

# 薄壳山核桃主要生物活性成分及其作用研究进展

黄梅<sup>1,2</sup>,任华东<sup>1</sup>,姚小华<sup>1</sup>,王开良<sup>1</sup>,吴霜<sup>1,2</sup>,杨水平<sup>2</sup>,常君<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所,浙江富阳311400; 2. 西南大学资源环境学院,重庆400716)

**摘要:**为了更好地推动薄壳山核桃生物活性成分的相关研究,对薄壳山核桃不饱和脂肪酸、酚类化合物、维生素E、植物甾醇、角鲨烯、类胡萝卜素等主要生物活性成分研究进展进行了综述,并总结了薄壳山核桃及其提取物在抗氧化、降血脂、降血糖、保护肝脏、抗癌等方面的保健作用。薄壳山核桃含有丰富的生物活性成分,基于其生物活性成分的新产品开发将是未来研究的重点。

**关键词:**薄壳山核桃;生物活性成分;保健作用

中图分类号:TS222+.1;TS201.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)06-0099-06

## Advances in studies on main bioactive components and their effects of pecans

HUANG Mei<sup>1,2</sup>, REN Huadong<sup>1</sup>, YAO Xiaohua<sup>1</sup>, WANG Kailiang<sup>1</sup>,  
WU Shuang<sup>1,2</sup>, YANG Shuiping<sup>2</sup>, CHANG Jun<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** In order to better promote the research on the bioactive components of pecan, the research progress of the main bioactive components of pecan, such as unsaturated fatty acids, phenolic compounds, vitamin E, phytosterols, squalene, carotenoids, was reviewed, and the health effects of pecan and its extracts on antioxidation, blood lipid lowering, blood sugar lowering, liver protection, and anti-cancer were summarized. The pecan is rich in bioactive components, and the development of new products based on its bioactive components will be the focus of future research.

**Key words:** pecan; bioactive component; health effect

薄壳山核桃(*Carya illinoensis*),为胡桃科山核桃属落叶乔木,原产于美国、墨西哥北部,是一种重要的木本油料坚果树种<sup>[1-2]</sup>。我国引种薄壳山核桃已有100多年的历史,目前主要在我国亚热带区域种植,其中以安徽、云南、江苏和浙江等地栽培面积最大,资源最为丰富<sup>[3]</sup>。

薄壳山核桃营养丰富,富含油脂、蛋白质及P、Fe、Mn、Zn等人体必需的矿质元素<sup>[4]</sup>。此外,薄壳山

核桃也是多种生物活性成分的膳食来源,包括酚类化合物、维生素E、植物甾醇、角鲨烯、类胡萝卜素等<sup>[5]</sup>。研究表明,这些成分具有抗氧化<sup>[6-7]</sup>、抗衰老<sup>[8-9]</sup>、降低胆固醇<sup>[10-11]</sup>和保护肝脏<sup>[12-13]</sup>等作用,薄壳山核桃也因其独特的保健作用和药用价值深受大众喜爱。本文系统总结了国内外有关薄壳山核桃主要生物活性成分和保健作用的重要研究进展,以期更好地推动薄壳山核桃生物活性成分相关研究,并为产业发展助力。

### 1 主要生物活性成分

#### 1.1 不饱和脂肪酸

薄壳山核桃油富含不饱和脂肪酸(UFA),主要有油酸(C18:1)、亚油酸(C18:2)、亚麻酸(C18:3),其中以油酸相对含量最高,亚油酸次之,其不饱和脂

收稿日期:2022-02-20;修回日期:2023-02-01

基金项目:浙江省重点研发计划(2021C02038);国家重点研发专项(2019YFD1001603)

