

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240222005

不同产地文冠果籽特性及其籽油理化 指标差异分析

苏优拉^{1,2}, 张 鼎^{1,2}, 孟祥雪^{1,2}, 晋子康^{1,2}, 陈贵林^{1,2*}

(1. 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古自治区中蒙药材规范化生产工程技术研究中心, 呼和浩特 010070)

摘 要: **目的** 研究不同产地文冠果种子特性及籽油的脂肪酸组成。**方法** 从全国 11 个省(区)收集 21 份文冠果材料, 对其形态特征和种仁含油率等指标进行测定, 进一步采用 CO₂ 超临界萃取技术提取文冠果籽油, 利用气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)检测其脂肪酸组成及相对含量。**结果** 不同产地文冠果种子的横径和纵径差异不大, 但千粒重、种仁重和种仁出油率有显著差异。其中, 山东省临沂市所产的文冠果种仁含油量为最高, 达 50.49%。文冠果籽油中共检测出棕榈酸、亚油酸、油酸、硬脂酸、二十碳一烯酸、芥酸和神经酸 7 种脂肪酸。不同产地籽油中单不饱和脂肪酸含量在 35.06%~55.96%之间, 多不饱和脂肪酸在 32.60%~64.64%之间, 饱和脂肪酸含量差异显著。**结论** 文冠果籽油中不饱和脂肪酸含量较高, 还含有少见的功能性神经酸, 是营养价值很高的一种木本油料作物。综合分析种子形态和脂肪酸组成, 发现内蒙古赤峰和山东临沂地区的文冠果种子千粒重、种仁出油率和不饱和脂肪酸含量高于其他地区, 品质较优。

关键词: 文冠果; 种子形态; 产地; 籽油; 脂肪酸组成

Differential analysis of seed characteristics and physicochemical indexes of seed oil of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. from different provenances

SU You-La^{1,2}, ZHANG Ding^{1,2}, MENG Xiang-Xue^{1,2}, JIN Zi-Kang^{1,2}, CHEN Gui-Lin^{1,2*}

(1. School of Life Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China; 2. The Good Agriculture Practice Engineering Technology Research Center of Chinese and Mongolian Medicine, Hohhot 010070, China)

ABSTRACT: Objective To study the differences in seed characteristics and physicochemical indexes of seed oil of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. from various regions. **Methods** *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. seeds were collected from 21 regions nationwide, and their morphological characteristics were analyzed. Supercritical fluid extraction was used to extract seed oil, and its fatty acid composition and relative content were detected by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). **Results** There was no significant difference in seed length and width among different provenances, but there were significant differences in 1000-grain weight, kernel weight, and kernel oil yield. The highest kernel oil yield was found in samples from Linyi City, Shandong Province, which reached

基金项目: 内蒙古自治区科技成果转化项目(CGZH2018127)

Fund: Supported by the Scientific and Technological Achievement Transformation Project of Inner Mongolia (CGZH2018127)

*通信作者: 陈贵林, 教授, 主要研究方向为药用植物资源的综合利用。E-mail: guilinch61@163.com

*Corresponding author: CHEN Gui-Lin, Professor, School of Life Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China. E-mail: guilinch61@163.com

50.49%。Seven kinds of fatty acid components were detected in *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. seed oil, including palmitic acid, linoleic acid, oleic acid, stearic acid, eicosenoic acid, erucic acid, and neuric acid. There was a significant difference in the content of unsaturated fatty acids. The content of monounsaturated fatty acids in seed oil ranged from 35.06% to 55.96%, and the content of polyunsaturated fatty acids ranged from 32.60% to 64.64%.

Conclusion *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. seed oil contains extremely high amount of unsaturated fatty acids. It also contains functional neuric acid, which is rare in other species, making it a woody plant oil with high nutritional value. Through comprehensive analysis of seed morphology and fatty acid composition, it has found that the thousand grain weight, kernel oil yield, and unsaturated fatty acid content of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. in Chifeng, Inner Mongolia and Linyi, Shandong are higher than those in other regions, indicating better quality.

KEY WORDS: *Xanthoceras sorbifolium* Bunge.; seed morphology; provenance; seed oil; fatty acid composition

0 引言

木本油料作物具有产量高、收益期长、抗逆性强、种植技术要求低等特点。近年来,木本油脂因其高营养价值和特有的生物活性物质,受到了广泛关注^[1-2]。发展木本油料,不仅可增产油脂,还可利用树木防风固沙,保持水土,有利于当地生态和经济协同发展。我国木本油料作物种类繁多,例如油茶、核桃、油橄榄、椰子和油桐等^[3-6],资源丰富、分布广泛。

文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* Bunge.)为落叶灌木或小乔木,是无患子科文冠果属植物,广泛分布于我国北方地区,有“北方油茶”之称,其茎干或枝条可作药用^[7]。文冠果种仁含大量脂肪酸,包括棕榈酸、硬脂酸、亚油酸、油酸、花生烯酸、芥酸和神经酸等,其中不饱和脂肪酸含量可达 85%~90%^[8-9]。油酸有利于软化血管,能通过降低胆固醇调节血脂水平,参与人体新陈代谢^[10]。亚油酸是必需脂肪酸,能够降胆固醇、降血压、降血脂和预防动脉粥样硬化^[11]。神经酸作为一种功能性脂肪酸,具有促进大脑发育、降血脂、防治神经受损的作用,其生物合成以芥酸为基础,神经酸的含量多与芥酸含量成正比^[12-13]。动物实验结果显示,神经酸能够改善帕金森病导致的运动障碍,缓解自身免疫性脑脊髓炎,调节脱髓鞘小鼠的脂肪酸代谢等^[14-16]。除作为食用油脂外,文冠果油亦可作工业用油,文冠果粕可作精饲料,具有广阔的应用前景^[17]。脂肪酸是评价油脂品质的重要指标之一,种质、地理和气候环境等因素均会对油脂的脂肪酸组成及含量产生影响^[18]。有报道通过比较 47 个产地的油茶籽油发现,其中饱和脂肪酸含量差异显著,而不饱和脂肪酸含量差异不显著^[19]。甘肃兰州产牡丹籽油的亚油酸含量显著低于其他地区,牡丹籽油中角鲨烯、油酸和 α -亚麻酸含量与降雨量、年均温度和海拔等显著相关^[20]。已有研究报道了不同提取工艺和品种对文冠果油理化性质的影响,且多采用了传统的索式提取、压榨和浸出等方法^[21-23]。文冠果在我国广泛分布,但已有的研究在一定程度上缺乏系统性。目前,文冠果虽已大规模

