

红松籽油的提取方法及生物活性研究进展

Research progress on extraction methods and biological activities of Korean pine seed oil

陈平^{1,2} 王劲^{3,4} 李华⁵

CHEN Ping^{1,2} WANG Jin^{3,4} LI Hua⁵

(1. 常州市高级职业技术学校, 江苏 常州 213161; 2. 江苏联合职业技术学院武进分院, 江苏 常州 213161; 3. 常州旅游商贸高等职业学校, 江苏 常州 213032; 4. 江苏联合职业技术学院常州旅游商贸分院, 江苏 常州 213032; 5. 扬州大学旅游烹饪学院, 江苏 扬州 225001)

(1. Changzhou Advanced Vocational and Technical School, Changzhou, Jiangsu 213161, China; 2. Wujin Branch, Jiangsu United Vocational and Technical College, Changzhou, Jiangsu 213161, China; 3. Changzhou Higher Vocational School of Tourism and Trade, Changzhou, Jiangsu 213032, China; 4. Changzhou Tourism Business Branch, Jiangsu United Vocational and Technical College, Changzhou, Jiangsu 213032, China; 5. College of Tourism and Cuisine, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225001, China)

摘要:红松籽油是一种天然植物油,因富含油酸、亚油酸和皮诺敛酸等多种不饱和脂肪酸而闻名。已证明红松籽油具有降血脂、增强免疫力、抗炎、抗氧化、增强胰岛素敏感性和抗肿瘤等多种生理作用。文章综述了近年来关于红松籽油的提取方法和药理作用,并就其在食用油、工业生产中的应用提出了建议。

关键词:红松籽油;生物活性;提取方法

Abstract: The natural vegetable oil known as Korean pine seed oil is well-known for its high content of being various unsaturated fatty acids, including oleic, linoleic and pinopuric acid. It has been proved that Korean pine seed oil has several physiological benefits such as lowering blood lipids, enhanceing immunity, anti-inflammation, anti-oxidation, enhancing insulin sensitivity, and anti-tumor. This review summarized the extraction methods and pharmacological effects of Korean pine seed oil in recent years, and put forward good suggestions for its application in edible oil and industrial production.

Keywords: Korean pine seed oil; biological activity; extraction method

基金项目:全国商科教育培训科研“十四五”规划立项课题(编号: SKKT-21032);全国人文社会科学立项课题(编号: 21BJR01020)

作者简介:陈平(1982—),男,常州市高级职业技术学校高级讲师,学士。E-mail: 553470527qq.com

收稿日期:2023-07-25 **改回日期:**2024-04-12

红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.),又名海松、赤松,为松科中的一种常绿针叶树,是中国长白山区、吉林山区和小兴安岭的重要经济林木^[1]。红松的种子称为红松籽,富含多种优质脂肪酸、氨基酸和维生素^[2]。红松籽的含油量高,提取出来的油称为红松籽油,具有独特风味和多种功效,如抗氧化、抗肿瘤、抗衰老、减肥降脂等^[3]。红松籽油主要由多不饱和脂肪酸(约 50%)、单不饱和脂肪酸(约 40%)和饱和脂肪酸(约 10%)组成,其中亚油酸是含量最多的不饱和脂肪酸,油酸是含量最多的单不饱和脂肪酸,而棕榈酸和硬脂酸则是最主要的饱和脂肪酸。此外,红松籽油中还含有独特的皮诺敛酸,具有较强的抗炎、降血脂和抗癌等功效。近年来,如何高效提取红松籽油和发现其更多的药理活性已成为当前红松的研究热点^[4],文章综述应用于红松籽油的提取方法和药理活性,以期红松籽油的开发与利用提供参考。

1 红松籽油的提取方法

红松籽油的提取方法主要包括压榨法、有机溶剂提取法、超临界萃取法、超声波辅助提取法和水酶法等。不同的提取方法会影响红松籽油的品质和产量。

1.1 压榨法

压榨法是通过机械力不断挤压油料来提取油脂的方法^[5]。压榨法分为冷压榨和热压榨两种方式。在热压榨过程中,由于内部温度较高,不饱和脂肪酸容易分解,从而影响油品的质量。因此,在传统的红松籽油提取过程

中,通常采用冷压榨法,它以最大限度地保留油的色泽和风味,并避免高温分解不饱和脂肪酸^[6]。然而,冷榨工艺的主要缺点是出油率低,且成本较高,这些问题仍有待进一步研究和解决。近年来,许多研究人员已经开始关注如何优化压榨工艺,以提高油料的产量。例如,李默馨等^[7]采用冷压榨法提取红松籽油,并优化了最佳提取工艺。在物料粒度 16 目、压榨压力 4 MPa 和水分含量 4% 的条件下,其出油率达到了 51.1%。刘静波等^[8]选取长白山红松籽为原料,运用机械液压冷榨法从中提取红松籽油,研究了压力、温度、循环周期、歇止周期对提取率的影响,最终确定了液压冷榨法萃取红松籽油的最佳提取工艺参数为:压力 15 MPa,温度 45 °C,循环周期 4 min,停歇周期 9 min,该条件下红松籽油提取率为 60.3%。

尽管冷榨工艺在油脂提取方面独具优势,但较低の出油率限制了其在工业领域的应用。因此,提升冷榨工艺の出油效率和降低生产成本成为了当前亟待解决的问题。在中国,冷榨制油技术已得到广泛应用,但在红松籽油的工业化生产方面,仍需深入研究。为了提升红松籽油的产量,需要加大冷榨设备的研发力度,并探索如何更有效地从饼粕中提取有效成分。此外,冷榨后的饼粕中含有一些生物活性物质和抗营养物质,目前关于如何去除这些抗营养物质的研究还不够充分,因此需要加强这方面的研究。同时,为了延长红松籽的加工产业链和促进产业的持续发展,需要进一步加快冷榨饼粕的综合利用研究,并开发出新型的红松籽油产品。此外,制定红松籽油及其蛋白质的国家或行业标准也是推动产业规范化发展的关键。综上所述,通过提升冷榨工艺の出油效率、加强饼粕的综合利用研究以及制定相关标准,可以推动红松籽产业的持续发展和规范化,为中国的油脂产业注入新的活力。

