



郑巧文,孙怡宁,邓玮亮,等.喀什“新新2号”核桃油组成特征及其在 HepG2 细胞中调节脂质代谢与抗氧化活性评价[J].轻工学报,2026,41(3):28-40.

ZHENG Q W,SUN Y N,DENG W L,et al. Compositional characteristics of Kashgar ‘Xinxin 2’ walnut oil and evaluation of its lipid metabolism-regulating and antioxidant activities in HepG2 cells [J]. Journal of Light Industry,2026,41(3):28-40. DOI:10.12187/2026.03.004

# 喀什“新新2号”核桃油组成特征及其在 HepG2 细胞中调节脂质代谢与抗氧化活性评价

郑巧文<sup>1,2</sup>,孙怡宁<sup>3</sup>,邓玮亮<sup>1</sup>,陈小乐<sup>1</sup>,陈坤锥<sup>1</sup>,覃威铭<sup>1</sup>,申迎宾<sup>1</sup>,张磊<sup>2</sup>

1. 广州大学 生命科学学院,广东 广州 510006;

2. 新疆农业大学 林学与风景园林学院,新疆 乌鲁木齐 830052;

3. 中国农业大学 食品科学与营养工程学院,北京 100083

**摘要:**【目的】研究喀什“新新2号”核桃油的化学组成,并评估其调节脂质代谢与抗氧化的潜力。【方法】采用色谱技术分析喀什“新新2号”核桃油的脂肪酸组成与微量活性成分含量,构建 HepG2 细胞脂肪堆积模型,通过油红 O 染色观察细胞内脂滴形成情况,并检测相关脂质代谢与氧化应激指标。【结果】喀什“新新2号”核桃油中不饱和脂肪酸的相对含量为 91.01%,其中亚油酸、油酸和  $\alpha$ -亚麻酸的相对含量分别为 62.70%、14.30%和 14.01%, $\omega 6/\omega 3$  脂肪酸比例为 4.48:1;其富含生育酚(27.06 mg/100 g)、植物甾醇(332.00 mg/100 g)、角鲨烯(86.00 mg/100 g)和多酚(6.79 mg/100 g)。高剂量(500  $\mu\text{g}/\text{mL}$ )核桃油能显著抑制 HepG2 细胞内脂滴形成,对总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)和丙二醛(MDA)的抑制率分别为 42.19%、42.21%、71.96%和 76.57%。而高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性则分别提高至模型组的 4.55 倍、3.15 倍和 5.10 倍。【结论】喀什“新新2号”核桃油富含不饱和脂肪酸及多种微量活性成分,在细胞水平上表现出显著的脂质代谢调节与抗氧化潜力,有望作为一款具有调节脂质代谢功能的新型健康食用油。

**关键词:**核桃油;组成特征;脂质代谢;抗氧化活性;HepG2 细胞

**中图分类号:**TS225.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)03-0028-13

## 0 引言

新疆作为我国核桃(*Juglans regia* L.)原产地和主产区之一,2023 年核桃产量达  $1.17 \times 10^6 \text{ t}^{[1]}$ 。喀什地区是新疆核桃的核心产区,其核桃种植面积占新疆核桃总种植面积的 27.1%。喀什平均海拔

1350 m,独特的温带干旱气候特征(年均气温  $13.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、日照 2741 h、无霜期 228 d)与极端水文条件(年降水量 54 mm,年蒸发量 2100 mm)共同形成了优质核桃生长的天然适生区。另外,当地昼夜温差较大,尤其利于核桃中脂肪累积与风味物质形成,这也奠定了该地区作为国家地理标志产品产地

收稿日期:2025-10-10;修回日期:2025-11-28;出版日期:2026-06-15

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项课题项目(2022A02004-1);中央引导地方科技发展项目(ZYYD2024CG22)

作者简介:郑巧文(1998—),女,广东省广州市人,广州大学硕士研究生,主要研究方向为食品营养与健康。E-mail: qiaowenzheng0307@163.com

通信作者:张磊(1983—),男,甘肃省武威市人,新疆农业大学高级实验师,主要研究方向为功能性蛋白质挖掘及评价、食品营养。E-mail:zlei\_xj@sina.com

的生态基础<sup>[2]</sup>。“新新2号”( *J. regia* ‘Xinxin 2’) 作为新疆喀什核桃主产区的核心栽培品种,不仅表现出高产、丰产的特性,还具有突出的抗逆性<sup>[3]</sup>。

