

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.03.010

尤悦, 张文静, 许睿, 等. γ -亚麻酸的富集及其生理功效研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(3): 101-108.YOU Y, ZHANG W J, XU R, et al. Research progress on the enrichment of γ -linolenic acid and its physiological functions[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(3): 101-108.

γ -亚麻酸的富集及其生理功效研究进展

尤悦, 张文静, 许睿, 周义方, 吕彦锟, 张晖, 吴港城✉, 王兴国

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214000)

摘要: γ -亚麻酸 (GLA) 是含有三个双键的多不饱和脂肪酸, 因其具有多种生物学活性而备受关注。GLA 目前主要的植物来源为琉璃苣、月见草和黑加仑等, 微生物来源大多为藻类和真菌。现有的 GLA 分离纯化技术各有优缺点, 单一的富集方法无法满足高纯度 GLA 的要求, 采用不同方法综合使用、结合现代化分离提取技术是未来制备 GLA 的方法。同时, 多项研究表明, GLA 在机体的物质代谢和生理调控上发挥着十分重要的作用, 对血脂、抗血栓性心血管疾病、癌症和糖尿病等慢性疾病具有很好的预防效果, 但具体的作用机理仍需进一步研究。综上所述, GLA 是一种对人体有益的脂肪酸, 但其人体内的代谢途径和生理功效仍然需要进一步挖掘, 从而为 GLA 作为功能性保健食品的开发提供理论支撑。

关键词: γ -亚麻酸; 富集方法; 代谢; 生理功能

中图分类号: TS222+.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)03-0101-08

网络首发时间: 2024-05-09 12:04:42

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240509.1008.002>

Research Progress on the Enrichment of γ -Linolenic Acid and Its Physiological Functions

YOU Yue, ZHANG Wen-jing, XU Rui, ZHOU Yi-fang, LYU Yan-kun,
ZHANG Hui, WU Gang-cheng✉, WANG Xing-guo

(Food College, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: The γ -linolenic acid (GLA), a polyunsaturated fatty acid with three double bonds, has attracted much attention due to its numerous biological properties. Borage, evening primrose, and blackcurrant are the primary sources of GLA, while algae and fungi constitute the majority of microbial sources. Existing GLA separation and purification technologies have their own advantages and disadvantages. A single enrichment method can not meet the requirements for high-purity GLA. The comprehensive use of different methods and

收稿日期: 2023-10-07

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFD2100303); 2021 年江苏省高等教育教改研究立项项目 (2021JSJG058)

Supported by: National Key Research and Development Project of China(No. 2021YFD2100303); The Exploration and Practice of the Higher Education Reform Research Project of Jiangsu Province in 2021 (No. 2021JSJG058)

作者简介: 尤悦, 女, 2003 年出生, 在读本科生, 研究方向为油脂加工。E-mail: 1012210516@stu.jiangnan.edu.cn

通讯作者: 吴港城, 男, 1987 年出生, 博士, 副教授, 研究方向为油脂加工。E-mail: gangcheng.wu@jiangnan.edu.cn

the combination of modern separation and extraction technology could be the methods for preparing GLA in the future. Simultaneously, numerous studies have demonstrated the crucial involvement of GLA in the body's metabolism and physiological control, as well as its efficacy in blood lipids, antithrombotic cardiovascular diseases, cancer and diabetes. Further research is necessary to gain a better understanding of the mechanism of action. This review of GLA sources, enrichment methods, metabolic pathways and physiological efficacy in humans could provide theoretical support for GLA as a functional health food for the prevention of multiple chronic diseases.

Key words: γ -linolenic acid; enrichment method; metabolism; physiological function

脂肪酸是油脂中最具代表性的营养物质，可将其分为饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸等。其中多不饱和脂肪酸中具有重要生物学功能的通常是 n-6 多不饱和脂肪酸和 n-3 多不饱和脂肪酸。 γ -亚麻酸 (GLA) 是 n-6 系列多不饱和脂肪酸，其结构为顺 6，顺 9，顺 12 十八碳三烯酸，分子结构如图 1 所示； α -亚麻酸 (ALA) 是 n-3 系列多不饱和脂肪酸，其结构为顺 9，顺 12，顺 15 十八碳三烯酸，分子结构如图 2 所示。二者属于同分异构体，差异在于其中一个双键的位置不同，从而导致两者在体内的代谢及生理功能存在差异。



