



植物遗传资源学报
Journal of Plant Genetic Resources
ISSN 1672-1810, CN 11-4996/S

《植物遗传资源学报》网络首发论文

题目: 银扇草果实的脂肪酸分析研究
作者: 彭礼, 郭至辉, 李佩芳, 曾浩, 阮颖
DOI: 10.13430/j.cnki.jpgr.20240213001
收稿日期: 2024-02-13
网络首发日期: 2024-10-16
引用格式: 彭礼, 郭至辉, 李佩芳, 曾浩, 阮颖. 银扇草果实的脂肪酸分析研究[J/OL]. 植物遗传资源学报. <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240213001>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

银扇草果实的脂肪酸分析研究

彭礼, 郭至辉, 李佩芳, 曾浩, 阮颖

(湖南农业大学生物科学技术学院/作物表观遗传调控与发育湖南省重点实验室, 长沙 410000)

摘要:银扇草 (*Lunaria annua* L.) 属十字花科银扇草属, 是一种含神经酸的二年生草本植物, 其种子富含油脂, 具有较高的生物与医药价值。目前对银扇草果实发育过程中脂肪酸积累及代谢的特征未见报道。为探明银扇草果实发育过程中脂肪酸的种类和含量变化特征, 以及超长链脂肪酸特别是神经酸的合成特点, 本研究使用气相色谱-质谱联用技术比较分析含神经酸植物银扇草、琉璃苣和蒜头果果实的脂肪酸组分及含量, 结果表明, 银扇草果实发育过程中共有 10 种脂肪酸参与了油脂代谢, 种子中有 7 种, 果皮中有 8 种, 多为长链及超长链不饱和脂肪酸。种子内的脂肪酸主要由软脂酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸、芥酸和神经酸组成; 软脂酸、硬脂酸、亚油酸和亚麻酸的含量均随种子发育逐渐减少; 油酸、芥酸和神经酸随种子发育逐渐增加, 并在花后 25~35 d 内大量累积; 果皮中不含芥酸和神经酸, 但有山萘酸、木质素酸和蜡酸的分布。银扇草、琉璃苣和蒜头果种子中均含芥酸和神经酸, 木本植物蒜头果含量最高, 银扇草次之, 琉璃苣含量最低, 三者种子中神经酸的含量与芥酸含量有明显的正相关关系。本研究结果阐明了银扇草果实发育过程中脂肪酸代谢变化特点及神经酸积累特性, 为充分利用银扇草种质资源和拓展神经酸的获取途径提供了新思路。

关键词:银扇草; 果实发育; 脂肪酸积累; 芥酸; 神经酸

Analysis of Fatty Acids in the Fruit of *Lunaria annua* L.

PENG Li, GUO Zhihui, LI Peifang, ZENG Hao, RUAN Ying

(College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Epigenetic Regulation and Development in Hunan Province, Changsha 410000)

Abstract: Honesty (*Lunaria annua* L.) belongs to the Brassicaceae family and is a biennial herb with high nutritional and medicinal value, as it contains nervonic acid, and its seeds are rich in oil. Currently, there are no reports on the characteristics of fatty acid accumulation and metabolism during the fruit development process of *Lunaria*. In order to explore the changes in the types and contents of fatty acids during the development process of the fruit of *Lunaria*, as well as the synthesis characteristics of very-long-chain fatty acids, especially nervonic acids, this study used gas chromatography and mass spectrometry to compare and analyze the fatty acid components and content of plants containing nervonic acids: *Lunaria*, Arabidopsis, Borage, and Malania fruit. The results showed that a total of 10 types of fatty acids were involved in fatty acid metabolism during the development process of the *Lunaria* fruit, seven in seeds and eight in pericarps, most of them are long chain and very-long-chain unsaturated fatty acids. The fatty acids in the seeds were mainly composed of palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid, linolenic acid, erucic acid and nervonic acid; the content of palmitic acid, stearic acid, linoleic acid and linolenic acid gradually decreased with seed development; oleic acid, erucic acid and nervonic acid gradually increased with seed development and accumulated in large quantities in the first 25-35 days after anthesis; the pericarp was free of erucic acid and nervonic acid, but specializes in behenic acid, lignoceric acid and cerotic acid. *Lunaria*, Borage and Malania seeds all contain erucic acid and nervonic acid. Woody plant Malania seed has the highest content, followed by *Lunaria*, and Borage has the lowest content. The content of nervonic acid in the seeds of the three plants is significantly positively correlated with the content of erucic acid. The results of this study elucidate the characteristics of fatty acid metabolism and accumulation of nervonic acid during the fruit

收稿日期: 2024-02-13

第一作者研究方向为植物学, E-mail: 605027683@qq.com; 郭至辉为共同第一作者

通信作者: 阮颖, 研究方向为植物发育生物学, E-mail: yingruan@hotmail.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1200400)

Foundation projects: The National Key Research and Development Program of China(2022YFD1200400)

development process of *Lunaria*, providing new ideas for fully utilizing the germplasm resources of *Lunaria* and expanding the pathways for obtaining nervonic acids.