1.2 有机溶剂提取法

有机溶剂提取技术的原理是利用油脂与有机溶剂相互溶解的特性,将油脂提取出来^[9]。该方法操作简便,出油率高,且提取后的油渣可用于饲料生产^[10]。有机溶剂提取法的主要缺点是有些溶剂不能完全去除,可能会残留在油脂中,从而影响油脂的品质。此外,不当使用和排放一些有机溶剂可能会对环境造成污染并带来生产安全等问题,因此在实际应用中需要注意安全和环保方面的问题^[11]。对于红松籽油的提取,有机溶剂提取法也是常用的方法。潘晓丽等^[12]以正己烷为萃取溶剂,在提取温度 25 °C、液料比 18:1 (mL/g)、浸提时间 5 h 的条件下,得到的红松籽油提取率为 65.52%。此外,还可以通过优化萃取工艺,例如选择合适的溶剂、控制萃取温度和时间等,以提高红松籽油的提取率和品质^[13]。

目前,有机溶剂提取法大多还停留在实验室研究阶

段,在工业生产中,由于有机溶剂残留的问题,卫生和安全条例在处理使用有机溶剂造成的环境问题方面越来越严格,因此,不能被广泛推广应用。对人类健康和环境的潜在危害,限制了其在食品、化妆品和制药行业的应用。随着科学技术的发展,如进一步解决了溶剂残留问题,并解决了提取过程中溶剂大量损失及环境污染等问题,那么,有机溶剂提取技术有望和其他提取方法结合大大提高油脂提取率并推广于工业生产中。

1.3 超临界萃取法

超临界萃取法是一种利用超临界流体作为萃取剂高效提取油脂的方法。可通过调节压力和温度控制流体密度,从而改变超临界流体的溶解能力,实现对所需物质的选择性萃取。常用的超临界萃取剂包括超临界 CO₂ 和超临界乙醇等^[14]。

与有机溶剂提取法相比,超临界萃取法具有提取油脂成分的高选择性、提取物较为纯净、提取效率高、操作简便以及无毒副产物等优点^[15]。然而,由于超临界萃取的设备成本较高、对操作人员要求较高,并且受到工艺条件的限制,目前尚未完全应用于工业生产中。李清光^[16]的研究揭示,在特定的萃取条件下——压力设定为 35 MPa,温度控制在 45 °C,持续时间为 240 min,并加入 5% 的乙醇作为夹带剂,可以获取高达 55.61% 的出油率。胡小泓等^[17]详细探讨了时间、温度和压力对出油率的影响,并得出最佳工艺参数为:萃取时间 3 h,温度 35 °C,压力 30 MPa。

尽管超临界萃取法具有高效性,但它也面临一些挑战,如设备制造的复杂性、高操作压力以及难以实现大规模工业化生产等,这些问题仍有待进一步研究和改进。然而,尽管存在这些限制,超临界萃取法仍然被视为一种具有巨大潜力的油脂提取方法。随着技术的不断发展和优化,超临界萃取法将在未来得到更广泛的应用。

1.4 超声波辅助提取法

超声波辅助法是一种利用高频超声波波动和能量效应来促进油脂提取和分离的方法。在媒质中,超声波产生的压缩和稀疏效应形成了空穴和微小气泡的空化现象。这些微小气泡在崩解时会产生高温和高压,加速油脂中目标成分的扩散和运动,从而促进目标成分的释放和分离^[18]。与传统方法相比,超声波辅助法的能量消耗较高,需要更多的能源成本^[19]。因此,在实际应用中,需要综合考虑其经济性和实用性。超声波辅助法也已被应用于红松籽油的提取。例如,王凤娟等^[20]采用超声波辅助提取红松籽油,在超声波功率 210 W、料液比 1:7 (g/mL)、超声温度 45 °C,超声时间 25 min 的条件下,红松籽油得率达到 53.01%。Zhang 等^[21]利用超声波辅助提取技术从红松籽中提取红松籽油,结果表明,当超声频率为

32 kHz, 超声温度为 80 °C, 超声时间为 50 min, 料液比为 1:30 (g/mL) 时, 红松籽油的提取率为 70%。

超声波辅助提取法以其高效、精准、环保的特点, 在油脂提取领域取得了显著成果。然而, 尽管其优势明显, 但在实际应用中, 设备的自动化和智能化水平仍有待提高。设备的声学参数, 如超声频率、声强和空占比, 对提取效率有着直接影响, 但目前对这些参数的研究还不够深入。此外, 超声提取过程中关键工艺参数的控制也至关重要。虽然超声波辅助法在油脂提取中具有潜力, 但仍需要进一步研究和优化, 以改进其能源效率和经济性。未来, 可以进一步探索超声波辅助法与其他提取方法的联合应用, 以寻求更高效、节能和可持续的红松籽油提取方法。

