

## 橄榄木酚素及其生物活性研究进展

禹 晓<sup>1</sup>, 聂成镇<sup>1</sup>, 刘亚豪<sup>1</sup>, 黄沙沙<sup>1</sup>, 邓乾春<sup>2</sup>, 朱莹莹<sup>1</sup>,  
相启森<sup>1</sup>, 申瑞玲<sup>1</sup>

(1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院, 食品生产与安全河南省协同创新中心, 郑州 450001;  
2. 中国农业科学院 油料作物研究所, 油料脂质化学与营养湖北省重点实验室, 武汉 430062)

**摘要:** 橄榄木酚素包括松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇, 是存在于橄榄油中的主要酚类化合物。橄榄木酚素是构成特级初榨橄榄油内源性抗氧化体系的重要脂质伴随物之一。对橄榄木酚素的生物合成与代谢途径, 含量、分布及稳定性, 吸收代谢, 体外抗氧化活性, 生物活性进行了综述, 提出橄榄木酚素研究存在的问题, 并对今后的研究方向进行了展望, 以期对橄榄油提质制取和木酚素相关健康产品研发提供理论指导。

**关键词:** 橄榄木酚素; 松脂醇; 1-乙酰氧基松脂醇; 抗氧化; 生物活性

中图分类号: S565.7; Q946 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2021)02-0124-07

### Progress on olive lignans and its bioactivities

YU Xiao<sup>1</sup>, NIE Chengzhen<sup>1</sup>, LIU Yahao<sup>1</sup>, HUANG Shasha<sup>1</sup>, DENG Qianchun<sup>2</sup>,  
ZHU Yingying<sup>1</sup>, XIANG Qisen<sup>1</sup>, SHEN Ruiling<sup>1</sup>

(1. Henan Collaborative Innovation Center for Food Production and Safety, College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 2. Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** Olive lignans, including pinosresinol and 1-acetoxypinosresinol, are the main phenolic compounds in olive oil. Olive lignans are important lipid concomitants composed of the endogenous antioxidant system of extra virgin olive oil. The biosynthesis and metabolism pathway, content, distribution and stability, absorption and metabolism, antioxidant activity in vitro and bioactivities of olive lignans were reviewed. The problems in the study of olive lignans were put forward, and the future research direction was prospected to provide theoretical guidance for high quality olive oil extraction and research and development of health products related to lignans.

**Key words:** olive lignans; pinosresinol; 1-acetoxypinosresinol; antioxidation; bioactivity

橄榄油作为地中海饮食的膳食脂肪主要组成部分, 具有改善心脑血管疾病、糖尿病, 抗癌和抗氧化等生理功能<sup>[1]</sup>。橄榄油的生物活性主要依赖于其高含量的不饱和脂肪酸和酚类化合物, 包括简单酚

(羟基酪醇, 酪醇, 3,4-二羟基苯乙醇, 对羟基苯乙醇)、酚酸(香草酸, 对苯二甲酸和肉桂酸)、黄酮(木犀草素和芹菜素)、木酚素等<sup>[2]</sup>。其中, 橄榄木酚素作为橄榄油中典型酚类化合物, 构成了橄榄油内源性抗氧化体系的关键物质基础<sup>[3]</sup>。橄榄木酚素包括松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇, 相对分子质量分别为 358.38 和 416.42, 在橄榄油制取过程中迁移至其中。此外, 松脂醇在其他植物油中也被检出, 但 1-乙酰氧基松脂醇则仅存在于橄榄油中<sup>[4]</sup>。橄榄木酚素作为一种植物雌激素物质, 具有抑制乳腺癌、

收稿日期: 2020-05-09; 修回日期: 2020-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801502, 31771938)

作者简介: 禹 晓(1986), 女, 讲师, 博士, 主要从事功能性脂质分子营养研究(E-mail) yuxiao@zzuli.edu.cn。

通信作者: 邓乾春, 研究员, 博士(E-mail) dengqianchun@caas.cn。

结肠癌、皮肤癌、肺癌细胞增殖的活性,同时也具有良好的体外和体内抗脂质氧化的潜力。Cecchi等<sup>[5]</sup>采用 HPLC-DAD-TOF/MS 从产自意大利、突尼斯和西班牙的部分或全精炼橄榄油中检测出松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇异构体,这些异构体化合物主要是在橄榄油精炼过程的脱色步骤产生,因此

可用于初榨橄榄油的掺伪检测。橄榄木酚素及其异构体的化学结构如图 1 所示。本文综述了橄榄木酚素的生物合成与代谢途径,含量、分布及稳定性,吸收代谢,体外抗氧化活性及生物活性,以期为橄榄油提质制取和木酚素相关健康产品研发提供理论指导。