Key words: *Lunaria annua* L.; fruit development; fatty acid accumulation; erucic acid; nervonic acid

银扇草(*Lunaria annua* L.)是十字花科银扇草属的两年生草本植物,常作为园艺观赏植物^[1]。银扇草种子含较丰富的长链不饱和脂肪酸(油酸:芥酸:神经酸 $\approx 1:2:1$),神经酸约占20%,是少数含有神经酸的植物^[2-5]。已有研究指出,银扇草种子中的不饱和脂肪酸可用于制备生物燃料,具有良好的发展前景^[3]。近年来,国内外研究者围绕银扇草开展了系列研究,对银扇草根尖进行核型分析^[6];以银扇草叶片和茎为外植体;构建了再生体系^[7];阐释了其果实发育的细胞学特征和假隔膜发生及形态变化过程^[8-9],分析了种子中脂肪酸及硫苷组分和类型^[10]。目前有大量研究对花生、油茶、薏苡等油料作物进行脂肪酸分析及相关功能基因验证^[11-18],而对银扇草果实中脂肪酸特别是神经酸累积的研究鲜有报道。

神经酸能预防脑神经衰弱、促进大脑的发育^[19],但神经酸资源极少获取难度极大。目前已知植物界中仅银扇草、蒜薹^[20]等30多种植物中含有神经酸。为充分开发利用银扇草神经酸资源,本研究中以银扇草为研究对象,采用气相色谱-质谱联用技术对其果实中的脂肪酸进行研究,分析不同发育时期果实中的脂肪酸累积的特征;同时以拟南芥为对照,对含神经酸的银扇草、琉璃苣和蒜头果进行脂肪酸组分及含量的比较分析,旨在充分挖掘银扇草的脂肪酸及神经酸资源,为进一步充分开发利用银扇草提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料银扇草(*Lunaria annua* L.)、拟南芥(*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.)、琉璃苣(*Borago officinalis* L.)和蒜头果(*Malania oleifera* Chun & S. K. Lee)种子来自于作物表观遗传发育湖南省重点实验室。试验地点位于湖南长沙,为典型的亚热带季风气候。2021年7月,种子播种于营养钵中,每种材料各种30株,室外条件种植,定期浇水施肥。2022年4月自然授粉后进行取样,6月进行收获。

1.2 试验方法

取花后5、15、25和35 d的银扇草果实200 mg,设置3个生物学重复,用于分析银扇草果实发育过程中脂肪酸组分及含量的变化;将25 d和35 d的果实剥开,分别取果皮与种子200 mg,设置3个生物学重复,用于比较分析银扇草果皮与种子发育过程中的脂肪酸变化;再分别取200 mg自然干燥的银扇草、蒜头果和琉璃苣种子,以拟南芥种子为对照,各设置3个生物学重复,用于调查神经酸和芥酸在该4种植物的分布规律。具体方法如下:取200 mg样品于10 mL具塞试管中,加入1 mL 1 mol/L的KOH-甲醇溶液,置于40℃水浴锅震荡30 min,再静置15 min,随后将试管塞移除后置于70℃水浴锅将液体蒸干,加入2 mL 5% H₂SO₄-甲醇后,70℃水浴60 min,加入2 mL正己烷静置10 min,等待液体分层,即获得果实脂肪酸甲酯化样品,采用Agilent 7890B型气相色谱仪(安捷伦,山东)分析果实脂肪酸甲酯,Excel统计与计算数据。

气相色谱仪分析条件:HB-88毛细管柱(100.0 m \times 0.32 mm \times 0.25 μ m);载气为He(纯度99.9999%);进样口温度:250℃;柱温:初始温度120℃保持1 min,10℃/min升温至175℃保持10 min,5℃/min升温至210℃保持5 min,5℃/min升温至230℃保持15 min;柱流速:1.04 mL/min,分流比:20:1;离子源温度:200℃;接口温度:220℃;质核比扫描范围:50~700 m/z;进样量:1 μ L。

2 结果与分析

2.1 银扇草果实总脂肪酸分析

果实按结构可分为果皮和种子。将分离的果皮和种子分别进行脂肪酸提取和甲酯化，通过气相色谱仪及质谱仪进行分析，并筛选物质相似度评分大于 80 分的脂肪酸。从不同发育时期的银扇草种子中共检测出 7 种脂肪酸，包括 5 种长链脂肪酸（软脂酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸）和 2 种超长链脂肪酸（芥酸、神经酸）（表 1）。在种子发育的不同阶段，脂肪酸的组分及含量有明显的差异。当果实发育至 5d，种子中的脂肪酸由长链脂肪酸组成，无超长链脂肪酸的积累，饱和脂肪酸（软脂酸、硬脂酸）约占总脂肪酸的 33%；果实发育至 15d，种子中逐渐有超长链脂肪酸的积累，约占总脂肪酸含量的 12%，其中饱和脂肪酸约占总脂肪酸含量的 21%，有所下降。随果实逐渐成熟至 25d，种子中的超长链脂肪酸含量增加，与长链脂肪酸含量相近，含量约占总脂肪酸含量的 57%，但饱和脂肪酸含量下降显著，约占总脂肪酸含量约 4%；至 35d 果实完全成熟，种子中的脂肪酸主要由超长链脂肪酸组成，含量约占总脂肪酸含量的 67%，饱和脂肪酸占总脂肪酸含量约 1%，含量占比极低。

