

紫檀芪的吸收代谢及生物学功能研究进展

孟田田, 闻子巍, 刘亚茹, 韩露, 程晓芳, 徐永杰*

(信阳师范大学 生命科学学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 紫檀芪是植物产生的天然抗毒素,存在于紫檀、蜂胶、葡萄、蓝莓等植物中。紫檀芪具有两个独特的甲氧基结构,展现出比白藜芦醇更高的生物利用度、亲脂性和稳定性,使其在体内具有更好的吸收和更长的代谢时间。因此,紫檀芪具有丰富的生物学功能,在抗氧化、抗炎、抗菌、抗肥胖和抗衰老等方面发挥着重要作用。对紫檀芪的吸收、代谢以及生物学功能进行详尽的综述,为在药物开发方面的应用提供理论参考。

关键词: 紫檀芪; 吸收与代谢; 结构及来源; 生物学功能

中图分类号: Q591;R914

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress on absorption, metabolism and biological function of pterostilbene

MENG Tiantian, WEN Ziwei, LIU Yaru, HAN Lu, CHENG Xiaofang, XU Yongjie*

(College of Life Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Pterostilbene is a natural antitoxin produced by plants, which exists in plants such as *Pterocarpus indicus* Willd., *Propolis*, *Vitis vinifera* L. and *Vaccinium* sect. *Cyanococcus*. Pterostilbene has two unique methoxy structures, exhibiting higher bioavailability, lipophilicity and stability than resveratrol, so that it has better absorbed and longer metabolic time in the body. Therefore, pterostilbene has rich biological functions and plays important roles in antioxidant, anti-inflammatory, antibacterial, antiobesity and anti-aging. A detailed review of the absorption, metabolism and biological functions of purple sandalwood was provided, and theoretical references for its application in drug development were offered.

Key words: pterostilbene; absorption and metabolism; structure and source; biological function

0 引言

芪类化合物是一类重要的酚类化合物,广泛存在于葡萄科(Vitaceae)、豆科(Fabaceae)、龙脑香科(Dipterocarpaceae)等多种植物中^[1]。它们的结构特征是存在共同的二苯乙烯骨架结构,但在取代基的性质和位置上有所不同。芪类化合物被归类为植物抗毒素,包括白藜芦醇(Resveratrol)、紫檀芪(Pterostilbene)、氧化白藜芦醇(Oxyresveratrol)、白皮杉醇(Piceatannol)、桑黄苷

(Oxyresveratrol glucoside)和各种低聚芪类化合物。这些抗菌化合物在植物中从头合成,作为抵御真菌感染和毒素的防御手段,显示出药物研究和开发的巨大潜力。芪类化合物还具有多种生物活性,包括抗氧化、抗炎和抗菌等特性^[2]。

白藜芦醇和紫檀芪是常见的单体芪,其中白藜芦醇以丰富资源及优良特性受到广泛的关注。紫檀芪是白藜芦醇的3,5-二甲基类似物,其化学结构与白藜芦醇相似,但在苯环上多了两个甲基取代基。这一结构变化使得紫檀芪的亲脂性显著

收稿日期:2024-10-27;修回日期:2025-02-07;*. 通信联系人,E-mail:yongjx81@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(32202654);河南省自然科学基金项目(242300421589)

作者简介:孟田田(1994—),女,河南周口人,讲师,博士,主要从事动物营养与代谢调控研究。

引用格式:孟田田,闻子巍,刘亚茹,等. 紫檀芪的吸收代谢及生物学功能研究进展[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版),2025,38(4):490-496.

MENG Tiantian, WEN Ziwei, LIU Yaru, et al. Research progress on absorption, metabolism and biological function of pterostilbene[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2025, 38(4):490-496.

提高,从而更容易被吸收,并表现出更高的生物利用度^[3-6]。基于这些特性,本文主要综述了紫檀芪的吸收代谢活性和生物学功能研究进展。

1 紫檀芪化学结构及来源

紫檀芪(3,5-二甲氧基-4'-羟基二苯乙烯,分子式 $C_{16}H_{16}O_3$,分子量256.30)属于非黄酮类多酚化合物(图1)。1940年,RAO和SESHADRI首次从紫檀的芯材中分离出紫檀芪。它是一种由植物产生的天然抗毒素,广泛分布于多种植物中,包括传统中药材(如紫檀、血竭和蜂胶)以及多种浆果类植物(如葡萄、蓝莓和鹿莓)^[4,7]。根据表1的数据进一步证实了其在植物中的广泛存在。紫檀芪具有亲脂性、低极性表面积、可旋转键、氢键受体和给体等特性,具有较高的膜透性^[8]。它是白藜芦醇的一种芪类衍生物,通过用甲基取代白藜芦醇苯环3和5位上的羟基氢原子而形成的。这种修饰被认为可以增强亲脂性,减少与人体内葡萄糖醛酸酶等第二阶段代谢酶的相互作用^[5,9]。