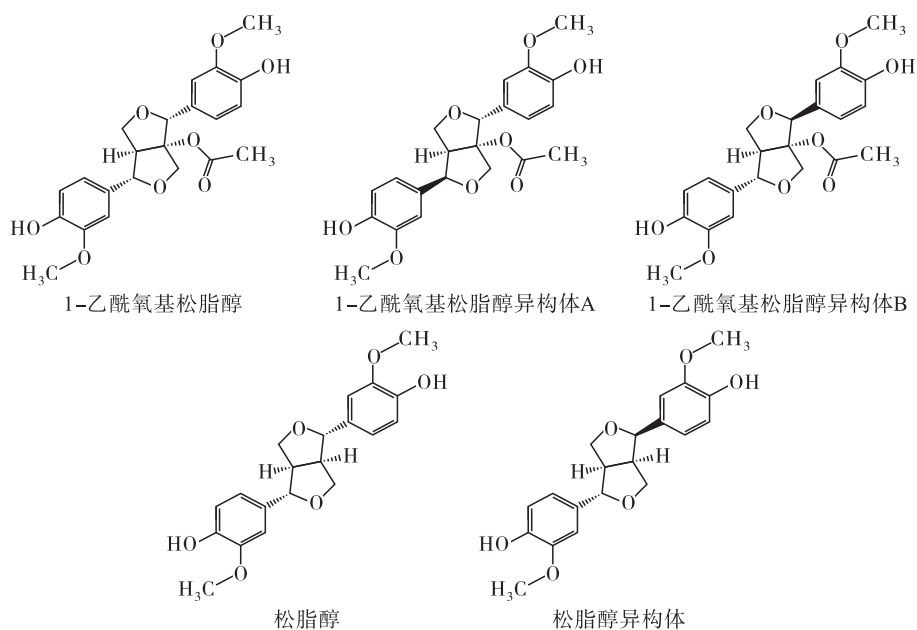


图 1 橄榄木酚素及其异构体的化学结构<sup>[6]</sup>

## 1 橄榄木酚素生物合成与代谢途径

研究表明,橄榄木酚素松脂醇的合成途径与亚麻木酚素开环异落叶松树脂酚二葡萄糖苷 (secoisolariciresinol diglycoside, SDG) 合成过程类似,是由两分子松柏醇在 Dirigent 蛋白作用下通过立体定向耦联合成。此外,松脂醇能够在松脂醇/落

叶松醇还原酶 (Pinoresinol/lariciresinol reductase, PLR) 作用下依次代谢生成落叶松树脂醇和开环异落叶松脂素。松脂醇生物合成与代谢途径如图 2 所示。然而,目前关于 1-乙酰氧基松脂醇的生物合成与代谢途径仍没有相关文献报道。

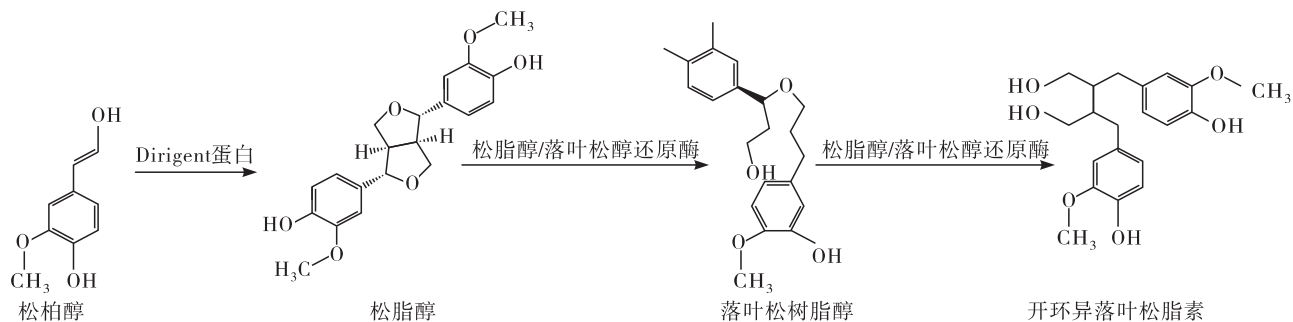


图 2 橄榄木酚素生物合成及代谢途径<sup>[6]</sup>

## 2 橄榄木酚素含量、分布及稳定性

### 2.1 橄榄木酚素含量

松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇,于 2000 年首次被 Owen<sup>[3]</sup>、Brenes<sup>[7]</sup>等在橄榄油中检出。Brenes等<sup>[8]</sup>采用高效液相色谱-荧光检测器法 (HPLC-FLD) 检测出 46 个西班牙品种初榨橄榄油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量范围分别为 21.4~43.0

mg/kg 和 1.9~94.2 mg/kg,表现出了不依赖于种植区域的品种间差异性。其中,38 个 Picual 品种橄榄油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇平均含量分别为 43.0 mg/kg 和 1.9 mg/kg,而 8 个 Arbequina、Empeltre、Hojiblanca 和 Cornicabra 品种橄榄油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量范围分别为 21.4~41.0 mg/kg 和 10.2~94.2 mg/kg。Torre-Robles