种植,但人工栽植中存在着品种差异大、结实不稳定和出油率差异较大等问题^[24],影响其经济效益和深度开发利用。

本研究从全国 11 个省(区)收集了 21 份文冠果材料,采用 CO₂ 超临界萃取技术提取文冠果籽油,利用气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)检测脂肪酸组成及其相对含量,并进行聚类分析,以为文冠果优良品种选育及种植区划提供参考,进一步为我国文冠果资源开发利用提供数据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

21 份成熟的文冠果种子样品:2020 年 9~11 月,从内蒙古自治区、甘肃省、山东省、宁夏回族自治区、河南省、吉林省等 11 个省(区)收集。文冠果果实均采集自自然散生的成年植株,取样地的地理环境及生态因子数据由当地相关部门提供,见表 1。

14%三氟化硼甲醇溶液(分析纯)、正己烷(色谱纯)(美国 Sigma 公司);甲醇(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

7890B-5977A 气相色谱-质谱联用仪(美国安捷伦公司);HA220-50-06 型超临界萃取装置(南通华安超临界萃取有限公司);JC-FW400A 粉碎机(青岛聚创嘉恒分析仪器有限公司);DHG-9070A 电热鼓风干燥箱(上海精密实验设备有限公司);DL92150P 机械式游标卡尺(0.01 mm,宁波得力文教用品有限公司);PL200 电子天平(精度 0.01 g,瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 种子形态指标的测定

种子纵径和横径的测定^[25]:每个产地随机取 100 粒种子,用精度为 0.01 mm 的游标卡尺分别测定种子的长度(种子纵轴的长度)和宽度(垂直种脐的种面横向的最大宽度),重复 3 次,计算平均值。

表 1 种质地理位置及气候特点
Table 1 Location and climatic conditions of provenances

产地	代码	经度/N°	纬度/E°	海拔/m	年降水/mm	年均温/°C	年平均日照/h
内蒙古自治区	通辽市	TL	121°19'	43°35'	233	74.8	1464
	赤峰市	CF	119°20'	41°35'	754	65.4	1488
	锡林郭勒盟	XM	115°59'	42°14'	1276	51.4	1512
	兴安盟	XAM	121°50'	46°03'	307	102.6	1475
	阿拉善盟	AL	105°33'	38°48'	1364	22.3	1606
甘肃省	白银市	BY	104°40'	36°34'	1559	45.5	1284
	庆阳市	QY	108°01'	35°49'	1185	77.3	1321
	临海市	LY	118°03'	35°07'	93	155.9	1205
山东省	菏泽市	HZ	116°04'	35°25'	45	100.9	1507
	中卫市	ZW	106°15'	37°22'	1223	44.1	1364
宁夏回族自治区	固原市	GY	106°15'	35°58'	2251	88.3	1140
	平顶山	PD	113°17'	33°36'	101	105.7	1025
河南省	三门峡市	SM	110°51'	34°28'	885	85.6	1314
	吉林市	JL	126°44'	42°58'	283	127.4	1285
吉林省	延边朝鲜族自治州	YB	129°43'	42°40'	601	99.1	1451
	四平市	SP	124°21'	43°19'	175	101.4	1475
河北省	唐山市	TS	117°56'	40°07'	74	85.9	1433
江苏省	宿迁市	SQ	118°48'	34°05'	6	164.2	994
辽宁省	铁岭市	TLK	124°10'	42°27'	161	118.0	1642
新疆维吾尔自治区	石河子市	SH	86°04'	44°18'	442	21.4	1634
陕西省	西安市	XA	109°21'	34°12'	582	96.1	1289

种形指数^[26]: 根据种子纵径和横径计算种形指数(种形指数=种子纵径/种子横径)。

种子千粒重的测定^[25]: 采用四分法, 每个产地随机选取 100 粒种子, 用测量精度为 0.01 g 的电子天平称重, 重复 6 次, 计算平均值。

种仁重测定: 随机挑选饱满的文冠果种子 30 粒, 清洗烘干后, 剥壳取仁, 用天平称量其种仁质量, 重复 3 次, 计算平均值。

1.3.2 文冠果籽油的提取

将采集到的种子阴干, 手工去除坏种、变质种等并剥去外壳, 取种仁。得到的种仁放入烘箱 50℃烘干 24 h, 控制含水率在 6%以下, 粉碎过 20 目筛。精确称取文冠果种仁粉 100 g, 采用 CO₂ 超临界萃取设备进行提取, 萃取压力为 30 MPa, 萃取温度为 50℃, CO₂ 流量为 30 L/h, 萃取时间为 120 min^[27]。得到澄清透明呈亮黄色的文冠果籽油, 准确称量并计算出油率。按照公式(1)计算。

$$\text{出油率}/\% = \frac{\text{油的质量}}{\text{文冠果种仁粉末的质量}} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.3 文冠果籽脂肪酸的甲酯化和含量测定

依照 GB/T 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》对文冠果籽油进行预处理。将 100 mg 油

样加入 4 mL 0.4 mol/L 的 KOH 甲醇溶液, 水浴回流 30 min 后加入 5 mL 三氟化硼甲醇溶液, 加入 4 mL 正己烷于沸腾混合溶液中, 冷却后再加入 20 mL NaCl 饱和溶液, 静置分层。吸取 1~2 mL 上层溶液, 加入适量 Na₂SO₄ 干燥, 备用。

