

沙棘脂肪酸修复烧伤的机制及应用

王飞越¹, 赵丽虹¹, 邱佳¹, 李润佳¹, 李全², 曹晓东³, 张子英⁴, 韩帅^{5*}, 马月宏^{4*}

¹内蒙古医科大学第三临床医学院, 内蒙古 包头

²内蒙古包钢医院烧伤科, 内蒙古 包头

³内蒙古医科大学药学院, 内蒙古 呼和浩特

⁴内蒙古医科大学基础医学院, 内蒙古 呼和浩特

⁵内蒙古医科大学动物实验中心, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年9月29日; 录用日期: 2025年10月23日; 发布日期: 2025年11月3日

摘要

烧伤治疗面临着控制炎症反应、加速创面愈合和减少瘢痕形成等多重挑战。沙棘果实天然脂肪酸复合物通过多靶点作用机制, 有抗炎、减轻氧化损伤、抗感染、促进创面愈合与组织再生等作用, 对烧伤修复有显著优势, 在局部制剂开发及与光疗联合方面也取得较好的应用, 在动物试验和临床中得到有效验证。在烧伤治疗领域具有巨大的应用潜力和广阔前景。为创面管理提供了新的生物活性材料选择。

关键词

沙棘, 脂肪酸, 烧伤创面愈合, 联合疗法

The Mechanism and Application of Sea Buckthorn Fatty Acids in Burn Wound Repair

Feiyue Wang¹, Lihong Zhao¹, Jia Qiu¹, Runjia Li¹, Quan Li², Xiaodong Cao³, Ziyang Zhang⁴, Shuai Han^{5*}, Yuehong Ma^{4*}

¹Third Clinical Medical College of Inner Mongolia Medical University, Baotou Inner Mongolia

²Department of Burn Surgery, Baogang Hospital of Inner Mongolia, Baotou Inner Mongolia

³School of Pharmacy, Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia

⁴School of Basic Medicine, Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia

⁵Laboratory Animal Center, Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia

Received: September 29, 2025; accepted: October 23, 2025; published: November 3, 2025

*通讯作者。

文章引用: 王飞越, 赵丽虹, 邱佳, 李润佳, 李全, 曹晓东, 张子英, 韩帅, 马月宏. 沙棘脂肪酸修复烧伤的机制及应用[J]. 临床医学进展, 2025, 15(11): 41-49. DOI: 10.12677/acm.2025.15113063

Abstract

Burn treatment faces multiple challenges, such as the control of inflammatory responses, acceleration of wound healing, and reduction of scar formation. The natural fatty acid complex derived from sea buckthorn fruits exerts multiple effects, including anti-inflammation, reduction of oxidative damage, anti-infection, and promotion of wound healing and tissue regeneration via a multi-target mechanism. This multifaceted activity demonstrates significant advantages in burn repair. It has shown promising progress both in the development of topical preparations and in combination with Photo Biomodulation Therapy (PBMT). Its efficacy has been well-documented in both animal experiments and clinical studies. This complex provides a new bioactive material option for wound management and holds great application potential and broad prospects in the field of burn treatment.

Keywords

Sea Buckthorn, Fatty Acids, Burn Wound Healing, Combination Therapy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

皮肤烧伤愈合包含炎症期、增殖期和重塑期三个阶段。炎症期在损伤后 24 小时内开始,并持续数周至数月,具体取决于损伤的严重程度。增殖期结缔组织基质替换临时基质、肉芽形成(新的结缔组织和微观血管)、血管生成和上皮化。角质形成细胞有助于上皮化(伤口表面闭合)和血管生成(恢复血流)。重塑期肉芽组织成熟,细胞外基质(ECM)在生长因子、基质金属蛋白酶(MMP)和金属蛋白酶组织抑制剂(TIMP)的作用下重塑。烧伤愈合时间长短取决于多种因素,包括损伤严重程度、炎症级联激活和营养[1]。脂肪酸缺乏会导致伤口愈合不良[2],沙棘果油富含不饱和脂肪酸(UFA),其比例为 71.2%~76.0% [3],沙棘籽油中 UFA 比例为 88.11% [4]。其独特的 UFA 及其比例使沙棘油具有促进皮肤再生和修复的特性,且沙棘油可以防止感染、消除炎症和减少氧化应激[5]。沙棘油中含量高的 UFA 为 omega-7、omega-9、omega-3 和 omega-6, omega-9 中以油酸(OA)含量高, omega-6 中以亚油酸(LA), omega-3 中以 α -亚麻酸(ALA)含量高, omega-7 中以棕榈油酸(POA)含量高。沙棘油中饱和脂肪酸以硬脂酸(SA)和棕榈酸(PA)含量高[6]。沙棘霜在治疗 II 度烧伤方面比 1% 磺胺嘧啶银(SSD)更具有更高的临床疗效,说明沙棘敷料可以缩短 II 度烧伤的治疗进程,并减轻护理负担[7]。

