

植物来源神经酸的生理功效、制备及检测方法研究进展

高慧¹,张廷婷¹,甘境翔¹,刘鹤¹,徐同成²,宗爱珍²,孙杰¹

(1. 青岛大学生命科学学院, 山东 青岛 266071; 2. 山东省农业科学院, 济南 250100)

摘要:为提高植物来源神经酸的产量和促进神经酸产品的研究开发及利用,从神经酸的植物来源、生理功效、提取及纯化工工艺以及检测方法4个方面进行综述。植物中神经酸来源以木本植物居多;神经酸具有控制心血管疾病、改善血糖、改善大脑功能、修复中枢神经系统损伤、提高免疫力、抑制肿瘤细胞生长等生理功效;常采用低温结晶、金属盐沉淀、尿素包合、分子蒸馏等方法对神经酸进行提取纯化,采用气相色谱和高效液相色谱等检测方法检测神经酸含量。

关键词:神经酸;来源;生理功效;制备方法;检测方法

中图分类号:TS201.4;O621.3 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)11-0119-07

Research progress on physiological efficacy, preparation and detection methods of plant-derived nervonic acid

GAO Hui¹, ZHANG Tingting¹, GAN Jingxiang¹, LIU He¹, XU Tongcheng², ZONG Aizhen², SUN Jie¹

(1. College of Life Sciences, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: In order to increase the production of plant-derived nervonic acid (NA) and promote the research development and utilization of NA products, the plant source, physiological efficacy, extraction and purification process, and detection methods of NA were reviewed. Woody plants are the main source of NA in plants. NA has physiological efficacies such as controlling cardiovascular diseases, improving glucose, improving brain function, repairing central nervous system damage, enhancing immunity, and inhibiting tumor cell growth. The extraction and purification of NA is usually carried out by low temperature crystallization, metal salt precipitation, urea inclusion and molecular distillation. The NA content is detected by gas chromatography and high-performance liquid chromatography, etc.

Key words: nervonic acid; source; physiological efficacy; preparation method; detection method

收稿日期:2022-08-28;修回日期:2023-07-26

基金项目:山东省重点研发计划(2021TZXD010);2020年烟台“双百人才”项目;青岛市科技惠民示范引导专项(23-2-8-xdny-6-nsh,23-3-8-xdny-1-nsh);2021年山东省重点扶持区域引进急需紧缺人才项目;2019年山东省人才引进成果示范推广项目;山东省2018年度农业重大应用技术创新项目;青岛市自然科学基金(23-2-1-180-zyyd-jch);山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC2520,2023TSGC0892)

作者简介:高慧(1997),女,在读硕士,研究方向为农产品加工(E-mail)gaochuqi01@163.com。

通信作者:孙杰,教授(E-mail)sjj605@163.com。

神经酸(Nervonic acid, NA),即顺-15-二十四碳烯酸,是一种超长链单不饱和脂肪酸,最早从鲨鱼脑组织中分离得到。在过去的几十年里,相关研究结果已经证明了神经酸对人类健康的必要性和重要性,同时具有巨大的发展潜力和广阔的应用前景。神经酸通过酰胺键与鞘氨醇结合形成神经酰鞘脂,鞘脂是大脑白质和有髓鞘神经纤维的重要组成部分。研究发现,若大脑中缺乏神经酸,则会引起大脑

损伤以及记忆力减退,导致卒中后遗症、老年痴呆等脑疾病^[1]。

动物、微生物中神经酸含量不高,提取难度高,因此不可作为神经酸主要提取来源。随着油脂研究的发展,黄花蒿、蒜头果、紫槭、琉璃苣、文冠果和大麻等^[2]野生植物的种子油中检测出神经酸,其中在蒜头果油中神经酸含量超过 50%^[3]。相比于动物来源的神经酸,植物来源的神经酸具有成本低、含量高的特点,且植物可批量种植,可以实现规模化提取神经酸,为神经酸的研究和应用开创出一个新的、可持续发展的方向,使富含神经酸的植物可以作为神

经酸提取的重要来源^[4]。

本文首先介绍了神经酸的生物合成途径,然后对近年来报道的木本植物、草本植物和微藻中的神经酸含量进行系统列表、归纳和总结,进一步综述神经酸生理功效及制备和检测方法,以期开发不同产品的神经酸检测技术,解决神经酸工业生产率低的问题,以满足消费者对神经酸的需求。