采用 GC-MS 测定文冠果籽油的脂肪酸组成和含量^[28]。GC 条件如下: Agilent HP-5MS 型弹性石英毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 载气为高纯氦气(He); 进样口温度为 280℃; 分流比为 50:1; 流速 1.0 mL/min; 进样量 1.0 μL; 升温程序为: 初始温度为 70℃, 保持 2 min, 以 10℃/min 升至 280℃, 保持 9 min; MS 条件: 电子轰击(electron impact, EI)离子源, 70 eV; 离子源温度为 230℃; 四极杆温度为 150℃; 溶剂延迟时间为 4 min; 扫描范围为 50~500; 检索谱库为 NIST14.0 谱库。采用面积归一化法定量并计算文冠果籽油中饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)、单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid, MUFA)和多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)含量, 每个样品重复 3 次, 计算平均值。

1.4 数据处理

实验得到的结果使用 Excel 2016 和 SPSS 26.0 统计软件进行数据处理、方差分析和邓肯多重比较, 并采用欧氏距离法进行聚类分析, $P<0.05$ 为具有显著性差异。使用

TBtools 绘制热图。所有指标至少平行测定 3 次, 实验结果用平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 不同产地文冠果种子的物理特性及差异分析

由表 2 可知, 不同产地文冠果种仁重在 8.34~17.39 g 之间, 吉林延边地区的文冠果种仁最重。文冠果种仁出油率在 15.23%~50.49%之间, 含油量大于 40%的有内蒙古自治区通辽市和赤峰市, 吉林省的延边自治州和四平市, 新疆维吾尔自治区石河子市, 山东省临沂市和江苏省宿

迁市所收集的样品。文冠果含油量最高的产地是山东省临沂市, 达 50.49%。文献报道油茶的含油量在 50%左右, 油用牡丹在 24%~38%之间, 核桃在 60%~65%之间, 元宝枫在 45%~48%之间^[29], 文冠果的含油量与其他木本植物相近。

进一步对不同产地种子的物理特性进行了差异分析, 由表 3 可以看出, 文冠果种子 7 个表型性状指标在不同个体间存在着一定的变异, 其中种仁重和种仁出油率变异系数较高, 性状不稳定, 以上结果与文献报道基本一致^[30]。说明不同产地文冠果种子重量和含油量差异较大, 可能和产地的土壤及气候因素相关。

表 2 不同产地文冠果种子形态特征和出油率
Table 2 Morphological characteristics and oil yielding of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. seeds in different provenances

产地	种子纵径/mm	种子横径/mm	种形指数	千粒重/g	种仁重/g	种仁出油率/%
TL	11.05±1.81 ^a	8.76±1.20 ^a	1.36±0.20 ^a	793.95±6.36 ^d	11.54±0.25 ^f	43.00±1.90 ^e
CF	13.51±1.38 ^a	10.64±0.97 ^a	1.25±0.07 ^a	1002.91±6.33 ^b	14.78±0.76 ^c	43.85±1.93 ^b
XM	11.90±1.01 ^a	8.58±1.14 ^a	1.29±0.13 ^a	716.98±3.76 ^g	8.59±0.31 ^j	19.87±1.64 ^m
XAM	13.24±1.11 ^a	10.45±1.06 ^a	1.28±0.09 ^a	971.34±9.36 ^b	15.28±1.05 ^b	35.73±0.95 ^f
AL	10.82±1.66 ^a	9.37±1.70 ^a	1.36±0.13 ^a	519.44±8.25 ^j	8.34±0.93 ^k	34.17±1.68 ^f
BY	12.76±1.15 ^a	10.02±0.85 ^a	1.17±0.06 ^a	983.34±7.79 ^b	14.92±0.62 ^b	29.00±1.18 ⁱ
QY	11.59±0.88 ^a	9.45±1.07 ^a	1.31±0.03 ^a	709.04±4.98 ^h	10.82±0.46 ^f	31.15±0.83 ^h
LY	11.51±1.46 ^a	9.34±0.92 ^a	1.22±0.13 ^a	862.96±12.54 ^c	12.82±0.20 ^d	50.49±0.74 ^a
HZ	10.46±2.72 ^b	8.84±1.42 ^a	1.21±0.07 ^a	362.50±5.59 ^f	10.40±0.42 ^h	22.40±1.63 ^l
ZW	11.86±1.00 ^a	10.12±0.84 ^b	1.13±0.04 ^a	804.82±4.87 ^d	9.99±1.92 ⁱ	24.69±1.03 ^k
GY	12.51±3.13 ^a	10.33±1.23 ^a	1.30±0.15 ^a	877.26±2.85 ^c	17.36±0.42 ^a	22.48±0.81 ^l
PD	12.44±1.01 ^a	10.18±1.26 ^a	1.22±0.01 ^a	1018.82±1.40 ^b	16.89±0.74 ^a	37.10±0.55 ^f
SM	12.13±0.96 ^a	9.50±0.92 ^a	1.32±0.09 ^a	762.80±2.48 ^d	11.95±0.15 ^c	23.59±1.73 ^k
JL	12.28±1.63 ^a	9.62±1.18 ^a	1.51±0.23 ^a	745.02±13.86 ^c	10.89±1.19 ^f	30.07±0.65 ⁱ
YB	13.02±1.67 ^a	9.66±1.07 ^a	1.38±0.16 ^a	1156.94±16.10 ^a	17.39±0.18 ^a	49.40±0.64 ^a
SP	12.81±1.39 ^a	9.73±0.99 ^a	1.30±0.12 ^a	902.90±9.77 ^c	12.47±0.77 ^c	46.05±0.59 ^b
TS	11.86±1.69 ^a	8.98±0.87 ^a	1.34±0.16 ^a	779.76±5.61 ^d	11.81±0.77 ^c	15.23±0.29 ^a
SQ	11.87±0.96 ^a	9.63±0.97 ^a	1.24±0.13 ^a	652.30±2.02 ⁱ	10.56±1.30 ^g	45.39±0.91 ^b
TLK	12.80±1.45 ^a	10.44±1.00 ^a	1.31±0.13 ^a	890.23±2.70 ^c	13.70±0.82 ^c	26.18±0.61 ^j
SH	13.28±1.41 ^a	10.43±1.17 ^a	1.24±0.04 ^a	744.10±5.61 ^c	10.90±0.86 ^f	40.05±1.40 ^c
XA	12.78±1.15 ^a	10.14±0.95 ^a	1.34±0.20 ^a	771.52±2.56 ^d	12.09±0.31 ^c	33.98±0.53 ^g