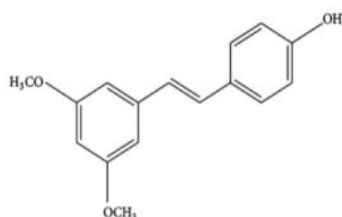


图1 紫檀芪结构式

Fig. 1 Structural formula of pterostilbene

表1 紫檀芪在浆果中的含量

Tab. 1 Content of pterostilbene in berries

来源	浓度范围	参考文献
蓝莓	9.9~15.1 mg/kg (鲜质量)	[10]
越橘浆果	99~520 ng/g (干质量)	[11]
受真菌感染的葡萄	0.2~4.7 mg/g (鲜质量)	[12]
兔眼蓝莓	99~151 ng/g (干质量)	[11]
鹿莓	520 ng/g (干质量)	[11]

2 紫檀芪的吸收与代谢

紫檀芪具有良好的生物利用度,从化学结构上分析,其存在的两个甲氧基使其具有高亲脂性,从而增加细胞膜的通透性和紫檀芪的口服吸收^[4]。有研究表明,无论剂量或给药途径,紫檀芪的血浆水平和暴露量都远高于等剂量的白藜芦醇,这表

明,与白藜芦醇相比,紫檀芪在体内的代谢更为稳定,代谢时间更长,这使其能够在体内保持较高的血浆浓度。例如,KAPETANOVIC等^[6]的研究发现,紫檀芪的口服生物利用度为66.9%,而白藜芦醇的口服生物利用度仅为29.8%。另外,紫檀芪的给药方式对其生物利用度起着重要作用,静脉给药比口服给药具有更高的生物利用度^[13]。

在代谢方面,紫檀芪通过UDP-葡萄糖醛酸转移酶进行葡萄糖醛酸化代谢,形成相应的葡萄糖醛酸化代谢物。研究发现,UDP-葡萄糖醛酸转移酶1A1(UGT1A1)和UDP-葡萄糖醛酸转移酶1A3(UGT1A3)是主要负责紫檀芪葡萄糖醛酸化的酶。DELLINGER等^[5]的研究表明,紫檀芪在体内的代谢过程中,UGT1A1和UGT1A3表现出较高的酶活性,能够有效地将紫檀芪转化为葡萄糖醛酸化代谢物。此外,研究进一步证实紫檀芪-4'-葡萄糖醛酸是紫檀芪的主要代谢物。研究通过大鼠实验发现,紫檀芪在口服或静脉注射后,其血浆中主要检测到的代谢物为紫檀芪-4'-葡萄糖醛酸,表明葡萄糖醛酸化是紫檀芪在体内的主要代谢途径之一^[6]。

紫檀芪作为一种白藜芦醇衍生物,具有两个甲氧基结构,在吸收与代谢方面展现出显著优势。高吸收率、高生物利用度和长代谢时间确保了紫檀芪在体内可以持续发挥多种生理作用。

3 生物学功能

紫檀芪作为一种天然的多酚类化合物,凭借其独特的化学结构和高效的生物活性,展现出广泛的生物学功能。如图2所示,紫檀芪在抗氧化、抗炎、抗菌、抗肥胖和抗衰老等方面均表现出显著的作用。这些功能不仅与其化学结构密切相关,还通过调控多种细胞信号通路来实现。例如,紫檀芪能够通过激活Nrf2/ARE通路增强抗氧化酶的活性,有效清除体内的活性氧(ROS),从而减轻氧化应激对细胞的损伤。同时,紫檀芪通过抑制NF- κ B信号通路,降低炎症介质的表达,发挥强大的抗炎作用。此外,紫檀芪在调节肠道菌群、促进脂肪代谢以及延缓细胞衰老等方面也表现出独特的优势。