1.5 水酶法

水酶法作为一种新兴的油脂提取技术, 其原理是利用水解酶对经过机械粉碎的油料进行酶解, 从而破坏细胞壁、脂蛋白和脂多糖等复合物, 使油脂得以从油料中释放出来。通过油水亲合力和密度差异, 油脂可以被有效地分离和提取。与传统的化学溶剂提取方法相比, 水酶法不仅具有更高的提取率, 而且减少了有害化学物质的排放, 因此被视为一种更清洁和可持续的提取方式^[22-23]。周琪等^[24]采用双酶法提取红松籽油, 在碱性蛋白酶加酶量 2 364 U/g、温度 51 °C、时间 3 h、pH 8.40; 蜗牛酶加酶量 3.9 mg/g 松子乳、温度 44 °C、时间 1 h、pH 7.00、料水比 1:5 (g/mL) 的条件下, 红松籽油的得率为 93.87%。程倩等^[25]以水酶法提取葵花籽仁油, 当最优预处理条件为 95 °C、pH 4.8、60 min, 最佳酶反应条件为 55 °C、pH 4.8、采用复合纤维素酶和蛋白酶(各 1 mL)、反应 3 h 时, 提取率可达 90.17%。

目前, 水酶法技术在红松油提取方面主要聚焦于酶解工艺的研究, 而其他重要环节, 如原料预处理、乳状液破乳、副产物利用以及产品的理化性质和加工特性等, 都缺乏深入的研究。因此, 为了推动红松籽油提取技术的发展, 需要对这些领域进行更全面、更深入的研究。同时, 水酶法技术在实际应用中仍面临一些挑战, 如水资源消耗大、酶成本高、产品标准制定、设备改造和创新以及多种产品的高效、高质量、低成本同步生产等问题。解决这些问题将是未来努力的方向。

1.6 提取方法对红松籽油品质的影响

红松籽油是一种营养价值丰富的植物油, 其质量、出油率、脂肪酸组成和抗氧化活性等特性受到不同提取方法的影响。目前已经有多种提取方法在实践中应用, 包括冷压(CP)、热压(HP)、有机溶剂提取(HE)、超临界萃取法(SPE)和水酶提取(AEE)等^[26-28]。酸值和过氧化值是评价红松籽油品质的重要指标。不同的提取方法得到

的红松籽油具有不同的酸值和过氧化值, 其中提取方法的酸值递减顺序为热压>水酶法提取>有机溶剂提取>超临界提取>冷压^[29], 过氧化值的递减顺序为冷压>热压>水酶提取>有机溶剂提取>超临界提取。水酶提取法得到的红松籽油具有较低的酸值和过氧化值, 表明其能够提取出高品质的红松籽油(见表 1)。

表 1 各种提取方法品质特征比较

Table 1 Comparison of quality features of various extraction methods

提取方法	提取率/ %	酸值/ (mg KOH · g ⁻¹)	过氧化值/ (meq · kg ⁻¹)
冷压	45.91	0.36	4.34
热压	46.09	0.83	2.72
有机溶剂提取	55.38	0.51	2.47
超声提取	49.71	0.64	2.92
超临界提取	45.85	0.43	2.30
水酶法提取	73.01	0.74	2.62

2 红松籽油的药理活性

2.1 降血脂活性

保持血脂的正常水平对于人体健康至关重要, 高血脂会增加心脑血管疾病的风险, 而降低血脂有助于减少心脑血管疾病和其他相关疾病的风险^[30-31]。红松籽油富含不饱和脂肪酸和抗氧化物质, 这些成分可以降低血液中的甘油三酯和胆固醇水平, 从而降低患心脑血管疾病的风险。刘静波等^[32]研究表明, 在给高脂饲料诱导的高血脂小鼠饲料中添加红松籽油后, 小鼠的总胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白胆固醇和葡萄糖含量均显著降低。红松籽油的降血脂功效可能与调节基因的表达有关。Shuang 等^[33]研究表明, 红松籽油能够降低 Cd36 mRNA 的表达、导致 ApoA4 mRNA、Atgl mRNA、Cpt1a mRNA、Acadl mRNA 和 ApoB100 mRNA 的水平降低, 进而增加肝脏甘油三酯的代谢以及线粒体脂肪酸氧化和低密度脂蛋白组装。Asset 等^[34]研究表明, 与其他植物油喂养的大鼠相比, 喂食红松籽油的大鼠血清 TAG 和极低密度脂蛋白浓度较低。Chen 等^[35]报道了类似的发现, 与喂食猪油的大鼠相比, 喂食红松籽油的大鼠血清总 TAG 水平较低。血清 TAG 降低可能是由于脂肪酸氧化增强或胰岛素敏感性增加。因此, 红松籽油可能成为降低血脂的一种潜在天然药物。然而, 需要进一步的研究来探讨红松籽油对血脂代谢的具体机制以及其在预防心血管疾病方面的应用。此外, 需要注意红松籽油的适宜用量, 以避免潜在的副作用。另外, 由于红松籽油的降血脂功效可将其应用于医药、保健品等领域进行开发。通过对红松籽油进行精炼, 可以保留其中的功能性成分, 将

其发展成为一种具有功能性的食用油资源。红松籽油降血脂的机制如图 1 所示。

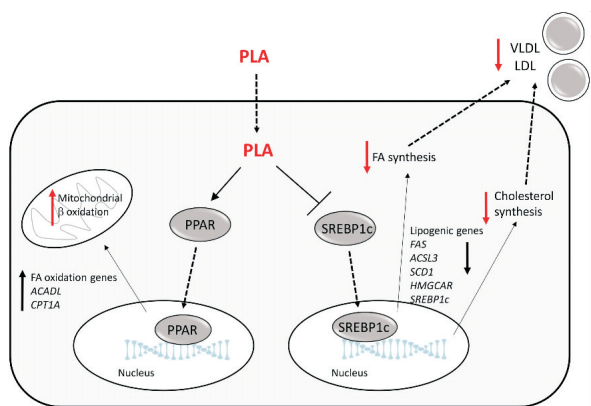


图 1 红松籽油降血脂的机制示意图 [36]

Figure 1 Schematic diagram of the mechanism of lowering blood lipids by Korean pine nuts oil