注: 不同字母表示同一列之间存在显著性差异($P<0.05$), 表 4 相同。

表 3 种子形态特征的变异分析
Table 3 Variation analysis of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. seeds

项目	种子纵径/mm	种子横径/mm	种形指数	千粒重/g	种仁重/g	种仁出油率/%
平均值	12.61	9.82	1.29	828.18	12.55	33.52
最大值	15.80	12.50	1.67	1156.96	17.39	50.49
最小值	7.90	6.10	1.07	519.46	8.34	15.23
标准差	1.69	1.24	0.15	70.83	2.62	10.07
极差	7.90	6.40	0.60	637.50	9.05	35.26
变异系数/%	13.40	12.63	11.63	17.11	20.86	30.05

2.2 不同产地文冠果籽油脂肪酸组成

进一步采用 GC-MS 对不同产地文冠果籽油脂肪酸组成和含量进行测定, 结果如表 4 所示, 主要脂肪酸含量从高到低依次为: 亚油酸>油酸>芥酸>二十碳一烯酸>神经酸~棕榈酸>硬脂酸。比较分析发现, 文冠果籽油的脂肪酸组成与常见的草本和木本食用油脂相似, 均含大量的不饱和脂肪酸及少量的饱和脂肪酸^[9]。各脂肪酸的含量与其他食用油略有差异, 文冠果籽油中亚油酸含量最高, 油酸次之, 比例为 1.5:1~4:1, 而茶籽油中油酸含量最高, 棕榈酸次之^[31], 市售葵花籽油中亚油酸和油酸的比例约为 2.5:1。各产地文冠果籽油的饱和脂肪酸占 85%以上, 亚油酸和油酸的总量接近 70%, 亚油酸含量最高的产地为石河子市, 高达 64.64%, 油酸含量最高的产地为内蒙古阿拉善, 高达 29.51%。此外, 文冠果油中含有特殊功能性脂肪酸——神经酸, 平均含量为 4.89%。宁夏回族自治区固原市所采集样品的神经酸含量最高, 达 8.13%, 文冠果籽油可作为获得神经酸的宝贵资源。神经酸又名鲨鱼酸, 是一种神经营养因子。据报道, 在 974 种油脂植物中, 神经酸含量高于 2%的仅有 15 种, 其中 10 种为木本植物^[32]。文冠果籽油的脂肪酸组成和含量差异可能与文冠果种质、生长环境和提取方法等有关。研究发现, 气象、土壤养分和海拔等生态

因子对四川盆地油用牡丹种子品质具有重要影响, 其中土壤有机质和碱解氮对蛋白质和含油率的影响较大^[18]。唐东慧等^[21]用索氏提取法获得文冠果种仁油, 其神经酸含量为 1.28%~3.77%, 平均值为 2.53%, 略低于超临界 CO₂ 萃取法。对不同制油工艺进行比较, 发现水酶法提取的文冠果油不饱和脂肪酸含量最高, 而浸出法提取的文冠果油中生育酚和甾醇含量最高^[23]。

2.3 不同产地文冠果籽油脂肪酸变异特征

不同产地文冠果籽油脂肪酸相对含量的平均值、最大值、最小值、标准差、变异系数统计结果见表 5。21 个产地文冠果籽油主要脂肪酸的变异系数从大到小分别是硬脂酸、油酸、神经酸、二十碳一烯酸、芥酸、棕榈酸和亚油酸。说明不同文冠果籽油脂肪酸组成在油酸(10.39%~29.51%)、硬脂酸(1.32%~5.50%)和神经酸(2.31%~8.13%)含量方面差异较大。饱和脂肪酸中相对含量平均值最高的为棕榈酸, 其最大值出现在通辽市, 最小值出现在庆阳市, 变异系数为 14.74%, 性状相对稳定; 其次为硬脂酸, 吉林市文冠果籽油脂肪酸中硬脂酸相对含量平均值最高, 兴安盟和宿迁市较低, 极差较大, 变异系数较高, 性状不稳定。不饱和脂肪酸中平均值最高的为亚油酸, 变幅较大, 极差达到 32.04; 其次为油酸, 变异系数为 28.21%, 性状相对不稳定。

表 4 不同产地文冠果籽油脂肪酸含量(%)
Table 4 Fatty acid content of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. seed oil from different regions (%)