从不同发育时期（25d 和 35d）的银扇草果皮中共检测出 8 种脂肪酸，包括 5 种长链脂肪酸（软脂酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸）和 3 种超长链脂肪酸（山嵛酸、木质素酸和蜡酸）（表 2）。在果皮的发育过程中，脂肪酸的组分及含量均有明显的差异。在总脂肪酸的组成上，花后 35d 的果皮相较于花后 25d 的果皮多出了硬脂酸和超长链脂肪酸山嵛酸、木质素酸和蜡酸，超长链脂肪酸总含量约占 10.3%；在脂肪酸的含量上，花后 35d 的果皮中软脂酸和亚油酸均高于花后 25d，油酸和亚麻酸均低于花后 25d。果皮和种子的总脂肪酸综合比较，果皮的脂肪酸种类更丰富。

表 1 银扇草种子的总脂肪酸分析

Table 1 Analysis of total fatty acid in the seed of Lunaria

发育时期 (d) Developmental stage	脂肪酸	软脂酸含量	硬脂酸含量	油酸含量	亚油酸含量	亚麻酸含量	芥酸含量	神经酸含量
	种类数	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	Number	Palmitic acid	Stearic acid	Oleic acid	Linoleic acid	Linolnic	Erucic acid	Nervonic
	of fatty acid	content	content	content	content	acid content	content	acid content
5	5	28.65	4.49	4.09	31.29	31.48	0	0
15	6	20.73	0	10.92	26.29	29.92	7.03	5.11
25	6	3.60	0	24.80	10.66	3.81	33.84	23.29
35	6	1.48	0	24.94	5.81	1.05	37.92	28.80

表 2 银扇草果皮的总脂肪酸分析

Table 2 Analysis of total fatty acid in the peel of Lunaria

发育时期 (d) Developmental stage	脂肪酸	软脂酸含	硬脂酸含	油酸含	亚油酸	亚麻酸	山嵛酸	木质素酸	蜡酸含
	种类数	量 (%)	量 (%)	量 (%)	含量 (%)	含量 (%)	含量 (%)	含量 (%)	量 (%)
	Number	Palmitic	Stearic	Oleic	Linoleic	Linolnic	Behenic	Lignoceric	Cerotic
	of fatty acid	acid	acid	acid	acid	acid	acid	acid	acid
		content	content	content	content	content	content	content	content
25	4	22.98	0	8.62	21.70	46.70	0	0	0
35	8	28.34	3.96	5.96	23.60	27.88	3.09	4.12	3.05

2.2 超长链脂肪酸在银扇草果实发育过程中的积累特点

银扇草果实中含丰富的超长链脂肪酸，即主链碳原子数大于 18 的脂肪酸。在银扇草果实发育的早期（5d），脂肪酸主要以 C16（软脂酸，主链碳原子数为 16）和 C18（硬脂酸、

油酸、亚油酸和亚麻酸，主链碳原子数为 18）的形式存在。随着种子发育，果实快速膨大（15-25d），C16 与乙酰 CoA 聚合形成 C18，18:0-ACP 被去饱和酶催化生成油酸酰基-酰基载体蛋白（18:1-ACP，Oleoyl- acyl carrier protein），C18 总含量上升。随着果实/种子逐渐成熟（25d），C18 以丙二酰-CoA 为碳源并经过多次相继的缩合反应合成 C20、C22（芥酸，主链碳原子数为 22）和 C24（神经酸，主链碳原子数为 24）等超长链脂肪酸。在银扇草各阶段的种子中均未检测到 C20 的存在，随着 C22 和 C24 的不断合成，C16 及 C18 的含量逐渐下降。至果实完全成熟后，银扇草种子内脂肪酸主要以超长链脂肪酸的形式存在，其中，芥酸（C22: 1）占比 37.92%，神经酸（C24: 1）占比 28.81%(图 1)。