图 1 GLA 的化学结构式

Fig.1 The structural formula of GLA



图 2 ALA 的化学结构式

Fig.2 The structural formula of ALA

在自然界中，GLA 在琉璃苣、黑加仑和月见草等植物种子中的含量较高。这些植物在我国西南、西北、华东、华南等地区均有种植。琉璃苣种子是目前已知的 GLA 最丰富的来源，琉璃苣籽油中 GLA 含量高达 22%^[1]。除此之外，还可以从微生物中获取 GLA。产 GLA 的微生物资源主要是真菌和藻类。能够产生 GLA 的真菌中深黄被孢霉的 GLA 产量较高，可达 1 525.20 mg/L^[2]。在藻类中，螺旋藻种 GLA 含量高达 10 108 mg/kg 藻粉，占整个藻体脂肪含量的 20%~30%^[1]。因此，

需要对不同来源的 GLA 进行系统的综述，从而为后期开发利用原料的选择提供依据。

由于油脂中 GLA 的含量偏低，如何制备高含量 GLA 的油脂已经被越来越多的重视。目前，GLA 的保护性加工技术主要包括：尿素包埋、超临界 CO₂ 萃取、低温结晶、溶剂萃取以及酯交换、脂肪酶催化水解法等。例如，低温结晶和尿素包埋虽然是分离不饱和脂肪酸和饱和脂肪酸最简单的方法，但回收率远低于酶促反应的回收率。采用超临界 CO₂ 萃取通常可以保证高纯度，但其成本较高且难以将双键数相近的脂肪酸分开。可见，不同 GLA 的保护性加工技术存在较大差异性，需要对上述加工技术进行系统性的综述。

GLA 是亚油酸在人体内的一种中间代谢产物，是组成生物膜的重要成分，且可以通过一系列的生理生化活动合成机体所需要的活性成分，并产生各种代谢产物。正常人从食物中摄取亚油酸经 δ -6-脂肪酸脱氢酶代谢形成 GLA，延长生成双高- γ -亚麻酸后，再脱氢生成花生四烯酸，可进一步转化为前列腺素、白三烯、血栓素等重要衍生物，参与细胞的组成、调节细胞的生理生化活性^[1]。研究表明 GLA 在心血管系统、免疫系统、生殖系统、内分泌系统中都具有重要的生理作用和显著的药理作用。可见，GLA 的体内代谢途径及其生理功效已经有较多的报道，但缺乏对这些内容进行系统的综述。

因此，本文从 GLA 的来源、高含 GLA 油脂的保护性加工技术、体内的代谢途径及其生理功效四个方面进行综述，为 GLA 产品的开发提供科学依据。

1 GLA 的来源

GLA 是一种含有三个双键的多不饱和脂肪酸,是前列腺素、血栓素、白三烯等重要物质的前体,对人体代谢有着重要作用,在药理学和营养学上引起人们的广泛关注。

GLA 在动物组织中含量较低,但在人乳汁中含量较高,占乳汁重量 0.35%~1.0%,植物中 GLA 主要存在于柳叶菜科、紫草科和虎耳草科种子油中,如月见草油中 GLA 含量为 7%~10%,琉璃苣油中 GLA 含量达 15%~25%,黑加仑油中 GLA 含量为 11.71%~20%^[1]。目前的研究方向为以现有 GLA 植物资源为基础筛选培育高 GLA 含量的植物和提高含有 GLA 植物中 GLA 的含量。

除了从植物中提取,一部分微生物也可以产 GLA,如藻类和真菌。藻类主要为螺旋藻,其多不饱和脂肪酸含量很高,GLA 以酯化状态存在其中,螺旋藻生产的 GLA,占总脂肪酸的 30%,具有较高的水平。能够产 GLA 的真菌主要是被孢霉、毛霉、小克银汉霉、根霉等,不同菌属所产生 GLA 量不同,其中深黄被孢霉产生油脂中 GLA 含量较为丰富,在最佳条件下 GLA 产量达 1 525.20 mg/L^[1]。目前发酵生产 GLA 大多数以深黄被孢霉作为菌种,其研究方向主要是诱变和发酵条件优化。但是目前从微生物中获取 GLA 的方法尚未得到广泛应用,主要原因是 GLA 合成途径复杂。随着诱变技术的深入研究,可以得到具有不同特质的 GLA 正突变菌株,将这些具有不同优良性状的菌株集于一身,是 GLA 优良菌种选育工作的关键与未来工作方向之一。