产地	棕榈酸 (C16:0)	亚油酸 (C18:2)	油酸 (C18:1)	硬脂酸 (C18:0)	二十碳一烯酸 (C20:1)	芥酸 (C22:1)	神经酸 (C24:1)
TL	5.90±0.93 ^a	47.21±9.40 ^b	18.13±2.48 ^f	2.40±0.59 ^e	10.05±0.30 ^b	12.89±1.16 ^b	5.09±0.43 ^b
CF	5.30±1.60 ^a	42.69±3.86 ^c	25.58±6.64 ^b	1.88±0.76 ^e	10.26±0.02 ^b	12.02±1.94 ^c	5.56±1.14 ^b
XM	5.68±0.14 ^a	50.77±3.34 ^b	16.56±0.13 ^d	1.67±0.70 ^e	7.53±0.18 ^d	8.67±0.16 ^g	2.31±0.12 ⁱ
XAM	5.67±0.43 ^a	47.35±2.01 ^b	18.83±1.01 ^e	1.43±0.85 ^d	9.09±0.65 ^b	12.05±0.55 ^c	5.56±0.23 ^b
AL	4.92±0.63 ^b	32.60±0.11 ^h	29.51±1.95 ^b	2.07±0.36 ^e	8.13±2.10 ^c	10.92±3.27 ^f	3.89±0.87 ^e
BY	5.63±1.82 ^a	51.46±6.39 ^a	14.11±1.10 ^d	3.05±1.33 ^b	11.74±2.38 ^a	14.53±0.58 ^b	5.25±0.32 ^b
QY	3.04±0.13 ^d	43.66±1.48 ^d	18.72±0.85 ^e	2.21±0.52 ^e	8.95±0.34 ^b	14.77±0.81 ^b	4.78±0.67 ^c
LY	4.85±0.36 ^b	48.71±0.46 ^b	21.03±0.46 ^b	2.28±0.85 ^e	8.55±0.74 ^b	14.41±0.49 ^b	5.16±0.27 ^b
HZ	3.65±0.62 ^c	44.89±1.34 ^c	25.44±0.88 ^b	2.00±0.74 ^e	5.51±0.98 ^f	12.35±1.13 ^c	4.26±0.53 ^d
ZW	4.93±0.53 ^b	41.83±1.12 ^c	10.39±0.46 ^e	2.49±0.81 ^e	11.14±0.47 ^a	16.18±0.40 ^a	6.36±0.06 ^b
GY	5.65±0.57 ^a	44.32±1.28 ^c	16.51±1.00 ^g	2.01±0.07 ^e	13.35±2.04 ^a	17.97±0.72 ^a	8.13±0.44 ^a
PD	4.84±0.79 ^b	42.87±1.06 ^d	13.67±1.14 ^d	2.30±0.55 ^e	12.00±0.60 ^a	15.72±0.59 ^a	6.01±0.23 ^b
SM	5.82±0.36 ^a	56.40±0.46 ^a	14.98±0.46 ⁱ	2.70±0.85 ^b	11.51±0.74 ^a	15.25±0.49 ^a	5.65±0.27 ^b
JL	4.65±0.57 ^b	54.65±9.04 ^a	13.03±5.56 ^d	5.50±2.66 ^a	9.31±0.80 ^b	11.82±1.03 ^e	3.76±0.17 ^f
YB	5.57±0.49 ^a	59.77±0.88 ^a	15.95±0.60 ^b	1.94±0.10 ^e	10.34±0.41 ^b	13.34±0.41 ^b	4.78±0.37 ^c
SP	5.63±0.53 ^a	47.31±2.06 ^b	11.80±0.45 ^e	1.86±0.55 ^e	12.11±1.60 ^a	16.11±1.56 ^a	5.20±0.48 ^b
TS	4.64±0.32 ^b	47.49±0.32 ^b	15.25±0.47 ^h	2.45±1.07 ^e	9.99±0.83 ^b	12.09±2.48 ^c	5.08±0.34 ^b
SQ	4.07±0.26 ^c	45.67±0.47 ^c	25.96±1.38 ^b	1.32±0.29 ^d	7.03±0.20 ^e	11.47±0.54 ^e	4.31±0.47 ^d
TLK	5.70±0.10 ^a	57.17±5.05 ^a	15.59±1.36 ^d	1.99±0.01 ^e	9.43±0.23 ^b	10.84±0.55 ^f	2.62±0.13 ^h
SH	5.54±0.57 ^a	64.64±0.58 ^a	14.07±0.11 ^j	1.75±0.23 ^e	9.45±0.43 ^b	11.90±0.32 ^d	3.64±0.62 ^g
XA	5.75±0.52 ^a	47.81±0.92 ^b	16.03±0.57 ^d	2.30±0.33 ^e	10.47±0.67 ^b	15.22±0.45 ^a	5.38±0.38 ^b

注: 不同字母表示同一列之间存在显著性差异(P<0.05)。

表 5 文冠果籽油脂脂肪酸变异分析
Table 5 Variation analysis of fatty acid content in *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. seed oil

项目	棕榈酸	亚油酸	油酸	硬脂酸	二十碳一烯酸	芥酸	神经酸
平均值	5.11	48.54	17.67	2.27	9.81	13.36	4.89
最大值	5.90	64.64	29.51	5.50	13.35	17.97	8.13
最小值	3.04	32.60	10.39	1.32	5.51	8.67	2.31
标准差	0.75	6.93	4.99	0.82	1.82	2.21	1.24
极差	2.86	32.04	19.12	4.17	7.85	9.30	5.82
变异系数/%	14.74	14.27	28.21	36.32	18.57	16.54	25.39

2.4 不同产地文冠果油营养价值评价

由表 6 可知, 21 个产地的文冠果籽油中 SFA、MUFA 和 PUFA 的百分含量与比值差异较为明显。SFA 含量在 5.25%~10.15%之间, MUFA 含量在 35.06%~55.96%之间, PUFA 在 32.60%~64.64%之间。油脂中合理的脂肪酸组成对机体的生长、发育及疾病防治具有重要意义^[33]。适量的 SFA 能维持细胞膜结构稳定, MUFA 与 PUFA 能改善血液循环、降低胆固醇并增强记忆力^[34]。文冠果籽油普遍富含油酸和亚油酸, 可有效补充人体所需的不饱和脂肪酸。在脂肪酸营养价值评价中, PUFA 和 SFA 的比值(P/S)是一个重要指标, 当油脂的 $P/S>2$ 时具有降血脂功效, 且比值越

大, 其降血脂功效越明显^[35]。各产地文冠果籽油的 P/S 比值均远大于 2, P/S 比值最高的为石河子市(8.87)、庆阳市(8.32)和宿迁市(8.47)。文献报道^[36], 正己烷浸提的几种坚果籽油的 P/S 比值分别为红松籽(7.97)、核桃(7.93)和葵花籽(6.99), 与文冠果籽相当。