2. 沙棘脂肪酸调控烧伤创面愈合的作用机制与阶段性特征

2.1. 沙棘脂肪酸对烧伤炎症期的调控机制

2.1.1. 多靶点抗炎效应及信号通路机制

沙棘脂肪酸中的 omega-7 具有抗炎效果, POA 可激活 PPAR α /AMPK 信号通路,减少促炎基因的表达和产生,最终减少炎症介质的释放[8][9],通过增加肝细胞核因子 4 α (HNF4 α)和肝细胞核因子 4 γ (HNF4 γ)的表达来降低炎症活性[10]。POA 还通过抑制 MAPK 信号激活和 NF- κ B 的核易位而产生光老化的保护作用

用[8]。 ω -9 具有抗炎效果[11]。在吞噬细胞中, OA 减轻了脂多糖(LPS)诱导的急性肾损伤, 通过 Ras/MAPKs/PPAR γ 信号通路改善了炎症和氧化应激, OA 降低了促炎因子即肿瘤坏死因子- α (TNF- α)、白细胞介素-6 (IL-6)和干扰素- γ (IFN- γ)的表达, 并提高了白介素-10 (IL-10)的含量[12]。Camell 和 Smith 指出, 膳食中添加 OA 会增加小鼠肠系膜脂肪组织中的 M2 表型巨噬细胞标志物 CD206 的表达, 即 OA 可诱导保护性抗炎反应[13]。 ω -3 治疗的烧伤患者的严重败血症和败血性休克发生率比对照组低两倍[14]。 ω -3 的肠外免疫营养与抗氧化剂和氨基酸等其他佐剂联合使用, 可减轻烧伤患者的严重炎症反应[15]。 ω -3 可抑制 LL37 诱导的小鼠皮肤中的血管生成, 通过 TLR2/MyD88/NF- κ B 通路可在小鼠和角质形成细胞中减轻 LL37 诱导的炎症[16]。Tingö 等人研究证明 ω -3 可能通过增加 IL-10 表达来减少炎症, 在肠道炎症小鼠模型中给予 ω -3, 可以减少炎症、改善修复反应和减少有害细菌的致病作用来改善上皮功能[17]。ALA 通过调节氧化应激、抑制 NF- κ B 信号通路、调控炎症相关细胞因子表达等多种途径发挥抗炎效应。ALA 能够抑制 I κ B 激酶(IKK)的活性, 减少 I κ B 的磷酸化和降解, 从而阻断 NF- κ B 的激活, 降低炎症细胞因子的表达, 发挥抗炎作用[18]。ALA 可以抑制巨噬细胞向促炎的 M1 型极化, 促进其向抗炎的 M2 型极化, 减少促炎介质的释放, 增强抗炎和组织修复能力, 并且 ALA 能够调节 T 淋巴细胞分化和功能, 抑制 Th1 细胞分泌促炎细胞因子, 促进 Th2 细胞和调节性 T 细胞(Treg)的功能, 维持免疫平衡, 减轻炎症反应[19]。

2.1.2. 沙棘脂肪酸氧化应激损伤的靶向抑制途径

烧伤损伤局部血管导致创面组织病理性缺血缺氧, 诱发氧化应激和炎症反应, 阻碍修复细胞的增殖、迁移, 进而影响创面愈合[20]。沙棘油通过 PPAR γ -LXR α -ABCA1/ABCG1 信号通路调节脂质代谢, 减少胆固醇积累、氧化应激和炎症[21]。沙棘油能降低脂质过氧化与活性氧(ROS)生成、抑制潜在炎症[22]。氧化应激与炎症反应密切相关, 过量的 ROS 会激活炎症信号通路。细胞内 ROS 增多诱导炎症相关因子的释放, 可加剧炎症级联反应。如过氧化氢(H₂O₂)激活 NF- κ B 通路并刺激炎症反应。ROS 增加和由此产生的脂质过氧化促进炎症反应[23]。沙棘油一方面可以调控抗氧化酶系统, 另一方面可以直接清除 ROS [24]。OA 可以直接调节抗氧化酶的合成和活性[11]。ALA 具有独特的双硫键结构, 能够直接清除超氧阴离子(OFR)、羟自由基($\cdot$ OH)等 ROS。ALA 降低 ROS 水平, 减少氧化应激诱导的炎症反应, 抑制炎症介质的产生。同时, ALA 可以再生其他抗氧化剂, 如维生素 C、维生素 E 和谷胱甘肽, 增强细胞的抗氧化防御能力。

2.2. 沙棘油对烧伤增殖期细胞增殖与组织再生的调控机制

沙棘油支持难以愈合的伤口肉芽形成过程, 可用于治疗烧伤, 如因暴露在阳光下或 X 射线而引起的皮肤损伤。角质形成细胞生长因子(KGF)为血管内皮细胞的有效有丝分裂原, 可刺激内皮细胞产生尿激酶型纤溶酶原激活剂的蛋白酶, 该激活剂作用于新生血管形成。KGF 通过刺激角质形成细胞的增殖和迁移, 加速再上皮化, 对于上皮的维护、修复和再生中起至关重要的作用, POA 可使人体皮下组织细胞分泌 KGF。POA 可增加端粒酶活性, 端粒和端粒酶在控制细胞增殖中起着重要作用, Dudau M 等人从沙棘籽油中纯化了几种富含脂肪酸的组分, 并通过研究发现富含的脂肪酸的组分支持角质形成细胞和真皮成纤维细胞的增殖, 而不会引发炎症或过度的血管内皮生长因子(VEGF)合成[25]。OA 脂质体凝胶可通过 AKT/mTORC1 信号通路促进成纤维细胞和角质形成细胞的增殖[26] [27]。ALA 可降低经皮水分流失并提高皮肤水合作用水平[28]。在烧伤患者中, ω -3 水平低下会增加感染和死亡的风险, 在烧伤患者治疗过程中通过补充 ω -3 UFA, 可减少炎症发生和感染、促进创面愈合[29]。Tihista 等试验发现, 接受含有 ω -3 治疗的烧伤患者重度脓毒症和脓毒性休克的发生率比未接受 ω -3 治疗患者低两倍, ω -3 可加速烧伤