2.2 控制肥胖作用

红松籽油具有控制体重增加和降低食欲的显著功效。研究 [37-38] 表明,红松籽油可以增加胆囊收缩素 (CCK-8) 和类胰高血糖素-1 (GLP-1) 的分泌,这两种肠道激素能够增加饱腹感并抑制食欲。红松籽油控制体重的机制可能与调节代谢相关的基因表达有关 [39-41],这一发现为进一步了解红松籽油在健康领域的应用提供了重要的线索。Le 等 [42] 研究发现,摄取红松籽油能够提升与脂肪氧化、线粒体氧化和骨骼肌氧化代谢紧密相关的基因表达水平。红松籽油中含有的皮诺敛酸,作为一种关键的配体,能够与 PPAR α 和 PPAR δ 两种与氧化脂质代谢息息相关的核受体相结合。皮诺敛酸通过调节这些核受体的活性,进一步影响脂质代谢和能量平衡 [43],这在控制体重和预防肥胖、维护健康代谢状态中发挥着至关重要的作用。综上所述,红松籽油通过抑制食欲、减少食物摄入量以及调整代谢相关基因的表达,有效减少脂肪组织和异位脂肪的沉积,从而控制体重增长,促进机体达到更为健康的代谢状态。红松籽油控制肥胖的机制示意图如图 2 所示。

2.3 抗炎活性

炎症反应是机体对外部感染、刺激或组织损伤等因素的复杂生理防御反应 [44]。

红松籽油中的脂肪酸可以通过多种机制调节炎症反应。在细胞膜上,脂肪酸的含量和种类可以影响膜的物理性质和信号转导的灵敏度,进而影响细胞的活性和代谢;在细胞核内,脂肪酸可以与核受体结合,调节炎症相关基因的表达,例如转录因子 NF- κ B 和 STATs 等 [45]。红松籽油中的皮诺敛酸是一种具有抗氧化和抗炎作用的多酚类物质,已有研究表明它能够抑制炎症介质的产生,

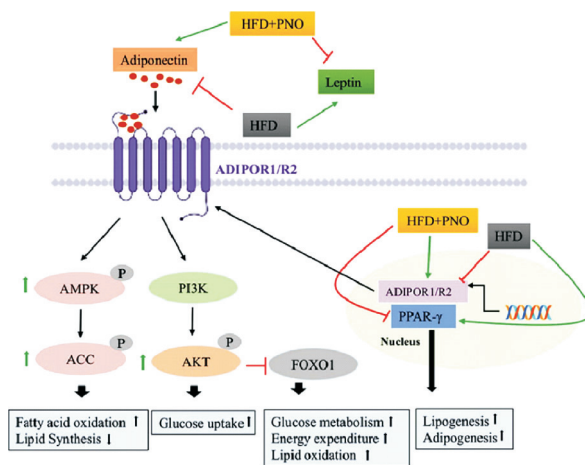


图 2 红松籽油控制肥胖的机制示意图 [38]

Figure 2 Schematic diagram of the mechanism of controlling obesity with Korean pine nuts oil

从而减轻炎症反应和组织损伤。在用脂多糖刺激的小鼠胶质细胞中,皮诺敛酸降低了一系列促炎介质的产生。浓度为 50 μ mol/L 的皮诺敛酸,可使 NO、白细胞介素 (IL)-6 和肿瘤坏死因子 α (TNF- α) 的产生分别减少 41%,74%,27% [46]。由此可见,红松籽油具有一定的抗炎作用,可以通过调节炎症信号转导、基因表达和相应蛋白质的分泌来抑制炎症。红松籽油抗炎的机制示意图如图 3 所示。

2.4 抗氧化活性

新陈代谢是生物体生命活动的一个过程,会产生多种自由基,如过氧化氢、有机过氧化物和超氧阴离子等,这些自由基会在环境等外界因素的变化下不断积累 [47]。过量的自由基进入人体后,会攻击细胞并对脂质、蛋白质、核酸等物质进行氧化反应,从而对人体健康造成严重伤害,且过量的自由基与慢性病如心血管疾病、癌症和老年痴呆等有关 [48]。适当补充抗氧化剂可以有效清除自由基,保护细胞免受自由基的损伤。Chen 等 [35] 研究表明,

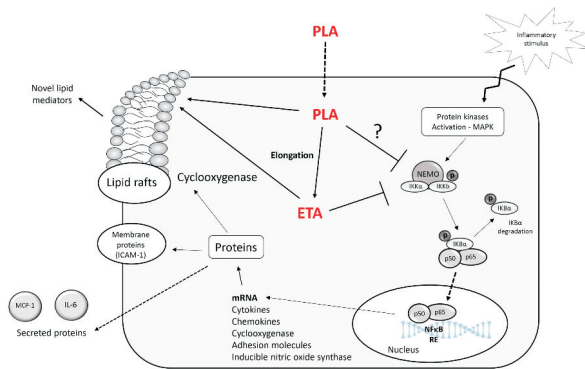


图 3 红松籽油抗炎的机制示意图 [36]

Figure 3 Schematic diagram of the anti-inflammatory mechanism of Korean pine nuts oil

摄取红松籽油的大鼠,其血清中的SOD和GSH-Px活性显著增强,总抗氧化能力(TAOC)也明显高于对照组,而血清中的MDA水平则低于对照组。综上所述,红松籽油具有抗氧化作用,能够清除DPPH自由基和ABTS自由基,降低血清脂质过氧化物MDA含量,并提高SOD、GSH-Px和TAOC的活性^[49],这对于保护人体免受自由基伤害具有重要意义。