3.1 抗氧化

氧化应激是指在生物体内,由于ROS的产生和清除之间的平衡失调^[16],过量的ROS积累会导

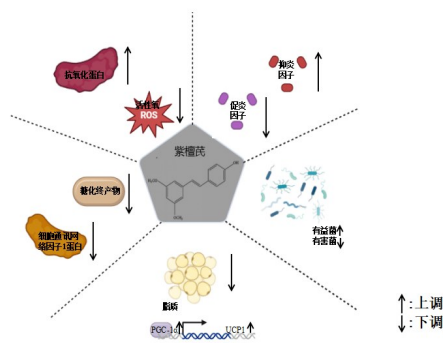


图 2 紫檀芪生物学功能

Fig. 2 Biological functions of pterostilbene

致细胞和组织的氧化损伤,引发炎症等疾病。为了维持生理平衡,需要依靠抗氧化系统来中和 ROS,如抗氧化酶和抗氧化剂。主要的 ROS 包括过氧化氢(H_2O_2)、超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)和羟基自由基($\cdot OH$)^[17]。紫檀芪可以抑制 ROS 的产生,防止持续的氧化应激^[18]。研究表明,果糖引发糖尿病的小鼠体内的 $O_2^{\cdot-}$ 、 H_2O_2 等 ROS 的含量增多,灌胃紫檀芪后,ROS 含量出现下降趋势,抗氧化应激相关酶(如超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)等)活性增加^[19]。紫檀芪在缓解宫内生长迟缓(IUGR)断奶仔猪的相关症状中表现出显著效果。研究表明,紫檀芪能够有效改善 IUGR 仔猪的肠道形态,降低肠道通透性,并恢复氧化还原状态的平衡。此外,紫檀芪还能调节肠道菌群,缓解肠道生态失调。值得注意的是,在缓解空肠氧化应激和激活 Nrf2 相关抗氧化系统方面,紫檀芪的效果优于白藜芦醇,进一步凸显了其在抗氧化和肠道保护中的独特优势^[20]。

在老年高脂血症(HLP)大鼠的研究中,在紫檀芪和耐力运动的组合处理下,HLP 大鼠肝脏中 Nrf2/Keap1 通路被显著激活,减少了氧化损伤,这种现象可能由于紫檀芪的强大抗氧化能力以及耐力运动进一步促进机体抗氧化防御能力的提升^[21]。将 Nrf2 敲低后,ROS 水平显著升高,抗氧化蛋白表达下调^[22],而紫檀芪可通过 PI3K/AKT 依赖性激活 Nrf2/ARE 通路介导抗氧化保护作用^[23],显著增加 Nrf2 的磷酸化(p-Nrf2),导致抗氧化蛋白(如 HO-1 和 γ -GCLC)的表达增加。同时还能激活 AMPK 和 AKT 的磷酸化,促使 Nrf2 从细胞质转移到细胞核,进而增强了 Nrf2 调控基因 *HO-1* 的表达,强调了紫檀芪强大的抗氧化能力^[24]。

综上,紫檀芪可抑制 ROS 产生,缓解氧化应

激。在糖尿病小鼠、IUGR 仔猪和高脂血症大鼠模型中,其通过降低 ROS 含量、增强抗氧化酶活性、改善肠道形态和菌群平衡等,展现强大抗氧化和肠道保护作用。机制上,紫檀芪能激活 Nrf2 相关通路,促进抗氧化蛋白表达,增强机体抗氧化防御能力。

3.2 抗炎

炎症是机体对外界刺激和损伤的一种防御反应,当机体遇到病原体或刺激物时,会触发一系列复杂的事件来保护和恢复组织完整性^[25]。这一过程涉及免疫细胞的激活、信号分子的释放以及各种细胞成分向炎症部位的募集^[26]。

目前已经有诸多研究指出,紫檀芪具有较好的抗炎作用。紫檀芪通过显著降低脂多糖(LPS)诱导的白细胞介素-6(IL-6)和肿瘤坏死因子- α (TNF- α)的 mRNA 高表达,具有潜在的抗大鼠神经炎作用^[27]。此外,它还显著改善了葡萄糖的体内稳态,减轻了炎症反应,减轻了糖尿病小鼠中促炎细胞因子白细胞介素-1 β (IL-1 β)、肿瘤坏死因子- α (TNF- α)和干扰素- γ (IFN- γ)表达^[27]。紫檀芪通过抑制炎症细胞因子、炎症介质(如环氧化酶-2(COX-2)、诱导型一氧化氮合酶(iNOS)和前列腺素 E2(PGE2))的水平,并提高抗炎症细胞因子的水平,从而表现出对大鼠脑缺血的神经保护作用^[28]。此外,紫檀芪在体内外均可降低白细胞介素-1 α (IL-1 α)、白细胞介素-6(IL-6)、单核细胞趋化蛋白-1(MCP-1)、白细胞介素-1 β (IL-1 β) mRNA 表达及核苷酸结合寡聚结构域样受体蛋白 3(NLRP3)表达,抑制炎症细胞迁移;降低了烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸氧化酶 1(NOX1)、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸氧化酶 2(NOX2)和烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸氧化酶 4(NOX4)的 mRNA 表达,表明紫檀芪在 LPS 诱导的心肌损伤中起着至关重要的作用,可能是预防和治疗脓毒症诱导的心肌功能障碍的关键靶点^[29]。