创面愈合[30]。以不同剂量 ω -3 干预慢性难愈性创面模型大鼠,可促使大鼠创面细胞增生、胶原生成,炎症细胞浸润消退,进而促使皮肤组织形态结构恢复正常,还可降低大鼠血清 TNF- α 与 IL-6 水平、创面组织 TNF- α 与 IL-6 蛋白表达,且上述病理改变随 ω -3 剂量升高而增强。这表明 ω -3 可减弱促炎因子表达释放,抑制炎症,促使胶原纤维与血管生成,最终促进创面愈合,且 ω -3 剂量越高,其加快创面愈合的作用越强[31]。使用含有低 ω -6 与 ω -3 比值和高 ω -9 与 ω -6 比值的油混合物,可使大鼠烧伤模型再上皮化增加和 NF- κ B 染色标记降低[32]。

2.3. 沙棘油对烧伤重塑期胶原代谢与瘢痕形成的调控机制

胶原纤维在伤口愈合的过程中发挥巨大作用[33]。正常情况下机体胶原蛋白的合成与分解处于相对平衡状态,当烧伤创面愈合时,成纤维细胞病理性增生,生成大量胶原纤维,胶原纤维束杂乱、漩涡状排列并成为创面内主要结构,大量致密胶原纤维逐渐形成瘢痕[34]。创面修复分为生理性增生和病理性增生,后者包括增生性瘢痕和瘢痕疙瘩。一些学者对 FA 相关物质治疗病理性疤痕进行了多项研究,将富含不同脂肪酸(Ω -3、 Ω -6 及 Ω -9)的乳液局部涂抹于大鼠伤口,实验证实三者均能显著加速伤口愈合[35]。沙棘油可以改善血液循环,促进皮肤氧合作用,清除体内多余的毒素,并轻松渗透表皮。它是一种强抗氧化剂,可以对抗自由基,重建细胞并延缓细胞衰老。 ω -7 可以激活皮肤生理功能并减少疤痕,支持 KGF 持伤口愈合,减少疤痕和变色[36]。OA 能够通过抑制促炎细胞因子的产生,加速皮肤伤口的愈合[37]。 ω -7 可以激活皮肤生理功能并减少疤痕。Niimi Y 等人得出结论, ω -7 显著增加伤口床细胞端粒酶活性和 KGF,并加速移植烧伤伤口愈合[38]。有调查问卷研究发现,南非瘢痕疙瘩患者“高 Ω -6、低 Ω -3”的失衡饮食可能通过促进炎症和成纤维细胞过度活性,从而促进病理性瘢痕(如瘢痕疙瘩)的形成[39]。此外,一项体外研究发现 DHA 对瘢痕疙瘩成纤维细胞具有抗纤维化作用[30]。沙棘籽油对Ⅲ度火焰烧伤的成年绵羊全层烧伤及削痂创面表现出显著的促进愈合作用, ω -7 可作为一种经济高效且有效的烧伤伤口愈合补充疗法,急性口服药物中毒患者外涂及口服沙棘油治疗,均可使其疼痛程度及发生率均明显降低,可缓解胃部不适、胸骨后疼痛,提高口腔烧伤创面愈合率[40]。沙棘籽油还可通过增加 AQP3 和 HAS2 的表达来改善皮肤水合作用,防止皮肤干燥[41]。烧伤重塑期易发生感染,而沙棘油有抑制感染的作用。有研究表明,从不同部位提取的沙棘油对五种食源性细菌均表现出不同程度的抑制效果。增殖期易发生感染,各部位沙棘油对金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)的抑制效果基本相当。对于其余细菌(枯草芽孢杆菌、蜡样芽孢杆菌、凝结芽孢杆菌),沙棘果油的抑菌效果最佳,其次为沙棘籽油与沙棘叶片油;而对大肠杆菌(*E. coli*)的抑制效果则呈现沙棘籽油 > 沙棘叶片油 $\approx$ 沙棘果油(沙棘籽油抑菌效果为后两者的两倍)[42]。膳食 POA 可修复肠道粘膜屏障,减少炎性细胞浸润以及 TNF- α 和 IL-6 的表达,并提高急性和慢性炎症性肠病小鼠模型中抗 TNF- α 治疗的疗效。在克罗恩病(CD)患者培养的发炎结肠组织中用 POA 进行离体治疗减少了促炎信号和细胞因子,并赋予了明显的组织修复[43]。低浓度 OA 可通过干扰群体感应(QS)系统,抑制病原菌的毒力基因表达(如毒素、菌毛合成),并阻碍生物膜形成,从而达到抗菌效果[44]。