等<sup>[9]</sup>采用高效液相色谱-紫外检测器法(HPLC-UV)测定出西班牙 Picual、Arbequina 和 Picudo 品种橄榄油中松脂醇含量分别为 7.6、37.3 mg/100 g 和 9.8 mg/100 g, 同样表现出品种特异性。Oliveras-López 等<sup>[10]</sup>采用高效液相色谱-二极管阵列检测器-质谱法(HPLC-DAD-MS)检测出西班牙 Picual 品种橄榄油中松脂醇含量范围为 nd~23.2 mg/L, 而 1-乙酰氧基松脂醇则在 5 个待测油样中均未检出; 检测出西班牙 Picuda、Hojiblanca 和 Arbequina 品种橄榄油中松脂醇含量范围为 7.5~12 mg/L, 1-乙酰氧基松脂醇含量范围为 26~77 mg/L; 检测出意大利 Taggiasca 品种橄榄油中松脂醇含量范围为 8.2~14 mg/L, 1-乙酰氧基松脂醇含量范围为 8.4~160 mg/L, Seggianese 品种橄榄油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量分别为 30 mg/L 和 40 mg/L。Christophoridou 等<sup>[11]</sup>应用 <sup>1</sup>H NMR 检测出 2 个希腊 Koroneiki 品种橄榄油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量范围分别为 1.25~1.61 μmol/100 g 和 2.01~2.63 μmol/100 g, 2 个 Tsunati 品种橄榄油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量范围分别为 1.30~1.44 μmol/100 g 和 2.13~2.87 μmol/100 g。Chtourou 等<sup>[12]</sup>采用液相色谱-质谱法(LC-MS)检测出突尼斯 Arbequina 和 Chemlali Sfax 品种橄榄油中松脂醇含量分别为 2.83、1.70 mg/kg, 1-乙酰氧基松脂醇含量分别为 5.12、6.23 mg/kg。上述研究表明, 橄榄品种和种植区域特异性, 以及分析检测方法的差异不仅影响橄榄油中木酚素含量, 更能够直接影响橄榄木酚素中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇构成比例。

此外, 果实收获成熟度和制取工艺可能对橄榄油中木酚素含量和组成产生重要影响。Torres 等<sup>[13]</sup>分别采摘两种生长条件(雨林和灌溉地)的同一品种油橄榄果, 探讨了成熟度和橄榄果浆融合参数对橄榄油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量的影响。结果发现, 与生长在灌溉地的油橄榄果相比, 生长在雨林地区的油橄榄果制取的橄榄油中松脂醇含量无明显增加, 且 1-乙酰氧基松脂醇含量也无明显差异性。随着果实成熟度增加, 橄榄油中松脂醇含量稍有降低, 1-乙酰氧基松脂醇含量则表现出先逐步增加后降低的趋势, 在油橄榄果皮为黑色而果肉为白色时, 橄榄油中木酚素含量达到最大值。此外, 橄榄油制取过程中果浆融合参数也能够影响橄榄油中木酚素含量。其中, 果浆融合温度升高有利于橄榄油中松脂醇的富集, 融合时间的影响则存在不确定性, 而果浆融合温度升高和时间延长则会

降低橄榄油中 1-乙酰氧基松脂醇含量。

## 2.2 橄榄木酚素油相迁移和贮藏稳定性

目前, 橄榄木酚素仍未在油橄榄果中被检出, 因此对其生物合成和油相迁移规律仍存在疑问。现有研究表明: 若橄榄果浆未被进行水分调质预处理, 所制取的橄榄油中并无橄榄木酚素被检出; 随着橄榄果浆中水分含量增加至 30%~40% 时, 所制取的橄榄油中橄榄木酚素含量显著增加<sup>[14]</sup>。因此, 橄榄油制取过程中采用三相离心倾析法更有利于橄榄木酚素的生成、溶出和油相迁移。基于此, 有研究学者推测, 橄榄木酚素本身并不存在, 可能是与其他物质交联存在于油橄榄果中。当橄榄果浆制取过程中特定酶溶出, 且与水分共存时, 橄榄木酚素被合成或释放。但也有学者以印度 Raggiola 和 Leccino 2 个品种油橄榄为对象, 比较不同制取工艺对橄榄油中橄榄木酚素含量的影响。研究发现, 与三相分离工艺相比, 两相分离工艺更有利于初榨橄榄油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇的富集, 分别增加 30.4%~101.5% 和 28.5%~29.8%<sup>[15]</sup>。还有研究表明, 若在橄榄果浆融合过程中加入能够降解纤维素、半纤维素的糖苷酶复合物则能够显著提高橄榄油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量, 但这种酶诱导的橄榄木酚素油相迁移程度却表现出橄榄品种和收获时间特异性<sup>[16]</sup>。