2.5 脂肪酸聚类分析

聚类分析有利于进一步筛选优质的文冠果种质, 采用聚类分析法对不同产地文冠果籽油的脂肪酸进行分析, 结果如图 1 所示。将样品按相似程度划分类别, 使得同一类中的元素之间的相似性比其他类更强。21 个产地的文冠果籽油根据其 7 种脂肪酸的含量可分为 2 大类和 5 个亚类。

表 6 不同产地文冠果籽油营养价值评价
Table 6 Nutritional evaluation of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. seed oil from different regions

产地	SFA/%	MUFA/%	PUFA/%	P/S	S/M/P
TL	8.30	46.15	47.21	5.69	0.23:1.00:0.77
CF	7.18	53.46	42.69	5.95	0.13:1.00:1.25
XM	7.34	35.06	50.77	6.92	0.21:1.00:0.69
XAM	7.10	45.53	47.35	6.67	0.16:1.00:0.96
AL	6.99	52.45	32.60	4.67	0.13:1.00:1.61
BY	8.68	45.63	51.46	5.93	0.19:1.00:0.89
QY	5.25	47.22	43.66	8.32	0.11:1.00:1.08
LY	7.13	49.15	48.71	6.83	0.15:1.00:1.01
HZ	5.65	47.55	44.89	7.95	0.12:1.00:1.06
ZW	7.42	44.07	41.83	5.64	0.17:1.00:1.05
GY	7.66	55.96	44.32	5.79	0.17:1.00:1.04
PD	7.14	47.40	42.87	6.00	0.15:1.00:1.11
SM	8.52	47.38	56.40	6.62	0.23:1.00:0.66
JL	10.15	37.92	54.65	5.38	0.27:1.00:0.69
YB	7.50	44.41	59.77	7.96	0.22:1.00:0.58
SP	7.49	45.23	47.31	6.32	0.17:1.00:0.96
TS	7.10	42.41	47.49	6.69	0.17:1.00:0.89
SQ	5.39	48.77	45.67	8.47	0.11:1.00:1.07
TLK	7.69	38.48	57.17	7.44	0.20:1.00:0.67
SH	7.29	39.06	64.64	8.87	0.25:1.00:0.45
XA	8.06	47.11	47.81	5.93	0.17:1.00:0.99

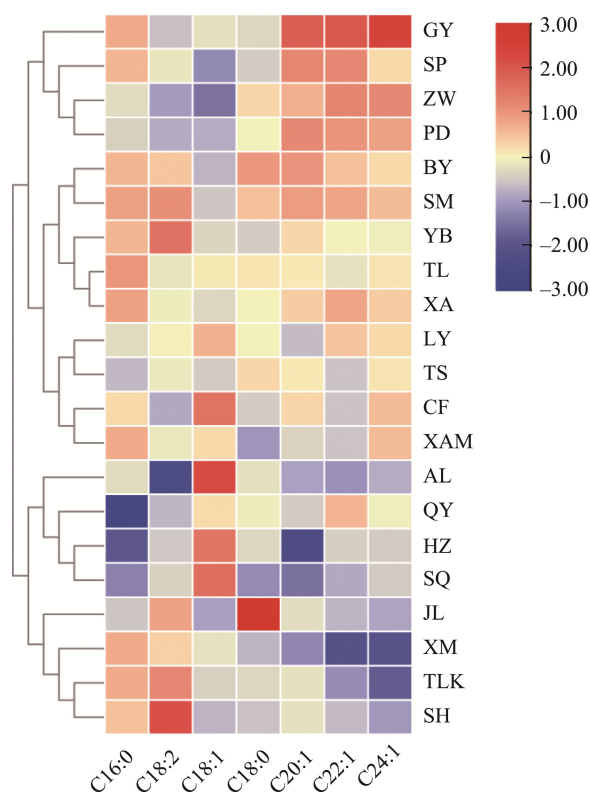


图1 不同产地文冠果籽油脂肪酸聚类热图分析

Fig.1 Heatmap clustering of fatty acids in *Xanthoceras sorbifolium* Bunge seed oil from different regions

第一类群中棕榈酸、亚油酸和油酸含量高于第二类群,而花生烯酸、芥酸和神经酸含量较低,以锡林郭勒盟、铁岭市和石河子市的样品为代表。第二类群中花生烯酸、芥酸和神经酸含量显著高于第一类群,以宁夏固原市和中卫市及河南省平顶山市的样品为代表。此外,大部分地区样品中的芥酸含量与神经酸含量成正比,因神经酸的生物合成以芥酸为基础^[12]。综上可知,从第二类群中可筛选富含神经酸的文冠果品种,在第一类群中可筛选低芥酸、高油酸和亚油酸的文冠果品种。

3 结 论

通过比较从全国 11 个省(区)收集的 21 份文冠果种子形态特征和出油率,发现不同地区的文冠果种子千粒重、种仁重和种仁出油率存在显著差异。对 CO₂ 超临界萃取的文冠果籽油进行脂肪酸组成分析,发现其主要脂肪酸有 7 种,比例与常见的食用油脂相近。其中油酸和亚油酸的含量最高,21 份样品的单不饱和脂肪酸含量在 35.06%~55.96%之间,多不饱和脂肪酸在 32.60%~64.64%之间,不饱和脂肪酸含量差异显著,特有的功能性神经酸含量达 2.31%~8.13%,可作为高级木本食用油加以开发利用,聚类分析进一步为优良种质的筛选提供了指导。文冠

果种子的形态和出油率及其籽油的差异主要来源于种质和生长环境,其与种源、土壤和环境因子的相关性有待进一步阐明。本研究可以为我国文冠果资源开发利用和优良品种选育提供参考。下一步将继续研究不同地区文冠果籽油中的酚类、黄酮类、维生素和甾醇等活性成分,探索其抗氧化活性和氧化稳定性。