1 神经酸的植物来源

1.1 神经酸的生物合成途径

神经酸的生物合成途径如图 1 所示。

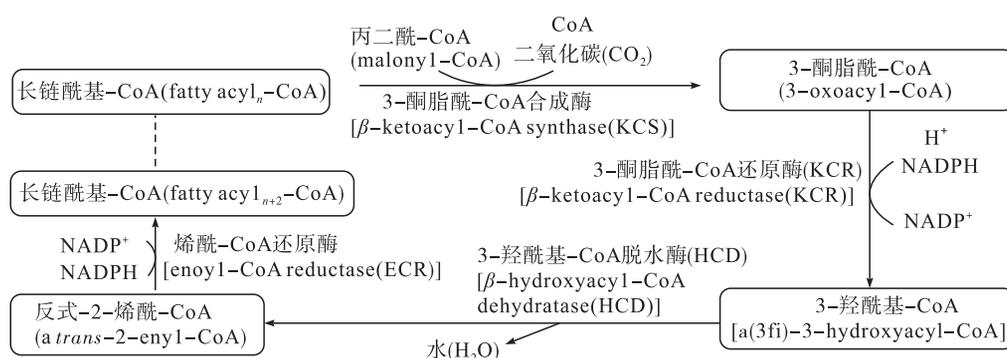


图 1 神经酸的生物合成途径(参照文献[5-6]整理)

神经酸是由油酸的碳链延长合成的,其中丙二酰辅酶 A 提供的两个 C 单元被循环添加到酰基链上^[6]。如图 1 所示的循环发生在内质网膜上。3-酮脂酰-CoA 合成酶(KCS)催化长链酰基辅酶 A 与丙二酰-CoA 缩合,生成 3-酮脂酰-CoA,然后经 3-酮脂酰-CoA 还原酶(KCR)还原为 3-羟酰基-CoA。然后,在 3-羟酰基-CoA 脱水酶(HCD)作用下生成反式-2-烯酰基-CoA^[6]。最后,被烯酰基-CoA 还原酶(ECR)还原后形成更长链的酰基辅酶 A。KCS 具有酶的专一性,而其他 3 种酶在所有组织中均参与这一过程,并具有广泛的底物特异性。因此,KCS 是神经酸生物合成途径中的限速酶。

1.2 神经酸的植物来源

木本植物中发现神经酸的存在,为神经酸提取提供了更多来源。He 等^[7-8]分析了 3 种富含神经酸的木本植物种子油,分别为蒜头果(*Malania oleifera* Chun et S. K. Lee)、盾叶木(*M. adenantha* Gagnep)和印度血桐(*Macaranga indica* Wight),神经酸含量分别为 42.22%、28.41% 和 21.77%,其中蒜头果种子不仅含油量最高(58.71%),油中神经酸含量亦最高。元宝枫(*Acer truncatum* Bunge)与文冠

果(*Xanthoceras sorbifolium* Bunge)也可作为神经酸的来源,其种子油中的神经酸含量分别为 6.01%^[9]和 2.59%^[10],其中文冠果具有抗逆性强、易存活等特点。近期研究发现,三花槭(*Acer triflorum* Komarov)种子油中也含有神经酸,其种子平均含油量为 36.31%,油中不饱和脂肪酸总含量为 91.98%,神经酸含量为 4.69%^[11],表明三花槭种子油具有较高的营养价值。

草本植物的茎部支撑不发达,木质化细胞含量少,植株较矮小,多为一年生和二年生,也可作为神经酸的来源。蒲定福等^[12]检测出我国甘蓝型、白菜型、芥菜型油菜种子油中均存在神经酸,其中甘蓝型油菜种子油中的神经酸含量在 0.06% ~ 1.90%。银扇草(*Lunaria annua* L.)是一种二年生十字花科草本植物,具有观赏价值,银扇草籽油中的神经酸含量高达 43.25%^[13]。研究发现,微藻 *Mychonastes afer* HSO-3-1 油中神经酸含量占总脂肪酸含量的 3.8%^[14],微藻具有代谢物安全、生长速度快和工业化用途成熟等优点,为工业化微藻中神经酸的合成提供了基本条件,为其开发利用扩大了来源。表 1 为不同植物来源的神经酸含量。