橄榄木酚素主要存在于初榨橄榄油中, 平均含量为 41.53 mg/kg, 而精炼橄榄油中橄榄木酚素含量则明显降低, 仅为 7.29 mg/kg<sup>[3]</sup>。以初榨橄榄油为对象的研究表明, 初始原油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量分别为 13.7 mg/kg 和 8.5 mg/kg, 水洗步骤导致原油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量分别降低 12.4% 和 36.5%, 后续脱色和脱臭步骤使油相中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量进一步降低 68.6% 和 45.9%, 仅有极少量橄榄木酚素残留在精炼橄榄油中。以橄榄果渣油为对象的研究发现, 初始原油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量分别为 88.6 mg/kg 和 80.8 mg/kg, 水洗步骤使油相中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量分别降低 73.9% 和 90.5%, 经后续的精炼步骤后橄榄油中几乎无橄榄木酚素被检出<sup>[17]</sup>。因此, 精炼过程对橄榄油中木酚素的消减具有重要影响。

以橄榄油为载体的松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇表现出差异化的贮藏环境胁迫稳定性。Brenes 等<sup>[18]</sup>研究表明, 初榨橄榄油经避光无氧条件贮藏 1 年后, 其松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量无明显

变化。Torre - Robles 等<sup>[9]</sup>分析了西班牙 Picual、Arbequina 和 Picudo 品种商业初榨橄榄油贮藏过程中酚类化合物变化规律。结果表明,因光照和贮存容器的差异,贮藏1年后橄榄油中松脂醇含量降低10.95%~77.31%。我们推测,橄榄油木酚素这种差异化的贮藏稳定性可能与橄榄油中共存的其他酚类抗氧化物质组成和含量有关。此外,热处理对初榨橄榄油中松脂醇和1-乙酰氧基松脂醇含量也无明显影响。Brenes 等<sup>[8]</sup>研究发现,180℃加热25 h仍有接近50%的橄榄木酚素残留在油相中,微波加热15 min对油相中橄榄木酚素含量也无明显影响。橄榄木酚素表现出的这种热稳定性,是否依赖于橄榄油这一特异性的纯油脂体系仍不可知。橄榄油中较高含量的简单酚、游离酚酸、黄酮等可能早于松脂醇和1-乙酰氧基松脂醇,参与橄榄油贮藏或热胁迫过程中脂质氧化的抗御反应。

### 3 橄榄木酚素的吸收代谢

当以橄榄油为载体时,松脂醇和1-乙酰氧基松脂醇表现出较好的胃肠道胁迫稳定性。因分子极性差异,松脂醇仅存在于胃和小肠模拟消化液的油相中,而1-乙酰氧基松脂醇则能同时存在于胃和小肠模拟消化液的油相和水相胶束中。体外细胞试验研究表明,松脂醇和1-乙酰氧基松脂醇经Caco-2细胞摄取后主要以硫酸盐和葡萄糖醛酸络合物形式存在<sup>[19]</sup>。研究表明,Caco-2细胞介导的这种吸收和代谢呈现出一定的剂量依赖关系(6~259 μmol/L)。当松脂醇的暴露浓度接近30~40 μmol/L时,约2%的松脂醇被Caco-2细胞摄取,且此时细胞内以共轭形式存在的松脂醇接近饱和,这与亚麻木酚素开环异落叶松树脂酚(secoisolarisiresinol, SECO)吸收程度相当。进一步增加暴露浓度(>40 μmol/L),松脂醇则以主要以游离形式存在于Caco-2细胞内<sup>[20]</sup>。因此,松脂醇可能通过简单的被动扩散或依赖低亲和性的转运体形式被结肠细胞摄取。这一非特异性吸收方式也间接表明,松脂醇也可能被结肠细胞以外的其他细胞吸收,进而在特定组织细胞发挥生物活性。

以人粪便作为橄榄木酚素代谢基质时,接近55%松脂醇能够被粪便细菌代谢为哺乳动物木酚素肠二醇(enterodiols, ED)和肠内酯(enterolactone, EL)<sup>[21]</sup>。Nurmi 等<sup>[22]</sup>研究表明,在芬兰男性尿液中检测出约占5%摄入量的松脂醇。这一研究结果表明,与体外模拟代谢相比,体内条件下松脂醇代谢程度明显提高。Suárez 等<sup>[23]</sup>分析了摄入30 mL初榨橄榄油1 h和2 h后血清中1-乙酰氧基松脂醇浓

度。结果发现,仅在1名受试者血清中检测到极低浓度1-乙酰氧基松脂醇(0.016 μmol/L)。遗憾的是,该研究未对摄入的初榨橄榄油中1-乙酰氧基松脂醇的本底含量进行定量分析,因此无法推测这一低血清累积特性是否与橄榄油中较低的1-乙酰氧基松脂醇本底含量有关。