作者简介:黄梅(1996),女,硕士研究生,研究方向为经济林栽培与育种(E-mail)1399054380@qq.com。

通信作者:常君,副研究员(E-mail)ylchj163@163.com。

肪酸组成与橄榄油相似。研究表明,不饱和脂肪酸在人体代谢中具有十分重要的生理作用<sup>[14]</sup>。薄壳山核桃油中不饱和脂肪酸含量与多种因素有关,其中品种是影响因素之一。常君等<sup>[15]</sup>对41个品种的薄壳山核桃油脂肪酸组成研究发现,其不饱和脂肪酸含量介于90.10%~92.63%之间,均值为91.88%。Ribeiro等<sup>[16]</sup>评价了巴西南部11个品种的薄壳山核桃油脂肪酸组成,结果发现,Mahan和Chickasaw品种的薄壳山核桃油中油酸含量最高,分别为72.99%和72.86%,Barton和Success品种的亚油酸含量较高,分别为22.50%和22.06%,Mahan、Importada和Stuart品种的亚麻酸含量在1.00%以上。Wakeling等<sup>[17]</sup>研究了澳大利亚种植的Wichita和Western Schley [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch]品种薄壳山核桃油的脂肪酸组成,结果发现,薄壳山核桃油中油酸平均含量为55.3%,亚油酸平均含量为33.0%,显著高于棕榈酸(6.6%)、硬脂酸(2.5%)和亚麻酸(1.7%)平均含量。果实的成熟度对脂肪酸组成影响也较大,随着薄壳山核桃果实的成熟,其饱和脂肪酸含量逐渐降低,而不饱和脂肪酸含量逐渐增加,其中油酸的增长最快<sup>[18]</sup>。

### 1.2 酚类化合物

酚类化合物是植物次生代谢产物,按其化学结构可分为类黄酮和非类黄酮两类,常见的类黄酮有黄酮醇、单宁、儿茶素等,非类黄酮主要是酚酸类化合物<sup>[19]</sup>。目前已从薄壳山核桃中鉴定出67种酚类化合物,包括36种单宁、22种类黄酮(除单宁外)和9种酚酸<sup>[20]</sup>。

Kornsteiner等<sup>[21]</sup>对10种不同坚果中酚类物质比较分析发现,薄壳山核桃总酚含量平均值达1284 mg/100 g(以没食子酸当量表示),仅次于核桃。罗会婷等<sup>[22]</sup>以76株薄壳山核桃单株种仁为研究对象,发现其总黄酮含量为1.45~7.04 mg/g,平均值为3.08 mg/g,缩合单宁含量为6.78~49.16 mg/g,平均值为18.65 mg/g。De La Rosa等<sup>[6]</sup>研究发现,薄壳山核桃种仁中主要有鞣花酸、没食子酸、原儿茶酸、对羟基苯甲酸和儿茶素5种酚酸,在壳中只鉴定出鞣花酸和没食子酸。El Hawary等<sup>[23]</sup>采用高效液相色谱从4个栽培在埃及的薄壳山核桃品种中鉴定出8种黄酮类化合物和15种酚酸,其中以Sioux品种的薄壳山核桃壳的酚类物质含量最高。Pandey等<sup>[24]</sup>认为酚类化合物作用于薄壳山核桃种仁的感官上,如颜色、涩味等。研究表明,不同品种薄壳山核桃中酚类化合物含量存在差异<sup>[23]</sup>。

### 1.3 维生素E

维生素E(包括 $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -生育酚及相应的生育三烯酚)是一种脂溶性抗氧化剂,具有很强的生物活性。研究表明,100 g薄壳山核桃种仁含有22~31 mg的生育酚,其中包括20~30 mg的 $\gamma$ -生育酚、0.9~1.6 mg的 $\alpha$ -生育酚以及0.1~0.3 mg的 $\delta$ -生育酚和 $\beta$ -生育酚<sup>[25]</sup>。

影响薄壳山核桃种仁生育酚水平的因素较多,包括品种、果实成熟度、产地等。许梦洋等<sup>[26]</sup>研究发现, $\alpha$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -生育酚在薄壳山核桃发育早期含量最高,随着发育成熟其含量快速下降。Robbins等<sup>[27]</sup>对比分析了美国不同地区18个品种薄壳山核桃种仁中生育酚含量,结果发现:Pawnee品种 $\alpha$ -生育酚含量最低,为0.59 mg/100 g,Stuart品种 $\alpha$ -生育酚含量最高,为1.89 mg/100 g;Wichita品种 $\beta$ -生育酚含量最低,为0.02 mg/100 g,Desirable品种 $\beta$ -生育酚含量最高,为0.74 mg/100 g;Choctaw品种 $\gamma$ -生育酚含量最低,为15.98 mg/100 g,Western品种 $\gamma$ -生育酚含量最高,为27.23 mg/100 g;Wichita品种 $\delta$ -生育酚含量最低,为0.02 mg/100 g,Desirable品种 $\delta$ -生育酚含量最高,为0.17 mg/100 g。