在调节炎症过程中,NF- κ B 是蛋白质表达的关键转录因子^[30]。正常生理条件下,NF- κ B(由亚基 p50 和 p65 组成)与抑制蛋白(I κ B α)结合,在细胞质中处于失活状态;在受到刺激后,I κ B 被磷酸化并被 I κ B 激酶(IKK)复合物激活,并迅速降解^[31-32]。IKK 复合物包括激酶、IKK α 和 IKK β ^[33-34]。这种磷酸化使 p65 亚基与 I κ B α 分离。p65 进入细胞核并启动靶基因的转录,包括 *TNF- α* 、*IL-1 β* 和

IL-6^[34]。体外研究表明, 紫檀芪可显著下调 *IκBα*、*IKKα* 和 *IKKβ* 的表达, 抑制 *NF-κB* 的活化, 导致 *TNF-α*、*IL-1β*、*IL-6* 等促炎细胞因子表达量下调^[35]。作为一种天然植物成分, 紫檀芪具有显著抗炎作用, 可降低多种炎症模型中 *IL-6*、*TNF-α* 等促炎细胞因子和炎症介质的表达, 并通过抑制 *NF-κB* 信号通路的活化来减轻炎症反应, 在抗炎方面表现出显著的效果和广泛的应用前景。

3.3 抗菌

作为植物的次生代谢产物, 紫檀芪在多种植物中的存在与其潜在的植物抗毒素作用有关。在植物抵御微生物和真菌感染、紫外线照射、高温和重金属污染等不利环境方面发挥着重要作用。

PEZET 团队^[36]发现, 真菌感染的葡萄果皮中紫檀芪的含量明显高于未感染的葡萄果皮。感染沙门菌小鼠灌胃 14 d 50 mg/kg 紫檀芪后, 肠组织的沙门菌载菌量以及炎症反应显著降低, 病理性损伤得到有效缓解, 并且小鼠肠道中的有益菌群包括乳杆菌科 (*Lactobacillaceae*)、黏液菌科 (*Muribaculaceae*) 及普雷沃氏菌科 (*Prevotellaceae*) 丰度上调, 肠杆菌科 (*Enterobacteriaceae*) 与脱硫弧菌科 (*Desulfovibrionaceae*) 等致病菌群的比例下调^[37]。紫檀芪的微生物重塑效果明显, 显著增加了肠道微生物多样性, 降低凸腹真杆菌 (*Eubacterium ventriosum*) 和聚乙酸菌属 (*Acetitomaculum*) 的丰度, 升高经黏液真杆菌属 (*Blautia*) 和毛螺菌科 UCG-001 (*Lachnospiraceae* UCG-001) 等有益菌的丰度^[38]。SHIH 等^[39]研究表明, 紫檀芪不仅可以降低蜡样芽孢杆菌 (*B. cereus*) 细胞存活率, 还会对肠道微生物群发挥有益作用, 增加拟杆菌门 (*Bacteroidetes*) 的丰度, 降低厚壁菌门 (*Firmicutes*) 的丰度, 降低幽门螺杆菌 (*Helicobacter*)、脱硫弧菌属 (*Desulfovibrio*)、毛螺菌属 (*Lachnospiraceae*) 和黏螺菌属 (*Mucispirillum*) 的相对丰度^[40]。

最近的研究表明, 紫檀芪可以改善肠道菌群的稳态, 增加短链脂肪酸 (SCFAs) 及其受体的水平, 并抑制肠道紧密连接蛋白的降低, 从而减轻肠道屏障损伤和肠道炎症^[41]。

综上, 紫檀芪能改善肠道菌群稳态, 增加有益菌丰度, 降低致病菌比例, 提升肠道微生物多样性, 还能提高短链脂肪酸及其受体水平, 抑制肠道紧密连接蛋白降低, 从而减轻肠道屏障损伤和

炎症。

3.4 抗肥胖

肥胖及由肥胖所带来的疾病对人类的健康造成严重影响, 这些疾病包括高血压、2型糖尿病等, 这些并发症会减少寿命。肥胖患者通常出现脂质代谢紊乱的现象, 即脂质水平出现升高或者降低的异常变化^[42]。紫檀芪能够减少脂肪细胞的脂质积累对抗肥胖, 3T3L1 前脂肪细胞是体外研究脂肪形成的细胞模型之一^[43], 用 5.0、7.5 μmol/L 的紫檀芪处理 3T3L1 脂肪细胞, 与对照组相比, 脂质积累分别减少了 30.64%±1.36% 和 54.93%±3.14%^[44]。