2 高含 GLA 油脂的保护性加工技术

近年来,由于 GLA 具有重要生理功能,人们对于 GLA 的研究逐步全面,其市场需求量逐渐增加,产品纯度要求增高,因此需要对其进行富集纯化。GLA 由于其全顺式和多不饱和的结构,热不稳定的多聚脂肪酸的化学合成很困难,因此主要从天然来源获得 GLA。

天然油脂原料组成复杂,混合脂肪酸因油脂品种、产地等诸多因素导致物理化学性质不同,且多不饱和脂肪酸在原料中的浓度一般不高,所

以采用安全无毒且高效地分离纯化目标产物,提高产品的利用价值为分离纯化 GLA 的主要研究方向。

尿素包合技术原理是脂肪族化合物可与尿素形成不同程度包合物,根据脂肪酸饱和度差异及分子结构不同,将 GLA 与包括同分异构体在内的其他脂肪酸分离。该方法操作简便,尿素可循环利用,其缺点是不能将碳链长度不同而饱和度相近或相同的脂肪酸分开,产率较低,需要与其他方法结合才能得到纯度较高的 GLA 产物。杨琦^[2]等研究结果表明:尿素包合 60 h,且温度-15 °C,包合三次,GLA 的纯度可高达 78.996 4%; Luis V´azquez^[3]等利用尿素络合法选择性从车前草种子油中富集硬脂酸和 GLA, GLA 的产率达 91%~92%。使用尿素包合技术富集 GLA 的实验过程中,尿素用量、包合次数、梯度温度结晶的设定及有机溶剂的投入量都能影响最终产物的浓度。尿素用量过高,多种脂肪酸都能与尿素分子形成包合物,导致 GLA 收率偏低;尿素用量过少,混合物中饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸与尿素分子之间难以形成稳定包合物,因而只能得到低纯度不饱和脂肪酸。适当增加包合次数和梯度温度结晶有利于提高产物浓度,此外,有机溶剂溶解尿素,对混合物的分离效果也有一定影响。

超临界 CO₂ 萃取技术是通过调节温度和萃取压力来改变活性物质在临界流体中的溶解度,其优点是萃取时间非常短,易分离,操作时温度低,不存在溶剂残留,很好地避免了 GLA 生物活性成分的氧化和热分解。Yang^[4]等通过超临界 CO₂ 萃取法提高从螺旋藻富集 GLA 的提取效率,在最佳条件下,GLA 的提取效率可达 98%,含量占提取物中总脂肪酸的 35%; Nidhi^[5]等采用超临界 CO₂ 萃取技术从白芥中富集多不饱和脂肪酸,与溶剂萃取法相比,多不饱和脂肪酸含量由 5.36%提高至 9.12%,GLA 含量由 0.45%提高至 0.67%。但该技术难以将双键数目相近的脂肪酸如亚油酸和亚麻酸分离,且设备投资较大。

低温结晶是基于脂肪酸或脂肪酸酯在不同温度和溶剂中溶解度的差异进行分离,Chen^[6]等采用两次低温结晶从皂化琉璃苣油中浓缩 GLA,第

一阶段 GLA 含量从 23.4% 提高到 66.1%，相应收率为 93%，在第二阶段操作中，GLA 含量进一步提高到 93.9%，相应的收率为 92.4%，总产率达 86%。该方法防止了多不饱和脂肪酸的氧化，GLA 在低温条件下结晶析出，可以保证一定的纯度。其缺点是需要回收大量的有机溶剂，分离效率不高，所需时间较长，且能耗较高，通常和其他方法配合使用。低温结晶与尿素包合结合比单一的方法富集效果更好。Ahmed^[7]等利用低温尿素结晶工艺富集从酵母毛霉中提取脂质中的 GLA，使得 GLA 的含量达到 92.7%，回收率为 63%。低温结晶与尿素包合结合能否实现 GLA 的高效富集仍然需要进一步研究。

溶剂萃取法是利用混合脂肪酸在同一溶剂中溶解度不同来分离纯化混合脂肪酸。溶剂萃取法可以通过调节温度、脂肪酸与溶剂间的比例、溶剂种类及反应时间等提高分离的纯度。此方法操作简洁，但在蒸馏过程中需加热，会使部分 GLA 遭破坏，且回收溶剂流程复杂，回收不彻底。乙醇、石油醚、丙酮、正己烷等是常用的溶剂。对常用溶剂提取效果研究显示，正己烷提取效果最差，丙酮能够提取得到最多的 GLA。在食品工业中批准使用的有机溶剂中，乙醇能够得到最多的 GLA 产量。单溶剂萃取过程中，萃取剂用量多，分离成本高、能耗高是其不可忽略的问题，因而如今更多采用的是混合溶剂提取，通过调节溶剂组成及比例实现工艺分离性能与能耗的权衡。食品工业生产中多采用乙醇-正丁烷。Svetlana^[8]等将种子油衍生为脂肪酸甲酯，加入 2 mL 甲基化混合物（甲醇：乙酰氯，20：1，v/v）和 1 mL 正己烷在 100 °C 下加热 30 min，得 GLA 含量占总脂肪酸的 20.2%；采用相同的萃取条件发现紫草科种子油中富含 GLA，含量最高可达 22.8%^[9]。