总之,橄榄油中木酚素含量、肠道微生物丰度及其代谢酶活性等多重因素均会不同程度地影响橄榄木酚素吸收和代谢。目前,关于橄榄木酚素经结肠细胞摄取和共轭代谢后的氧化代谢轨迹、生物富集性等的研究还鲜有涉及。此外,松脂醇和1-乙酰氧基松脂醇氧化代谢产物的分析检测方法建立也是影响进一步开展橄榄木酚素吸收代谢评价的重要限制因素。

### 4 橄榄木酚素体外抗氧化活性

由于1-乙酰氧基松脂醇分离和合成极为困难,目前关于橄榄木酚素体外抗氧化活性的研究仍相对有限。Owen 等<sup>[3]</sup>对橄榄油中3种酚类化合物(简单酚、酚酸和木酚素)抑制次黄嘌呤/黄嘌呤氧化酶体系产生的活性氧进行比较分析。结果发现,1-乙酰氧基松脂醇清除自由基能力最强(IC<sub>50</sub>值0.91 mmol/L),明显优于咖啡酸、酪醇、羟基酪醇、环烯醚萜等(IC<sub>50</sub>值1.34~6.05 mmol/L),且远高于Trolox(IC<sub>50</sub>值12.24 mmol/L)。Carrasco - Pancorbo 等<sup>[24]</sup>采用半制备型高效液相色谱法从特级初榨橄榄油中分离出3种典型酚类化合物,包括苯乙醇、木酚素和烯醚萜类,并对其DPPH自由基清除活性进行了比较分析。结果发现,松脂醇DPPH自由基清除活性明显优于1-乙酰氧基松脂醇,但低于羟基酪醇和橄榄多酚配糖体。有学者评价了连翘叶<sup>[25]</sup>、芝麻<sup>[26]</sup>、巴西莓<sup>[27]</sup>、木薯<sup>[28]</sup>等来源松脂醇的体外抗氧化活性。其中,连翘叶来源松脂醇清除DPPH和ABTS自由基的IC<sub>50</sub>值分别为8.66 μg/mL和3.08 μg/mL,FRAP法Trolox当量值为2580.5 μmol/g,明显优于BHT<sup>[25]</sup>。此外,Carrasco - Pancorbo 等<sup>[24]</sup>研究发现,等含量(218 mg/kg)条件下,1-乙酰氧基松脂醇抑制三油酸甘油酯氧化的能力(氧化诱导时间7.58 h)明显优于松脂醇和酪醇(氧化诱导时间3.12~3.20 h),与烯丙酸相当(氧化诱导时间7.98 h),但次于羟基酪醇(氧化诱导时间16.25 h)和橄榄多酚配糖体(氧化诱导时间9.76 h)。橄榄木酚素苯环上氧原子的存在,在加速氧化热处理(110℃)过程中能够诱导苯环的开环反应,而1-乙酰氧基松脂醇中-COOCH<sub>3</sub>的存在一定程

度上可能干扰了这一开环反应,从而表现出优于松脂醇的抑制三油酸甘油酯氧化的潜力。总之,因木酚素来源导致的样品纯度不同、体外抗氧化评价方法的多样化、评价体系中木酚素差异化的溶解度等,均能够影响松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇的抗氧化活性。

## 5 橄榄木酚素生物活性

由于 1-乙酰氧基松脂醇受分离纯化和化学合成限制,目前关于橄榄木酚素生物活性的研究主要集中在松脂醇上,主要涉及到神经保护、抗肿瘤、抗炎和抗氧化、抑菌等。

### 5.1 神经保护作用

松脂醇能够改善谷氨酸诱导小鼠海马神经元 HT22 细胞死亡,效果明显优于木质素二聚物,EC<sub>50</sub> 值分别为 6.96 μmol/L 和 9.15 μmol/L<sup>[29]</sup>。进一步的研究表明,松脂醇能够通过诱导海马突触传递的长时程增强(long-term potentiation, LTP)效应、激活海马细胞外信号调节激酶(extracellular signal-regulated kinase, ERK)、丝氨酸-苏氨酸蛋白激酶(serine/threonine kinase, Akt)和环磷酸腺苷反应元件结合蛋白(cAMP-response element binding protein, CREB)通路,抑制乙酰胆碱酯酶(acetylcholinesterase, AChE)和促进钙流入神经元细胞,进而改善东莨菪碱诱导小鼠记忆损伤和突触可塑性<sup>[30]</sup>。