研究发现, 紫檀芪能够减少肝脏脂肪变性, 其去脂作用是由于脂肪酸的可用性降低、三酰甘油的合成以及增加低密度脂蛋白组装和脂肪酸氧化^[45]。白色脂肪储存能量, 棕色脂肪消耗能量产热对抗肥胖, 其中过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 共激活因子-1 α (PGC-1 α) 和 PR 结构域含锌指蛋白 16 (PRDM16) 是关键转录因子, 它们通过调控线粒体解偶联蛋白 1 (UCP1) 的表达, 促进白色脂肪向棕色脂肪的转化^[46]。紫檀芪处理显著增加大鼠白色脂肪中 PGC-1 α 、PRDM16 等 mRNA 水平, 也增加 p-AMPK、PRDM16 蛋白表达水平和 p-AMPK/AMPK 比值, 表达发挥抗肥胖作用^[47]。综上, 紫檀芪具有抗肥胖作用, 可减少脂肪细胞脂质积累, 降低肝脏脂肪变性。此外, 紫檀芪通过促进白色脂肪棕色化, 来增加能量消耗, 其机制涉及上调 PGC-1 α 和 PRDM16 等关键转录因子的表达。

3.5 抗衰老

近年来紫檀芪在抗衰老过程中的功能受到了广泛关注。细胞的自我消化过程称为细胞自噬, 细胞自噬能够持续保持细胞活力, 同时将受损的细胞器清理掉, 并且帮细胞排除积累的废物, 进而延缓衰老。紫檀芪可通过激活相关的信号通路 (如 Sestrin2), 激活 p62 依赖性选择性自噬, 来降低细胞通信网络因子 1 (CCN1) 的蛋白质丰度, 从而发挥抗衰老功能^[48]。研究发现, 紫檀芪有预防早衰的功效, 含 0.4% 紫檀芪的面霜在减少衰老标记 (眼下细纹、鱼尾纹面积等) 方面有显著的效果, 同时在体外实验中, 检测出其有抗胶原酶和抗弹性酶活性^[49]。糖化反应是指还原糖与蛋白质、脂质或核酸等生物大分子非酶促反应, 进而形成糖化终产物 (AGEs), AGEs 是导致衰老的重要因素。

在大鼠半乳糖血症的实验中,紫檀芪能够下调晶状体和坐骨神经中的 AGEs 含量,暗示其在体内能够抑制 AGEs 形成^[50]。在高血糖的状态下,醛糖还原酶(AR)会将葡萄糖转化成山梨醇,山梨醇的积累将导致细胞内渗透压的增加,从而促进 AGEs 的形成。

紫檀芪能够抑制 AR 的活性,通过减少糖酵解途径中的山梨醇积累,进而减少 AGEs 的形成,延缓衰老^[50]。紫檀芪可以减少卵巢中 B 细胞淋巴瘤/白血病-2 相关 X 蛋白、半胱氨酸天冬氨酸特异性蛋白酶-3 和磷酸化组蛋白变体 H2AX 等凋亡相关蛋白的表达,增加抗凋亡相关蛋白,如细胞周期依赖性激酶 2 及增殖细胞核抗原的表达水平,这表明紫檀芪可能通过调节这些蛋白来减少细胞凋亡,促进细胞增殖来对抗衰老。同时发现紫檀芪能够增加产蛋鸡卵巢皮质小卵泡的数量,降低卵巢组织中 DNA 断裂的细胞的比例,这进一步证实了紫檀芪对卵巢细胞凋亡的抑制作用^[51]。

综上,紫檀芪具有抗衰老功能,可激活细胞自噬相关信号通路,降低细胞衰老标记,减少糖化终产物形成,并通过调节细胞凋亡相关蛋白,抑制细胞凋亡,促进细胞增殖,从而发挥抗衰老作用。

4 结束语

作为一种强效的天然多酚类化合物,紫檀芪

具有抗氧化、抗炎、调节肠道菌群、抗肥胖和抗衰老作用。它通过调节 Nrf2/ARE 等抗氧化信号通路,降低 ROS 含量,提高抗氧化酶活性,保护细胞;通过 NF- κ B 通路抗炎;调节肠道菌群,增加有益菌、减少有害菌,减轻肠道损伤;活化 AMPK 通路,促进白色脂肪棕色化,抗肥胖;激活自噬,抑制 AGEs 形成,延缓衰老。