酯交换法通过改变脂肪酸在甘油三酯中的分布来改变油脂特性。López-Martínez^[10]等采用三步法制备了富含 GLA 的结构状三酰基甘油酯，最终 GLA 的浓度提高至 90%；薛刚^[11]等对柱色谱和甲酯化工艺进行优化，得到 GLA 纯度高达 91%。

脂肪酶催化水解法速度快，易分离，但受酶的种类和活性等多种因素影响。Carla^[12]等通过脂

肪酶介导催化合成了富含 GLA 的 1,3-二酰甘油，采用两种脂肪酶和三个变量优化反应条件，最终 1,3-二酰甘油中 GLA 含量可达 32.3%；Yoon^[13]等通过假丝酵母脂肪酶催化水解琉璃苣油中 GLA，并用分子蒸馏从反应混合物中分离出甘油酯，可以将琉璃苣油中 GLA 的含量由 20.64% 提高到 45.94%。

3 GLA 在体内的代谢

GLA 能调节细胞的生理生化活动，它在体内经过多次复杂的代谢活动，产生多种代谢产物，直接参与了人体新陈代谢合成机体所需的活性成分（图 3）。一般认为，所有哺乳动物，包括人类，需要 1%~2% 的亚油酸[LA,18:2(n-6)]作为总膳食能量，以防止必需脂肪酸缺乏症。LA 通过 δ -6-脂肪酸脱氢酶在各种组织中代谢形成 GLA，其通过链延长酶迅速延伸为二高- γ -亚麻酸（DGLA）。 δ -5-脂肪酸脱氢酶可使 DGLA 进一步降低饱和度生成花生四烯酸[AA,20:4(n-6)]。AA 的环氧合酶产物为前列腺素 E2，通过 5-脂氧合酶生成 4-系列白三烯^[14]。

然而，由于 δ -5-脂肪酸脱氢酶在啮齿动物和人类中的活性有限，因此只有一小部分 DGLA 会转化为 AA。研究数据表明，在许多类型的细胞中，补充 GLA 会导致 GLA 链延长酶产物 DGLA 的积累而不会导致 AA 的积累。且 LA 通过 δ -6-脂肪酸脱氢酶、链延长酶和 δ -5-脂肪酸脱氢酶转化为 AA，其中氢原子被选择性的去除以产生新的双键，然后加入两个碳原子以延长脂肪酸链。膳食 GLA 绕过速度限制酶 δ -6-脂肪酸脱氢酶，通过链延长酶迅速延长到 DGLA，只有非常有限的量被 δ -5-脂肪酸脱氢酶氧化为 AA。DGLA 可以通过环氧合酶途径转化为前列腺素 E1，或者通过 15-脂氧合酶途径转化为 15-羟基二十碳三烯酸（15HETrE），15HETrE 能够抑制 AA 衍生的 5-脂氧合酶代谢物的形成^[14]。

GLA 与 ALA 都是合成生命活性物质前列腺素的前驱物质且不能在哺乳动物体内合成，二者在体内有各自的代谢途径，ALA 通过去饱和酶与碳链延长酶的作用生成二十碳五烯酸和二十二碳

六烯酸 (DHA), GLA 在生物转化过程中与 ALA 合成 DHA 所用脂肪酸去饱和酶和碳链延长酶相同, 因此 GLA 会抑制 ALA 向 DHA 的转化^[15]。