2.5 降血糖活性

2型糖尿病是一种代谢紊乱性疾病。尽管糖尿病的病因尚不完全清楚,但已经有研究表明,游离脂肪酸可能作为信号分子的前体或直接作用于受体,发挥着调节胰腺保护、降低食欲和调节葡萄糖激素分泌的作用。红松籽油富含游离脂肪酸,这使得它能够显著提高糖耐受性,发挥抗糖尿病的作用^[50]。其原理为红松籽油中的皮诺敛酸可作为自由脂肪酸受体1(FFA1)和自由脂肪酸受体4(FFA4)的有效配体,能够增强胰岛素的葡萄糖依赖性分泌,并促进葡萄糖的高效代谢^[51]。FFA1和FFA4在许多组织中起作用,包括与胰岛素响应相关的组织。激活FFA1受体和FFA4受体在调节胰岛素分泌和敏感性方面发挥着重要作用。通过激活这些受体,可以更有效地调节胰岛β细胞对葡萄糖的响应,从而提高胰岛素的分泌和敏感性^[52]。这为人们提供了新的视角和研究途径,以进一步理解和改善胰岛素的分泌和调节机制。喂食了皮诺敛酸或红松籽油的小鼠暴露在葡萄糖中仅30 min后,其血糖水平显著下降^[52]。这一发现揭示了皮诺敛酸对FFA1和FFA4受体的共激活作用,这种激活能够增强葡萄糖依赖性胰岛素的分泌,进而促进葡萄糖的有效利用。因此,红松籽油的摄入可能有助于改善胰岛素抵抗和血糖控制。红松籽油降血糖的机制示意图如图4所示。

2.6 抗癌活性

癌症的发生机制与细胞的异常增殖和分裂密切相关

关。癌症通常起源于人体的特定部位,并可能通过转移扩散到其他部位,造成不可逆的病变。近年来的研究^[54]表明,多不饱和脂肪酸对癌症的发展具有不同的影响。其中,二十碳五烯酸(EPA)显示出抑制癌症发展的效果。而花生四烯酸(AA)似乎促进肿瘤的发展。与此同时,红松籽油中的皮诺敛酸也具有一定的抑制癌症作用。此外,研究^[55]还发现,在人类乳腺癌细胞中,皮诺敛酸的应用能够降低细胞的运动能力和侵袭性,降幅高达25%。然而,这种处理对细胞的增殖和基质黏附能力并无显著影响。值得注意的是,皮诺敛酸处理后的细胞中,多不饱和脂肪酸的组成发生了显著变化,其中AA的含量从12.6%下降到4.9%。由于花生四烯酸是合成前列腺素PGE2的前体,因此皮诺敛酸处理导致了PGE2合成的剂量依赖性减少。试验^[55]还观察到,皮诺敛酸处理后细胞中的环氧化酶表达减少。综上所述,皮诺敛酸可能通过减少AA水平和调节前列腺素合成来影响乳腺癌细胞的运动能力和侵袭性,从而对癌症发展产生影响。红松籽油抗癌的机制示意图如图5所示。

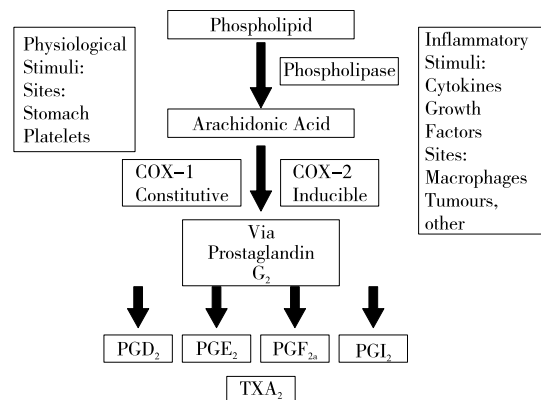


图5 红松籽油抗癌的机制示意图^[55]

Figure 5 Schematic diagram of the anticancer mechanism of Korean pine nuts oil

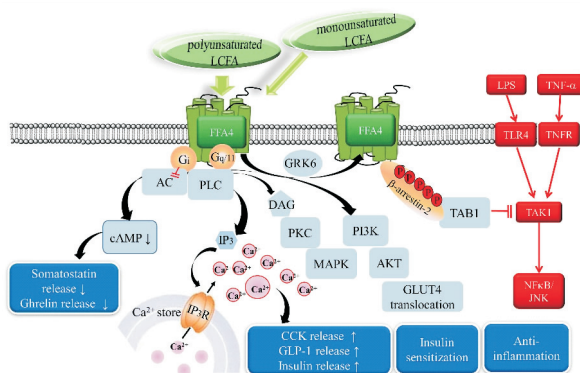


图4 红松籽油降血糖的机制示意图^[53]

Figure 4 Schematic diagram of the hypoglycemic mechanism of Korean pine nuts oil

综上所述,红松籽油,这种富含不饱和脂肪酸的天然宝藏,已经引起了人们的广泛关注。随着对其成分的深入研究,已经开发出多种以红松籽油不饱和脂肪酸为主要成分的功能食品,这些产品不仅赢得了市场的青睐,还为社会带来了显著的经济效益。更重要的是,不饱和脂肪酸作为疾病的调节因子,其潜力在医药领域备受期待。

3 结论

近年来,各种提取技术在红松油脂提取领域具有广阔的应用前景和巨大的发展潜力。然而,要实现这些技术的广泛应用和产业化发展,还需要解决许多技术和实践上的挑战,尤其是红松籽油不饱和脂肪酸的提取纯化及生理功效研究,通过调控相关酶活性和基因表达,红松籽油有望在未来医药研究领域发挥重要作用。