3. 沙棘油在烧伤治疗中的前沿应用与制剂开发

沙棘果油因其高药用价值而被用作油相。有学者使用了沙棘果油(SBO)、聚山梨脂(Tween 80)和山梨醇酐单油酸酯(span 80)优化人参(Panos)纳米乳剂(P-NE),增强治疗炎症的抗炎功效[45]。沙棘籽油局部 NE 乳膏(纳米乳膏)和凝胶制剂在雌性 SD 大鼠中显示出显著的伤口愈合活性,NE 乳膏和凝胶改善了 SD 大鼠皮肤的保油性,并增加了皮肤层的渗透性。这些制剂还显示出良好的急性皮肤毒性特征,未显著影响皮肤改变[46]。经 OA 脂质体凝胶治疗 32 天后,大鼠创面中炎症与氧化应激指标阳性蛋白的表达接近于

正常皮肤, TNF- α 、IL-6 及丙二醛蛋白恢复为较低表达, 而超氧化物歧化酶蛋白恢复为较高表达, 这表明 OA 脂质体凝胶能够通过减轻创面组织的炎症反应浸润及氧化应激损伤来发挥治疗作用[20]。以羧甲基壳聚糖(CMCS)和海藻酸盐作为凝胶基体材料联合 ω -3 组成负载脂肪酸的新型凝胶系统, 可以减少病原菌感染, 更好地促进局部微循环和肉芽组织生长, 加速创面愈合[47]。

超脉冲激光 PBMT 和沙棘提取物 SBTAL-ALE 的联合治疗, 通过加速细胞增殖、新生血管形成、胶原蛋白沉积、减弱炎症反应和减少氧化应激以及生物能量学激活, 协同增强烧伤修复的应用显著改善了 III 度烧伤修复[48]。利用沙棘油和对甲氧基肉桂酸(p-MCA)可调合成新型植物油 - 紫外线过滤生物偶联物, 以替代常见的紫外线过滤物 - 对甲氧基肉桂酸乙基己基(桂皮酸)。植物油 - 紫外线吸收生物偶联物的新概念在油凝胶配方中具有潜在的紫外线-b 光保护性能, 使它们的性能和稳定性值得进一步研究, 包括与紫外线-a 吸收剂的结合[49]。动物实验表明联合使用沙棘油和可溶性环氧化物水解酶抑制剂(TPPU)可显著降低烧伤小鼠血清 DiHOME 水平, 减少中性粒细胞浸润, 并增强巨噬细胞的修复功能。沙棘油中的 ω -3 通过竞争性抑制 LA 代谢, 与可溶性环氧化物水解酶(sEH)抑制剂联用可协同抑制病理性炎症, 改善免疫功能[50]。

4. 沙棘油应用于烧伤治疗的瓶颈及未来发展方向

4.1. 沙棘油应用于烧伤治疗的瓶颈

毒理学研究显示, 沙棘油无急性毒性、无遗传毒性、无亚慢性毒性, 按照推荐剂量和使用方法, 属于实际无毒物质[51]。但沙棘油在加工过程中可能受到塑化剂和苯并芘等有害物质的污染[52]。沙棘油的提取方法包括压榨、有机溶剂萃取、超临界 CO₂ 提取、水替代、水酶法以及超声波和微波辅助提取[53]。采用超临界 CO₂ 萃取技术生产的沙棘籽油不饱和脂肪酸和天然生物活性成分含量丰富, 有较强体外抗氧化活性, 且无溶剂残留的特性[54][55]。这种生产工艺避免了传统有机溶剂萃取可能带来的化学残留问题。沙棘油是复杂的混合物, 除脂肪酸外, 还含有维生素 E、类胡萝卜素、黄酮类等成分。现有研究难以区分脂肪酸单独作用与多成分协同效应。不同研究中沙棘油的提取工艺、浓度及使用方法差异较大。沙棘油是不饱和脂肪酸含量较高的植物油之一, 其中不饱和脂肪酸及生物活性成分易受光、热和氧气等外部因素的影响发生氧化分解[4]。缺乏标准化的制剂工艺导致生物活性成分稳定性存在差异。沙棘脂肪酸的生物利用度受到多种因素影响, 包括脂肪酸的化学形态、剂型工艺、个体代谢差异以及与其他食物的相互作用等。开发高效的沙棘油递送系统是提高其脂肪酸生物利用度的重要策略。基于现有的研究证据, 乳剂化技术、微胶囊化保护、纳米乳化与自微乳化系统剂型工艺显示出良好的应用前景[56]。对沙棘脂肪酸进行分子修饰和结构重构是提高其生物利用度的另一有效途径, 如将沙棘脂肪酸与磷脂结合形成磷脂复合物, 可以显著提高其亲脂性和生物膜透过性。研究发现, 磷脂酰胆碱(16:0/16:0)在沙棘果肉中与油脂高积累密切相关[57]。利用食物成分间的协同作用是提高沙棘脂肪酸生物利用度的实用策略。与一些常规烧伤药膏(如湿润烧伤膏)相比, 沙棘脂肪酸制剂在抗感染能力、促进深度烧伤愈合及减少疤痕方面显示出优势。虽然部分高端沙棘油制剂(如超临界萃取产品)的单价可能较高, 但其综合治疗效果和降低远期负担的潜力, 使其具有更优的长期成本效益。烧伤创面是开放性伤口, 目前临床治疗面临着感染和瘢痕形成等问题, 所用制剂必须无菌。沙棘油不耐高温, 传统的热压灭菌法不适用, 需要采用辐照灭菌或无菌生产工艺, 这增加了技术和成本门槛。现有临床试验设计多局限于小样本观察性研究。烧伤深度、患者代谢特征等个体化因素对疗效的影响制约着治疗方案的精准化实施。