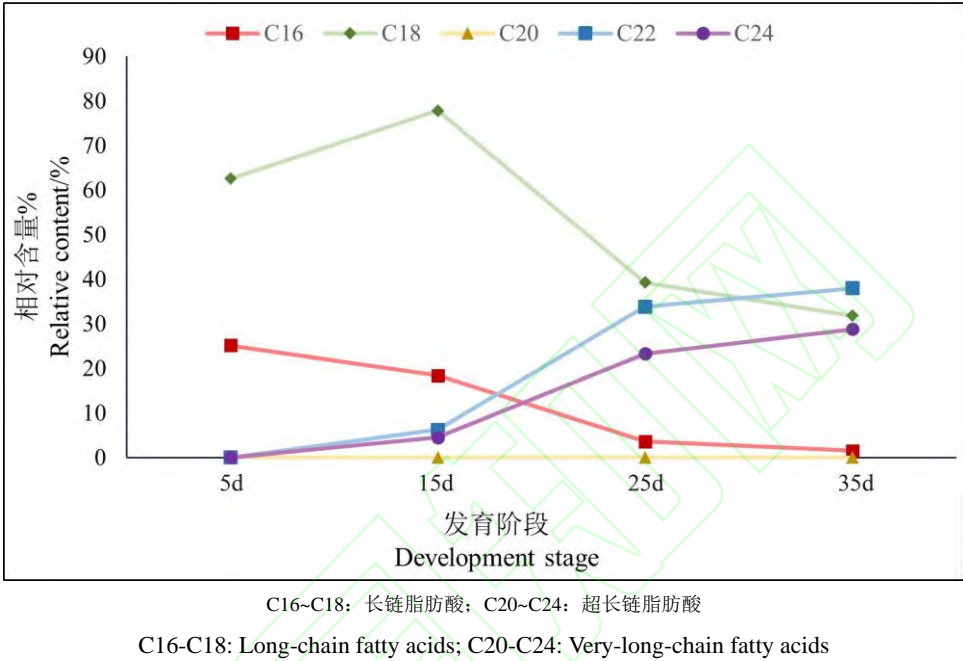
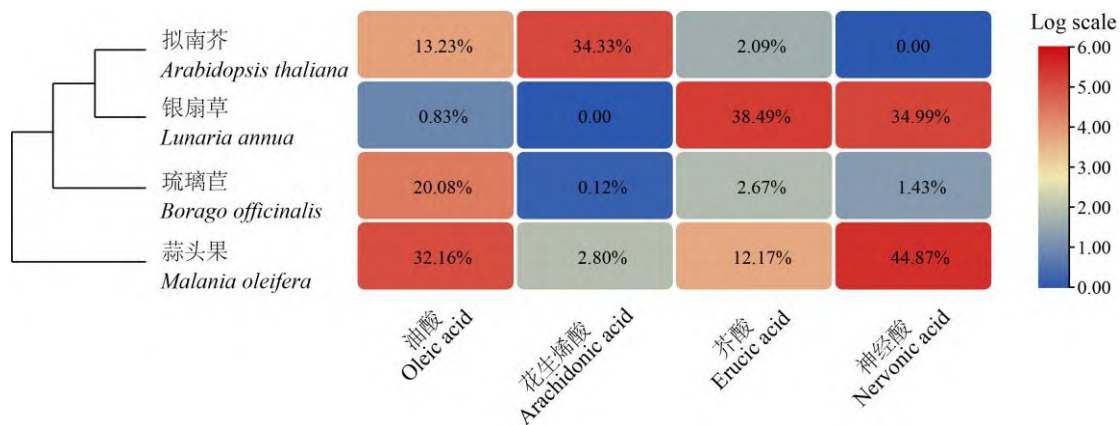


图 1 果实发育过程中超长链脂肪酸及前体物质的含量变化

Fig.1 Changes in the content of very-long-chain fatty acids and precursor substances during fruit development of *Lunaria*

2.3 银扇草、琉璃苣、蒜头果种子中神经酸及前体物质含量的比较

神经酸是一种超长链脂肪酸，具有重要的经济价值。根据植物亲缘关系及种子中神经酸的存在与否，以拟南芥为对照，比较分析银扇草、琉璃苣及蒜头果种子的脂肪酸组分及含量，发现神经酸含量的高低与芥酸含量有明显关系（图 2）。在拟南芥中检出 11 种脂肪酸，油酸约占 13.23%，花生烯酸约占 34.33%，芥酸约占 2.09%，神经酸占 0；在银扇草中共检出 10 种脂肪酸，其中油酸约占总脂肪酸 0.83%，无花生烯酸，芥酸约占 38.49%，神经酸约占 34.99%；在琉璃苣中分离出 10 种脂肪酸，油酸约占 20.08%，花生烯酸约占 0.12%，芥酸约占 2.67%，神经酸约占 1.43%；在蒜头果中分离出 12 种脂肪酸，油酸约占 32.16%，花生烯酸约占 2.8%，芥酸约占 12.17%，神经酸约占 44.87%（表 3）。四种植物种子内均含软脂酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和芥酸，含量存在明显差异。在银扇草同属的拟南芥中，超长链脂肪酸主要以花生烯酸的形式存在，而芥酸和神经酸含量极低；在同含神经酸的草本植物琉璃苣中，脂肪酸主要以长链脂肪酸的形式存在，超长链脂肪酸含量较少。在同为高神经酸作物的木本植物蒜头果中，长链脂肪酸主要以油酸的形式存在，含量较高，超长链脂肪酸主要以芥酸和神经酸的形式存在，神经酸含量最高。4 种植物种子中的神经酸含量的高低与芥酸含量有明显的正相关关系。



Log scale 为脂肪酸含量的对数值，方框内数值为脂肪酸含量的实际值

Log scale is the logarithmic value of the content of fatty acids, and the values in the box are the actual values of content of fatty acids

图 2 银扇草、蒜头果、琉璃苣及拟南芥种子中超长链脂肪酸的含量分析热图

Fig.2 Heat map for analyzing the content of very-long-chain fatty acids in seeds of *Lunaria*, *Arabidopsis*, *Borago* and *Malania*

表 3 银扇草、拟南芥、琉璃苣及蒜头果种子的脂肪酸分析

Table 3 Analysis of fatty acid components in seeds of *Lunaria*, *Arabidopsis*, *Borago* and *Malania*