核桃仁富含油脂(40%~70%),其中油酸等单不饱和脂肪酸(Monounsaturated Fatty Acids, MUFAs),亚油酸、亚麻酸等多不饱和脂肪酸(Polyunsaturated Fatty Acids, PUFAs),以及多酚、生育酚、角鲨烯、植物甾醇等活性成分含量均较高,使其成为兼具营养与功能特性的健康油脂资源<sup>[4]</sup>。核桃油中  $\omega 6/\omega 3$  脂肪酸比例符合国际膳食指南推荐标准((4~6):1),有助于调节脂质代谢、抑制炎症反应、降低心血管疾病风险<sup>[5]</sup>。研究<sup>[6]</sup>发现,核桃油中的植物甾醇与多酚可通过调控 HepG2 细胞胆固醇合成通路,显著降低细胞内总胆固醇(Total Cholesterol, TC)与甘油三酯(Triglyceride, TG)水平,提示其在代谢综合征干预中具有重要作用。

全球膳食结构转变导致的高脂饮食过量摄入,已成为诱发代谢性疾病的重大公共卫生问题。脂质代谢紊乱是多种脂质相关疾病的核心诱因,尤其与代谢相关脂肪性肝病(Metabolic-associated Fatty Liver Disease, MAFLD)和2型糖尿病的发生发展密切相关<sup>[7]</sup>。MAFLD是最常见的慢性肝病,已累及全球30%以上人口<sup>[8]</sup>。脂肪在非脂肪组织(尤其是肝脏)中异常累积所引发的脂肪毒性,是导致细胞损伤与功能障碍的关键因素<sup>[9]</sup>。高脂饮食诱导的脂质过载会引发线粒体氧化应激,如活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)、丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量增加,通过抑制过氧化物酶体增殖物激活受体 $\alpha$ (Peroxisome Proliferator-activated Receptor Alpha, PPAR- $\alpha$ )信号以削弱脂肪酸 $\beta$ -氧化能力<sup>[10]</sup>;同时,此过程通过压倒核红细胞2相关因子2(Nuclear Erythroid 2-related Factor 2, Nrf2)介导的抗氧化防御,如超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)和谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione Peroxidase, GSH-Px)活性下降,形成“脂质堆积-氧化损伤”恶性循环,加重肝脏脂毒性及炎症;而增强膳食的抗氧化能力可打破此循环,恢复脂质代谢平衡<sup>[11]</sup>。尽管药物治疗可在短期内改善相关指标,但长期使用治疗代谢综合征的药

物会产生严重的毒副作用和耐药性<sup>[12]</sup>。相比之下,通过膳食调控脂质代谢稳态的策略具有更好的安全性和可持续性,已成为代谢性疾病干预的前沿方向<sup>[13]</sup>。因此,寻找能够调节脂质代谢、改善机体健康的天然食品资源成为当前研究的热点,其中富含不饱和脂肪酸的植物油在干预治疗 MAFLD 方面已显示出潜在的药理活性<sup>[14]</sup>。

鉴于此,本研究拟以国家地理标志产品——新疆喀什“新新2号”核桃油为研究对象,解析其脂肪酸及微量活性成分(如角鲨烯、植物甾醇)的组成谱,并深入探讨其通过抗氧化途径调节肝细胞脂质代谢的作用,以期开发以喀什核桃油为代表的特色功能性油脂提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要材料与试剂

冷榨法提取喀什“新新2号”核桃油(下文简称核桃油),喀什光华现代农业有限公司;人肝癌细胞(HepG2),浙江诺博生物制品有限公司;CCK8检测试剂盒、增强型BCA蛋白浓度测定试剂盒,上海碧云天生物技术有限公司;油酸钠(SO)、棕榈酸钠(SP)、胎牛血清(FBS),美国Sigma-Aldrich公司;PBS缓冲液、油红O染色试剂盒,北京博奥拓达科技有限公司;TC、TG、低密度脂蛋白胆固醇(Low-density Lipoprotein Cholesterol, LDL-C)、高密度脂蛋白胆固醇(High-density Lipoprotein Cholesterol, HDL-C)、MDA、SOD和GSH-Px检测试剂盒,南京建成生物工程研究所;异辛烷、KOH、甲醇、NaHSO<sub>4</sub>,国药集团化学试剂有限公司;高糖DMEM培养液,美国Gibco公司;二甲基亚砜(DMSO),美国MP公司。以上试剂均为分析纯。