总之,紫檀芪的多方面生物学功能研究为其在药物开发、促进健康和疾病预防等方面的应用提供了坚实的理论基础,但仍有许多问题亟待解决。例如,紫檀芪在不同生理和病理条件下的具体作用机制尚未完全阐明,其在人体内的长期安全性和有效性也需进一步验证。

此外,紫檀芪的生物利用度虽然优于白藜芦醇,但在实际应用中仍面临一定的局限性,如何通过制剂改良或与其他活性成分协同作用来提高其生物利用度,是未来研究的重要方向之一。

今后应进一步探索紫檀芪在复杂疾病模型中的应用,特别是在代谢性疾病、神经退行性疾病和癌症等领域的潜在作用。同时,结合现代生物技术手段,深入解析紫檀芪的作用靶点和信号通路网络,将为其在精准医学中的应用提供更多理论支持。最后,紫檀芪的临床转化研究也值得关注,通过大规模临床试验验证其安全性和疗效,有望为开发新型天然药物和功能性食品奠定基础。

参考文献:

- [1] DUTA-BRATU C G, NITULESCU G M, MIHAI D P, et al. Resveratrol and other natural oligomeric stilbenoid compounds and their therapeutic applications[J]. *PLANTS-BASEL*, 2023, 12(16): 2935.
- [2] TSAI H Y, HO C T, CHEN Y K. Biological actions and molecular effects of resveratrol, pterostilbene, and 3'-hydroxypterostilbene[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2017, 25(1): 134-147.
- [3] LANGE K W, LIS M. Resveratrol, pterostilbene, and dementia[J]. *BioFactors*, 2018, 44(1): 83-90.
- [4] LIU Y J, YOU Y Y, LU J, et al. Recent advances in synthesis, bioactivity, and pharmacokinetics of pterostilbene, an important analog of resveratrol[J]. *Molecules*, 2020, 25(21): 5166.
- [5] DELLINGER R W, GARCIA A M G, MEYSKENS F L J. Differences in the glucuronidation of resveratrol and pterostilbene: Altered enzyme specificity and potential gender differences[J]. *Drug Metabolism and Pharmacokinetics*, 2014, 29(2): 112-119.
- [6] KAPETANOVIC I M, MUZZIO M, HUANG Z H, et al. Pharmacokinetics, oral bioavailability, and metabolic profile of resveratrol and its dimethylether analog, pterostilbene, in rats[J]. *Cancer Chemotherapy and Pharmacology*, 2011, 68(3): 593-601.
- [7] LIN W S, LELAND J V, HO C T, et al. Occurrence, bioavailability, anti-inflammatory, and anticancer effects of pterostilbene[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(46): 12788-12799.
- [8] KOSURU R, RAI U, PRAKASH S, et al. Promising therapeutic potential of pterostilbene and its mechanistic insight based on preclinical evidence[J]. *European Journal of Pharmacology*, 2016, 789: 229-243.
- [9] WANG P, SANG S M. Metabolism and pharmacokinetics of resveratrol and pterostilbene[J]. *BioFactors*, 2018, 44(1): 16-25.