### 1.4 植物甾醇

植物甾醇也称植物固醇,被誉为“血管的清道夫”,其大致可以分为4-无甲基甾醇、4-甲基甾醇和4,4'-二甲基甾醇3种类型。研究表明,薄壳山核桃是植物甾醇的良好来源,其中 $\beta$ -谷甾醇最丰富(约占4-无甲基甾醇总量的75%),其次是 $\Delta^5$ -燕麦甾醇(约占4-无甲基甾醇总量的15%),还含有菜油甾醇和豆甾醇<sup>[28]</sup>。

不同品种和不同产地间的薄壳山核桃中植物甾醇含量存在较大差异。Domínguez-Avila等<sup>[29]</sup>对墨西哥北、中、南部地区Western品种薄壳山核桃的植物甾醇含量研究发现,北部地区的总甾醇和 $\beta$ -谷甾醇含量最高,分别为52.31 mg/100 g和50.37 mg/100 g(以油质量计),南部地区的总甾醇和 $\beta$ -谷甾醇含量最低,分别为34.73 mg/100 g和32.61 mg/100 g(以油质量计)。Bouali等<sup>[30]</sup>对突尼斯北部3个品种(Mahan、Moore、Burkett)的薄壳山核桃成熟过程中植物甾醇含量变化分析发现,Mahan和Moore在开花后20周植物甾醇含量达到最大,而Burkett在开花后24周植物甾醇含量达到最大。Ribeiro等<sup>[16]</sup>测定了巴西南部11个品种的薄壳山核桃的 $\beta$ -谷甾醇含量,结果为88.74~220.42 mg/100 g(以油质量计)。Segura等<sup>[31]</sup>评估不同类型坚果(杏仁、巴西坚果、腰果、榛子、澳洲坚果、花

生、薄壳山核桃、松子、开心果和核桃)中植物甾醇含量时发现,薄壳山核桃(未指明品种)中 $\beta$ -谷甾醇含量仅次于杏仁、澳洲坚果、松子和开心果。

### 1.5 其他

薄壳山核桃中还含有类胡萝卜素、角鲨烯、磷脂等其他活性成分,但关于这些活性成分研究的报道较少。类胡萝卜素是维生素A的前体物质,根据其化学结构可分为胡萝卜素和叶黄素两大类<sup>[32]</sup>。Boual等<sup>[33]</sup>研究发现,薄壳山核桃在发育过程中,叶黄素和玉米黄质含量在开花后20周达到最大,分别为3.05、3.13 mg/kg(以油质量计),且其含量随着果实成熟而逐渐降低。

角鲨烯是一种碳氢化合物,为链状结构,由30个碳原子和6个双键组成,是植物甾醇和动物胆固醇的前体物质<sup>[34]</sup>。角鲨烯具有抗氧化活性和生物活性,可用于保健品、药品及化妆品等,主要来自鲨鱼肝、鱼类,也有植物来源,如橄榄油和苜蓿籽油等<sup>[35]</sup>。Derewiaka等<sup>[36]</sup>比较了不同坚果的角鲨烯含量,结果发现,薄壳山核桃角鲨烯含量为208.2  $\mu\text{g/g}$ (以油质量计),低于巴西坚果(1 458.2  $\mu\text{g/g}$ )、澳洲坚果(383.4  $\mu\text{g/g}$ )和榛子(257.6  $\mu\text{g/g}$ ),高于腰果(116.0  $\mu\text{g/g}$ )和开心果(82.1  $\mu\text{g/g}$ )。

磷脂是细胞的组成成分,广泛分布于动植物体内。Song等<sup>[37]</sup>研究了杏仁、腰果、薄壳山核桃、开心果、核桃和花生6种坚果的磷脂组成及含量,结果发现,薄壳山核桃油总磷脂含量为1.19%,与其他坚果油相比较低,其中磷脂酸(PA)和磷脂酰肌醇(PI)是薄壳山核桃油中的主要磷脂。