### 1.2 主要仪器与设备

SCION 456型气相色谱(GC)仪,德国BRUKER公司;HP-88型GC柱(100 m×0.25 mm×0.2  $\mu$ m)、HP-5型GC柱(30 m×0.32 mm×0.25  $\mu$ m)、SP<sup>TM</sup>-2560型GC柱(100 m×0.25 mm×0.2  $\mu$ m),美国Sigma-Aldrich公司;GC-2014C型GC仪,日本岛津公司;8890型GC仪、ZORBAX Eclipse PAH型液相色谱(LC)柱(5  $\mu$ m×4.6 mm×250 mm)、1260型高效液

相色谱(HPLC)仪,美国 Agilent 公司;Acclaim™ C30 型 LC 柱(5 μm×4.6 mm×250 mm),美国 Dionex 公司;UV/VIS Lambda 365 型分光光度计,美国 PerkinElmer 公司;IR200 型傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪,美国 Thermo Nicolet 公司;240i 型 CO<sub>2</sub> 培养箱、357-714018 Mul-tiskan FC 型酶标仪,美国 Thermo Fisher 公司;CKX53 型倒置荧光显微镜,日本 Olympus 公司。

### 1.3 实验方法

**1.3.1 核桃油主要成分测定** 1) 脂肪酸测定。脂肪酸按照《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》(GB 5009.168—2016)<sup>[15]</sup> 中的方法进行测定,并略作修改。准确称取 60.0 mg 核桃油样品于具塞试管中,加入 4 mL 异辛烷,待样品完全溶解后,加入 200 μL 0.02 g/mL 的 KOH-甲醇溶液,涡旋振荡 30 s,静置至溶液澄清。随后加入约 1 g NaHSO<sub>4</sub>,涡旋振荡以中和 KOH。静置待盐沉淀后,将上层溶液转移至上机瓶中,使用 SCION 456 型 GC 仪进行检测。GC 条件如下:HP-88 型 GC 柱;进样器温度 270 °C;检测器温度 280 °C;升温程序为初始温度 100 °C,保持 13 min,以 10 °C/min 的速率升温至 180 °C,保持 6 min,再以 1 °C/min 的速率升温至 200 °C,保持 20 min,最后以 4 °C/min 的速率升温至 230 °C,保持 10.5 min;载气为 N<sub>2</sub>,分流比 100:1,进样体积 1.0 μL。结果以各脂肪酸含量占总脂肪酸含量的百分比表示。

2) 微量活性成分测定。生育酚按照《食品安全国家标准 食品中维生素 A、D、E 的测定》(GB 5009.82—2016)<sup>[16]</sup> 中的方法,用 HPLC 仪进行测定,色谱柱为 Acclaim™ C30 型 LC 柱。

植物甾醇按照《动植物油脂 甾醇组成和甾醇总量的测定 气相色谱法》(GB/T 25223—2010)<sup>[17]</sup> 中的方法,使用 8890 型 GC 仪进行测定,色谱柱为 HP-5 型 GC 柱。

角鲨烯按照《动植物中角鲨烯含量的测定》(GB/T 43732—2024)<sup>[18]</sup> 中的方法,使用 GC-2014C 型 GC 仪进行测定,色谱柱为 SP™-2560 型 GC 柱。

多酚按照《粮油检验 植物油中多酚的测定 分光光度法》(LS/T 6119—2017)<sup>[19]</sup> 中的方法进行

测定。

3) 多环芳香烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)测定。PAHs 按照《食品安全国家标准 食品中多环芳烃的测定》(GB 5009.265—2021)<sup>[20]</sup> 中的方法,用 HPLC 仪进行测定,色谱柱为 ZORBAX Eclipse PAH 型 LC 柱。该检测方法下,葱、苯并[a]葱、蒽、茚并[1,2,3-c,d]芘、苯并[b]荧葱、苯并[k]荧葱、苯并[a]芘、二苯并[a,h]葱和苯并[g,h,i]芘的检出限均为 0.3 μg/kg;菲的检出限为 2.0 μg/kg;萘的检出限为 3.3 μg/kg;荧葱的检出限为 0.5 μg/kg;苊、芴和芘的检出限均为 0.7 μg/kg。