表 1 不同植物来源的神经酸含量

种类	来源	含油率/%	神经酸含量/%	参考文献
木本植物	三花槭	36.31	4.69	[11]
	苦茶槭	7.80	7.10	[15]
	元宝枫	37.50	5.80	[16]
	盾叶木	18.50	36.77	[8]
	蒜头果	58.71	42.22	[8]
	印度血桐	29.22	32.17	[8]
	文冠果	53.50	2.20	[16]
	牡荆	16.10	3.10	[15]
草本植物	白芥	29.60	3.40	[15]
	缎花	30.00	19.10	[17-18]
	芫菁	34.40	2.40	[15,19]
	遏蓝菜	25.10	14.60	[15]
	银扇草	35.00	43.25	[13]
微藻	<i>Nannochloris</i> sp.		9.97	[20]
	<i>Mychonastes afer</i>		3.00	[21]

2 神经酸的生理功效

2.1 控制心血管疾病、改善血糖

神经酸能修复受损的心脑血管壁,使其恢复弹性,舒张血管,降低血压,通过使 $\omega-3$ 和 $\omega-6$ 多不饱和脂肪酸正常代谢,提高血液微循环,促进胰岛 β 细胞分泌胰岛素,从而改善血糖症状。Keppley 等^[22] 对小鼠进行高脂肪饮食 (HFD) 实验,结果证明,在膳食中添加神经酸可以减少 HFD 小鼠的体质量增加并控制小鼠血糖的上升。

2.2 改善大脑功能、修复中枢神经系统损伤

Song 等^[23] 研究了元宝枫籽油 (ASO) 对小鼠记忆力、脂质谱及潜在代谢变化的影响,给予小鼠 ASO 1、3、7 d 后,进行了莫里斯水迷宫实验 (MWM),结果证明神经酸对小鼠的认知有改善能力;Wu 等^[24] 通过对蒜头果油 (MOC) 处理的小鼠进行降压被动回避实验、MWM 以及氧化应激参数和生化指标的检测,发现在行为测试中小鼠模型的学

习记忆能力得到显著改善,含大量神经酸的 MOC 与 DHA 藻油和维生素 E 组合可防止小鼠模型海马组织中的脂质氧化,增强海马体中谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-PX) 的活性,降低丙二醛 (MDA) 的含量和氧化应激,从而大大提高小鼠的学习和记忆功能,并得出神经酸有助于改善记忆力退化显现,提高认知能力的结论。

大脑中的氧化应激诱导细胞损伤和死亡,导致多种神经退行性疾病,包括阿尔茨海默病 (AD) 和帕金森病 (PD) 等疾病^[25-26]。神经酸缺乏会导致记忆力减退、AD 以及更严重的脑部疾病,如脑卒中后遗症、脑萎缩等^[27]。Umemoto 等^[28] 研究神经酸对 6-羟基多巴胺 (6-OHDA) 诱导的 PD (大鼠嗜铬细胞瘤 PC-12) 细胞模型的神经保护作用,发现 6-OHDA 处理之前用神经酸处理,细胞活力显著增加,而且在神经酸预处理细胞中的 MDA 水平降低,表明该组细胞氧化应激降低,证明神经酸有助于中枢神经系统疾病的治疗。

2.3 提高免疫力、抑制肿瘤细胞的生长

神经酸具有增强机体免疫力、促进脾淋巴细胞的增殖转化、提高抗体数量及细胞活性等多重作用。王熙才等^[29] 将艾舍尔软胶囊 (富含神经酸) 作用于小鼠模型,结果发现,神经酸有助于提高小鼠自然杀伤 (NK) 细胞的活性及小鼠脾淋巴细胞和抗体细胞的增殖。DNA 聚合酶 β 在肿瘤细胞中过度表达,会促进肿瘤细胞的生长,干扰染色体 DNA 复制,导致遗传不稳定^[30]。Yang 等^[31] 研究发现,神经酸对 DNA 聚合酶 β 的活性具有竞争性的抑制作用,神经酸作为抑制剂使 DNA 聚合酶 β 与 DNA 双链相互作用的结合速率降低至原来的 1/3,解离速率增加了 9 倍。该项研究成果为抗癌药物的开发开辟了新道路,以靶向治疗癌症为切入点,为其他研究人员攻克癌症提供了研究思路。