## 2 保健作用

### 2.1 抗氧化作用

薄壳山核桃是天然抗氧化剂的良好来源,其酚类化合物、维生素E、植物甾醇、角鲨烯、类胡萝卜素等生物活性成分均具有一定的抗氧化活性<sup>[38]</sup>。品种、生长地区和提取工艺等因素均会影响薄壳山核桃及其提取物的抗氧化活性。

Lombardini等<sup>[39]</sup>通过氧自由基吸收能力测定法(ACORAC)评估了5个品种的薄壳山核桃种仁的抗氧化能力,结果发现,5个品种的抗氧化能力大小为Kanza > Nacono  $\geq$  Shawnee  $\geq$  Pawnee > Desirable。张金丽等<sup>[40]</sup>对比了12个品种薄壳山核桃油的抗氧化性差异,用半数抑制浓度(IC<sub>50</sub>)表示自由基清除能力,得出抗氧化能力最强的是马汉品种薄壳山核桃油,其对应的IC<sub>50</sub>为58.94 mg/mL。Flores - Cordova等<sup>[41]</sup>以墨西哥奇瓦瓦州栽培的薄壳山核桃

为研究对象,分析了其种仁和壳中酚类化合物含量和抗氧化活性,结果表明,壳中酚类化合物含量是种仁中的7~8倍,酚类化合物是薄壳山核桃中发挥抗氧化活性的重要成分,这与De La Rosa等<sup>[6]</sup>的研究结果一致。Do Prado等<sup>[42]</sup>评估了4种不同提取工艺(浸提法、浸提后喷雾干燥、乙醇提取法、超临界萃取法)对薄壳山核桃壳提取物中酚类化合物含量及抗氧化活性的影响,结果表明,浸提后喷雾干燥工艺提取物的酚类化合物含量和抗氧化活性均显著高于其他提取工艺( $p < 0.05$ )。Cason等<sup>[43]</sup>研究了不同提取方法对20个品种薄壳山核桃壳提取物总酚含量和自由基清除活性的影响,结果表明,薄壳山核桃壳提取物的总酚含量和自由基清除活性随栽培品种和提取方法的不同而明显不同。

### 2.2 降血脂和降血糖作用

Guarneiri等<sup>[44]</sup>将56名久坐的成人随机分为SUB组(薄壳山核桃代替日常饮食中的等热量食物)、ADD组(薄壳山核桃作为日常饮食的一部分)和无坚果对照组3组,8周后分别测定空腹和摄入高饱和脂肪食物4h后的热量,结果发现,SUB组空腹静息代谢率( $p = 0.01$ )和空腹脂肪氧化( $p < 0.01$ )显著增加,空腹呼吸交换率降低( $p = 0.05$ ),ADD组餐后膳食诱导产热作用增加( $p < 0.001$ ),无坚果对照组测量结果没有变化,得出每天食用薄壳山核桃可以增加高危成人的能量消耗和脂肪氧化指标的结论,而这种变化幅度足以影响长期体质量管理和慢性病预防,具有现实临床意义。Rajaram等<sup>[11]</sup>的一项临床研究也表明,富含单不饱和脂肪酸的薄壳山核桃饮食改善了受试者的血脂谱(减少了甘油三酯、总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇水平,增加了高密度脂蛋白胆固醇水平),与Del Gobbo等<sup>[45]</sup>关于不同坚果(包括薄壳山核桃)对血脂、脂蛋白的影响研究结论一致。此外,Porto等<sup>[10]</sup>研究发现,薄壳山核桃壳水提取物可降低糖尿病大鼠的血糖水平,抑制高胆固醇血症大鼠总胆固醇和甘油三酯水平的增加。

### 2.3 护肝作用

Dorsaf等<sup>[13]</sup>评估了薄壳山核桃果皮提取物(PPE)中原花青素对四氯化碳(CCl<sub>4</sub>)诱导的大鼠肝毒性的影响,结果表明,单独注射CCl<sub>4</sub>会导致大鼠肝脏抗氧化剂显著减少,而肝脏脂质过氧化和血清损伤生物标志物增加,PPE协同治疗显著逆转了CCl<sub>4</sub>诱导的血清丙氨酸转氨酶、天冬氨酸转氨酶、碱性磷酸酶和乳酸脱氢酶活性的增加,同时还显著降

