桐子的品种及产地有关^[19]。

2.3 不同产地山桐子特征品质指标 HCA 和 PCA

对不同产地的山桐子品质指标进行 HCA,聚类因子包含亚油酸、PUFA、磷脂、 β -谷甾醇、维生素 E、MUFA、UFA、含油率、角鲨烯、总酚 10 个特征指标。不同产地山桐子 10 个特征品质指标的聚类热

图见图 1。



注:同一指标颜色从黑色到白色依次表示含量由高到低

Note: The color from black to white indicates the content from high to low

图 1 不同产地山桐子特征品质指标的聚类热图

Fig. 1 Clustering heat maps of characteristic quality indexes of *Idesia polycarpa* from different geographic regions

由图 1 可知,聚类分析将 7 个产地的山桐子分为两类,其中陕西汉中、四川泸州、云南威信、贵州仁怀为一类,贵州贵阳、贵州榕江、四川绵阳为一类。

PCA 是利用降维的思想,把多个独立的指标转化为几个综合指标(主成分)的多元统计方法^[20],最终以几个主成分代替多个指标进行综合评价。不同产地山桐子特征品质指标的 PCA 载荷矩阵如表 5 所示。

由表 5 可知,共提取 4 个主成分,特征值均大于 1,贡献率分别为 53.582%、17.360%、13.675%、10.948%,累积方差贡献率为 95.566%,4 个主成分能够有效解释几乎全部的原始样本信息,故选取 4 个主成分评价山桐子的品质。主成分 1(PC1)的主

要评价指标为亚油酸、PUFA、磷脂、 β -谷甾醇、维生素 E, 主成分 2 (PC2) 的主要评价指标是 MUFA、UFA、含油率, 主成分 3 (PC3) 的主要评价指标为角鲨烯, 主成分 4 (PC4) 的主要评价指标为总酚。

表 5 不同产地山桐子特征品质指标的 PCA 载荷矩阵

Table 5 PCA load matrix of quality index of *Idesia polycarpa* from different geographic regions

特征指标	载荷系数			
	PC1	PC2	PC3	PC4
含油率(X_1)	0.255	0.624	-0.640	-0.182
亚油酸(X_2)	0.950	0.068	0.173	-0.204
UFA(X_3)	0.606	0.684	0.055	-0.240
MUFA(X_4)	-0.709	0.637	-0.250	0.068
PUFA(X_5)	0.944	-0.003	0.223	-0.217
角鲨烯(X_6)	0.077	0.514	0.792	-0.044
β -谷甾醇(X_7)	0.863	-0.188	-0.112	0.451
维生素 E(X_8)	0.852	0.212	0.055	0.450
总酚(X_9)	-0.634	0.351	0.164	0.638
磷脂(X_{10})	0.867	-0.029	-0.378	0.309
特征值	5.358	1.736	1.368	1.095
贡献率/%	53.582	17.360	13.675	10.948
累积贡献率/%	53.582	70.942	84.618	95.566

将单个特征向量结合起来, 以各主成分的贡献率为权重, 用 4 个新的山桐子综合评价指标 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 取代原来的 10 个变量(表 5)。以载荷系数与特征值 1/2 次方的比值作为相应主成分的得分系数, 得到的线性关系为: $F_1 = 0.110X_1 + 0.410X_2 + 0.262X_3 - 0.306X_4 + 0.408X_5 + 0.033X_6 + 0.373X_7 + 0.368X_8 - 0.274X_9 + 0.375X_{10}$; $F_2 = 0.474X_1 + 0.052X_2 + 0.519X_3 - 0.483X_4 + 0.002X_5 + 0.390X_6 - 0.143X_7 + 0.161X_8 + 0.266X_9 - 0.022X_{10}$; $F_3 = -0.547X_1 + 0.148X_2 + 0.047X_3 - 0.214X_4 + 0.191X_5 + 0.677X_6 - 0.096X_7 + 0.047X_8 + 0.140X_9 - 0.323X_{10}$; $F_4 = -0.174X_1 - 0.195X_2 - 0.229X_3 + 0.065X_4 - 0.207X_5 - 0.042X_6 + 0.431X_7 + 0.430X_8 + 0.610X_9 + 0.295X_{10}$ 。

由各主成分得分和贡献率加权求和得到综合评价函数, 山桐子品质质量综合评价函数表达式为 $F = 0.5358F_1 + 0.1736F_2 + 0.1368F_3 + 0.1095F_4$ 。通过上述表达式计算出不同产地山桐子品质综合得分(F), 综合得分越大, 表明该产地山桐子综合品质越好。不同产地山桐子综合得分见表 6。