神经酸的生理功效相关实验及结果见表 2。

表 2 神经酸的生理功效相关实验及结果

生理功效	实验模型	作用剂量	实验结果	参考文献
控制心血管疾病、改善血糖	来自 Jackson Laboratories 的 C57BL/6J 小鼠	对照组 D12450Ji (41.86 kJ 脂肪)、对照组 + NA (0.6%)、HFD 组 D12492 (251.15 kJ 脂肪)、HFD 组 + NA (0.6%)	降低 HFD 小鼠体质量并控制血糖的上升	[22]
提高记忆力	SPF 成年雌性昆明种小鼠	46.27 mg/kg MOC + 8.17 mg/kg DHA 藻油 + 1.00 mg/kg 维生素 E	MDA 含量降低,超氧化物歧化酶 (SOD) 活性和 GSH-PX 活性显著增加	[24]
保护神经细胞	6-羟基多巴胺 (6-OHDA) 刺激的大鼠嗜铬细胞瘤 PC-12 细胞	0.01 $\mu\text{mol/L}$ NA 预处理 48 h 后,0.01 $\mu\text{mol/L}$ NA 和 50 $\mu\text{mol/L}$ 6-OHDA 共同处理	MDA 含量显著降低,超氧化物歧化酶和 γ -谷氨酰半胱氨酸合成酶表达显著增加	[28]

续表 2

生理功效	实验模型	作用剂量	实验结果	参考文献
提高机体免疫力	清洁级健康昆明种小鼠	12.5、25.0、50.0 mg/mL 艾舍尔软胶囊内容与玉米胚芽油混合物	淋巴细胞转化能力、抗体生成细胞数量、单核 - 巨噬细胞吞噬能力、NK 细胞活性均提高	[29]
抑制肿瘤细胞的生长	DNA 聚合酶 β	5 μ mol/L NA	DNA 聚合酶 β 与 DNA 双链结合能力减弱	[31]

3 神经酸提取及纯化方法

神经酸独特的保健作用对人体健康具有重要意义,但天然产品神经酸含量一般较低,有必要对其进行提取纯化。常用的神经酸提取纯化方法包括低温结晶法、金属盐沉淀法、尿素包合法、分子蒸馏法等。

低温结晶法是根据低温下混合脂肪酸在溶剂中的溶解度和凝固点的差异进行富集纯化。神经酸产品的回收率和纯度受到一些因素的影响,如溶剂类型、料溶比、冷却结晶温度和冷却结晶速度等。骆芬芳^[32]以乙醇溶液为结晶溶剂,通过单因素实验和正交实验确定最佳低温结晶工艺条件为结晶温度 5 $^{\circ}$ C、结晶时间 2 h、料溶比 1:9、乙醇体积分数 90%,在此条件下神经酸产品的纯度为 26.12%。付一笑^[33]采用低温结晶法分离纯化蒜头果油中的神经酸,最终神经酸产品的富集率为 26.86%,神经酸含量为 70.19%。低温结晶法适用范围广,设备简单且生产成本低,在低温条件下操作不会影响神经酸的分子结构和理化性质。

金属盐沉淀法常用皂化物(氢氧化钠 - 乙醇溶液)与混合脂肪酸反应,生成相应的脂肪酸盐,根据不同脂肪酸盐在有机溶剂中溶解度的差异,而将神经酸盐从混合脂肪酸盐中分离,最后进行酸化处理得到神经酸。林秀椿等^[34]比较了金属盐沉淀法、结晶法和金属盐沉淀 - 结晶耦合法纯化神经酸的效果,结果表明,金属盐沉淀法神经酸含量提升至 16.45%,结晶法为 5.57%,耦合法为 6.24%。金属盐沉淀法对于低碳脂肪酸的去除有明显效果,且具有经济、高产等优点。

尿素包合法是分离饱和与不饱和烃链的经典方法。饱和或单不饱和脂肪酸易进入尿素分子的空间结构,形成稳定的晶体包合物^[6]。碳链有支链或双键过多会影响包合物稳定性^[35]或不与尿素形成包合物,从而实现分离。郭莹莹等^[10]利用尿素包合法富集文冠果油中的神经酸,将神经酸含量从 2.59% 提升至 9.49%,回收率达到 74.01%。尿素包合法的低加工温度很好地保存了神经酸的分子结构、理

化性质和生理活性,同时具有设备简单、所使用的试剂容易获得、可回收、成本低等优点。

分子蒸馏法是一种高效的液 - 液分离技术,已被用于油脂和石油领域的分离纯化,以获得富含特定化合物的馏分^[36]。徐明辉等^[37]将元宝枫籽油乙酰化后采用分子蒸馏法分离其中的神经酸乙酯,得到含量为 50% 以上的神经酸乙酯产品。李俊雯等^[28]以罗汉菜籽油为原料采用分子蒸馏 - 尿素包合法富集神经酸,最终将神经酸含量从 6.40% 提高至 26.23%。分子蒸馏技术的特点是蒸发器和冷凝器之间的距离短,蒸馏空间高真空以及蒸馏物质暴露于操作温度的时间短^[39],分离效率高,具有良好的抗产品劣化和分解性能,且克服了现有技术存在如步骤烦琐、水洗易乳化、产品酸值高等问题,在脂肪酸提取中应用较为广泛。