4.2. 临床试验设计的优化策略与核心要点

优化沙棘油工艺, 在保证保油品质的前提下, 提高出油率、降低能耗和成本, 并确保安全与环保,

使沙棘油的获取更便捷,以便运用于临床。针对沙棘脂肪酸治疗烧伤的临床试验设计,应立足于其已知的药理活性(如抗炎、抗氧化及促进组织再生),并采用随机、双盲、三臂对照的严谨方案。研究对象需明确界定烧伤深度(如Ⅱ度)与面积,并排除严重合并症患者。客观疗效评价指标,除记录创面完全愈合时间和定期测量创面愈合率外,还应纳入组织病理学评估(胶原生成与上皮化程度)、实验室检测(创面或血清中的炎症因子 IL-1 β 、TNF- α 及氧化应激标志物 SOD、MDA 的变化)以及患者报告的疼痛评分和愈后疤痕质量。此外,试验应深入探索其分子机制,例如:利用同位素标记法,探究外用沙棘油在不同脂肪酸在烧伤创面皮肤各层中的渗透、分布与代谢动力学特征,验证其是否通过调控 PI3K/Akt 或 Wnt/ β -catenin 等关键信号通路来发挥作用,同时全程密切监测不良事件以完成安全性评价。还可运用单细胞测序技术解析不同烧伤阶段细胞对活性成分的响应特征。建立基于人工智能的剂型优化平台,实现活性成分的控释递送;结合组学技术来建立疗效预测模型。利用网络药理学、分子对接、组学技术等现代研究方法,阐明沙棘油中特定脂肪酸(如棕榈油酸)及其与其他活性成分(黄酮类、维生素)的协同作用通路,例如调控 Wnt/ β -catenin、VEGF 等信号通路,从系统层面解释其促进愈合的机理[58]。

基金项目

内蒙古自治区教育科学研究“十四五”规划项目(NGJGH2023028);内蒙古自治区卫生健康科技计划项目(202201180);内蒙古医科大学本科教育教学改革研究与实践项目(NYJXGGSJ2024044);内蒙古医科大学青年培育项目(YKD2021QN006);内蒙古医科大学实验室开放基金(2021KF11, 2022LX01, 2023GZ21, 2024GZ20);内蒙古医科大学思想政治工作精品培育项目(NYD2025SZJP014);内蒙古医科大学英才培育项目(YCPY2025060);内蒙古医科大学学风建设精品项目(YKD2025XFJS007, YKD2025XFJS011)。

参考文献

- [1] 曾凡正, 邓乾春, 禹晓. 加工部位及提取工艺对沙棘油品质特性及主要脂质伴随物油相迁移的影响[J]. 中国油脂, 2020, 45(5): 93-99.
- [2] Shields, B.A., VanFosson, C.A., Pruskowski, K.A., Gurney, J.M., Rizzo, J.A. and Cancio, L.C. (2019) High-Carbohydrate vs High-Fat Nutrition for Burn Patients. *Nutrition in Clinical Practice*, **34**, 688-694. <https://doi.org/10.1002/ncp.10396>
- [3] Zhang, H., Song, G., Ma, W., Guo, M., Ling, X., Yu, D., *et al.* (2023) Microencapsulation Protects the Biological Activity of Sea Buckthorn Seed Oil. *Frontiers in Nutrition*, **9**, Article 1043879. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1043879>
- [4] 黄俊恺. 沙棘籽油、果油品质特性及贮藏稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- [5] Zielińska, A. and Nowak, I. (2017) Abundance of Active Ingredients in Sea-Buckthorn Oil. *Lipids in Health and Disease*, **16**, Article No. 95. <https://doi.org/10.1186/s12944-017-0469-7>
- [6] Solà Marsiñach, M. and Cuenca, A.P. (2019) The Impact of Sea Buckthorn Oil Fatty Acids on Human Health. *Lipids in Health and Disease*, **18**, Article No. 145. <https://doi.org/10.1186/s12944-019-1065-9>
- [7] Abdollahzadeh, M. and Shafiee, S. (2021) To Compare the Effect of sea Buckthorn and Silver Sulfadiazine Dressing on Period of Wound Healing in Patients with Second-Degree Burns: A Randomized Triple-Blind Clinical Trial. *Wound Repair and Regeneration*, **29**, 732-740. <https://doi.org/10.1111/wrr.12916>
- [8] Okamoto, T., Nakashima, F., Shibata, T. and Mori, D. (2024) Seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides*, L.) Pulp Oil Prevents Ultraviolet-Induced Damage in Human Fibroblasts. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, **88**, 948-955. <https://doi.org/10.1093/bbb/zbae071>
- [9] Bermúdez, M.A., Pereira, L., Fraile, C., Valerio, L., Balboa, M.A. and Balsinde, J. (2022) Roles of Palmitoleic Acid and Its Positional Isomers, Hypogeic and Sapenic Acids, in Inflammation, Metabolic Diseases and Cancer. *Cells*, **11**, Article 2146. <https://doi.org/10.3390/cells11142146>
- [10] Bueno-Hernández, N., Sixtos-Alonso, M.S., Milke García, M.D.P. and Yamamoto-Furusho, J.K. (2017) Effect of Cis-Palmitoleic Acid Supplementation on Inflammation and Expression of HNF4 γ , HNF4 α and IL6 in Patients with Ulcerative Colitis. *Minerva Gastroenterology*, **63**, 257-263. <https://doi.org/10.23736/s1121-421x.17.02367-4>
- [11] Santa-María, C., López-Enríquez, S., Montserrat-de la Paz, S., Geniz, I., Reyes-Quiroz, M.E., Moreno, M., *et al.* (2023)