由表 6 可知, 陕西汉中山桐子的综合得分最高, 为 1.73, 表明该地区的山桐子品质较好, 云南威信

表 6 不同产地山桐子主成分得分与综合评价

Tab 6 Principal component score and comprehensive evaluation of *Idesia polycarpa* from different geographic regions

产地	F_1	F_2	F_3	F_4	综合得分	排名
陕西汉中	2.46	0.79	2.01	0.00	1.73	1
四川绵阳	-2.33	2.23	-0.12	0.09	-0.87	5
四川泸州	0.15	-0.79	-0.44	2.25	0.13	4
云南威信	2.61	-0.18	-0.39	-0.45	1.27	2
贵州仁怀	1.69	0.03	-1.76	-0.78	0.58	3
贵州贵阳	-2.78	0.03	-0.12	-0.39	-1.56	7
贵州榕江	-1.80	-2.05	0.82	-0.73	-1.29	6

3 结论

通过测定 7 个产地山桐子果实成分及其油脂的品质指标, 发现不同产地山桐子的品质指标均具有显著差异, 这是由于不同地区的温度、降水、土壤等环境因素造成的。其中: 贵州仁怀与四川绵阳山桐子果实有较高的含油率; 陕西汉中与云南威信山桐子油的亚油酸含量最高; 陕西汉中山桐子油的维生素 E、角鲨烯含量均高于其他产地的。采用层次聚类分析对不同产地山桐子进行差异性分析发现, 陕西汉中、四川泸州、云南威信、贵州仁怀山桐子为一类, 贵州贵阳、贵州榕江、四川绵阳的为另一类。通过主成分分析对各产地山桐子品质进行综合评价, 结果显示陕西汉中的山桐子综合得分最高, 云南威信的次之。综上, 产地是影响山桐子品质的因素之一。

参考文献:

- [1] RANA S, LIU Z. Study on the pattern of vegetative growth in young dioecious trees of *Idesia polycarpa* Maxim [J]. *Trees*, 2021, 35(1): 69-80.
- [2] 尚祖飞, 徐甜甜, 邹康, 等. 山桐子鲜果干燥方式对山桐子油脂品质的影响[J]. *中国油脂*, 2024, 49(1): 20-24.
- [3] 范睿深. 山桐子油脂合成相关基因的克隆及功能分析[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [4] YE Y, JIA R R, TANG L, et al. *In vivo* antioxidant and anti-skin-aging activities of ethyl acetate extraction from *Idesia polycarpa* defatted fruit residue in aging mice induced by D-galactose[J/OL]. *Evid Based Compl Alternat Med*, 2014, 2014: 185716[2024-07-27]. <https://doi.org/10.1155/2014/185716>.
- [5] 张文龙. 山桐子果和籽的组成、特性与制炼油工艺研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2023.
- [6] LI Y, PENG T, HUANG L, et al. The evaluation of lipids raw material resources with the fatty acid profile and morphological characteristics of *Idesia polycarpa* Maxim. var. *vestita* Diels fruit in harvesting[J]. *Ind Crops Prod*, 2019, 129: 114-122.

(下转第 152 页)