- [10] AIYER H S, WARRI A M, WOODE D R, et al. Influence of berry polyphenols on receptor signaling and cell-death pathways: Implications for breast cancer prevention[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(23): 5693-5708.
- [11] RIMANDO A M, KALT W, MAGEE J B, et al. Resveratrol, pterostilbene, and piceatannol in vaccinium berries [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(15): 4713-4719.
- [12] ADRIAN M, JEANDET P, DOUILLET-BREUIL A C, et al. Stilbene content of mature *Vitis vinifera* berries in response to UV-C elicitation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(12): 6103-6105.
- [13] NAGARAJAN S, MOHANDAS S, GANESAN K, et al. New insights into dietary pterostilbene: Sources, metabolism, and health promotion effects[J]. *Molecules*, 2022, 27(19): 6316.
- [14] 朱屹东. 代谢工程改造大肠杆菌生产白藜芦醇[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
ZHU Qidong. Metabolic engineering of *Escherichia coli* for resveratrol production[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [15] KALLSCHEUER N, VOGT M, BOTT M, et al. Functional expression of plant-derived O-methyltransferase, flavanone 3-hydroxylase, and flavonol synthase in *Corynebacterium glutamicum* for production of pterostilbene, kaempferol, and quercetin[J]. *Journal of Biotechnology*, 2017, 258: 190-196.
- [16] SCHIEBER M, CHANDEL N S. ROS function in redox signaling and oxidative stress[J]. *Current Biology: CB*, 2014, 24(10): R453-R462.
- [17] BASKARAN S, FINELLI R, AGARWAL A, et al. Reactive oxygen species in male reproduction: A boon or a bane?[J]. *Andrologia*, 2021, 53(1): e13577.
- [18] HE J L, DONG X H, LI Z H, et al. Pterostilbene inhibits reactive oxygen species production and apoptosis in primary spinal cord neurons by activating autophagy via the mechanistic target of rapamycin signaling pathway[J]. *Molecular Medicine Reports*, 2018, 17(3): 4406-4414.
- [19] KOSURU R, KANDULA V, RAI U, et al. Pterostilbene decreases cardiac oxidative stress and inflammation via activation of AMPK/Nrf2/HO-1 pathway in fructose-fed diabetic rats[J]. *Cardiovascular Drugs and Therapy*, 2018, 32(2): 147-163.
- [20] CHEN Y A, ZHANG H, CHEN Y P, et al. Resveratrol and its derivative pterostilbene ameliorate intestine injury in intrauterine growth-retarded weanling piglets by modulating redox status and gut microbiota [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2021, 12(1): 70.
- [21] 柳志雄, 邓晶. 蓝莓提取物紫檀芪与耐力运动联合对老年高脂血症大鼠脂代谢的影响[J]. *分子植物育种*, 2024, 22(17): 5834-5841.
LIU Zhixiong, DENG Jing. Effects of pterostilbene combined with endurance exercise on lipid metabolism in elderly rats with hyperlipidemia[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2024, 22(17): 5834-5841.
- [22] HSEU Y C, VUDHYA GOWRISANKAR Y, WANG L W, et al. The *in vitro* and *in vivo* depigmenting activity of pterostilbene through induction of autophagy in melanocytes and inhibition of UVA-irradiated α -MSH in keratinocytes via Nrf2-mediated antioxidant pathways[J]. *Redox Biology*, 2021, 44: 102007.
- [23] LI H P, JIANG N, LIANG B H, et al. Pterostilbene protects against UVB-induced photo-damage through a phosphatidylinositol-3-kinase-dependent Nrf2/ARE pathway in human keratinocytes [J]. *Redox Report: Communications in Free Radical Research*, 2017, 22(6): 501-507.
- [24] ZHOU J F, CI X X, MA X Y, et al. Pterostilbene activates the Nrf2-Dependent antioxidant response to ameliorate Arsenic-induced intracellular damage and apoptosis in human keratinocytes [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2019, 10: 497.
- [25] ARULSELVAN P, FARD M T, TAN W S, et al. Role of antioxidants and natural products in inflammation[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016, 2016: 5276130.
- [26] HENAO-MEJIA J, ELINAV E, JIN C C, et al. Inflammasome-mediated dysbiosis regulates progression of NAFLD and obesity[J]. *Nature*, 2012, 482(7384): 179-185.
- [27] SIREESH D, GANESH M R, DHAMODHARAN U, et al. Role of pterostilbene in attenuating immune mediated devastation of pancreatic beta cells via Nrf2 signaling cascade[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2017, 44: 11-21.
- [28] YAN W J, REN D Q, FENG X X, et al. Neuroprotective and Anti-Inflammatory effect of pterostilbene against cerebral ischemia/reperfusion injury via suppression of COX-2[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2021, 12: 770329.
- [29] ZHANG L, JIAN X, YU J C, et al. Pterostilbene interferes with Lipopolysaccharide-induced myocardial injury through oxidative stress and inflammasome pathways[J]. *Frontiers in Physiology*, 2022, 13: 862187.