- Update on Anti-Inflammatory Molecular Mechanisms Induced by Oleic Acid. *Nutrients*, **15**, Article 224. <https://doi.org/10.3390/nu15010224>
- [12] Zhang, B., Zeng, M., Wang, Y., Li, M., Wu, Y., Xu, R., *et al.* (2022) Oleic Acid Alleviates LPS-Induced Acute Kidney Injury by Restraining Inflammation and Oxidative Stress via the Ras/MAPKs/PPAR- γ Signaling Pathway. *Phytomedicine*, **94**, Article 153818. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2021.153818>
 - [13] Camell, C. and Smith, C.W. (2013) Dietary Oleic Acid Increases M2 Macrophages in the Mesenteric Adipose Tissue. *PLOS ONE*, **8**, e75147. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075147>
 - [14] Zhou, Y., Wang, Y., Wang, L. and Jiang, H. (2024) The Efficacy of Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids for Severe Burn Patients: A Systematic Review and Trial Sequential Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Clinical Nutrition ESPEN*, **59**, 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2023.11.019>
 - [15] Singer, P. and Shapiro, H. (2009) Enteral Omega-3 in Acute Respiratory Distress Syndrome. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, **12**, 123-128. <https://doi.org/10.1097/mco.0b013e328322e70f>
 - [16] Hou, D.D., Di, Z.H., Qi, R.Q., Wang, H.X., Zheng, S., *et al.* (2017) Sea Buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) Oil Improves Atopic Dermatitis-Like Skin Lesions via Inhibition of NF- κ B and STAT1 Activation. *Skin Pharmacology and Physiology*, **30**, 268-276. <https://doi.org/10.1159/000479528>
 - [17] Tingö, L., Hutchinson, A.N., Bergh, C., Stiefvatter, L., Schweinlin, A., Jensen, M.G., *et al.* (2022) Potential Modulation of Inflammation by Probiotic and Omega-3 Supplementation in Elderly with Chronic Low-Grade Inflammation—A Randomized, Placebo-Controlled Trial. *Nutrients*, **14**, Article 3998. <https://doi.org/10.3390/nu14193998>
 - [18] Calder, P.C. (2017) Omega-3 Fatty Acids and Inflammatory Processes: From Molecules to Man. *Biochemical Society Transactions*, **45**, 1105-1115. <https://doi.org/10.1042/bst20160474>
 - [19] Gutiérrez, S., Svahn, S.L. and Johansson, M.E. (2019) Effects of Omega-3 Fatty Acids on Immune Cells. *International Journal of Molecular Sciences*, **20**, Article 5028. <https://doi.org/10.3390/ijms20205028>
 - [20] 王毛毛, 张庆, 吴博文, 等. 脂质体凝胶负载油酸促进慢性烧伤创面的修复[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(22): 3524-3531.
 - [21] Li, J., Guo, J., Yuen, M., Yuen, H. and Peng, Q. (2025) The Comparative Effects of ω -7 Fatty Acid-Rich Sea Buckthorn Oil and ω -3 Fatty Acid-Rich DHA Algal Oil on Improving High-Fat Diet-Induced Hyperlipidemia. *Food & Function*, **16**, 1241-1253. <https://doi.org/10.1039/d4fo04961f>
 - [22] Hussain, L., Rana, S., Abbas, G., Alshammari, A., Alasmari, A.F., Alharbi, M., *et al.* (2023) Pharmacological Potential of *Hippophae rhamnoides* L. Nano-Emulsion for Management of Polycystic Ovarian Syndrome in Animals' Model: *In Vitro* and *in Vivo* Studies. *ACS Omega*, **8**, 32977-32989. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04720>
 - [23] Situmorang, J.H., Chen, M., Kuo, W., Lin, S., Shih, C., Lin, P., *et al.* (2023) 9-Pohsa Prevents NF- κ B Activation and Ameliorates LPS-Induced Inflammation in Rat Hepatocytes. *Lipids*, **58**, 241-249. <https://doi.org/10.1002/lipd.12380>
 - [24] Gęgotek, A., Jastrząb, A., Jarocka-Karpowicz, I., Muszyńska, M. and Skrzydlewska, E. (2018) The Effect of Sea Buckthorn (*Hippophae Rhamnoides* L.) Seed Oil on UV-Induced Changes in Lipid Metabolism of Human Skin Cells. *Antioxidants*, **7**, Article 110. <https://doi.org/10.3390/antiox7090110>
 - [25] Dudau, M., Codrici, E., Tarcomnicu, I., Mihai, S., Popescu, I.D., Albulescu, L., *et al.* (2021) A Fatty Acid Fraction Purified from Sea Buckthorn Seed Oil Has Regenerative Properties on Normal Skin Cells. *Frontiers in Pharmacology*, **12**, Article 737571. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.737571>
 - [26] Guo, W., Qiu, W., Ao, X., Li, W., He, X., Ao, L., *et al.* (2020) Low-Concentration DMSO Accelerates Skin Wound Healing by Akt/mTOR-Mediated Cell Proliferation and Migration in Diabetic Mice. *British Journal of Pharmacology*, **177**, 3327-3341. <https://doi.org/10.1111/bph.15052>
 - [27] Mi, X.J., Le, H.M., Lee, S., Park, H.R. and Kim, Y.J. (2022) Silymarin-Functionalized Selenium Nanoparticles Prevent LPS-Induced Inflammatory Response in RAW264.7 Cells through Downregulation of the PI3K/Akt/NF- κ B Pathway. *ACS Omega*, **7**, 42723-42732. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04140>
 - [28] Proksch, E., Brandner, J.M. and Jensen, J. (2008) The Skin: An Indispensable Barrier. *Experimental Dermatology*, **17**, 1063-1072. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0625.2008.00786.x>
 - [29] Alipoor, E., Jazayeri, S., Dahmardehei, M., Salehi, S., Yaseri, M., Emami, M.R., *et al.* (2023) Effect of a Collagen-Enriched Beverage with or without Omega-3 Fatty Acids on Wound Healing, Metabolic Biomarkers, and Adipokines in Patients with Major Burns. *Clinical Nutrition*, **42**, 298-308. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2022.12.014>
 - [30] Tihista, S. and Echavarría, E. (2018) Effect of Omega 3 Polyunsaturated Fatty Acids Derived from Fish Oil in Major Burn Patients: A Prospective Randomized Controlled Pilot Trial. *Clinical Nutrition*, **37**, 107-112. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2017.01.002>
 - [31] 李勋, 李德胜, 陈杰. ω -3 多不饱和脂肪酸对慢性难愈性创面大鼠创面愈合的影响[J]. 医学分子生物学杂志, 2025, 22(3): 283-289.