4) FTIR 测定。参考文献[21]中的薄膜法进行测定,并稍作修改。吸取 100 μL 核桃油样品,置于衰减全反射(Attenuated Total Reflection, ATR)附件表面,在 4000~400 cm<sup>-1</sup> 的红外区域进行扫描,分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>,每个样品自动扫描 3 次。通过比较核桃油 FTIR 光谱中的吸收峰与文献报道的花生油中典型功能基团的特征吸收峰,确定相应的功能基团,并用 Origin 2021 软件进行谱图分析。

**1.3.2 细胞实验** 1) 细胞培养与建模条件确立。用含 10%(如无特殊说明,下文百分号均指体积分数)FBS 的高糖 DMEM 培养液培养 HepG2 细胞,并于 37 °C、含 5% CO<sub>2</sub> 的 CO<sub>2</sub> 培养箱中培养。

采用 CCK8 法检测核桃油对 HepG2 细胞存活率的影响。将核桃油溶解在 DMSO 中至 20 mg/mL,经 0.22 μm 薄膜过滤器过滤除菌后作为储备溶液,再用完全培养基(含 10% FBS)将其稀释成不同质量浓度的核桃油工作液。所有核桃油工作液及对照组培养基中 DMSO 的终体积分数均不超过 0.1%。选择对数生长期 HepG2 细胞,调整细胞密度,分别接种于无菌 96 孔培养板(5×10<sup>4</sup> 个/mL,每孔 100 μL)中,37 °C 贴壁生长 24 h 后,分别加入含不同质量浓度(62.5 μg/mL、125.0 μg/mL、250.0 μg/mL、500.0 μg/mL 和 1 000.0 μg/mL)核桃油的培养基,即为实验组;对照组为不加核桃油的细胞组。空白组为只有完全培养基的无细胞组,每组设 3 个复孔。孵育 24 h 后,每孔加入 CCK8 10 μL,继续孵育 1.5 h,于酶标仪 450 nm 波长处测定每个孔的吸光度(OD)。按下式计算细胞存

活率/%:

$$\text{细胞存活率} = \frac{OD_2 - OD_0}{OD_1 - OD_0} \times 100\%$$

式中, $OD_0$  为空白组的吸光度; $OD_1$  为对照组的吸光度; $OD_2$  为实验组的吸光度。

采用 CCK8 法检测 SO+SP 混合溶液对 HepG2 细胞存活率的影响。分别配制 10 mmol/L SO 母液和 20 mmol/L SP 母液,经 0.22  $\mu\text{m}$  薄膜过滤器过滤除菌后,于 4  $^{\circ}\text{C}$  保存,采用培养基 2 倍梯度稀释后使用。方法同上,实验分组为空白组、对照组、不同浓度 SO+SP 混合溶液组(6.4 mmol/L SO+3.2 mmol/L SP、3.2 mmol/L SO+1.6 mmol/L SP、1.6 mmol/L SO+0.8 mmol/L SP、0.8 mmol/L SO+0.4 mmol/L SP、0.4 mmol/L SO+0.2 mmol/L SP、0.2 mmol/L SO+0.1 mmol/L SP)。

2)细胞的分组与处理。对照组仅含完全培养基;模型组为培养基+0.4 mmol/L SO+0.2 mmol/L SP;核桃油低剂量干预组为模型组+125  $\mu\text{g}/\text{mL}$  核桃油,核桃油中剂量干预组为模型组+250  $\mu\text{g}/\text{mL}$  核桃油,核桃油高剂量干预组为模型组+500  $\mu\text{g}/\text{mL}$  核桃油。

**1.3.3 脂滴含量测定** HepG2 细胞模型中的脂滴含量采用油红 O 染色试剂盒进行测定。将 HepG2 细胞接种至 6 孔细胞培养板并培养 24 h,再分组干预处理 24 h,用 PBS 缓冲液清洗 2 次以除去培养基,经油红 O 染色后,于倒置荧光显微镜下放大 400 倍并观察染色结果。用 ImageJ(Fiji) 软件对细胞中相对脂滴面积进行定量。

**1.3.4 细胞脂质水平测定** 将 HepG2 细胞接种至 6 孔细胞培养板并培养 24 h,再分组干预处理 48 h,用预冷 PBS 缓冲液清洗 2 次以去除培养基,加入 150~250  $\mu\text{L}$  含有 1 mmol/L 苯甲基磺酰氟(PMSF)的 RIPA 裂解缓冲液,置于冰上裂解 30 min,每 10 min 振荡 1 次,直接采用 TC、TG、LDL-C 和 HDL-C 试剂盒对未离心裂解物进行测定,结果均以 mmol/g 表示。细胞的蛋白质浓度使用增强型 BCA 蛋白浓度测定试剂盒进行测定。