物种	软脂酸 含量 (%)	硬脂酸 含量 (%)	油酸含 量 (%) Oleic acid content	亚油酸 含量 (%) Linoleic acid content	花生烯酸含 量 (%) Arachidonic acid content	山嵛酸 含量 (%) Behenic acid content	芥酸含 量 (%) Erucic acid content	神经酸 含量 (%) Nervonic acid content	其他 脂肪 酸含 量 (%) Other fatty acid content	总计
拟南芥 <i>Arabidopsis</i>	8.31	2.77	13.23	30.27	34.33	0	2.09	0	9.00	100
银扇草 <i>Lunaria</i>	1.43	0.21	0.83	3.99	0	0	38.49	34.99	20.06	100
琉璃苣 <i>Borago</i>	10.34	5.19	20.08	37.37	0.12	0.21	2.67	1.43	22.59	100
蒜头果 <i>Malania</i>	1.25	0.39	32.16	0.86	2.80	1.01	12.17	44.87	4.49	100

3 讨论

本研究通过比较不同发育时期的银扇草果实的脂肪酸组分及含量，共发现 10 种脂肪酸，含量具有差异性，分布具有特异性。本研究首次发现银扇草果皮中含山嵛酸、木质素酸和蜡酸，其中山嵛酸可用于制备介电常数且耐腐蚀的低频吸波剂^[21]，蜡酸可用作润滑剂，是重要的脂肪酸资源。本研究在完全成熟的银扇草种子中共检出 7 种脂肪酸，与已有研究的测定结果（肉豆蔻酸 0.24%、棕榈酸 1.17%、棕榈油酸 0.28%、硬脂酸 0.20%、油酸 23%、亚油酸 6.31%、亚麻酸 0.95%、鳕油酸 0.50%、芥酸 43.25%，神经酸 23.01%）相比^[2-4]，种子中并没有肉豆蔻酸、棕榈油酸和鳕油酸的积累。此外，与其他气候环境下种植的银扇草相比，其含量也有很大的差异。在苏格兰（54.5°N 以北），银扇草种子内芥酸约占 46%，神经酸

约占 20% [2], 芥酸和神经酸的比例均接近于 2: 1。在希腊 (35- 45 °N), 人为引种栽培的银扇草种子内的芥酸约占 43%, 神经酸约占 23% [3], 比例有所下降。而本研究中 (28 °N), 成熟的银扇草果实中芥酸约占 38%, 神经酸约占 29%, 芥酸与神经酸的比例明显下降, 接近于 4: 3, 这种差异很可能与种植地的经纬度密切相关, 在其他植物如黄连木 (*Pistacia chinensis*)、橄榄 (*Canarium album*)、摩洛哥坚果 (*Argania spinosa*) 和药西瓜 (*Citrullus colocynthis*) 也有类似的特征 [22-25]。

银扇草种子的脂肪酸与拟南芥、琉璃苣、蒜头果种子相比, 油酸、花生烯酸、芥酸和神经酸等脂肪酸的含量和比例有明显的差别。银扇草含芥酸最多, 蒜头果含油酸和神经酸最多, 拟南芥中含花生烯酸最多。在油酸-花生烯酸-芥酸-神经酸的脂肪酸延长通路上, 神经酸作为芥酸的合成产物, 其含量与芥酸含量呈明显的正相关关系。油酸、花生烯酸、芥酸和神经酸的合成同受 β -酮脂酰-CoA 合酶 (KCS, β -ketoacyl-CoA synthase)、 β -酮脂酰-CoA 还原酶 (KCR, β -ketoacyl-CoA reductase)、 β -羟脂酰-CoA 脱水酶 (HCD, β -hydroxacyl-CoA dehydratase) 和反式烯脂酰-CoA 还原酶 (ECR, trans-2,3-enoyl-CoA reductase) 4 种酶的调控, 而 KCS 作为关键限速酶决定了超长链脂肪酸的合成速率和碳链长度, 后 3 种酶具有广泛的底物特异性 [26-30]。C18:1-CoA (油酸-CoA) 经过连续的缩合反应先后形成 C20:1-CoA (花生烯酸-CoA)、C22:1-CoA (芥酸-CoA) 和 C24:1-CoA (神经酸-CoA), 产生的神经酸在生物体内一般以三酰甘油 (TAGs) 的形式储存 [31]。神经酸的合成一般认为与花生烯酸和上游产物芥酸密切相关 [32-33]。研究指出, 在芥菜型油菜种子中, 油酸与芥酸、神经酸呈极显著负相关 ($P<0.01$), 神经酸与芥酸极显著正相关 ($P<0.01$) [32]。在拟南芥中异源过表达 *Mokcs 4* 和 *Mokcs 11*, 高芥酸油菜和亚麻荠中异源过表达 *Mokcs 11*, 转基因拟南芥和亚麻荠 T0 代种子的神经酸含量都有所增高, 而高芥酸油菜中并没有神经酸的积累 [33]。本研究在银扇草各发育阶段的果实中均没有检测到花生烯酸的分布, 而果实中芥酸不仅含量极高, 还与神经酸存在显著的正相关关系, 这对于在高芥酸含量的油菜中异源表达 *Lakcs* 基因, 获得高神经酸油菜有一定的参考价值, 银扇草中神经酸的基因资源发展潜力巨大。