### 5.2 抗肿瘤活性

目前,松脂醇的抗肿瘤活性研究已开展较多。研究发现,初榨橄榄油多酚能够抑制人乳腺癌上皮细胞的恶性转化,这一改善作用一定程度上依赖于橄榄木酚素能够诱导 HER2-阳性上皮细胞凋亡<sup>[31]</sup>。已有研究证实,松脂醇对人乳腺癌细胞表现出一定的细胞毒性、抗增殖和促氧化活性,且不依赖于人乳腺癌细胞的雌激素受体状态<sup>[32]</sup>。重要的是,松脂醇的摄入形式也能够影响抗肿瘤活性的发挥。与松脂醇相比,纳米金-松脂醇复合物能够进一步抑制人乳腺癌 MCF-7 细胞增殖活性<sup>[33]</sup>。流行病学的病例对照研究发现,膳食补充松脂醇能够降低墨西哥妇女乳腺癌发生率,这一拮抗效应对绝经前妇女的效果最为明显<sup>[34]</sup>。此外,松脂醇能够通过激活死亡受体信号通路相关蛋白 Fas、FasL、Caspase-8 和 Bid 表达,降低线粒体膜电位并上调线粒体凋亡相关蛋白的表达,抑制 HepG2 细胞增殖活性<sup>[35]</sup>。

### 5.3 抗炎和抗氧化活性

松脂醇对四氯化碳诱导的小鼠急性肝损伤具有

保护作用,这可能与松脂醇能够抑制核转录因子 kappa B(nuclear transcription factor-kappa B, NF-κB)核转位和 c-Jun 磷酸化而表现出抗氧化和抗炎活性有关<sup>[36]</sup>。与 SDG、SECO 相比,松脂醇能够剂量依赖性地降低白细胞介素-6 和巨噬细胞趋化蛋白-1 分泌,从而表现出较强的抑制 Caco-2 细胞炎症反应,其作用机制可能与抑制 NF-κB 信号通路有关<sup>[37]</sup>。然而,以线虫为研究对象的研究结果显示,松脂醇并未表现出抗氧化活性,但能够调控胰岛素/IGF 样信号通路转录因子 DAF-16 的核转位,增加应激敏感性突变株 mev-1 线虫对热应激的抗性<sup>[38]</sup>。松脂醇能够通过增加内皮细胞一氧化氮释放,抑制白细胞黏附和活性氧形成,从而改善大鼠缺血再灌注诱导的微血管损伤<sup>[39]</sup>。

### 5.4 抑菌活性

松脂醇表现出较为显著的抑菌活性,且对人红细胞无溶血作用,抑菌机理主要基于对人真菌病原体白色念珠菌细胞膜结构的破坏效应<sup>[40]</sup>。因此,松脂醇将有望应用于人真菌感染相关疾病的预防和治疗。

### 5.5 其他

P-糖蛋白(P-gp)是一种与多药耐药相关的膜蛋白,在调节化疗药物的肿瘤细胞外运输中起关键作用,能够阻碍肿瘤细胞对治疗的反应性。研究发现,松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇能够逆转人骨髓白血病细胞(lucena-1)的多药耐药性,这一生物学过程依赖于松脂醇/1-乙酰氧基松脂醇与 P-糖蛋白在分子水平的交互作用<sup>[41]</sup>。此外,基于橄榄多酚与维生素 D 在肠道水平交互作用的研究发现,松脂醇能够抑制 Caco-2 细胞对维生素 D 的吸收。动物试验结果表明,松脂醇能够显著降低大鼠维生素 D 的餐后反应<sup>[42]</sup>。因此,橄榄油可能不适宜作为补充维生素 D 的脂质载体。

## 6 结论与展望

橄榄木酚素包括松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇,是构成初榨橄榄油内源性抗氧化体系的重要酚类化合物。受橄榄品种、种植区域、制取工艺、分析方法、收获成熟度等因素的影响,橄榄油中松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇含量和组成存在明显差异性。受木酚素来源和纯度、抗氧化活性评价体系等因素影响,松脂醇和 1-乙酰氧基松脂醇 DPPH 和 ABTS 自由基清除活性和抑制脂质过氧化的潜力存在不一致性。此外,由于 1-乙酰氧基松脂醇分离纯化和化学合成困难,目前关于橄榄木酚素生物活性的研究主要集中在松脂醇上,主要涉及到神经保

护、抗肿瘤、抗炎和抗氧化、抑菌等。基于橄榄木酚素尤其是松脂醇表现出的潜在生物学效应,应进一步将研究对象延伸至动物试验层面,且从分子层面探讨其潜在的作用机制,为橄榄木酚素在未来精准营养食品领域中的应用提供理论指导。