参考文献

- [1] 包三三. 红松籽油中皮诺敛酸高效分离及降脂活性评估[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021: 1-3.
BAO S S. Efficient separation and liquid-lowering activity evaluation of pinolenic acid from *Pinus koraiensis* seed oil[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021: 1-3.
- [2] ZADERNOWSKI R, MARIAN N, SYLWESTER C. Chemical composition of *Pinus sibirica* nut oils[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2009, 111(7): 698-704.
- [3] ZHANG Y, WANG Z J, ZHANG X J, et al. Formulation, characterization, pharmacokinetics and antioxidant activity evaluation of *Pinus koraiensis* nuts oil based coenzyme Q (10) loaded nanoemulsion [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 187: 115444.
- [4] 王莉莉, 赵庆佳, 张娜, 等. 不同提取方法对红松籽油甾醇浸提及功能性影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(6): 125-134.
WANG L L, ZHAO Q J, ZHANG N, et al. Effects of different extraction methods on extraction effect and functions of Korean pine oil sterol[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils*, 2022, 37(6): 125-134.
- [5] 宋明发, 杨芸, 白冉冉, 等. 不同方法提取山桐子油的品质及体外抗氧化活性研究[J]. *中国调味品*, 2022, 47(3): 28-32, 38.
SONG M F, YANG Y, BAI R R, et al. Quality and antioxidant activity in vitro of *Idesia polycarpa* maxim oils extracted by different methods[J]. *China Condiment*, 2022, 47(3): 28-32, 38.
- [6] 张志强, 张海满, 李晓红, 等. 胡麻籽油提取工艺的研究[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2009, 27(6): 7-9.
ZHANG Z Q, ZHANG H M, LI X H, et al. Extraction technique of linseed oil[J]. *Journal of Qinghai University*, 2009, 27(6): 7-9.
- [7] 李默馨, 王妍, 周晓丹, 等. 冷榨红松籽油的工艺研究[J]. *食品工业*, 2010, 31(5): 79-81.
LI M X, WANG Y, ZHOU X D, et al. Study on cold-pressed of Korean pine seed oil[J]. *The Food Industry*, 2010, 31(5): 79-81.
- [8] 刘静波, 程婉露, 姚志新, 等. 长白山红松籽油的提取及脂肪酸成分分析[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(6): 239-244.
LIU J B, CHEN W L, YAO Z X, et al. GC-MS analysis of aliphatic acid extracted from red pine seeds using cold pressing technology [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(6): 239-244.
- [9] 张忠, 王呈馨, 范柳萍, 等. 不同提取工艺翅果油抗氧化能力与活性成分的分析[J]. *中国油脂*, 2020, 45(9): 23-29.
ZHANG Z, WANG C X, FAN L P, et al. Antioxidant ability and active components of *Elaeagnus mollis* Diels seed oil extracted by different processes[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(9): 23-29.
- [10] 刘瑞利, 张传许, 占剑峰. 有机溶剂法提取米糠油工艺的研究[J]. *中国酿造*, 2015, 34(10): 121-124.
LI R L, ZHANG C X, ZHAN J F, et al. Study on cold-pressed of Korean pine seed oil[J]. *China Brewing*, 2015, 34(10): 121-124.
- [11] 姚雪峰, 洪海龙, 石俊庭, 等. 有机溶剂法和超临界 CO₂ 萃取法提取蒙艾挥发油的对比研究[J]. *广州化工*, 2020, 48(23): 55-57.
YAO X F, HONG H L, SHI J T, et al. Comparative study on extraction of Volatile oil from Meng Ai with organic solvent and supercritical CO₂ extraction [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2020, 48(23): 55-57.
- [12] 潘晓丽, 王凤娟, 张娜, 等. 不同提取方法对红松籽油提取效果及功能性质的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(1): 127-135.
PAN X L, WANG F J, ZHANG N, et al. Effects of different extraction methods on extraction effect and functional properties of Korean pine seed oil[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(1): 127-135.
- [13] 王振宇, 李宏菊, 郭庆启, 等. 响应面法对红松油提取工艺参数的优化[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(4): 78-81.
WANG Z Y, LI H J, GUO Q Q, et al. Optimization of process parameters of Korean pine oil extraction by response surface method[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2009, 24(4): 78-81.
- [14] 宋美玲. 超临界二氧化碳萃取沙棘籽油的工艺研究[J]. *食品工程*, 2023(1): 22-24.
SONG M L. Study on extraction technology of seabuckthorn seed oil by supercritical carbon dioxide[J]. *Food Engineering*, 2023(1): 22-24.
- [15] 黄沅玮. 超临界流体萃取技术及其在植物油脂提取中的应用[J]. *食品工程*, 2020(3): 12-15, 61.
HUANG R W. Supercritical fluid extraction technology and its application in the extraction of vegetable oil[J]. *Food Engineering*, 2020(3): 12-15, 61.
- [16] 李清光. 超临界 CO₂ 萃取红松籽油的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2008: 17-23.
LI Q G. Study on supercritical CO₂ extraction of Korean pine seed oil[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2008: 17-23.
- [17] 胡小泓, 贺祥柯, 郭小燕, 等. 超临界 CO₂ 对整粒松仁萃取的研究[J]. *中国油脂*, 2004, 29(3): 62-64.
HU X H, HE X K, GUO X Y, et al. Study on the extraction of whole pine kernels by supercritical CO₂ [J]. *China Oils and Fats*, 2004, 29(3): 62-64.
- [18] 范宇航, 张潮, 李敏, 等. 基于超声辅助技术提取食品原料中脂质的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(7): 185-192.
FAN Y H, ZHANG C, LI M, et al. Lipid extraction from food based on ultrasound-assisted technology: a review [J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(7): 185-192.
- [19] 徐开伟, 邹小彤, 刘意, 等. 耦合浮珠—超声辅助溶剂萃取法用于微藻采收及油脂提取[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(15): 267-274.
XU K W, ZHOU X T, LIU Y, et al. Coupled floating bead-ultrasonic-assisted solvent extraction was used for microalgae harvesting and oil extraction [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(15): 267-274.