低了  $\text{CCl}_4$  中毒大鼠肝脏中丙二醛的形成, 单独 PPE 处理大鼠肝脏未见明显的毒性作用。其他研究者也报道过薄壳山核桃壳提取物对肝脏活性的保护作用<sup>[12]</sup>。这些研究也为预防性使用薄壳山核桃果皮提取物中的原花青素作为减少药物肝毒性作用的保健品开发提供了一定的借鉴和理论支撑。

#### 2.4 抗癌作用

Miller 等<sup>[46]</sup>报道喂食大鼠薄壳山核桃能显著降低由氧化偶氮甲烷诱导的异常隐窝灶的发病率。Hilbig 等<sup>[47]</sup>研究发现, 薄壳山核桃壳提取物对人乳腺癌细胞具有毒性作用, 能有效抑制肿瘤细胞的发育, 并将其归因于提取物中的酚类化合物(包括没食子酸、4-羟基苯甲酸、绿原酸、香草酸、咖啡酸、鞣花酸、儿茶素、表儿茶素、表儿茶素没食子酸酯等)。

#### 2.5 其他作用

Zhang 等<sup>[48]</sup>研究发现, 薄壳山核桃油对小鼠具有抗疲劳活性; Li 等<sup>[49]</sup>研究发现, 薄壳山核桃油能改善大鼠学习和记忆能力。Babu 等<sup>[50]</sup>研究发现, 薄壳山核桃壳提取物对李斯特菌生长有抑制作用; Osorio 等<sup>[51]</sup>研究发现, 薄壳山核桃壳多酚提取物对植物病原真菌同样具有抑制作用。此外, Benvegnu 等<sup>[52]</sup>研究发现, 薄壳山核桃壳水提物对环磷酰胺诱导的大鼠睾丸毒性有保护作用, 同时还具有镇痛、抗水肿功效<sup>[53]</sup>。薄壳山核桃仁和壳中提取的原花青素低聚物可以帮助减缓饮食中碳水化合物和脂肪的吸收<sup>[54]</sup>, 可纳入肥胖症管理策略。

### 3 结 语

薄壳山核桃含有丰富的生物活性物质, 其生物活性物质的开发利用具有重要的经济价值和人类营养保健价值。目前, 对薄壳山核桃生物活性成分的研究与利用尚处于起步阶段, 许多亟待解决的问题有待深入研究, 充分挖掘基于生物活性成分的特异资源定向培育专用品种, 研发生物活性成分低成本高效提取技术, 生物活性成分保健与药用功能人类验证和基于薄壳山核桃生物活性成分的新产品开发将是未来研究重点。为此, 建议从以下几个方面开展深入研究: ①全面、系统开展基于薄壳山核桃重要生物活性成分的特异种质资源挖掘, 构建生物活性成分专用品种育种群体, 建立核心种质资源基因库, 为特定生物活性成分专用品种选育与创制奠定资源基础。②综合利用分子生物学、蛋白质组学和代谢组学等现代生物技术进行生物活性物质形成、代谢途径等研究, 探明薄壳山核桃重要生物活性成分形成机制, 为生物活性物质积累与调控提供理论依据。③进一步深入开展薄壳山核桃综合利用技术研究,

包括基于果壳、种仁蛋白质与氨基酸, 以及油脂及其生物活性成分提取加工新技术、新工艺, 推进基于薄壳山核桃生物活性成分的保健与药用新产品研发, 并加强其产品降血脂和血糖、抗癌和抑菌等方面的临床调查研究, 以实现产业链延伸, 提高薄壳山核桃产品附加值。