高速逆流色谱法(HSCCC)是一种液 - 液分配色谱技术,可根据各组分在两相中分配系数的差异进行分离。与传统技术相比,HSCCC 的优势在于无须使用固体载体以及避免了在载体上的不可逆吸附现象^[40-41]。赵艳等^[42]采用该方法纯化元宝枫籽油中的神经酸,纯化后神经酸纯度为 18.05%。采用 HSCCC 分离神经酸,操作简便、重现性好、回收率和分离效率高,但需要精密仪器做支撑,不能够工厂化生产。

比较以上神经酸提取纯化工艺的优缺点,总结得出:以上几种方法均易操作,其中分子蒸馏法具有减少乳化现象及防止产物酸值过高的优点,但一般得到的是乙酯型产品。金属盐沉淀法和 HSCCC 获得的神经酸纯度较高,但 HSCCC 要求精密仪器设备,无法进行工厂化生产,金属盐沉淀法纯化效率较低。因此,神经酸提取纯化方法,可优先选择优化分子蒸馏条件,或者与其他工艺相结合,以得到更高纯度和产率的神经酸产品。

4 神经酸检测技术

脂肪酸测定最常用的方法为色谱法,包括高效液相色谱(HPLC)、气相色谱(GC)、气相色谱 - 质谱联用(GC - MS)等方法。基于色谱检测的特点,

待测样品需低沸点、易挥发,因此在检测前需要将脂肪或脂肪酸进行甲酯化。甲酯化最常用的方法包括酸催化和碱催化两大类。其中氢氧化钠是使用最广的碱催化法衍生试剂,酸催化法常用衍生试剂包括盐酸、乙酰氯、硫酸、三氟化硼等^[43]。酸法甲酯化法既可用于游离脂肪酸,又可用于结合态脂肪酸(脂肪),而碱法甲酯化快捷、简便,水解和甲酯化可一步完成,但适用范围较窄,仅适合于脂肪^[44]。

GC与HPLC原理相似,均广泛用于神经酸的检测,前者流动相为气相,后者流动相为液相,柱中固定相与样品各组分分子的作用力不同,进而将不同物质分离^[45]。Tu等^[16]采用GC-FID分析蒜头果油、元宝枫籽油和文冠果油中脂肪酸,其中神经酸含量分别为62.6%、5.8%、2.2%。Liang等^[46]采用HPLC检测出文冠果油中神经酸含量为3.80%。两种检测方法均操作简单,适用范围广,但GC仅适用于对热稳定性较好的样品进行检测,而HPLC常温操作,无须将样品汽化,不受样品挥发性限制,适用于高沸点、热稳定性差、相对分子质量大的有机物质检测。Piovesana等^[47]采用超高效液相色谱-质谱(UHPLC-MS)检测出工业大麻脂肪酸中的神经酸含量为0.3%。GC-MS、液相色谱-质谱是将色谱与质谱联合使用,充分发挥色谱物质分离能力和质谱精准掌握离子化合物组成情况的优点^[48],具有高选择性和高灵敏性,极大增加了实验结果的准确度和可信度。

5 总结与展望

本文介绍了神经酸的植物来源,阐述了神经酸的生理功效,同时列举了神经酸的提取纯化方法及检测方法。神经酸植物来源广泛,其中木本植物来源可实现规模化生产神经酸;神经酸具有控制心血管疾病、改善血糖、提高机体免疫力及抑制肿瘤细胞生长等多种生理功效;神经酸的提取纯化方法众多,常用的方法包括低温结晶法、金属盐沉淀法、尿素包合法、分子蒸馏法等,应优先选择优化分子蒸馏条件,或者与其他工艺相结合的方法以提高神经酸的产率及纯度;神经酸的检测方法主要是色谱法,包括HPLC、GC、GC-MS等方法,其中GC仅适用于热稳定性较好的样品,而HPLC适用于高沸点、热稳定性差、相对分子质量大的有机物质检测。

随着提取技术和分析手段的不断进步,神经酸的功能活性将会被不断挖掘,应用领域将不断扩大。在现有的生物资源和纯化技术上,应选择和保护高产神经酸的植株进行批量育种和种植,扩大获取神