- [20] 王凤娟, 夏晓雨, 张娜, 等. 减压—超声波联用提取红松籽油动力学模型及油脂组成、抗氧化活性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(11): 110-117.
- WANG F J, XIA X Y, ZHANG N, et al. Kinetic model, fatty acid composition and antioxidant activity of Korean pine seed oil extracted by decompression assisted ultrasonic [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(11): 110-117.
- [21] ZHANG Y, WANG Z Y, CHEN X Q. Ultrasound-associated extraction of seed oil of Korean pine [J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16(2): 140-142.
- [22] TEIXEIRA C B, MACEDO G A, MACEDO J A, et al. Simultaneous extraction of oil and antioxidant compounds from oil palm fruit (*Elaeis guineensis*) by an aqueous enzymatic process[J]. Bioresource Technology, 2013, 129: 575-581.
- [23] 何林枫, 王静, 李利钦, 等. 水酶法提取樱桃籽油的工艺及理化性质[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 188-193, 216.
- HE L X F, WANG J, LI L Q, et al. Optimization on extraction of cherry seed oil by aqueous enzymatic method and analysis of its physical-chemical properties[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 188-193, 216.
- [24] 周琪, 韦家辉, 盛智丽, 等. 双酶法提取红松籽油及其抗氧化分析[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(1): 57-63.
- ZHOU Q, WEI J H, SHENG Z L, et al. Double enzymatic extraction of Korean pine seed oil and analysis of antioxidation[J]. Food Research and Development, 2019, 40(1): 57-63.
- [25] 程倩, 初柏君, 杨满, 等. 水酶法提取葵花籽仁油工艺的优化及对油脂品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(17): 6 969-6 974.
- CHEN Q, CHU B J, CHEN X, et al. Optimization of aqueous enzymatic extraction process of sunflower seeds oil and the effect on its quality[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(17): 6 969-6 974.
- [26] CHEN X Q, ZHANG Y, WANG Z Y, et al. In vivo antioxidant activity of *Pinus Koraiensis* nut oil obtained by optimised supercritical carbon dioxide extraction [J]. Natural Product Research, 2011, 25(19): 1 807-1 816.
- [27] 李杨, 江连洲, 王胜男, 等. 响应面法优化水酶法提取松子油的研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(3): 60-65.
- LI Y, JIANG L Z, WANG S N, et al. Optimization on aqueous enzymatic extraction conditions of pine seed oil by response surface method[J]. Soybean Science & Technology, 2012, 27(3): 60-65.
- [28] HOU L X, LI C C, QIU J H. Comparison of the physicochemical characteristics of *Pinus Koraiensis* L. nut oils from different extraction technologies[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2018, 1(3): 113-118.
- [29] 王忠娟. 红松籽油辅酶 Q₁₀ 纳米乳的制备、表征及活性评价 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023: 4-5.
- WANG Z J. Preparation, characterization and activity evaluation of coenzyme Q₁₀ nanoemulsion from Korean pine seed oil [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023: 4-5.
- [30] PAN L R, SEGREST J P. Computational studies of plasma lipoprotein lipids [J]. Biochimica et Biophysica Acta-Biomembranes, 2016, 1 858(10): 2 401-2 420.
- [31] NGUYEN P, LERAY V, DIEZ M, et al. Liver lipid metabolism[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2008, 92(3): 272-283.
- [32] 刘静波, 吴丽英, 董红竹, 等. 长白山红松籽油对小鼠血清及肝脏、肾脏脂质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(23): 257-261.
- LIU J B, WU L Y, DONG H Z, et al. Effect of nut oil of Korean pine from the Changbai mountain on serum and visceral lipids in mice[J]. Food Science, 2014, 35(23): 257-261.
- [33] SHUANG Z, PARK S, LIM Y, et al. Korean pine nut oil replacement decreases intestinal lipid uptake while improves hepatic lipid metabolism in mice [J]. Nutrition Research and Practice, 2016 10(5): 477-486.
- [34] ASSET G, STAELS B, WOLFF R L, et al. Effects of *Pinus pinaster* and *Pinus koraiensis* seed oil supplementation on lipoprotein metabolism in the rat[J]. Lipids, 1999, 34(1): 39-44.
- [35] CHEN X Q, ZHANG Y, WANG Z Y, et al. In vivo anti-oxidant activity of *Pinus koraiensis* nut oil obtained by optimised supercritical carbon dioxide extraction [J]. Natural Product Research, 2011, 25(19): 1 807-1 816.
- [36] BAKER E, MILES E, CALDER P. A review of the functional effects of pine nut oil, pinolenic acid and its derivative eicosatrienoic acid and their potential health benefits[J]. Progress in Lipid Research, 2021, 82: 101097.
- [37] BURTON-FREEMAN B, DAVIS P A, SCHNEEMAN B O. Interaction of fat availability and sex on postprandial satiety and cholecystokinin after mixed-food meals[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2004, 80(5): 1 207-1 214.
- [38] GUTZWILLER J P, DEGEN L, MATZINGER D, et al. Interaction between GLP-1 and CCK-33 in inhibiting food intake and appetite in men [J]. American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology, 2004, 287 (3): R562-R567.
- [39] PASMANN W J, HEIMERIKX J, RUBINGH C M, et al. The effect of Korean pine nut oil on in vitro CCK release, on appetite sensations and on gut hormones in post-menopausal overweight women[J]. Lipids in Health and Disease, 2008, 7(1): 10.
- [40] HUGHES G M, BOYLAND E J, WILLIAMS N J, et al. The effect of Korean pine nut oil (*PinnoThin*) on food intake, feeding behaviour and appetite: a double-blind placebo controlled trial[J]. Lipids in Health and Disease, 2008, 7(1): 1-10.
- [41] PARK S, LIM Y, SHIN S, et al. Impact of Korean pine nut oil on weight gain and immune responses in high fat diet-induced obese mice[J]. Nutrition Research and Practice, 2013, 7(5): 352-358.