神经酸对人脑发育具有重要作用, 它能促进脂肪酸的代谢, 降低心脑血管疾病的发生, 对预防肥胖、降低急性缺血性脑卒有重要作用 [34-37]。天然神经酸的获取途径较少, 主要是从植物中进行提取, 以元宝枫 (*Acer truncatum* Bunge)、蒜头果为代表的木本植物中神经酸的提取工艺有较快的发展 [38], 但木本植物的生长周期长和产量低是限制快速获取神经酸资源的因素。研究报道指出, 神经酸仅在 11 科 16 属下的 30 多个物种存在 [6], 而银扇草作为二年生十字花科草本植物, 以较短的生长周期 (全发育时期约 9-10 月) 和种内较高水平的神经酸独占优势, 可快速获取神经酸资源。本试验通过气相色谱仪接质谱仪分析银扇草、蒜头果、琉璃苣及拟南芥种子的脂肪酸组分, 发现银扇草种子中的神经酸略低于木本植物神经酸含量最高的蒜头果种子中的神经酸组分, 远高于草本植物琉璃苣种子中的神经酸组分, 拟南芥种子不含神经酸。由此, 银扇草作为新型神经酸草本植物, 其生长年限短, 神经酸含量高的特性, 对于拓展神经酸的来源途径具有良好前景。

参考文献:

- [1] Cromack H T H. The effect of sowing date on the growth and production of *Lunaria annua* in Southern England. *Industrial Crops and Products*, 1998, 7(2-3):217-221
- [2] Walker R L, Walker K C, Booth E J. Adaptation potential of the novel oilseed crop, Honesty (*Lunaria annua* L.), to the Scottish climate. *Industrial Crops & Products*, 2003, 18(1):7-15
- [3] Dodos G S, Karonis D, Zannikos F, Lois E. Renewable fuels and lubricants from *Lunaria annua* L.. *Industrial Crops & Products*, 2015, 11(75):43-50
- [4] 赖福兵. 蒜头果油中高纯神经酸的制备研究. 南宁: 广西大学, 2018
Lai F B. Study on the preparation of high purity Nervonic acid in *Malania oleifera* oil. Nanning: Guangxi University, 2018

- [5] 马柏林, 梁淑芳, 赵德义, 徐爱遐, 张康健. 含神经酸植物的研究. 西北植物学报, 2004(12): 2362-2365
Ma B L, Liang S F, Zhao D Y, Xu A X, Zhang K J. Study on plants containing nervonic acid. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004(12): 2362-2365
- [6] 李佩芳, 郭至辉, 曾浩, 蔡雨桐, 刘春林, 阮颖. 银扇草(*Lunaria annua* L.)染色体核型分析. 分子植物育种, 2024, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20220415.1054.010.html>
Li P F, Guo Z H, Zeng H, Cai Y T, Liu C L, Ruan Y. Chromosome karyotype analysis of *Lunaria annua* L.. Molecular Plant Breeding: 2024, 1-6, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20220415.1054.010.html>
- [7] 曾浩, 李佩芳, 郭至辉, 刘春林, 阮颖. 银扇草再生体系的建立. 植物学报, 2024, 59(3):433-440
Zeng H, Li P F, Guo Z H, Liu C L, Ruan Y. Establishment of a regeneration system for *Lunaria annua*. Chinese Bulletin of Botany, 2024, 59(3):433-440
- [8] 郭至辉, 李佩芳, 彭礼, 曾浩, 梁玲娇, 阮颖. 银扇草果实假隔膜形态发育特征. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(3):298-303
Guo Z H, Li P F, Peng L, Zeng H, Liang L J, Ruan Y. Morphological characteristics of the development of false dissepiment in *Lunaria annua*. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2023, 49(3): 298-303
- [9] Mosti T, Friedman C R, Piccolin F, Falco P D, Papini A. The unusual tegumental tissues of the *Lunaria annua* (Brassicaceae) seed: A developmental study using light and electron microscopy. Flora, 2012, 11(207): 828-837
- [10] Blaevi I, Ulovi A, Uli V I, Popovi M, Rollin P. Microwave-assisted versus conventional isolation of glucosinolate degradation products from *Lunaria annua* L. and their cytotoxic activity. Biomolecules, 2020, 10(2):215
- [11] 成新琪, 吴诗颖, 李欣悦, 刘文超, 刘宏涛, 胡孝明, 朱华国. 油茶种仁脂肪酸代谢关键基因的挖掘与分析. 植物遗传资源学报, 2024, doi:10.13430/j.cnki.jpgr.20240619003
Cheng X Q, Wu S Y, Li X Y, Liu W C, Liu H T, Hu X M, Zhu H G. Exploration and analysis of key genes involved in fatty acid metabolism in *Camellia oleifera* seeds kernel. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, doi:10.13430/j.cnki.jpgr.20240619003
- [12] 尚昆, 付瑜华, 李秀诗, 蒙秋伊, 杨玲玲, 朱加保. 薏苡CISAD、CIFAD2基因单倍型鉴定与相关脂肪酸关联分析. 植物遗传资源学报, 2024, doi:10.13430/j.cnki.jpgr.20240131003
Shang K, Fu Y H, Li X S, Meng Q Y, Yang L L, Zhu J B. Haplotype identification of CISAD/CIFAD2 and association analysis of related fatty acids in *Coix lacryma-jobi* L.. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, doi:10.13430/j.cnki.jpgr.20240131003
- [13] 饶庆琳, 姜敏, 吕建伟, 胡廷会, 成良强, 王金花, 王军. 花生种质资源品质性状分析及综合评价. 植物遗传资源学报, 2024, 25(9):1454-1467
Rao Q L, Jiang M, Lv J W, Hu T H, Cheng L Q, Wang J H, Wang J. Analysis and comprehensive evaluation of quality characters of peanuts germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(9):1454-1467
- [14] 邢凯峰, 谢昊星, 张立冬, 周军, 冯立云, 张华轩, 陈尚, 赵耀, 戎俊, 张剑. 不同种源野生油茶果实表型性状多样性分析. 植物遗传资源学报, 2024, 25(7):1106-1117
Xing K F, Xie H X, Zhang L D, Zhou J, Feng L Y, Zhang H X, Chen S, Zhao Y, Rong J, Zhang J. Diversity analysis on fruit phenotype of wild *Camellia oleifera* from different provenances. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(7):1106-1117
- [15] 梁煜莹, 张加羽, 姜骁, 王露欢, 张晓吉, 刘齐妹, 薛云云, 迟晓元, 白冬梅. 花生品质与气候环境的关系研究. 植物遗传资源学报, 2024, 25(2):227-244
Liang Y Y, Zhang J Y, Jiang Y, Wang L H, Zhang X J, Liu Q M, Xue Y Y, Chi X Y, Bai D M. Study on the relationship between peanut quality and climatic environments. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(2):227-244
- [16] 马钰聪, 赵雨露, 李佳伟, 刘彬, 王春妹, 张敏, 张利苹, 蒋晓霞, 穆国俊. 花生子仁糖代谢转录组-代谢组学联合分析. 植物遗传资源学报, 2022, 23(4):1143-1154
Ma J C, Zhao Y L, Li J W, Liu B, Wang C M, Zhang M, Zhang L P, Jiang X X, Mu G J. Transcriptome-metabolome combined analysis of kernel sugar metabolism in peanut(*Arachis hypogaea* L.). Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(4):1143-1154
- [17] 王瑾, 李玉荣, 程增书, 陈四龙, 宋亚辉, 刘义杰, 张朋娟. 高油酸花生品种(系)ahFAD基因变异鉴定及遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2020, 21(1):208-214