#### 参考文献:

- [1] 姚小华, 王开良, 任华东, 等. 薄壳山核桃优新品种和无性系开花物候特性研究[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(5): 675-680.
- [2] 彭方仁, 李永荣, 郝明灼, 等. 我国薄壳山核桃生产现状与产业化发展策略[J]. 林业科技开发, 2012, 26(4): 1-4.
- [3] 张日清, 李江, 吕芳德, 等. 我国引种美国山核桃历程及资源现状研究[J]. 经济林研究, 2003(4): 107-109.
- [4] 汤文华, 窦全琴, 潘平平, 等. 不同薄壳山核桃品种光合特性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 81-88.
- [5] ALASALVAR C, BOLLING B W. Review of nut phytochemicals, fat-soluble bioactives, antioxidant components and health effects[J]. Brit J Nutr, 2015, 113(2): S68-S78.
- [6] DE LA ROSA L A, ALVAREZ-PARRILLI E, SHAHIDI F. Phenolic compounds and antioxidant activity of kernels and shells of Mexican pecan (*Carya illinoensis*) [J]. J Agric Food Chem, 2011, 59(1): 152-162.
- [7] NAHLA A A, HAIDY A G, MOHAMMED M A. Phenolic constituents with promising antioxidant and hepatoprotective activities from the leaves extract of *Carya illinoensis* [J]. Nat Prod Ind J, 2007, 3(3): 151-158.
- [8] SUCHY J, LEE S, AHMED A, et al. Dietary supplementation with pecans delays motor neuron pathology in transgenic mice expressing G93A mutant human superoxide dismutase-1 [J]. Curr Top Nutraceut R, 2010, 8(1): 45-54.
- [9] 陈默然, 张巍, 沈楠, 等. 雌激素与山核桃油干预对去卵巢大鼠海马早老基因-1与载脂蛋白E基因表达的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 264-267.
- [10] PORTO L C S, DA SILVA J, FERRAZ A B F, et al. The antidiabetic and antihypercholesterolemic effects of an aqueous extract from pecan shells in wistar rats [J]. Plant Food Hum Nutr, 2015, 70(4): 414-419.
- [11] RAJARAM S, BURKE K, CONNELL B, et al. A monounsaturated fatty acid-rich pecan-enriched diet favorably alters the serum lipid profile of healthy men and women [J]. J Nutr, 2001, 131(9): 2275-2279.
- [12] MÜLLER L G, PASE C S, RECKZIEGEL P, et al.