GLA 在体内代谢生成的 AA 为前列腺素及生物膜的构成提供前体, AA 为 GLA 在体内代谢发挥营养功能性的关键作用。

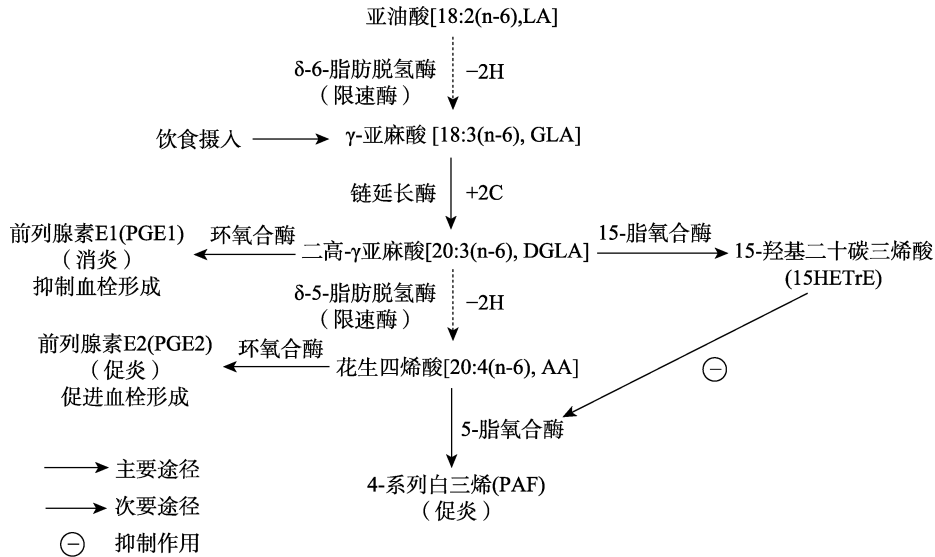


图 3 GLA 的体内代谢路径

Fig.3 The metabolic pathway of GLA acid in vivo

4 GLA 的生理功效

目前已发现 GLA 及其系列代谢物在免疫系统、心血管系统、生殖系统、内分泌系统乃至神经系统等相关疾病预防方面, 都有重要的功效。

4.1 心血管疾病

虽然当前没有证实 GLA 对不良心血管事件和脑血管疾病死亡率有直接影响, 但是有研究报告称, GLA 参与促进血管松弛, 抑制与动脉粥样硬化进展相关的平滑肌细胞的增殖, 在 GLA 水平较低的人群中, 外周动脉疾病的患病率往往更高, Albea^[16]等通过连续追踪 76 763 名妇女的饮食习惯研究 GLA 对冠心病的影响, 试验结果证实膳食补充添加 GLA 可以减少冠心病猝死的风险。研究者认为, 每日摄入 1 g 的 GLA 可以稳定心肌的活动, 减少心律失常的发生, 降低致死性冠心病的威胁; Yu^[17]等通过在自发性高血压大鼠与正常血压大鼠喂养 GLA 与正常油脂后发现, GLA 组血压较对照组有明显降低。以上试验均可证明, GLA 对心血管疾病具有一定的预防功效。

4.2 降血脂作用

最近研究表明, 富含 GLA 的油脂在脂质代谢

紊乱方面还发挥着积极的降脂作用。Takahashi^[18]等给试验大鼠喂食含有 2% 红花油的低脂饮食或富含亚油酸的红花油、含有 25% GLA 的琉璃苣油 14 天, 结果表明, 以琉璃苣油形式存在的 GLA 可减少体脂肪的积累; Ide^[19]等研究了来自月见草油的 GLA 对载脂蛋白 E 表达缺陷的遗传性高脂血症小鼠的肝脏脂肪酸代谢和血脂水平的影响, 与棕榈油相比, GLA 显著降低了血清三酰甘油和胆固醇水平; Yang^[20]等通过研究螺旋藻油中 GLA 对 C57BL/6 J 小鼠高脂高糖饮食诱导的肥胖和肝脏脂质积累的影响, 发现含有 GLA 的藻油可有效降低肥胖小鼠的体重和肝脏脂质积累。上述结论可以推测, 油脂中的 GLA 可能是发挥降血脂作用的关键脂肪酸, 但缺乏相关的直接证据。因此, GLA 是否具有降血脂的功效仍然需要进一步研究。

4.3 抗肿瘤作用

GLA 已被确认对 40 多种肿瘤细胞有明显的抑制作用。一些研究表明, GLA 的抗肿瘤活性是通过激活巨噬细胞、产生自由基和脂质过氧化导致细胞凋亡来实现的。Suma^[21]等体内研究表明, GLA、GLA 脂质体和 GLA 脂质凝胶都具有抗肿