- Wang J, Li Y R, Cheng Z S, Chen S L, Song Y H, Liu Y J, Zhang P J. ahFAD genotype identification and genetic diversity analysis of high oleic acid peanut cultivars. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21(1):208-214
- [18] 陈昊, 徐日荣, 陈湘瑜, 张玉梅, 胡润芳, 蓝新隆, 唐兆秀, 林国强. 花生种子萌发吸胀阶段冷害抗性的鉴定及耐冷种质的筛选. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(1):192-200
- Chen H, Xu R R, Chen X Y, Zhang Y M, Hu R F, Lan X L, Tang Z X, Lin G Q. Identification of imbibitional chilling injury resistance for peanut and screening of imbibitional chilling-tolerance germplasm. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21(1):192-200
- [19] Jamieson E C, Farquharson J, Logan R W, Howatson A G, Patrick W J, Weaver L T, Cockburn F. Infant cerebellar gray and white matter fatty acids in relation to age and diet. *Lipids*, 1999, 34(10):1065-71
- [20] 李蓉, 曹梦, 李妍逸, 陈吉丽, 张红林, 朱耀顺, 刘娟, 刘涛, 徐笑宇. 蕲蓂的资源开发利用与脂质代谢工程改良研究进展. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(8):1234-1244
- Li R, Cao M, Li Y Y, Chen J L, Zhang H L, Zhu Y S, Liu J, Liu T, Xu X Y. Research Progress of Resource Development and Lipid Metabolism Engineering Improvement on Pennycress. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(8):1234-1244
- [21] 王睿, 王峰, 徐逸凡, 官建国, 陈志宏. 低介电片状 FeNi 吸波剂的山嵛酸辅助制备及其织构行为. *包装工程*, 2024, 45(1):262-272
- Wang R, Wang F, Xu Y F, Guan J G, Chen Z H. Behenic acid-assisted preparation of low permittivity flaky FeNi absorbent and its texture behavior. *Packaging Engineering*, 2024, 45(1):262-272
- [22] 侯新村, 牟洪香, 菅永忠. 能源植物黄连木油脂及其脂肪酸含量的地理变化规律. *生态环境学报*, 2010, 19(12):2773-2777
- Hou X C, Mou H X, Jian Y Z. Geographical regularity of oil and fatty acid content of bioenergy plant *Pistacia chinensis* Bunge. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(12):2773-2777
- [23] Zhang Y, Zhang C, Xu C, Deng Y, Wen B, Xie P, Huang L. Effect of geographical location and soil fertility on main phenolic compounds and fatty acids compositions of virgin olive oil from *Leccino* cultivar in China. *Food Research International*, 2022, 157:111207
- [24] Elgadi S, Ouhammou A, Taous F, Zine H, Papazoglou EG, Elghali T, Amenzou N, El Allali H, Aithhaj A, El Antari A. Combination of stable isotopes and fatty acid composition for geographical origin discrimination of one argan oil vintage. *Foods*, 2021, 10:1274
- [25] Al-Hwaiti MS, Alsbou EM, Abu Sheikha G, Bakchiche B, Pham TH, Thomas RH, Bardaweel SK. Evaluation of the anticancer activity and fatty acids composition of "Handal" (*Citrullus colocynthis* L.) seed oil, a desert plant from south Jordan. *Food Science & Nutrition*, 2020, 9(1):282-289
- [26] Zheng H, Rowland O, Kunst L. Disruptions of the Arabidopsis enoyl-CoA reductase gene reveal an essential role for very-long-chain fatty acid synthesis in cell expansion during plant morphogenesis. *The Plant Cell*, 2005, 17(5): 1467-1481
- [27] Bach L, Michaelson L V, Haslam R, Bellec Y, Gissot L, Marion J, Costa M D, Boutin J P, Miquel M, Tellier F, Domergue F, Markham J E, Beaudoin F, Napier J A, Faure J D. The very-long-chain hydroxy fatty acyl-CoA dehydratase PASTICCINO2 is essential and limiting for plant development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(38): 14727-14731
- [28] Paul S, Gable K, Beaudoin F, Cahoon E, Jaworski J, Napier J A, Dunn T M. Members of the Arabidopsis FAE1-like 3-ketoacyl-CoA synthase gene family substitute for the Elop proteins of *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Biological Chemistry*, 2006, 281(14): 9018-9029
- [29] Joubès J, Raffaele S, Bourdenx B, Garcia C, Laroche-Traineau J, Moreau P, Domergue F, Lessire R. The VLCFA elongase gene family in *Arabidopsis thaliana*: Phylogenetic analysis, 3D modelling and expression profiling. *Plant Molecular Biology*, 2008, 67: 547-566
- [30] Gable K, Garton S, Napier J A, Dunn T M. Functional characterization of the Arabidopsis thaliana orthologue of Tsc13p, the enoyl reductase of the yeast microsomal fatty acid elongating system. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(396): 543-545
- [31] Tu X, Wan J, Xie Y, Wei F, Quek S, Lv X, Du L, Chen H. Lipid analysis of three special nervonic acid resources in China. *Oil Crop Science*, 2020, 5(4): 180-186