- Hepatoprotective effects of pecan nut shells on ethanol – induced liver damage[J]. *Exp Toxicol Pathol*, 2013, 65 (1/2): 165 – 171.
- [13] DORSAF H, SABRINE M, HOUDA B L, et al. Pecan pericarp extract protects against carbon tetrachloride – induced liver injury through oxidative mechanism in rats [J]. *Toxicol Res*, 2020, 9(5): 652 – 660.
- [14] 俞春莲, 王正加, 夏国华, 等. 10个不同品种的薄壳山核桃脂肪含量及脂肪酸组成分析[J]. *浙江农林大学学报*, 2013, 30(5): 714 – 718.
- [15] 常君, 任华东, 姚小华, 等. 41个薄壳山核桃品种果实营养成分与脂肪酸组成的比较分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(2): 20 – 30.
- [16] RIBEIRO S R, KLEIN B, RIBEIRO Q M, et al. Chemical composition and oxidative stability of eleven pecan cultivars produced in southern Brazil[J/OL]. *Food Res Int*, 2020, 136: 109596[2022 – 02 – 20]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109596>.
- [17] WAKELING L T, MASON R L, D'ARCY B R, et al. Composition of pecan cultivars Wichita and Western Schley [*Carya illinoensis*(Wangenh.) K. Koch] grown in Australia[J]. *J Agric Food Chem*, 2001, 49(3): 1277 – 1281.
- [18] 陈文静, 刘翔如, 邓秋菊, 等. 薄壳山核桃果实发育及脂肪酸累积变化规律[J]. *经济林研究*, 2016, 34(2): 50 – 55.
- [19] 贺晋瑜. 酚类物质对葡萄酒品质的影响[J]. *山西农业科学*, 2012, 40(10): 1118 – 1120.
- [20] 贾晓东, 许梦洋, 莫正海, 等. 薄壳山核桃酚类代谢物研究进展[J]. *植物学报*, 2020, 55(1): 106 – 119.
- [21] KORNSTEINER M, WAGNER K H, ELMADFA I. Tocopherols and total phenolics in 10 different nut types [J]. *Food Chem*, 2006, 98(2): 381 – 387.
- [22] 罗会婷, 许梦洋, 贾晓东, 等. 薄壳山核桃种仁中酚类成分含量和抗氧化能力差异分析及优株筛选[J]. *植物资源与环境学报*, 2018, 27(4): 63 – 71.
- [23] EL HAWARY S S, SAAD S, EL HALAWANY A M, et al. Phenolic content and anti – Hyperglycemic activity of pecan cultivars from Egypt[J]. *Pharm Biol*, 2015, 54 (5): 788 – 798.
- [24] PANDEY K B, RIZVI S I. Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease[J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2009, 2(5): 270 – 278.
- [25] DUCK J A. *Handbook of nuts*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001: 69 – 72.
- [26] 许梦洋, 罗会婷, 贾晓东, 等. 薄壳山核桃种仁成熟过程中生育酚动态变化研究[J]. *北方果树*, 2020(4): 4 – 9.
- [27] ROBBINS K S, GONG Y, WELLS M L, et al. Investigation of the antioxidant capacity and phenolic constituents of U. S. pecans[J]. *J Funct Foods*, 2015, 15: 11 – 22.
- [28] FERNANDES G D, GÓMEZ – COCA R B, PÉREZ – CAMINO M C, et al. Chemical characterization of major and minor compounds of nut oils: almond, hazelnut, and pecan nut [J/OL]. *J Chem*, 2017, 2017: 2609549 [2022 – 02 – 20]. <https://doi.org/10.1155/2017/2609549>.
- [29] DOMÍNGUEZ – AVILA J A, ALVAREZ – PARRILLA E, GONZÁLEZ – AGUILAR G A, et al. Influence of growing location on the phytochemical content of pecan (*Carya illinoensis*) oil [J]. *J Food Res*, 2013, 2(5): 143 – 151.
- [30] BOUALI I, TRABELSI H, HERCHI W, et al. Analysis of pecan nut (*Carya illinoensis*) unsaponifiable fraction. Effect of ripening stage on phytosterols and phytostanols composition[J]. *Food Chem*, 2014, 164: 309 – 316.
- [31] SEGURA R, JAVIERRE C, LIZARRAGA M A, et al. Other relevant components of nuts: phytosterols, folate and minerals [J]. *Brit J Nutr*, 2006, 96(S2): S36 – S44.
- [32] 靳青, 毕宇霖, 刘晓牧, 等. 类胡萝卜素代谢及功能研究进展[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(12): 3561 – 3571.
- [33] BOUALI I, TRABELSI H, ABDALLAH I B, et al. Changes in fatty acid, tocopherol and xanthophyll contents during the development of Tunisian – grown pecan nuts [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2013, 90(12): 1869 – 1876.
- [34] FAGUNDES M B, VENDRUSCOLO R G, MARONEZE M M, et al. Towards a sustainable route for the production of squalene using cyanobacteria [J]. *Waste Biomass Valor*, 2019, 10(5): 1295 – 1302.
- [35] SUN H, WIESENBNORN D, TOSTENSON K, et al. Fractionation of squalene from *Amaranth* seed oil[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1997, 74(4): 413 – 418.
- [36] DEREWIKA D, SZWED E, WOŁOSIAK R. Physicochemical properties and composition of lipid fraction of selected edible nuts[J]. *Pak J Bot*, 2014, 46 (1): 337 – 343.
- [37] SONG S, CHEONG L Z, WANG H, et al. Characterization of phospholipid profiles in six kinds of nut using HILIC – ESI – IT – TOF – MS system[J]. *Food Chem*, 2018, 240: 1171 – 1178.
- [38] RYAN E, GALVIN K, O'CONNOR T P, et al. Fatty acid profile, tocopherol, squalene and phytosterol content of Brazil, pecan, pine, pistachio and cashew nuts[J]. *Int J Food Sci Nutr*, 2006, 57(3/4): 219 – 228.
- [39] LOMBARDINI L, VILLAREAL – LOZOYA J E,