**1.3.5 细胞抗氧化指标测定** 将 HepG2 细胞接种至 6 孔细胞培养板并培养 24 h,再分组干预处理

48 h,用预冷 PBS 缓冲液清洗 2 次以去除培养基,加入 150~250  $\mu\text{L}$  含有 1 mmol/L PMSF 的 RIPA 裂解缓冲液,置于冰上裂解 30 min,每 10 min 振荡 1 次,直接采用 MDA、SOD 和 GSH-Px 试剂盒对未离心裂解液进行测定,细胞的蛋白质含量使用增强型 BCA 蛋白浓度测定试剂盒进行测定。MDA 测定结果以 nmol/mg 表示,SOD 和 GSH-Px 测定结果均以 U/mL 表示。

## 1.4 数据处理与统计分析

所有实验至少做 3 组平行,结果以(平均值 $\pm$ 标准差)表示。采用 GraphPad Prism(9.0) 软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA),使用 Origin 2021 软件绘图,利用 Adobe Illustrator 2020 软件处理图片。

## 2 结果与分析

### 2.1 核桃油主要脂肪酸及微量活性成分分析

核桃油的主要脂肪酸及微量活性成分相对含量见表 1。由表 1 可知,亚油酸的相对含量最高(62.70%),其次为油酸(14.30%)、 $\alpha$ -亚麻酸(14.01%)和棕榈酸(6.11%),硬脂酸的相对含量最低(2.39%)。不饱和脂肪酸的相对含量为 91.01%,其中 PUFAs 占 76.71%, $\omega 6/\omega 3$  脂肪酸比例为 4.48:1。生育酚总量为 27.06 mg/100 g,其中  $\gamma$ -生育酚占 69.84%, $\delta$ -生育酚占 23.06%, $\alpha$ -生育酚占 7.10%,未检出  $\beta$ -生育酚。植物甾醇总量达 332.00 mg/100 g,以谷甾醇为主(占比 79.70%),另含  $\Delta 7$ -燕麦甾烯醇、芸薹甾醇、 $\Delta 5, 24$ -豆甾二烯醇和豆甾醇。角鲨烯和多酚含量分别为 86.00 mg/100 g 和 6.79 mg/100 g。所检出的多种 PAHs,包括苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、苯并[g,h,i]芘、苯并[k]荧蒽、苊、蒽、二苯并[a,h]蒽、菲、萘、蒾、芴、茚并[1,2,3-c,d]芘、荧蒽等,均未超出检出限。上述结果表明,该核桃油是一种富含不饱和脂肪酸与多种生物活性成分的优质食用油<sup>[22]</sup>。

本研究测得的脂肪酸组成与其他产区核桃油的检测结果相似<sup>[23]</sup>,且  $\omega 6/\omega 3$  脂肪酸比例满足国际膳食指南推荐范围<sup>[24]</sup>。这一理想比例的形成可能是基因型与环境因素共同作用的结果。研究<sup>[25]</sup>

表1 核桃油的主要脂肪酸及微量活性成分相对含量

Table 1 Main fatty acid composition and minor active component contents in walnut oil

主要脂肪酸	相对含量/%
C16:0 棕榈酸	6.11±0.03
C18:0 硬脂酸	2.39±0.01
C18:1 ω9 油酸	14.30±0.01
C18:2 ω6 亚油酸	62.70±0.05
C18:3 ω3 α-亚麻酸	14.01±0.00
主要微量活性成分	相对含量/(mg·(100 g) <sup>-1</sup> )
α-生育酚	1.92±0.05
γ-生育酚	18.90±0.43
δ-生育酚	6.24±0.12
谷甾醇	264.60±11.74
Δ7-燕麦甾烯醇	42.50±1.28
芸薹甾醇	18.46±0.33
Δ5,24-豆甾二烯醇	3.29±0.08
豆甾醇	3.03±0.08
角鲨烯	86.00±3.93
多酚	6.79±0.24

指出,纬度、温度、湿度等环境条件与基因型一样,均可显著影响油脂的成分与浓度。A. Rabadán 等<sup>[26]</sup>进一步强调,作物年份对核桃油中油酸、亚油酸等关键脂肪酸含量的影响甚至超过基因型。