#### 参考文献:

- [1] FOSCOLOU A, CRITSELIS E, PANAGIOTAKOS D. Olive oil consumption and human health: a narrative review[J]. *Maturitas*, 2018, 118: 60–66.
- [2] OWEN R W, GIACOSA A, HULL W E, et al. Olive – oil consumption and health: the possible role of antioxidants [J]. *Lancet Oncol*, 2000, 1(2):107–112.
- [3] OWEN R W, MIER W, GIACOSA A, et al. Identification of lignans as major components in the phenolic fraction of olive oil[J]. *Clin Chem*, 2000, 46(7):976–988.
- [4] LÓPEZ – BIEDMA A, SÁNCHEZ – QUESADA C, DELGADO – RODRÍGUEZ M, et al. The biological activities of natural lignans from olives and virgin olive oils: a review[J]. *J Funct Foods*, 2016, 26:36–47.
- [5] CECCHI L, INNOCENTI M, MELANI F, et al. New isobaric lignans from refined olive oils as quality markers for virgin olive oils[J]. *Food Chem*, 2017, 219:148–157.
- [6] MARKULIN L, CORBIN C, RENOARD S, et al. Pinorensinol – lariciresinol reductases, key to the lignan synthesis in plants[J]. *Planta*, 2019, 249:1695–1714.
- [7] BRENES M, HIDALGO F, GARCIA A, et al. Pinorensinol and 1 – acetoxypinorensinol, two new phenolic compounds identified in olive oil[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2000, 77(7): 715–720.
- [8] BRENES M, GARCÍA A, RIOS J J, et al. Use of 1 – acetoxypinorensinol to authenticate Picual olive oils[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2002, 37(6):615–625.
- [9] TORRE – ROBLES A, MONTEAGUDO C, MARISCAL – ARCAS M, et al. Effect of light exposure on the quality and phenol content of commercial extra virgin olive oil during 12 – month storage[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2019, 96(4): 381–389.
- [10] OLIVESAS – LÓPEZ M, INNOCENTI M, GIACCHERINI C, et al. Study of the phenolic composition of Spanish and Italian monocultivar extra virgin olive oils: distribution of lignans, secoiridoidic, simple phenols and flavonoids[J]. *Talanta*, 2007, 73(4):726–732.
- [11] CHRISTOPHORIDOU S, DAIS P. Detection and quantification of phenolic compounds in olive oil by high resolution <sup>1</sup>H nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. *Anal Chim Acta*, 2009, 633(2):283–292.
- [12] CHTOUROU M, GARGOURI B, JABER H, et al. Comparative study of olive oil quality from Chemlali Sfax versus Arbequina cultivated in Tunisia[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2013, 115(6):631–640.
- [13] TORRES A, ESPÍNOLA F, MOYA M, et al. Assessment of phenolic compounds in virgin olive oil by response surface methodology with particular focus on flavonoids and lignans [J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2017, 90: 22–30.
- [14] CECCHI L, BRESCHI C, MIGLIORINI M, et al. Moisture in rehydrated olive paste affects oil extraction yield and phenolic compound content and profile of extracted olive oil [J/OL]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2019, 121:1800449 [2020–05–09]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201800449>.
- [15] ANTONINI E, FARINA A, LEONE A, et al. Phenolic compounds and quality parameters of family farming versus protected designation of origin (PDO) extra – virgin olive oils[J]. *J Food Compos Anal*, 2015, 43:75–81.
- [16] GARCIA A, BRENES M, MOYANO M J, et al. Improvement of phenolic compound content in virgin olive oils by using enzymes during malaxation[J]. *J Food Eng*, 2001, 48(3):189–194.
- [17] GARCÍA A, RUIZ – MÉNDEZ M, ROMERO C, et al. Effect of refining on the phenolic composition of crude olive oils[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2006, 83(2):159–164.
- [18] BRENES M, GARCIA A, GARCIA P, et al. Acid hydrolysis of secoiridoid aglycons during storage of virgin olive oil[J]. *J Agric Food Chem*, 2001, 49(11): 5609–5614.
- [19] SOLER A, ROMERO M P, MACIÀ A, et al. Digestion stability and evaluation of the metabolism and transport of olive oil phenols in the human small – intestinal epithelial Caco – 2/TC7 cell line[J]. *Food Chem*, 2010, 119(2): 703–714.
- [20] DURING A, DEBOUCHE C, RAAS T, et al. Among plant lignans, pinorensinol has the strongest antiinflammatory properties in human intestinal Caco – 2 cells[J]. *J Nutr*, 2012, 142(10):1798–1805.
- [21] HEINONEN S, NURMI T, LIUKKONEN K, et al. In vitro metabolism of plant lignans: new precursors of mammalian lignans enterolactone and enterodiol [J]. *J Agric Food Chem*, 2001, 49(7):3178–3186.
- [22] NURMI T, MURSU J, PEÑALVO J, et al. Dietary intake and urinary excretion of lignans in Finnish men[J]. *Br J Nutr*, 2010, 103(5):677–685.
- [23] SUÁREZ M, ROMERO M P, MACIÀ A, et al. Improved method for identifying and quantifying olive oil phenolic compounds and their metabolites in human plasma by microelution solid – phase extraction plate and liquid