- 食品工业, 2011(10): 99 - 102.
- [6] 孙建辉, 王平. 螺杆挤出机优化设计的现状及发展[J]. 现代制造工程, 2009(12): 9 - 12.
- [7] 刘平. 同向双螺杆挤出机浅析[J]. 农民致富之友, 2017(15): 123.
- [8] 付昱东, 何东, 杨庆余, 等. 挤压膨化技术在玉米深加工产业中研究现状及应用[J]. 农产品加工, 2020(2): 68 - 71, 76.
- [9] 耿孝正. 双螺杆挤出机原理及其应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2002: 4.
- [10] 李垚, 王丽艳. 基于摆线针轮传动的同轴异速单螺杆挤出机的仿真分析[J/OL]. 中国油脂: 1 - 10 [2024 - 01 - 07]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230485>.
- [11] 金子云, 郭树国, 左晓甜, 等. 新型变速单螺杆挤出机中熔体流动特性的数值模拟[J]. 饲料工业, 2024, 45(2): 31 - 37.
- [12] 汤霖森, 郭树国, 王丽艳. 基于 ANSYS 的带行星轮同轴变速单螺杆挤出机三维流场分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 107 - 110.
- [13] 班董董, 王丹华, 李亚楠, 等. 偏心距对波状单螺杆元件混合性能的影响[J]. 塑料, 2023, 52(2): 145 - 150.
- [14] 邹思雨, 任建民, 朱向哲. 新型单螺杆挤出机组合螺杆混合特性分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2023, 43(1): 54 - 60.
- [15] 韩海川, 刘谨, 李开国, 等. 双螺杆啮合元件与反螺纹元件对流场影响的仿真[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(6): 74 - 77, 87.
- [16] 郭树国, 于淼, 王丽艳, 等. 带有开槽中性捏合块和反向螺纹双螺杆挤出机的三维流场分析[J]. 沈阳化工大学学报, 2020, 34(4): 358 - 362.
- [17] 刘忠尧, 黄志刚, 代祥基, 等. 正向螺纹元件组合对反向螺纹元件熔体输送特性的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 66 - 71, 174.
- [18] 杜风娇, 刘建刚. 基于 ANSYS 摆线齿轮设计研究与 UG 制造分析[J]. 新余学院学报, 2018, 23(1): 14 - 18.
- [19] 曹娟. 摆线轮的建模与仿真[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(23): 111 - 113.
- [20] 陈俊, 何克龙, 沈磊, 等. 摆线转子泵的设计计算及参数化建模[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(5): 103 - 107.
- [21] 郭树国, 王丽艳, 刘强. 结构参数对单螺杆挤压机生产率影响的研究[J]. 粮油加工与食品机械, 2005(3): 56 - 57.
- [22] 赵学端, 廖其奠. 粘性流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.

(上接第 134 页)

- [7] 陈子茜, 陈耀兵, 黄秀芳, 等. 采收期对“鄂选2号”山桐子果实成分及脂肪酸组成变化影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(2): 96 - 103.
- [8] 咎鹏, 张琳, 祖元刚, 等. 山桐子 (*Idesia polycarpa* Maxim) 果实多酚的抗炎、抗菌活性研究[J]. 植物研究, 2016, 36(6): 955 - 960.
- [9] 闻乐嫣, 毛建梅, 安小风, 等. 毛叶山桐子果实化学成分及脂肪酸动态分析与评价[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 198 - 207.
- [10] 宋明发, 杨芸, 白冉冉, 等. 不同方法提取山桐子油的品质及体外抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(3): 28 - 32, 38.
- [11] 张红霞, 沈祥震, 卢克刚, 等. 气相色谱法同时测定植物油脂中的脂肪酸和角鲨烯含量[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(1): 72 - 78.
- [12] 林树真, 龙婷, 段明慧, 等. HPLC 法同时测定油茶籽油中的 γ -生育酚、 β -谷甾醇和角鲨烯[J]. 现代食品科技, 2018, 34(6): 218 - 223.
- [13] 董聪慧, 董文江, 程金焕, 等. 咖啡豆烘焙过程中油脂脂肪酸组成、挥发性风味及活性成分的演变规律[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 210 - 222.
- [14] LI N, SUN Y R, HE L B, et al. Amelioration by *Idesia polycarpa* Maxim. var. *vestita* Diels. of oleic acid - induced nonalcoholic fatty liver in HepG2 cells through antioxidant and modulation of lipid metabolism [J/OL]. *Oxid Med Cell Longev*, 2020, 2020: 1208726 [2024 - 07 - 27]. <https://doi.org/10.1155/2020/1208726>.
- [15] YUAN G, GUAN Y, YI H, et al. Antibacterial activity and mechanism of plant flavonoids to gram - positive bacteria predicted from their lipophilicities [J/OL]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 10471 [2024 - 07 - 27]. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90035-7>.
- [16] 张欢. 山桐子果实表型多样性与优树生长性状研究[D]. 四川南充: 西华师范大学, 2021.
- [17] 曹子伦, 雷芬芬, 郑竟成, 等. 不同产地南瓜籽油组成及氧化稳定性的差异[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 283 - 289.
- [18] ZHANG W, ZHAO C, KARRAR E, et al. Analysis of chemical composition and antioxidant activity of *Idesia polycarpa* pulp oil from five regions in China [J/OL]. *Foods*, 2023, 12(6): 1251 [2024 - 07 - 27]. <https://doi.org/10.3390/foods12061251>.
- [19] 刘海, 王进, 许杰, 等. 贵州不同油茶物种及产地对油茶籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2022, 47(7): 145 - 152.
- [20] 田朝杰, 孙婵婵, 陈宁, 等. 主成分分析在蛋清蛋白基脂肪模拟物综合评价中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(4): 69 - 74.