本研究测得的生育酚总量与文献<sup>[23]</sup>报道的西班牙核桃油(18.65~43.62 mg/100 g)相当,但高于加拿大核桃油(14.91~26.72 mg/100 g),低于阿根廷核桃油(35.92~42.06 mg/100 g)。然而,其组分占比与 K. Pycia 等<sup>[27]</sup>报道的以β-与δ-生育酚为主(共占77.3%)的结果不一致,后者指出核桃油中生育酚含量与品种存在显著相关性。P. D. Mitsikaris 等<sup>[28]</sup>也证实了不同地理来源核桃油的生育酚含量存在显著差异。这些差异可能主要归因于核桃品种的遗传背景与产地的特定生态条件,加工与储存方式亦对此有一定影响。不饱和脂肪酸含量可能与生育酚的降解速率呈正相关,因其氧化会生成大量过氧自由基,迫使生育酚通过提供氢原子来终止链式反应,从而导致自身被快速消耗<sup>[29]</sup>。作为天然脂溶性自由基清除剂,生育酚能降低脂质和 TC 过氧化反应<sup>[30]</sup>,但在加工过程中存在不同程度的流失<sup>[31]</sup>。与通过烘烤压榨和溶剂萃取获得的深度加工油相比,冷榨油的加工步骤更少,更有助

于保留生物活性成分<sup>[32]</sup>。该核桃油中较高的生育酚含量,尤其是高含量的γ-生育酚(18.90 mg/100 g)可能与其抗氧化潜力密切相关。

本研究测得的植物甾醇总量显著高于文献<sup>[33]</sup>报道的法国核桃油(139.90~283.30 mg/100 g)、我国铁核桃油(106.56~124.96 mg/100 g)和普通核桃油(165.20 mg/100 g)。这一差异可能与喀什地区日照强、昼夜温差大等生长环境、“新新2号”品种的遗传特性及所采用的冷榨提取工艺密切相关<sup>[34]</sup>。这与 A. Rabadán 等<sup>[35]</sup>的研究结论相呼应,即植物甾醇含量对作物年份和地理位置具有显著依赖性。X. Ma 等<sup>[36]</sup>的研究也发现,冷榨提取的核桃油中植物甾醇总量最高,达164.83 mg/100 g,这进一步印证了该提取工艺的优越性。植物甾醇是能有效降低血液中 LDL-C 的重要植物化学物质之一<sup>[37]</sup>,其高含量进一步提升了喀什“新新2号”核桃油的营养价值。

本研究测得的角鲨烯含量显著高于文献<sup>[38]</sup>报道的普通核桃油(0.82~1.30 mg/100 g)。其原因可能是该品种自身的高合成潜力与喀什强光照和干旱构成的“环境胁迫”激发“新新2号”核桃产生更多次生代谢产物,以及冷榨提取工艺对热敏性成分的有效保留。作为植物次生代谢产物,角鲨烯的合成受光照、温度、湿度等环境因素的调控<sup>[39]</sup>。研究证实,紫外线 B 能促进茶树(*Camellia sinensis*)<sup>[40]</sup>与中国紫杉(*Taxus chinensis*)<sup>[41]</sup>的萜类物质合成,光照亦可影响油茶(*Camellia oleifera*)角鲨烯的累积<sup>[42]</sup>,这表明环境因素对包括角鲨烯在内的萜类物质代谢具有广泛影响<sup>[43]</sup>。角鲨烯是一种三十碳六烯的异戊二烯类化合物<sup>[44]</sup>,虽在多数食用油中含量较低且对高温敏感<sup>[45]</sup>,但却是一种高效的过氧自由基清除剂,如在橄榄油和南瓜籽油中均可显著抑制脂质氧化<sup>[46]</sup>。高含量的角鲨烯预示其在喀什“新新2号”核桃油的抗氧化体系中可能发挥关键作用。

本研究测得的多酚含量高于文献<sup>[23]</sup>报道的我国核桃油(0.14~4.68 mg/100 g)及斯洛文尼亚核桃油(5.00 mg/100 g),但低于伊朗核桃油(18.00~31.00 mg/100 g)。研究<sup>[47]</sup>表明,核桃中多酚的含量不仅取决于品种,更与成熟度密切相关,其含量