- [32] Hokynková, A., Nováková, M., Babula, P., Sedláčková, M., Paulová, H., Hlaváčová, M., *et al.* (2022) Fatty Acid Supplementation Affects Skin Wound Healing in a Rat Model. *Nutrients*, **14**, Article 2245. <https://doi.org/10.3390/nu14112245>
- [33] 武胡雯, 邓晗彬, 周涵, 等. 水凝胶敷料减轻烧伤创面瘢痕的研究进展[J]. 海南医学院学报, 2024, 30(13): 1027-1034.
- [34] 狄海波, 侯世科. 烧伤后瘢痕的非手术治疗研究进展[J]. 实用皮肤病学杂志, 2021, 14(4): 229-233.
- [35] Ishak, W.M.W., Katas, H., Yuen, N.P., Abdullah, M.A. and Zulfakar, M.H. (2018) Topical Application of Omega-3-, Omega-6-, and Omega-9-Rich Oil Emulsions for Cutaneous Wound Healing in Rats. *Drug Delivery and Translational Research*, **9**, 418-433. <https://doi.org/10.1007/s13346-018-0522-8>
- [36] Yang, J.X., Li, S.Y., Chen, M.L. and He, L.R. (2022) The Role of Altered Fatty Acid in Pathological Scars and Their Dermal Fibroblasts. *Chinese Journal of Traumatology*, **25**, 218-223. <https://doi.org/10.1016/j.cjte.2022.03.006>
- [37] Pashkevich, N.I., Vilyanen, D.V., Marcinkevich, A.F., Borisova-Mubarakshina, M.M. and Osochuk, S.S. (2024) The Effect of Liposomes of Various Compositions on the Skin and Its Derivatives after II-III Degree Thermal Burns. *Acta Naturae*, **16**, 67-76. <https://doi.org/10.32607/actanaturae.27329>
- [38] Niimi, Y., Pérez-Bello, D., Ihara, K., Fukuda, S., Jacob, S., Andersen, C.R., *et al.* (2021) Omega-7 Oil Increases Telomerase Activity and Accelerates Healing of Grafted Burn and Donor Site Wounds. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 975. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79597-0>
- [39] Louw, L. and Dannhauser, A. (2000) Keloids in Rural Black South Africans Part 2: Dietary Fatty Acid Intake and Total Phospholipid Fatty Acid Profile in the Blood of Keloid Patients. *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, **63**, 247-253. <https://doi.org/10.1054/plef.2000.0208>
- [40] 吴小花, 张慧仙, 黄亚川, 等. 沙棘油治疗口服中毒致上消化道烧伤疗效观察[J]. 陕西医学杂志, 2017, 46(2): 257-258.
- [41] Yao, Q., Jia, T., Qiao, W., Gu, H. and Kaku, K. (2021) Unsaturated Fatty Acid-Enriched Extract from *Hippophae rhamnoides* Seed Reduces Skin Dryness through Up-Regulating Aquaporins 3 and Hyaluronan Synthetases 2 Expressions. *Journal of Cosmetic Dermatology*, **20**, 321-329. <https://doi.org/10.1111/jocd.13482>
- [42] Yue, X.F., Shang, X., Zhang, Z.J. and Zhang, Y.N. (2017) Phytochemical Composition and Antibacterial Activity of the Essential Oils from Different Parts of Sea Buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.). *Journal of Food and Drug Analysis*, **25**, 327-332. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.10.010>
- [43] Chen, Y., Mai, Q., Chen, Z., Lin, T., Cai, Y., Han, J., *et al.* (2023) Dietary Palmitoleic Acid Reprograms Gut Microbiota and Improves Biological Therapy against Colitis. *Gut Microbes*, **15**, Article 2211501. <https://doi.org/10.1080/19490976.2023.2211501>
- [44] Kumar, P., Lee, J., Beyenal, H. and Lee, J. (2020) Fatty Acids as Antibiofilm and Antivirulence Agents. *Trends in Microbiology*, **28**, 753-768. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2020.03.014>
- [45] Zhang, R., Rupa, E.J., Zheng, S., Nahar, J., Yang, D.C., Kang, S.C., *et al.* (2021) Panos-Fermented Extract-Mediated Nanoemulsion: Preparation, Characterization, and *in Vitro* Anti-Inflammatory Effects on RAW 264.7 Cells. *Molecules*, **27**, Article 218. <https://doi.org/10.3390/molecules27010218>
- [46] Gore, D.D., Sharma, N., Mishra, N., Parmar, P.K., Ranjana, S., Kumar, D., *et al.* (2024) Wound-Healing Effect of Topical Nanoemulsion-Loaded Cream and Gel Formulations of *Hippophae rhamnoides* L. (Sea Buckthorn) Fruit Oil and Their Acute Dermal Toxicity Study on Female SD Rats. *Indian Journal of Pharmacology*, **56**, 120-128. https://doi.org/10.4103/ijp.ijp_370_23
- [47] Kawahara, T., Takita, M., Masunaga, A., Morita, H., Tsukatani, T., Nakazawa, K., *et al.* (2019) Fatty Acid Potassium Had Beneficial Bactericidal Effects and Removed Staphylococcus Aureus Biofilms While Exhibiting Reduced Cytotoxicity towards Mouse Fibroblasts and Human Keratinocytes. *International Journal of Molecular Sciences*, **20**, Article 312. <https://doi.org/10.3390/ijms20020312>
- [48] Priyadarshi, A., Keshri, G.K. and Gupta, A. (2023) Dual-NIR Wavelength (Pulsed 810 nm and Superpulsed 904 nm Lasers) Photobiomodulation Therapy Synergistically Augments Full-Thickness Burn Wound Healing: A Non-Invasive Approach. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **246**, Article 112761. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2023.112761>
- [49] Slabu, A.I., Miu, L., Ghibu, E., Stavarache, C.E., Stan, R. and Teodorescu, F. (2023) Bioconjugation of Vegetable Oils with UV Absorbers: New Approach in Skin Photoprotection. *Molecules*, **28**, Article 7550. <https://doi.org/10.3390/molecules28227550>
- [50] Bergmann, C.B., McReynolds, C.B., Wan, D., Singh, N., Goetzman, H., Caldwell, C.C., *et al.* (2022) sEH-Derived Metabolites of Linoleic Acid Drive Pathologic Inflammation While Impairing Key Innate Immune Cell Function in Burn Injury. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **119**, e2120691119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2120691119>