参考文献

- [1] 王瑞元. 我国木本油料产业发展现状、问题及建议[J]. 中国油脂, 2020, 45(2): 1-2, 20.
WANG RY. Development status, problems and suggestions of woody oil industry in China [J]. China Oils Fats, 2020, 45(2): 1-2, 20.
- [2] XU L, WANG W, BAI K, *et al.* Efficacy mechanisms research progress of the active components in the characteristic woody edible oils [J]. Food Front, 2023, 4(4): 1578-1605.
- [3] LI G, MA L, YAN Z, *et al.* Extraction of oils and phytochemicals from *Camellia oleifera* seeds: Trends, challenges, and innovations [J]. Processes, 2022, 10(8): 1489.
- [4] 龙伟, 曾燕如, 盛建喜. 我国油橄榄产业发展的挑战与对策[J]. 中国油脂, 2023, 48(12): 20-25.
LONG W, ZENG YR, SHENG JX. Challenges and countermeasures in the development of olive industry in China [J]. China Oils Fats, 2023, 48(12): 20-25.
- [5] 于佳晔, 张咪, 彭越, 等. 核桃油组分及其在氧化过程中的变化研究进展[J]. 中国油脂, 2023, 48(11): 52-56.
YU JY, ZHANG M, PENG Y, *et al.* Research progress on components of walnut oil and their changes during oxidation [J]. China Oils Fats, 2023, 48(11): 52-56.
- [6] 任传义, 张延平, 汤富彬, 等. 油茶籽油、油橄榄油、核桃油、香榧油中主要化学成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(12): 5011-5016.
REN CY, ZHANG YP, TANG FB, *et al.* Analysis of main chemical components in camellia oil, olive oil, walnut oil and torreyia seeds oil [J]. J Food Saf Qual, 2015, 6(12): 5011-5016.
- [7] XIAO J, SUN L, PAN Y, *et al.* Multipurpose research from a native woody oil plant *Xanthoceras sorbifolia* in China [J]. Forests, 2023, 14(1): 86.
- [8] 陆昕, 李显玉, 杨素芝, 等. 文冠果种仁营养物质和脂肪酸组成与氨基酸的评价[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 74-80.
LU X, LI XY, YANG SZ, *et al.* Composition of nutrient substances and fatty acids and evaluation of amino acids in the seed kernel of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge [J]. J Chin Cereals Oils Ass, 2021, 36(6): 74-80.
- [9] 许佳敏, 佟祎鑫, 王菊花, 等. 文冠果油的营养成分及功能活性研究进展[J]. 中国油脂, 2022, 47(10): 77-82.
XU JM, TONG YX, WANG JH, *et al.* Research progress on nutritional ingredients and functional activities of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge oil [J]. China Oils Fats, 2022, 47(10): 77-82.