与抗氧化能力均随果实成熟度提高呈下降趋势。

相较于精炼油,冷榨油的优势主要在于压榨过程中保留了大量生物活性成分,包括生育酚、多酚、角鲨烯等抗氧化物质。而 M. Grajzer 等<sup>[48]</sup>的研究证实这三类物质协同作用能有效延缓脂质氧化进程,进而延长油脂货架期,并提供额外的健康功能。本研究采用的冷榨提取工艺在最大程度保留喀什“新新2号”核桃油中抗氧化活性成分的同时,还有效避免了 PAHs 污染。这与文献<sup>[49]</sup>报道的抗氧化剂能有效降低食物中 PAHs 水平的作用机制相符,为该核桃油在功能性食品领域中的应用提供了依据。

## 2.2 核桃油脂肪酸特征吸收峰分析

核桃油的 FTIR 图如图 1 所示。由图 1 可知,3477  $\text{cm}^{-1}$  处的宽吸收峰归属于 O—H 及可能的 N—H 伸缩振动,3060  $\text{cm}^{-1}$  与 3024  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰对应芳香族中不饱和碳上 C—H 的伸缩振动,2925  $\text{cm}^{-1}$  与 2852  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰分别对应脂肪酸链中—CH<sub>2</sub>—的不对称与对称伸缩振动,是油脂类物质的“指纹特征峰”,1746  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰为油脂类或脂肪酸中 C=O 的伸缩振动。1600  $\text{cm}^{-1}$  与 1492  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰反映了苯环的骨架振动,1450  $\text{cm}^{-1}$  与 1376  $\text{cm}^{-1}$  处吸收峰分别来源于油脂类物质中烷烃类—CH<sub>2</sub>—与—CH<sub>3</sub> 的弯曲振动。1155  $\text{cm}^{-1}$  处为 C—O 的伸缩振动吸收峰,1028  $\text{cm}^{-1}$  及 906~696  $\text{cm}^{-1}$  处分别为 C—H 的面内及面外弯

曲振动吸收峰。

FTIR 光谱证实了该核桃油的高度不饱和的酯类结构特征。3477  $\text{cm}^{-1}$  处的宽吸收峰与可能存在的微量游离脂肪酸或水分有关,3060  $\text{cm}^{-1}$  和 3024  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰证实了亚油酸、 $\alpha$ -亚麻酸等 PUFAs 的存在。2925  $\text{cm}^{-1}$  和 2852  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰反映了脂肪族长碳链骨架结构,1746  $\text{cm}^{-1}$  处的 C=O 是甘油三酯的标志性吸收峰。这些特征与文献<sup>[50]</sup>报道的核桃油脂肪酸结构相似,从官能团层面验证了喀什“新新2号”核桃油富含不饱和脂肪酸的化学本质。

## 2.3 核桃油和 SO+SP 混合溶液对 HepG2 细胞存活率的影响

核桃油及 SO+SP 混合溶液对 HepG2 细胞存活率的影响如图 2 所示,\* 表示与对照组相比差异显著( $P<0.05$ ),\*\* 表示差异极显著( $P<0.01$ ),\*\*\* 表示差异极其显著( $P<0.001$ ),下同。由图 2a)可知,作用 24 h 后,核桃油对 HepG2 细胞存活率的影响随其质量浓度的增加而变化。与对照组相比,当质量浓度为 1 000.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$  时,核桃油表现出显著的细胞毒性( $P<0.05$ ),而在 62.5~500.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$  质量浓度范围内,核桃油对 HepG2 细胞存活率影响不显著( $P>0.05$ )。由图 2b)可知,经 SO+SP 混合溶液作用 24 h 后,HepG2 细胞存活率随 SO+SP 混合溶液浓度增加而逐渐下降。与对照组相比,在较低浓度范围(0.2 mmol/L SO+0.1 mmol/L SP 及 0.4 mmol/L SO+0.2 mmol/L SP)内,SO+SP 混合溶液对 HepG2 细胞存活率影响不显著( $P>0.05$ );而在较高浓度(0.8 mmol/L SO+0.4 mmol/L SP 至 6.4 mmol/L SO+3.2 mmol/L SP)下则表现出显著的细胞毒性( $P<0.05$ )。