经酸原料范围;优化现有的神经酸纯化方法,寻找更高效纯化方法,使神经酸的获取在技术及纯度上得到进一步发展;在神经酸的检测方面,找出最优的检测方法,充分利用检测仪器的精准度,最大限度地检测到样品中的神经酸含量。随着我国居民健康意识逐步提升,消费能力逐渐增强,对神经酸功效的认知度不断上升,神经酸在食品、饮料、保健品领域的应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 赖福兵. 蒜头果油中高纯神经酸的制备研究[D]. 南宁:广西大学, 2018.
- [2] TANG T F, LIU X M, LING M, et al. Constituents of the essential oil and fatty acid from *Malania oleifera* [J]. Ind Crop Prod, 2013, 43: 1-5.
- [3] 张茜, 谭瑜, 李雁群, 等. GC-MS测定蒜头果油中的脂肪酸含量[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(5): 15-17.
- [4] YANG T Q, YU Q, XU W, et al. Transcriptome analysis reveals crucial genes involved in the biosynthesis of nervonic acid in woody *Malania oleifera* oilseeds [J/OL]. BMC Plant Biol, 2018, 18(1): 247 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1463-6>.
- [5] HUAI D, ZHANG Y, ZHANG C, et al. Combinatorial effects of fatty acid elongase enzymes on nervonic acid production in *Camelina sativa* [J/OL]. Plos One, 2015, 10(6): e0131755 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131755>.
- [6] LI Q, CHEN J, YU X, et al. A mini review of nervonic acid: source, production, and biological functions [J/OL]. Food Chem, 2019, 301: 125286 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125286>.
- [7] HE X, LI D Z, TIAN B. Diversity in seed oil content and fatty acid composition in *Acer* species with potential as sources of nervonic acid [J]. Plant Divers, 2021, 43(1): 86-92.
- [8] HE X, LU T Q, LI J Y, et al. Germplasm resources of three wood plant species enriched with nervonic acid [J]. Plant Divers, 2022, 44(3): 308-315.
- [9] 葛智勤, 金文华, 黄楠, 等. 低温结晶法纯化元宝枫籽油中神经酸[J]. 中国油脂, 2021, 46(4): 99-102.
- [10] 郭莹莹, 刘玉兰, 梁绍全, 等. 尿素包合法富集文冠果油中神经酸的研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(7): 119-123.
- [11] QIAO Q, HU K, WU C, et al. *Acer triflorum* as a new nervonic acid-containing oilseed resource for the future: fruit- and - seed weight, oil content and fatty acid composition [J/OL]. Ind Crops Prod, 2022, 179: 114684