- [42] LE N H, SHIN S, TU T H, et al. Diet enriched with Korean pine nut oil improves mitochondrial oxidative metabolism in skeletal muscle and brown adipose tissue in diet-induced obesity [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(48): 11 935-11 941.
- [43] GEORGIADI A, LICHTENSTEIN L, DEGENHARDT T, et al. Induction of cardiac Angptl4 by dietary fatty acids is mediated by peroxisome proliferator-activated receptor β/δ and protects against fatty acid-induced oxidative stress[J]. *Circulation Research*, 2010, 106(11): 1 712-1 721.
- [44] BHANDAR I C, AGNIHOTR N. Pine nut oil supplementation alleviates the obesogenic effects in high-fat diet induced obese rats: a comparative study between epididymal and retroperitoneal adipose tissue[J]. *Nutrition Research*, 2022, 106(11): 85-100.
- [45] 刘治廷, 王忠娟, 张秀娟, 等. 马齿苋抑菌活性成分研究进展 [J]. *食品科学*, 2023, 44(19): 359-371.
- LIU Z T, WANG Z J, ZHANG X J, et al. Recent advances in research on chemical components and antibacterial activities of *Portulaca oleracea* L.[J]. *Food Science*, 2023, 44(19): 359-371.
- [46] WEREMFO A, ADULLEY F, DABIE K, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic antioxidants from turkey berry (*Solanum torvum* Sw) fruits using response surface methodology[J]. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2022, 30: 100387.
- [47] WANG Z Y, CHEN X Q. Functional evaluation for effective compositions in seed oil of Korean pine[J]. *Journal of Forestry Research*, 2004, 15(3): 215-217.
- [48] WEIR G C. Islet inflammation can be linked to the disruption of proinsulin processing in type 1 diabetes but not in type 2 diabetes [J]. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 2022, 108(2): E21-E22.
- [49] CHRISTIANSEN E, WATTERSON K R, STOCKER C J, et al. Activity of dietary fatty acids on FFA1 and FFA4 and characterisation of pinolenic acid as a dual FFA1/FFA4 agonist with potential effect against metabolic diseases[J]. *British Journal of Nutrition*, 2015, 113(11): 1 677-1 688.
- [50] ITOH Y, KAWAMATA Y, HARADA M, et al. Free fatty acids regulate insulin secretion from pancreatic beta cells through GPR40[J]. *Nature*, 2003, 1 600(2 000): 2 001-2 004.
- [51] IM D S. FFA4 (GPR120) as a fatty acid sensor involved in appetite control, insulin sensitivity and inflammation regulation[J]. *Molecular Aspects of Medicine*, 2017, 64: 92-108.
- [52] CHEN S J, HSU C P, LI C W, et al. Pinolenic acid inhibits human breast cancer MDA-MB-231 cell metastasis in vitro [J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(4): 1 708-1 715.
- [53] 孔维深, 芦鑫荣, 侯琳琳, 等. 维生素与免疫系统健康[J]. *四川大学学报(医学版)*, 2023, 54(1): 7-13.
- KONG W L, LU X R, HOU L L, et al. Vitamins and immune system health [J]. *Journal of Sichuan University (Medical Sciences)*, 2011, 126(4): 1 708-1 715.
- [54] BENQUET C, KRZYSTYNIAK K, SAVARD R, et al. Modulation of exercise-induced immunosuppression by dietary polyunsaturated fatty acids in mice[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 1994, 43(2): 225-237.
- [55] MATSUO N, OSADA K, KODAMA T, et al. Effects of γ -linolenic acid and its positional isomer pinolenic acid on immune parameters of brown-norway rats[J]. *Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 1996, 55(4): 223-229.
-
- (上接第 226 页)
- [38] 李春兰, 邹玉峰, 张玉洁, 等. 食用菌在肉制品中的应用研究进展[J]. *肉类研究*, 2022, 36(8): 49-56.
- LI C L, ZHOU Y F, ZHANG Y J, et al. Research progress of edible fungi in meat products[J]. *Meat Research*, 2022, 36(8): 49-56.
- [39] WANG W, ZHANG K, LI C, et al. A novel biodegradable film from edible mushroom (*F. velutipes*) by product: microstructure, mechanical and barrier properties associated with the fiber morphology [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, 47: 153-160.
- [40] KYOUNGJU K, BYUNGSUN C, INHEE L, et al. Bioproduction of mushroom mycelium of *Agaricus bisporus* by commercial submerged fermentation for the production of meat analogue[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(9): 61-68.
- [41] ZHANG Z Y, ZHANG L J, SUN H J, et al. High-moisture extrusion technology application in the processing of textured plant protein meat analogues: a review [J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(8): 4 873-4 908.
- [42] GRACE N A, SYLVIE R, NARITSADA T, et al. Macrofungi as a nutraceutical source: promising bioactive compounds and market value[J]. *Journal of Fungi*, 2021, 7(5): 397.
- [43] 赵鑫锐, 张国强, 李雪良, 等. 人造肉大规模生产的商品化技术[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(11): 248-253.
- ZHAO X R, ZHANG G Q, LI X L, et al. Commercialization technology of artificial meat mass production [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2019, 45(11): 248-253.
- [44] ZHAO X R, ZHOU J W, DU G C, et al. Recent advances in the microbial synthesis of hemoglobin[J]. *Trends in Biotechnology*, 2020, 39(3): 286-297.
- [45] 张博, 王莹, 牛坤, 等. 代谢工程改造大肠杆菌一碳模块高效合成 L-甲硫氨酸[J]. *生物工程学报*, 2023, 39(8): 3 302-3 317.
- ZHANG B, WANG Y, NIU K, et al. Efficient synthesis of L-methionine by metabolic engineering of *E. coli* one-carbon module[J]. *Journal of Bioengineering*, 2023, 39(8): 3 302-3 317.