瘤作用,与对照组相比,三种制剂均显著减少肿瘤体积,14 d 后肿瘤重量分别减少 7.3%, 18.3% 和 59.7%; Mayra^[22]等研究表明 GLA 主要通过氧化应激产生相关的机制诱导内在凋亡途径,从而起到抗癌作用。因此, GLA 可能是一种具有潜在吸引力的抗肿瘤的生物学活性植物化学物质,可以抑制肿瘤活性且是抗癌作用的核心,然而仍需要进一步的研究来确定 GLA 在触发外源性细胞凋亡途径中具体的作用机制。

4.4 其他生理功效

4.4.1 抗炎功效

临床研究表明^[23], GLA 转化生成的 DGLA 是环氧合酶和脂氧合酶的底物,前者具有抗炎作用,后者可以抑制白三烯 B₄ 诱导的炎症细胞,因此 GLA 能有效地预防和治疗涉及氧化应激的多种炎症性疾病; Ella^[24]等研究发现 GLA 转化为其衍生物 DGLA 具有多种抗炎作用。以上研究都证明了 GLA 的抗炎效果是通过调节炎症相关细胞中 DGLA 和 AA 含量实现的。

4.4.2 抗菌功效

GLA 对多种革兰氏阴性菌、阳性菌及某些藻类的生长都有一定的抑制作用。Ohta^[25]等研究了 10 种不同脂肪酸对野生金黄色葡萄球菌菌株及抗甲氧西林突变菌株的细胞毒性作用,结果表明相较于其余 9 种脂肪酸, GLA 表现出了最大抗毒活性,当 GLA 浓度为 500 μg/mL 时,可在 15 min 内杀死全部细菌。

4.4.3 缓解糖尿病及其并发症

最近研究表明, GLA 可缓解糖尿病及其并发症。Takahashi^[18]等研究琉璃苣油对人体脂质的影响发现, GLA 的衍生物前列腺素可以增强腺苷酸环化酶活性、提高胰岛 β 细胞胰岛素的分泌,减轻糖尿病病情;魏琳琳^[26]等研究 GLA 对四氧嘧啶糖尿病模型大鼠的降糖作用发现,给糖尿病大鼠补充不同剂量的 GLA 后,各剂量组的大鼠血糖均有所下降,高剂量降糖效果最佳,表明 GLA 可提高糖尿病大鼠的葡萄糖耐受量。以上均可证明 GLA 具有缓解糖尿病作用,辅助降血糖的应用前景好。

4.4.4 减肥功效

由于 GLA 对棕色脂肪组织有刺激作用,能促

进棕色脂肪酸线粒体活性,消耗体内过多热量,因而具有治疗肥胖症作用。Takahashi^[18]等动物试验结果发现给试验大鼠喂食含有 47% GLA 的琉璃苣油和含有 25% GLA 的琉璃苣油 14 天与对照组相比,体脂肪积累减少,且 47% 浓度琉璃苣油 GLA 处理组相较于 25% 浓度琉璃苣油 GLA 处理组效果更加明显; Makoto^[27]等研究表明,乳酸菌衍生的 GLA 代谢物可以改善人类肠道中的脂质代谢,可能通过激活脂肪酸的 β-氧化作用减少人肠道上皮细胞中甘油三酯的积累。但 GLA 发挥作用的具体机制尚待进一步研究证实。

4.4.5 抗 HIV 病毒感染

GLA 既可以杀死易感染 HIV 的细胞,又可以预防由 HIV 病毒引起的遗传损伤。Kinehington^[28]等研究发现将 HIV 病毒感染的细胞用含有 GLA-Li 的培养基孵育 4 d 后发现 90% 的 HIV 感染细胞死亡,未被感染的对照组细胞仅有 20% 细胞死亡。随后有研究者进一步研究发现, GLA 在 HIV 病毒复制时期能够发挥最大杀伤作用。上述结果表明, GLA 可以选择性杀死被 HIV 病毒感染的细胞,而对正常细胞几乎没有毒性,所以 GLA 是一种很有潜力和前景的抗逆转录病毒的药物。

4.4.6 增强免疫

GLA 对人体免疫系统也有一定的生理功效,有实验证实富含 GLA 的鱼油在临床上能用来治疗免疫性疾病,如红斑狼疮、银屑病等。Newson^[29]等通过对婴幼儿和英国部分父母的纵向调查中发现,长期摄入 GLA 等不饱和脂肪酸的饮食对婴幼儿的湿疹、哮喘等特异性疾病有很强的抵抗性, GLA 可以明显降低此类疾病的发生率。但 GLA 发挥作用的具体机制尚待进一步研究证实。