- [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114684>.
- [12] 蒲定福, 冯自伟, 郑仁健, 等. 神经酸来源新方向的探讨[J]. 中国油脂, 2021, 46(8): 76-80, 86.
- [13] DODOS G S, KARONIS D, ZANNIKOS F, et al. Renewable fuels and lubricants from *Lunaria annua* L. [J]. Ind Crops Prod, 2015, 75: 43-50.
- [14] YUAN C, LIU J, FAN Y, et al. *Mychonastes afer* HSO-3-1 as a potential new source of biodiesel [J/OL]. Biotechnol Biofuels, 2011, 4(1): 47 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-47>.
- [15] 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, 31(3): 69-71.
- [16] TU X, WAN J, XIE Y, et al. Lipid analysis of three special nervonic acid resources in China [J]. Oil Crop Sci, 2020, 5(4): 180-186.
- [17] LIU F, WANG P, XIONG X, et al. A review of nervonic acid production in plants: prospects for the genetic engineering of high nervonic acid cultivars plants [J/OL]. Front Plant Sci, 2021, 12: 626625 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.626625>.
- [18] 范一铭, 高桂珍, 薛羽君, 等. 植物神经酸研究进展 [J]. 生物技术进展, 2022, 12(5): 664-672.
- [19] 马柏林, 梁淑芳, 赵德义, 等. 含神经酸植物的研究 [J]. 西北植物学报, 2004, 24(12): 2362-2365.
- [20] SAADAOU I, AL GHAZAL G, BOUNNIT T, et al. Evidence of thermo and halotolerant *Nannochloris* isolate suitable for biodiesel production in Qatar Culture Collection of Cyanobacteria and Microalgae [J]. Algal Res, 2016, 14: 39-47.
- [21] YUAN C, XU K, SUN J, et al. Ammonium, nitrate, and urea play different roles for lipid accumulation in the nervonic acid-producing microalgae *Mychonastes afer* HSO-3-1 [J]. J Appl Phycol, 2018, 30(2): 793-801.
- [22] KEPPELY L J W, WALKER S J, GADEMSEY A N, et al. Nervonic acid limits weight gain in a mouse model of diet-induced obesity [J]. FASEB J, 2020, 34(11): 15314-15326.
- [23] SONG W, ZHANG K, XUE T, et al. Cognitive improvement effect of nervonic acid and essential fatty acids on rats ingesting *Acer truncatum* Bunge seed oil revealed by lipidomics approach [J]. Food Funct, 2022, 13(5): 2475-2490.
- [24] WU R, ZHONG S, NI M, et al. Effects of *Malania oleifera* Chun oil on the improvement of learning and memory function in mice [J/OL]. Evid-Based Compl Alt, 2020, 2020: 8617143 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1155/2020/8617143>.
- [25] VOZELLA V, BASIT A, MISTO A, et al. Age-dependent changes in nervonic acid-containing sphingolipids in mouse hippocampus [J]. BBA-Mol Cell Biol L, 2017, 1862(12): 1502-1511.
- [26] CHEN X, GUO C, KONG J. Oxidative stress in neurodegenerative diseases [J]. Neural Regen Res, 2012, 7(5): 376-385.
- [27] AMMINGER G P, SCHÄFER M R, KLIER C M, et al. Decreased nervonic acid levels in erythrocyte membranes predict psychosis in help-seeking ultra-high-risk individuals [J]. Mol Psychiatr, 2012, 17(12): 1150-1152.
- [28] UMEMOTO H, YASUGI S, TSUDA S, et al. Protective effect of nervonic acid against 6-hydroxydopamine-induced oxidative stress in PC-12 cells [J]. J Oleo Sci, 2021, 70(1): 95-102.
- [29] 王熙才, 左曙光, 邱宗海, 等. 艾舍尔软胶囊增强小鼠免疫力的实验研究 [J]. 昆明医学院学报, 2008, 29(6): 71-75.
- [30] DASKALOVA S M, EISENHAEUER B M, GAO M, et al. An assay for DNA polymerase *beta* lyase inhibitors that engage the catalytic nucleophile for binding [J/OL]. Bioorg Med Chem, 2020, 28(17): 115642 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2020.115642>.
- [31] YANG J, YANG J, YIN Z Q, et al. Study of the inhibitory effect of fatty acids on the interaction between DNA and polymerase *beta* [J]. Biochemistry (Mosc), 2009, 74(7): 813-818.
- [32] 骆芬芳. 文冠果油中神经酸提取纯化及生物柴油制备工艺研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [33] 付一笑. 蒜头果光合生理以及其种子中神经酸的提取纯化 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- [34] 林秀椿, 王建中, 武建云. 荆条籽油的理化性质和神经酸的分离提纯 [J]. 中国油脂, 2008, 33(10): 37-39.
- [35] MUDGAL S, RAN-RESSLER R R, LIU L, et al. Branched chain fatty acids concentrate prepared from butter oil via urea adduction [J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2015, 118(4): 669-674.
- [36] KANG Y, WU K, SUN J, et al. Preparation of Kushui Rose (*Rosa setata* x *Rosa rugosa*) essential oil fractions by double molecular distillation: aroma and biological activities [J/OL]. Ind Crops Prod, 2022, 175: 114230 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114230>.

3 结论

本研究通过将椰子油添加到脱脂奶粉中制成复原乳,进而发酵制成酸奶。探究了椰子油添加量与复原乳平均粒径及粒径分布之间的关系,然后探究了椰子油添加量对酸奶品质及消化特性的影响。结果表明,椰子油添加量在2%~8%时,复原乳粒径分布无显著差异,当椰子油添加量为6%时,酸奶的整体品质最好。体外消化模拟实验表明,椰子油基酸奶脂质水解程度更高,脂肪酸释放速率更快,说明椰子油基酸奶对于人体消化吸收脂肪具有积极的影响。

参考文献:

- [1] 白海娜. 凝固型酸奶的营养成分及研究进展[J]. 现代食品, 2019, 8(16):108-110.
- [2] 解冰心, 唐善虎, 李思宁, 等. 添加不同植物油对益生菌酸奶品质、风味及发酵特性的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(10):151-157.
- [3] 沈壮. 低脂大豆酸奶品质分析及体外消化特性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [4] 柴溢, 张毅, 姜铁民, 等. UPLC法测定牛乳脂肪中脂肪酸的构成[J]. 食品科技, 2014, 39(6):272-275.
- [5] 崔志娟, 齐鸣, 谭碧娥. 中链脂肪酸甘油三酯在仔猪中的消化吸收及生理功能[J]. 动物营养学报, 2021, 33(10):5441-5448.
- [6] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGERI M, et al. INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion[J]. Nat Protoc, 2019, 14(4):991-1014.
- [7] 彭松林, 张伊依, 赵紫悦, 等. 酪蛋白酸钠-大豆油乳化体系的影响因素[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1):107-115, 124.
- [8] 郝慧敏, 靳学远, 刘艳芳. 超高压均质制备牡丹籽油纳米乳液及稳定性研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(9):78-81.
- [9] 倪玲英, 何利民. 波纹板间油滴的 Stokes 浮升模拟分析[J]. 过滤与分离, 2007, 17(2):18-20.
- [10] 王建辉, 靳娜, 成媛媛, 等. 基于大豆分离蛋白的脂肪模拟工艺条件优化[J]. 食品科学, 2014, 35(16):6-10.
- [11] 程欣玥, 孙小茜, 石静静, 等. 增稠剂促进酸奶凝胶的机理及应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(21):325-332.
- [12] 李红娟, 刘婷婷, 邹璇, 等. 乳清蛋白-黄油乳液凝胶对低脂酸奶理化特性及品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(7):71-77.
- [13] 郑健, 房天琪, 沈雪, 等. 乳清分离蛋白与燕麦 β -葡聚糖作为增稠剂在酸奶中的应用[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(7):21-25.
- [14] 张福荣, 曾雪峰, 陆丹丹. 鲟鱼鱼糜对酸奶质构特性与品质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(1):89-96.
- [15] NG S, KHOR Y, LIM H, et al. Fabrication of concentrated palm olein-based diacylglycerol oil-soybean oil blend oil-in-water emulsion: in-depth study of the rheological properties and storage stability[J/OL]. Foods, 2020, 9:877 [2022-07-07]. <https://doi.org/10.3390/foods9070877>.
-
- (上接第124页)
- [37] 徐明辉, 张骊, 陈东升, 等. 元宝枫籽油及神经酸制取工艺[J]. 粮食与食品工业, 2017, 24(1):41-43.
- [38] 李俊雯, 朱明明, 吴梦琪, 等. 分子蒸馏结合尿素包合法富集罗汉菜籽油中神经酸[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(2):82-87.
- [39] YI F, SUN J, BAO X, et al. Influence of molecular distillation on antioxidant and antimicrobial activities of rose essential oils[J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 102:310-316.
- [40] YAN R, SHEN J, LIU X, et al. Preparative isolation and purification of hainanmurpanin, meranzin, and phebalosin from leaves of *Murraya exotica* L. using supercritical fluid extraction combined with consecutive high-speed countercurrent chromatography[J]. J Sep Sci, 2018, 41(9):2092-2101.
- [41] LIANG Z, XIE Z, LAM S, et al. Optimization of the fractional precipitation of paclitaxel from a *Taxus chinensis* cell culture using response surface methodology and its isolation by consecutive high-speed countercurrent chromatography[J]. J Sep Sci, 2014, 37(17):2322-2330.
- [42] 赵艳, 朱晶, 王向东. 高速逆流色谱纯化元宝枫神经酸的研究[J]. 食品科技, 2016, 41(6):251-254.
- [43] HEWAVITHARANA G G, PERERA D N, NAVARATNE S B, et al. Extraction methods of fat from food samples and preparation of fatty acid methyl esters for gas chromatography: a review[J]. Arab J Chem, 2020, 13(8):6865-6875.
- [44] 寇秀颖, 于国萍. 脂肪和脂肪酸甲酯化方法的研究[J]. 食品研究与开发, 2005(2):46-47.
- [45] 张英明. 气相色谱法的原理及其在食品农药残留检测中的应用[J]. 食品安全导刊, 2021(35):187-189.
- [46] LIANG Q, FANG H, LIU J, et al. Analysis of the nutritional components in the kernels of yellowhorn (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge) accessions[J/OL]. J Food Compos Anal, 2021, 100:103925 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103925>.
- [47] PIOVESANA S, AITA S E, CANNAZZA G, et al. In-depth cannabis fatty acid profiling by ultra-high performance liquid chromatography coupled to high resolution mass spectrometry[J/OL]. Talanta, 2021, 228:122249 [2022-08-28]. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.122249>.
- [48] 孟超. 质谱联用技术在药品分析中的应用[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(5):190-192.