- chromatography – tandem mass spectrometry [J]. J Chromatogr B, 2009, 877(32):4097 – 4106.
- [24] CARRASCO – PANCORBO A, CERRETANI L, BENDINI A, et al. Evaluation of the antioxidant capacity of individual phenolic compounds in virgin olive oil[J]. J Agric Food Chem, 2005, 53(23):8918 – 8925.
- [25] KANG W Y, WANG J M. In vitro antioxidant properties and in vivo lowering blood lipid of *Forsythia suspense* leaves[J]. Med Chem Res, 2010, 19(7):617 – 628.
- [26] KUO P C, LIN M C, CHEN G F, et al. Identification of methanol – soluble compounds in sesame and evaluation of antioxidant potential of its lignans [J]. J Agric Food Chem, 2011, 59(7):3214 – 3219.
- [27] CHIN Y W, CHAI H B, KELLER W J, et al. Lignans and other constituents of the fruits of *Euterpe oleracea* (Acai) with antioxidant and cytoprotective activities[J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(17):7759 – 7764.
- [28] YI B, HU L F, MEI W L, et al. Antioxidant phenolic compounds of Cassava (*Manihot esculenta*) from Hainan [J]. Molecules, 2011, 16(12):10157 – 10167.
- [29] IN S J, SEO K H, SONG N Y, et al. Lignans and neolignans from the stems of *Viburnum erosum* and their neuroprotective and anti – inflammatory activity[J]. Arch Pharm Res, 2015, 38(1):26 – 34.
- [30] YU J, KWONA H, CHO E, et al. The effects of pinoreosinol on cholinergic dysfunction – induced memory impairments and synaptic plasticity in mice [J]. Food Chem Toxicol, 2019, 125:376 – 382.
- [31] MENENDEZ J A. Extra – virgin olive oil polyphenols inhibit HER2 ( *erbB – 2* ) – induced malignant transformation in human breast epithelial cells: relationship between the chemical structures of extra – virgin olive oil secoiridoids and lignans and their inhibitory activities on the tyrosine kinase activity of HER2[J]. Int J Oncol, 2009, 34(1):43 – 51.
- [32] ALICIA L B, CRISTINA S Q, GABRIEL B, et al. Phytoestrogen ( + ) – pinoreosinol exerts antitumor activity in breast cancer cells with different oestrogen receptor statuses[J/OL]. BMC Complement Altern Med, 2016, 16(1):350[2020 – 05 – 09]. <https://doi.org/10.1186/s12906-016-1233-7>.
- [33] PALABIYIK I M, NEBIOGLUS, ONUR F, et al. Gold nanoparticle – lignan complexes inhibited MCF – 7 cell proliferation in vitro: a novel conjugation for cancer therapy [J]. Anti – cancer Agent Med, 2015, 15(3):336 – 344.
- [34] LUISA T S, MARCIA G P, WOLFF M S, et al. Dietary consumption of phytochemicals and breast cancer risk in Mexican women[J]. Public Health Nutr, 2009, 12(6):825 – 831.
- [35] ZHANG Y W, ZHAO H B, DI Y C, et al. Antitumor activity of pinoreosinol in vitro: inducing apoptosis and inhibiting HepG2 invasion[J]. J Funct Foods, 2018, 45:206 – 214.
- [36] KIM H Y, KIM J K, CHOI J H, et al. Hepatoprotective effect of pinoreosinol on carbon tetrachloride – induced hepatic damage in mice[J]. J Pharmacol Sci, 2010, 112(1):105 – 112.
- [37] DURING A, DEBOUCHE C, RAAS T, et al. Among plant lignans, pinoreosinol has the strongest antiinflammatory properties in human intestinal Caco – 2 cells[J]. J Nutr, 2012, 142(10):1798 – 1805.
- [38] KOCH K, CHRISTIAN B, HAVERMANN S, et al. The lignan pinoreosinol induces nuclear translocation of DAF – 16 in *Caenorhabditis elegans* but has no effect on life span [J]. Phytother Res, 2015, 29(6):894 – 901.
- [39] LAPI D, DI MARO M, MASTANTUONO T, et al. Effects of oleuropein and pinoreosinol on microvascular damage induced by hypoperfusion and reperfusion in rat pial circulation[J]. Microcirculation, 2015, 22(1):79 – 90.
- [40] HWANG B, LEE J, LIU Q H, et al. Antifungal effect of ( + ) – pinoreosinol isolated from *Sambucus williamsii*[J]. Molecules, 2010, 15(5):3507 – 3516.
- [41] GONZÁLEZ M L, VERA D M A, LAIOLO J, et al. Mechanism underlying the reversal of drug resistance in P – glycoprotein – expressing leukemia cells by pinoreosinol and the study of a derivative[J/OL]. Front Pharmacol, 2017, 8:205 [2020 – 05 – 09]. <https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00205>.
- [42] GONCALVES A, MARGIER M, TAGLIAFERRI C, et al. Pinoreosinol of olive oil decreases vitamin D intestinal absorption[J]. Food Chem, 2016, 206:234 – 238.