- [30] SALIBA E, HENROT A. Inflammatory mediators and neonatal brain damage[J]. *Biology of the Neonate*, 2001, 79(3/4): 224-227.
- [31] SCHEIDEREIT C. IkappaB kinase complexes: Gateways to NF-kappaB activation and transcription[J]. *Oncogene*, 2006, 25(51): 6685-6705.
- [32] HANSBERGER M W, CAMPBELL J A, DAN THI P, et al. IkappaB kinase subunits alpha and gamma are required for activation of NF-kappaB and induction of apoptosis by mammalian reovirus[J]. *Journal of Virology*, 2007, 81(3): 1360-1371.
- [33] YAMAMOTO Y, GAYNOR R B. IkappaB kinases: Key regulators of the NF-kappaB pathway [J]. *Trends in Biochemical Sciences*, 2004, 29(2): 72-79.
- [34] HAYDEN M S, GHOSH S. Shared principles in NF-kappaB signaling[J]. *Cell*, 2008, 132(3): 344-362.
- [35] ZENG Q H, LIAN W C, WANG G Z, et al. Pterostilbene induces Nrf2/HO-1 and potentially regulates NF- κ B and JNK-Akt/mTOR signaling in ischemic brain injury in neonatal rats[J]. *3 Biotech*, 2020, 10(5): 192.
- [36] PEZET R, PONT V. Mise en évidence de pterostilbène dans les grappes de *Vitis vinifera* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 1988, 26(5): 603-607.
- [37] 王澜桥. 紫檀芪调节肠道菌群抗沙门菌肠道感染的作用及机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
WANG Lanqiao. The mechanism of pterostilbene against Salmonella intestinal infection by regulating host microbiota [D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [38] KOH Y C, LEE P S, KUO Y L, et al. Dietary pterostilbene and resveratrol modulate the gut microbiota influenced by circadian rhythm dysregulation[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2021, 65(21): e2100434.
- [39] SHIH Y H, TSAI P J, CHEN Y L, et al. Assessment of the antibacterial mechanism of pterostilbene against *Bacillus cereus* through apoptosis-like cell death and evaluation of its beneficial effects on the gut microbiota [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(41): 12219-12229.
- [40] RUI Z, ZHANG L, LI X F, et al. Pterostilbene exert an anti-arthritis effect by attenuating inflammation, oxidative stress, and alteration of gut microbiota[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2022, 46(5): e14011.
- [41] ZHANG Z T, DENG S M, CHEN C, et al. Pterostilbene could alleviate diabetic cognitive impairment by suppressing TLR4/NF- κ B pathway through microbiota-gut-brain axis[J]. *Phytotherapy Research*, 2023, 37(8): 3522-3542.
- [42] ALANNAN M, FAYYAD-KAZAN H, TRÉZÉGUET V, et al. Targeting lipid metabolism in liver cancer [J]. *Biochemistry*, 2020, 59(41): 3951-3964.
- [43] DERICI G E, ÖZDAŞ S, CANATAR İ, et al. Antidiabetic activities of *Bolanthus spergulifolius* (Caryophyllaceae) extracts on insulin-resistant 3T3-L1 adipocytes[J]. *PLOS One*, 2021, 16(6): e0252707.
- [44] GÜLNAR B, CANATAR I, ÖZDAŞ S. Antiadipogenic and antiobesogenic effects of pterostilbene in 3T3-L1 preadipocyte models[J]. *Turkish Journal of Biology*, 2023, 47(2): 141-157.
- [45] MENG T, WEN Z, CHENG X, et al. Unlocking gut health: The potent role of stibenoids in intestinal homeostasis [J]. *Animals: An Open Access Journal from MDPI*, 2025, 15(3): 1-21.
- [46] CHECHI K, NEDERGAARD J, RICHARD D. Brown adipose tissue as an anti-obesity tissue in humans[J]. *Obesity Reviews: An Official Journal of the International Association for the Study of Obesity*, 2014, 15(2): 92-106.
- [47] 郑佳伟, 刘武剑, 朱俊东, 等. 紫檀芪和跑台运动诱导大鼠白色脂肪棕色化的作用[J]. *第三军医大学学报*, 2020, 42(4): 367-374.
ZHENG Jiawei, LIU Wujian, ZHU Jundong, et al. Pterostilbene and treadmill exercise induce white adipose browning in rats[J]. *Journal of Third Military Medical University*, 2020, 42(4): 367-374.
- [48] JIANG Y M, ZHOU Y, XU W X, et al. Induction of sestrin2 by pterostilbene suppresses ethanol-triggered hepatocyte senescence by degrading CCN1 via p62-dependent selective autophagy [J]. *Cell Biology and Toxicology*, 2023, 39(3): 729-749.
- [49] MAJEED M, MAJEED S, JAIN R, et al. An open-label single-arm, monocentric study assessing the efficacy and safety of natural pterostilbene (*pterocarpus marsupium*) for skin brightening and antiaging effects [J]. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology*, 2020, 13: 105-116.
- [50] DODDA D, RAMA RAO A, VEERESHAM C. *In vitro* and *in vivo* evaluation of pterostilbene for the management of diabetic complications[J]. *Journal of Ayurveda and Integrative Medicine*, 2020, 11(4): 369-375.
- [51] WANG X Y, YUAN Q Y, XIAO Y Y, et al. Pterostilbene, a resveratrol derivative, improves ovary function by upregulating antioxidant defenses in the aging chickens via increased SIRT1/Nrf2 expression[J]. *Antioxidants*, 2024, 13(8): 935.

责任编辑:任长江