- [32] 范一铭, 吴金锋, 李洪戈, 李浩, 陈碧云, 闫贵欣, 蔡光勤, 伍晓明. 芥菜型油菜种子中神经酸、芥酸和油酸含量的遗传分析. 中国油料作物学报, 2024, 46(4):781-794
- Fan Y M, Wu J F, Li H G, Li H, Chen B Y, Yan G X, Cai G Q, Wu X M. Genetic analysis of the content of nervonic acid, erucic acid, and oleic acid in *Brassica juncea* seeds. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(4):781-794
- [33] Li Z, Ma S, Song H, Yang Z, Zhao C, David T, Zhang M. A 3-ketoacyl-CoA synthase 11 (KCS11) homolog from *Malania oleifera* synthesizes nervonic acid in plants rich in 11Z-eicosenoic acid. Tree Physiology, 2021, 41(2): 331-342
- [34] 王性炎, 王姝清. 神经酸新资源——元宝枫油. 中国油脂, 2005, 30(9):62-64
- Wang X Y, Wang S Q. A new resource of nervonic acid: Purpleblow maple oil. China Oils and Fats, 2005, 30(9):62-64
- [35] 侯镜德, 陈至善. 神经酸与脑健康. 北京:中国科学技术出版社, 2006:9-23
- Hou J D, Chen Z S. Nervonic acids and brain health. Beijing: China Science and Technology Press, 2006:9-23
- [36] 蔡晓琴, 冯佩, 胡健伟, 牛晓虎, 沈恒山, 张永红, 佟伟军, 许铤. 血浆二十四碳烯酸水平与急性缺血性脑卒中的关系. 山东医药, 2014, 54(25):27-29
- Cai X Q, Feng P, Hu J W, Niu X H, Shen H S, Zhang Y H, Tong W J, Xu T. The relationship between plasma levels of tetracarboxylic acid and acute ischemic stroke. Shandong Medical Journal, 2014, 54(25):27-29
- [37] Oda E, Hatada K, Kimura J, Aizawa Y, Thanikachalam PV, Watanabe K. Relationships between serum unsaturated fatty acids and coronary risk factors: Negative relations between nervonic acid and obesity-related risk factors. Int Heart J, 2005, 46: 975-985
- [38] Yang T, Yu Q, Xu W, Li DZ, Chen F, Liu A. Transcriptome analysis reveals crucial genes involved in the biosynthesis of nervonic acid in woody *Malania oleifera* oilseeds. BMC plant biology, 2018, 18(1): 1-13