- [10] BOWEN KJ, KRIS-ETHERTON PM, SHEARER GC, *et al.* Oleic acid-derived oleoylethanolamide: A nutritional science perspective [J]. *Prog Lipid Res*, 2017, 67(1): 1–15.
- [11] COCCHI M, MONDO E, MINUTO C, *et al.* Linoleic acid: Have we understood how it works in psychopathologies and ischemic cardiovascular diseases? [J]. *Progr Nutr*, 2020, 22(1): 7–11.
- [12] LIU F, WU R, MA X, *et al.* The advancements and prospects of nervonic acid production [J]. *J Agric Food Chem*, 2022, 70(40): 12772–12783.
- [13] LI Q, CHEN J, YU X, *et al.* A mini review of nervonic acid: Source, production, and biological functions [J]. *Food Chem*, 2019, 301: 125286.
- [14] HU D, CUI Y, ZHANG J. Nervonic acid amends motor disorder in amouse model of Parkinsons disease [J]. *Transl Neurosci*, 2022, 13(1): 71.
- [15] LIU S, SUN H, ZHOU Q, *et al.* Nervonic acid regulates the oxidative imbalance in experimental allergic encephalomyelitis: Original paper [J]. *Food Sci Technol Res*, 2021, 27(2): 269–280.
- [16] 陈方会, 杜俊民, 张芳荣, 等. 文冠果油神经酸乙酯对脱髓鞘小鼠脂肪酸、血脂的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(2): 235–242.
- CHEN FH, DU JM, ZHANG FR, *et al.* Effect of ethyl nervonic acid from *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. oil on fatty acids, blood lipid of demyelinating mice [J]. *J Food Saf Qual*, 2024, 15(2): 235–242.
- [17] 张云龙, 郑卫江, 姚文. 文冠果粕替代豆粕对 21–42 日龄肉鸡生长性能和盲肠菌群结构的影响[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(8): 3624–3635.
- ZHANG YL, ZHENG WJ, YAO W. Effects of replacement of soybean meal with *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. meal on growth performance and *Cecal microbiota* structure of broilers from 21 to 42 days of age [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2020, 32(8): 3624–3635.
- [18] 孙志鹏, 武华卫, 方颖, 等. 四川盆地油用牡丹种子品质地区差异及其与生态因子的关系[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(10): 1766–1775.
- SUN ZP, WU HW, FANG Y, *et al.* Regional difference of seed quality and its relationship with ecological factors of oil peony in Sichuan basin [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2021, 41(10): 1766–1775.
- [19] 王亚萍, 费学谦, 姚小华, 等. 不同产地油茶籽脂肪酸及甘油三酯的主成分分析和聚类分析[J]. *中国油脂*, 2021, 46(9): 112–119.
- WANG YP, FEI XQ, YAO XH, *et al.* Principal component analysis and cluster analysis of fatty acids and triglycerides in oil-tea camellia seeds from different origins [J]. *China Oils Fats*, 2021, 46(9): 112–119.
- [20] 王灵芝, 徐宝成, 陈树兴, 等. 不同产地及品种牡丹籽油脂肪酸和角鲨烯含量的分析[J/OL]. *中国油脂*: 1–12. [2024-03-15]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230081>
- WANG LZ, XU BC, CHEN SX, *et al.* Analysis of fatty acid and squalene content in peony seed oil from different producing areas and varieties [J/OL]. *China Oils Fats*: 1–12. [2024-03-15]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230081>
- [21] 唐东慧, 阮成江, 孟婷, 等. 不同种质文冠果含油量及油中脂肪酸组成分析[J]. *中国油脂*, 2017, 42(3): 77–81.
- TANG DH, RUAN CJ, MENG T, *et al.* Oil contents and fatty acid composition in different germplasm of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. [J]. *China Oils Fats*, 2017, 42(3): 77–81.
- [22] 刘玉兰, 郭莹莹. 不同产地原料和不同工艺制取文冠果油的综合品质研究[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(6): 1–6.
- LIU YL, GUO YY. Study on comprehensive quality of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. oil from different producing areas and different processes [J]. *Cere Oils*, 2020, 33(6): 1–6.
- [23] 郭雄, 彭吟雪, 胡传荣, 等. 不同制油工艺对文冠果油特性及品质影响的研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(9): 8–13.
- GUO X, PENG YX, HU CR, *et al.* Effects of different oil producing processes on characteristics and quality of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge. oil [J]. *China Oils Fats*, 2017, 42(9): 8–13.
- [24] 张海燕. 文冠果繁殖技术研究进展[J]. *中国野生植物资源*, 2022, 41(7): 51–54.
- ZHANG HY. Research progress of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge seedling technology [J]. *Chin Wild Plant Res*, 2022, 41(7): 51–54.
- [25] 赵鑫丹, 张东为, 戈素芬, 等. 沙棘果实和种子表型性状及变异分析[J]. *种子*, 2023, 42(9): 105–112.
- ZHAO XD, ZHANG DW, GE SF, *et al.* Analysis on variation and phenotypic characters in berries and seeds of *Hippophae rhamnoides* [J]. *Seed*, 2023, 42(9): 105–112.
- [26] 韩净, 叶腾云, 叶代全, 等. 不同结实量的杉木种子发芽率与种实性状相关性通径分析[J]. *种子*, 2023, 42(7): 72–76, 95.
- HAN J, YE TY, YE DQ, *et al.* Correlation and path analysis between seed germination rate and seed characters of *Cunninghamia lanceolata* with different seed yield [J]. *Seed*, 2023, 42(7): 72–76, 95.
- [27] 王娅丽, 赵卫英, 刘思洋, 等. 文冠果籽油的超临界萃取及其脂肪酸组成[J]. *经济林研究*, 2014, 32(1): 135–139.
- WANG YL, ZHAO WY, LIU SY, *et al.* Supercritical extraction and fatty acid composition of seed oil in *Xanthoceras sorbifolia* [J]. *Non-wood Forest Res*, 2014, 32(1): 135–139.
- [28] 李歌, 张超, 苏优拉, 等. 高粱糠乙醇提取物对 4 种植物油氧化稳定性的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(3): 118–121, 126.
- LI G, ZHANG C, SU YL, *et al.* Effect of ethanol extracts from sorghum bran on oxidative stability of 4 kinds of vegetable oils [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2017, 38(3): 118–121, 126.
- [29] 郭咪咪, 王瑛瑶, 闫军, 等. 典型木本油料油脂的特性分析[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(2): 74–79.
- GUO MM, WANG YY, YAN J, *et al.* Characteristics analysis of typical woody oils and fats [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2017, 32(2): 74–79.
- [30] 刘莉, 王磊, 吴丹, 等. 不同种源文冠果种子的表型变异[J]. *经济林研究*, 2021, 39(4): 97–105.
- LIU L, WANG L, WU D, *et al.* Phenotypic variation analysis of seeds from different provenances of *Xanthoceras sorbifolium* [J]. *Non-wood Forest Res*, 2021, 39(4): 97–105.
- [31] 周丹, 曾竟轩, 何日凤, 等. 高压超临界 CO₂ 萃取茶籽油、核桃油及灵芝孢子油及其对质量的影响研究[J/OL]. *中国粮油学报*: 1–17. [2024-03-15]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000671>

- ZHOU D, ZENG JX, HE RF, *et al.* Evaluation the high pressure supercritical CO₂ extraction of camellia oil, walnut oil, *Ganoderma lucidum* spores oil and the effects on oil quality [J/OL]. J Chin Cere Oils Ass: 1-17. [2024-03-15]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000671>
- [32] 王性炎, 樊金栓, 王姝清. 中国含神经酸植物开发利用研究 [J]. 中国油脂, 2006, (3): 69–71.
- WANG XY, FAN JS, WANG SQ. Study on development and utilization of nerve-acid-containing plants in China [J]. China Oils Fats, 2006, (3): 69–71.
- [33] 金青哲, 王月, 方靖凯, 等. 油酸和高油酸油脂对人体健康的影响研究进展[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(3): 1–3, 8.
- JIN QZ, WANG Y, FANG JK, *et al.* Research progress on the effects of oleic acid and high oleic acid oil on human health [J]. Cere Oils, 2023, 36(3): 1–3, 8.
- [34] 于晨, 李双, 袁勇军, 等. 基于脂肪酸指标的调和植物油品质评析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(6): 2073–2079.
- YU C, LI S, YUAN YJ, *et al.* Quality assessment of blended vegetable oil based on fatty acid index [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(6): 2073–2079.
- [35] 王瑞, 刘海学, 马俪珍, 等. 几种食用油中脂肪酸含量的测定与分析[J]. 食品研究与开发, 2011, (7): 106–109.
- WANG R, LIU HX, MA LZ, *et al.* Determination and analysis of fatty acid content in several edible oils [J]. Food Res Dev, 2011, (7): 106–109.
- [36] 刘振雷, 朱煜康, 楼乔明, 等. 18 种市售坚果脂肪酸组成的比较分析及营养评价[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(4): 90–95.
- LIU ZL, ZHU YK, LOU QM, *et al.* Comparative analysis and nutritional evaluation of fatty acid compositions of eighteen commercial nuts [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2021, 36(4): 90–95.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



苏优拉, 博士, 讲师, 主要研究方向为药用植物化学。
E-mail: suyoula@126.com



陈贵林, 教授, 主要研究方向为药用植物资源的综合利用。
E-mail: guilinch61@163.com