- CISNEROS – ZEVALLOS L. Antioxidant properties of pecan kernels[J]. *Acta Horti*, 2009 (841): 91 – 96.
- [40] 张金丽, 李靖, 王锦, 等. 美国山核桃不同引种品种出油率及抗氧化性比较研究[J]. *粮食与油脂*, 2018, 31(9): 51 – 53.
- [41] FLORES – CORDOVA M A, SÁNCHEZ E, MUÑOZ – MÁRQUEZ E, et al. Phytochemical composition and antioxidant capacity in Mexican pecan nut [J]. *Emir J Food Agric*, 2017, 29(5): 346 – 350.
- [42] DO PRADO A C P, DA SILVA H S, DA SILVEIRA S M, et al. Effect of the extraction process on the phenolic compounds profile and the antioxidant and antimicrobial activity of extracts of pecan nut [*Carya illinoensis* (Wangenh.) C. Koch] shell[J]. *Ind Crop Prod*, 2014, 52: 552 – 561.
- [43] CASON C, YEMMIREDDY V K, MOREIRA J, et al. Antioxidant properties of pecan shell bioactive components of different cultivars and extraction methods [J/OL]. *Foods*, 2021, 10(4): 713 [2022 – 02 – 20]. <https://doi.org/10.3390/foods10040713>.
- [44] GUARNEIRI L L, PATON C M, COOPER J A. Pecan – enriched diets increase energy expenditure and fat oxidation in adults at – risk for cardiovascular disease in a randomised, controlled trial[J]. *J Hum Nutr Diet*, 2021, 35(5): 774 – 785.
- [45] DEL GOBBO L C, FALK M C, FELDMAN R, et al. Effects of tree nuts on blood lipids, apolipoproteins, and blood pressure: systematic review, meta – analysis, and dose – response of 61 controlled intervention trials[J]. *Am J Clin Nutr*, 2015, 102(6): 1347 – 1356.
- [46] MILLER A A, VERGHESE M, BOATENG J, et al. Feeding almonds and pecans reduced development of azoxymethane induced precancerous lesions [J]. *Int J Cancer Res*, 2010, 6(4): 234 – 242.
- [47] HILBIG J, DE BRITTO POLICARPI P, DE SOUZA GRINEVICIUS V M A, et al. Aqueous extract from pecan nut [*Carya illinoensis* (Wangenh.) C. Koch] shell show activity against breast cancer cell line MCF – 7 and Ehrlich ascites tumor in Balb – C mice [J]. *J Ethnopharmacol*, 2018, 211: 256 – 266.
- [48] ZHANG W, XU J J, LI Y, et al. Anti – fatigue activity of pecan oil in mice[J]. *Adv Mat Res*, 2013, 750/751/752: 1524 – 1528.
- [49] LI Y, ZHAO X Y, JIN X L, et al. Pecan oil influences learning and memory and NF –  $\kappa$ B levels in the hippocampus of rats after MWM test[J]. *Adv Mat Res*, 2014, 912/913/914: 1957 – 1960.
- [50] BABU D, CRANDALL P G, JOHNSON C L, et al. Efficacy of antimicrobials extracted from organic pecan shell for inhibiting the growth of *Listeria* spp. [J]. *J Food Sci*, 2013, 78(12): M1899 – M1903.
- [51] OSORIO E, FLORES M, HERNÁNDEZ D, et al. Biological efficiency of polyphenolic extracts from pecan nuts shell (*Carya illinoensis*), pomegranate husk (*Punica granatum*) and creosote bush leaves (*Larrea tridentata* Cov.) against plant pathogenic fungi[J]. *Ind Crop Prod*, 2010, 31(1): 153 – 157.
- [52] BENVIGNO D M, BARCELOS R C, ROVERSI K, et al. Aqueous extract of pecan nut shell [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] exerts protection against oxidative damage induced by cyclophosphamide in rat testis[J]. *J Environ Pathol Tox*, 2013, 32(4): 329 – 341.
- [53] TREVISAN G, ROSSATO M F, HOFFMEISTER C, et al. Antinociceptive and antiedematogenic effect of pecan (*Carya illinoensis*) nut shell extract in mice: a possible beneficial use for a by – product of the nut industry[J]. *J Physiol Pharmacol*, 2014, 25(4): 401 – 410.
- [54] VAZQUEZ – FLORES A A, WONG – PAZ J E, LERMA – HERRERA M A, et al. Proanthocyanidins from the kernel and shell of pecan (*Carya illinoensis*): average degree of polymerization and effects on carbohydrate, lipid, and peptide hydrolysis in a simulated human digestive system [J]. *J Funct Foods*, 2017, 28: 227 – 234.