-
- [51] 袁江玲, 徐晓辉, 杜勇, 等. 沙棘果油的遗传毒性及致畸作用动物实验研究[J]. 中国预防医学杂志, 2020, 21(5): 540-543.
- [52] 张志刚, 姚玉军, 顾翔宇, 等. 植物油中塑化剂、苯并芘来源及沙棘籽油风险减控方法[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 88-91+115.
- [53] Dong, K., Binosha Fernando, W.M.A.D., Durham, R., Stockmann, R. and Jayasena, V. (2021) Nutritional Value, Health-Promoting Benefits and Food Application of Sea Buckthorn. *Food Reviews International*, **39**, 2122-2137. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1943429>
- [54] 郑玉霞. 超临界 CO₂ 萃取沙棘籽油的成分及其用作化妆品原料的安全性分析[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2007
- [55] 刘美静, 魏晓博, 余君伟, 等. 沙棘籽油的超临界 CO₂ 提取及抗氧化活性研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(1): 156-161.
- [56] 孔令辉, 陈济民, 姚崇舜, 等. 沙棘油中 α -LNA 在大鼠体内的药动学[J]. 中国药理学杂志, 2001(9): 36-39.
- [57] 丁健, 阮成江, 杨红, 等. 基于 UPLC-MS 技术分析沙棘果肉成熟过程中生物活性成分差异[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 276-286.
- [58] Chen, A., Gong, M., Chi, J., Wang, Z. and Dai, L. (2024) Exploring the Potential Mechanisms of the Ethyl Acetate Fraction of *Hippophae rhamnoides* L. Seeds as a Natural Healing Agent for Wound Repair. *Journal of Ethnopharmacology*, **335**, Article 118688. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2024.118688>