4.4.7 影响神经系统 and 大脑发育

当前有不少研究者正关注 GLA 对神经系统的影响, Yadav^[30]等研究了 GLA 和 ALA 对自闭症的改善效果,得出二者对丙戊酸诱导的自闭症样特征都具有积极作用,其中 GLA 处理的动物小鼠明显对神经元退行性病变和神经元损失有更明显的保护作用。

5 结论

综上所述,琉璃苣、黑加仑和月见草油是常

见的 GLA 来源, 虽然微生物发酵也会形成 GLA, 但仍然需要进一步优化菌种以及发酵条件; 现有的富集技术已经可以显著提高 GLA 的含量, 未来可以这些研究为基础, 为高含 GLA 油脂的产业化提供理论依据; 现有研究表明, GLA 及其衍生物在心血管系统、免疫系统、生殖系统、内分泌系统中都具有重要的生理作用和显著的药理作用, 但其在体内具体作用的分子机制仍然不清晰, 仍需要进一步深入研究, 从而为 GLA 的开发应用提供科学支撑。

参考文献:

- [1] 刘胜男. γ -亚麻酸产生菌深黄被孢霉的诱变选育[D]. 河南科技大学, 2015.
LIU S N. Mutant breeding of gamma linolenic acid produced strains *Mortierella Isabella*[D]. Henan University Of Science And Technology, 2015.
- [2] 杨琦, 刘世栋. 尿素包合法分离分析月见草油的脂肪酸组成包合参数的优化[J]. 化学分析计量, 2015, 24(5): 31-34.
YANG Q, LIU S D. Inclusion parameters optimization in analysis of the composition of fatty acids separated from evening primrose oil with urea inclusion[J]. Chemical Analysis And Meterage, 2015, 24(5): 31-34.
- [3] VAZQUEZ L, SANCHEZ M M, IGLESIA L D L, et al. A new urea adducts method for PUFA concentration using green food grade solvents and avoiding ethyl carbamate formation[J]. Food Chemistry, 2022, 392(30): 133197.
- [4] YANG X H, LI Y, LI Y H, et al. Solid matrix-supported supercritical CO₂ enhances extraction of γ -Linolenic acid from the cyanobacterium *arthrospira (spirulina) platensis* and bioactivity evaluation of the molecule in zebrafish[J]. Marine Drugs, 2019, 17(4): 203.
- [5] NIDHI H, SHREYA G, FALGUNI P. et al. Valorization of *kappaphycus alvarezii* through extraction of high-value compounds employing green approaches and assessment of the therapeutic potential of κ -carrageenan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 250: 126230.
- [6] CHEN T C, JU Y H. An improved fractional crystallization method for the enrichment of γ -Linolenic acid in borage oil fatty acid[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001, 41(17): 3781-3784.
- [7] AHMED U S, REDDY K, SWATHY S L, et al. Enrichment of γ -linolenic acid in the lipid extracted from *Mucor zycae* MTCC 5420[J]. Food Research International, 2009, 42(4): 449-453.
- [8] SVETLANA L, MARIA J G F, FRANCISCO G M. et al. *Ribes taxa*: A promising source of γ -linolenic acid-rich functional oils[J]. Food Chemistry, 2019, 301(15): 125309.
- [9] SVETLANA L, MARIA J G F, SARGILANA B, et al. *Mertensia* (Boraginaceae) seeds are new sources of γ -linolenic acid and minor functional compounds[J]. Food Chemistry, 2021, 350(15): 128635.
- [10] LOPEZ-MARTIEZ J E, RUBI R, REYNA N, et al. Enzymatic preparation of structured triacyl glycerides containing γ -linolenic acid[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2020, 28: 101680.
- [11] 薛刚, 刘凤霞, 黄开勋, 等. γ -亚麻酸以柱色谱和甲酯化纯化的正交实验[J]. 中国医药工业杂志. 2005, 36(6): 340-341.
XUE G, LIU F X, HUANG K X, et al. Purification of γ -linolenic acid by column chromatography and methyl esterification[J]. Chinese Journal of Pharmaceuticals, 2005, 36(6): 340-341.
- [12] CARLA C C, RODRIGO V B, JOSE L G G, et al. Lipase-catalyzed synthesis of 1,3-diacylglycerols containing stearidonic, γ -linolenic and α -linolenic acids in a solvent-free system[J]. Food Science And Technology, 2022, 170: 114107.
- [13] YOON H S, LEE Y J, KIM B H, et al. Preparation of γ -linolenic acid rich triacylglycerol from borage oil via a two-step lipase-catalyzed reaction[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2023(100): 215-224.
- [14] YANG Y F, ROOBER S, CHAPKIN. Importance of dietary γ -Linolenic acid in human health and nutrition[J]. Journal of Nutrition, 1988, 128(9): 1411-1414.
- [15] 谢婉菲, 姜珊, 王成成, 等. γ -亚麻酸对 α -亚麻酸转化为 DHA 的影响研究[J]. 中国油脂, 2023.
XIE W F, JIANG S, WANG C C, et al. Study on the effect of γ -linolenic acid on the conversion of α -linolenic acid to DHA[J]. China oils and fats, 2023.
- [16] ALBERT C M, OH K, WHANG W, et al. Dietary gamma-linolenic acid intake and risk of sudden cardiac death and coronary heart disease[J]. Circulation, 2015, 112(21): 3232-3238.
- [17] YU Z G. Induction of renal cytochrome P450 arachidonic acid epoxygenase activity by dietary gamma-linolenic acid[J]. The Journal of Pharmacology And Experimental Therapeutics, 2006, 317: 732-738.
- [18] TAKAHASHI Y, IDE T, FUJITA H. Dietary gamma-linolenic acid in the form of borage oil causes less body fat accumulation accompanying an increase in uncoupling protein 1 mRNA level in brown adipose tissue[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 2000, 127(2): 0-222.
- [19] IDE T, ORIGUCHI I. Physiological effects of an oil rich in γ linolenic acid on hepatic fatty acid oxidation and serum lipid levels in genetically hyperlipidemic mice[J]. Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition, 2019.
- [20] YANG Y, DU L, HOSOKAWA M, et al. Effect of *Spirulina* lipids on high-fat and high-sucrose diet induced obesity and hepatic lipid accumulation in C57BL/6J mice[J]. Journal of

- Functional Foods, 2019(65): 103741.
- [21] SUMA S, NAZEER H, LUBNA S, et al. Novel gamma linolenic acid encased in situ lipogel for augmented anti-tumor efficacy against solid tumor: In vitro and in vivo evaluation[J]. Journal of Drug Delivery Science And Technology, 2023, 87: 104768.
- [22] MAYRA M A, BELEN T R, SARA H Y. The involvement of polyunsaturated fatty acids in apoptosis mechanisms and their implications in cancer[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24, 11691.
- [23] KAPOOR R, HUANG Y S. Gamma linolenic acid: an anti-inflammatory omega-6 fatty acid[J]. Current Pharmaceutical Biotechnology, 2006, 7(6):531-534.
- [24] ELLA J B, CARINA A V, WIES T M D, et al. Gamma-linolenic and pinolenic acids exert anti-inflammatory effects in cultured human endothelial cells through their elongation products[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2020, 64: 2000382.
- [25] OHTA S, CHANG T, AKIRA K, et al. Antibiotic activity of unsaturated fatty acids on methicillin-resistant Staphylococcus[J]. Bioscience Biotechnology And Biochemistry, 1993, 57(12): 2194-2195.
- [26] 魏琳琳, 孙建云, 胡萍, 等. γ -亚麻酸对四氧嘧啶糖尿病模型大鼠的降糖作用研究[J]. 毒理学杂志, 2019, 33(4): 298-301.
WEI L L, SUN J Y, HU P, et al. Study on hypoglycemic effect of γ -linolenic acid on alloxouracil diabetic model rats[J]. Journal of Toxicology, 2019, 33(4): 298-301.
- [27] MAKTO N, MAKTO S, PENG L. et al. Lactic acid bacteria-derived γ -linolenic acid metabolites are PPAR δ ligands that reduce lipid accumulation in human intestinal organoids[J]. Journal of Biological Chemistry, 2022, 298(11): 102534.
- [28] KINCHINGOND, RANDALL S, WINTER M, et al. Lithium gamma-linolenic-induced cytotoxicity against cells chronically infected with HIV-1[J]. Febs Letters, 1993, 330(2): 219-221.
- [29] NEWSON R B, SHAHEEN S O, HENDERDON A L, et al. Umbilical cord and maternal blood red cell fatty acids and early childhood wheezing and eczema[J]. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 2004, 114(3): 531-537.
- [30] YADAV A, TIWARIL V, SINGH M, et al. Comparative efficacy of alpha-linolenic acid and gamma-linolenic acid to attenuate valproic acid-induced autism-like features[J]. Journal of Physiology and Biochemistry, 2017(73): 187-198. 