上述结果显示,1 000.0  $\mu\text{g}/\text{mL}$  核桃油表现出细胞毒性,这可能是由于高质量浓度油脂会导致培养环境物理性质改变,或过量不饱和脂肪酸会诱发脂质过氧化所致。因此,为确保后续实验的有效性与安全性,本研究分别选择 125  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、250  $\mu\text{g}/\text{mL}$  和 500  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的核桃油质量浓度作为低、中、高剂量进行实验。同时,为确保建模成功且不影响细胞存活率,选择 0.4 mmol/L SO+0.2 mmol/L SP 作为

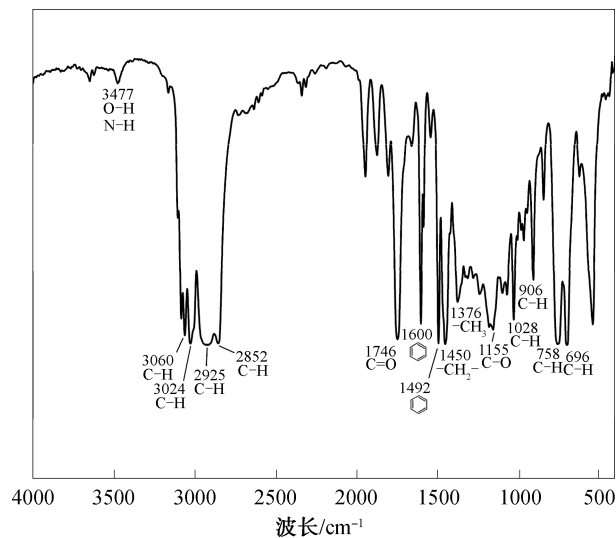


图 1 核桃油的 FTIR 图

Fig. 1 FTIR spectrum of walnut oil

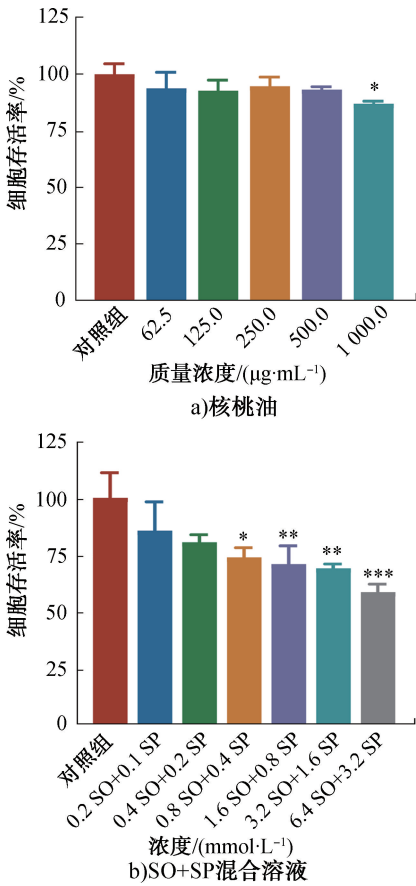


图2 核桃油及SO+SP混合溶液对HepG2细胞存活率的影响  
Fig. 2 Effects of walnut oil and SO+SP solution on the viability of HepG2 cells

模型组的建模浓度。

### 2.4 核桃油对脂肪堆积 HepG2 细胞脂滴形成的影响

为评估核桃油对肝细胞脂肪堆积的改善作用,本研究采用0.4 mmol/L SO+0.2 mmol/L SP混合溶液构建HepG2细胞脂肪堆积模型,并通过油红O染色法评估核桃油对细胞内脂滴形成的影响。油红O染色后HepG2细胞脂滴形成情况如图3所示,其中#表示与模型组相比差异显著( $P < 0.05$ ),##表示差异极显著( $P < 0.01$ ),###表示差异极其显著( $P < 0.001$ ),下同。由图3a)—e)可知,模型组细胞内聚集了大量红色脂滴,而各剂量核桃油干预组细胞内脂滴数量均明显减少,表明核桃油能够抑制HepG2细胞内脂滴的累积,且抑制效果呈剂量依赖性增强。由图3f)可知,模型组相对脂滴面积是对照组的4.23倍,而低、中、高剂量核桃油干预组相对脂滴面积分别降至模型组的85.35%、74.88%和62.37%。

本研究结果与刘畅<sup>[51]</sup>关于东北山核桃油可抑制脂滴形成的研究结论相一致,表明不同来源的核桃油在改善肝细胞脂质堆积方面可能具有相似的生物活性。该结果也与文献<sup>[52]</sup>报道一致,可推测植物油中的不饱和脂肪酸及脂溶性生物活性成分

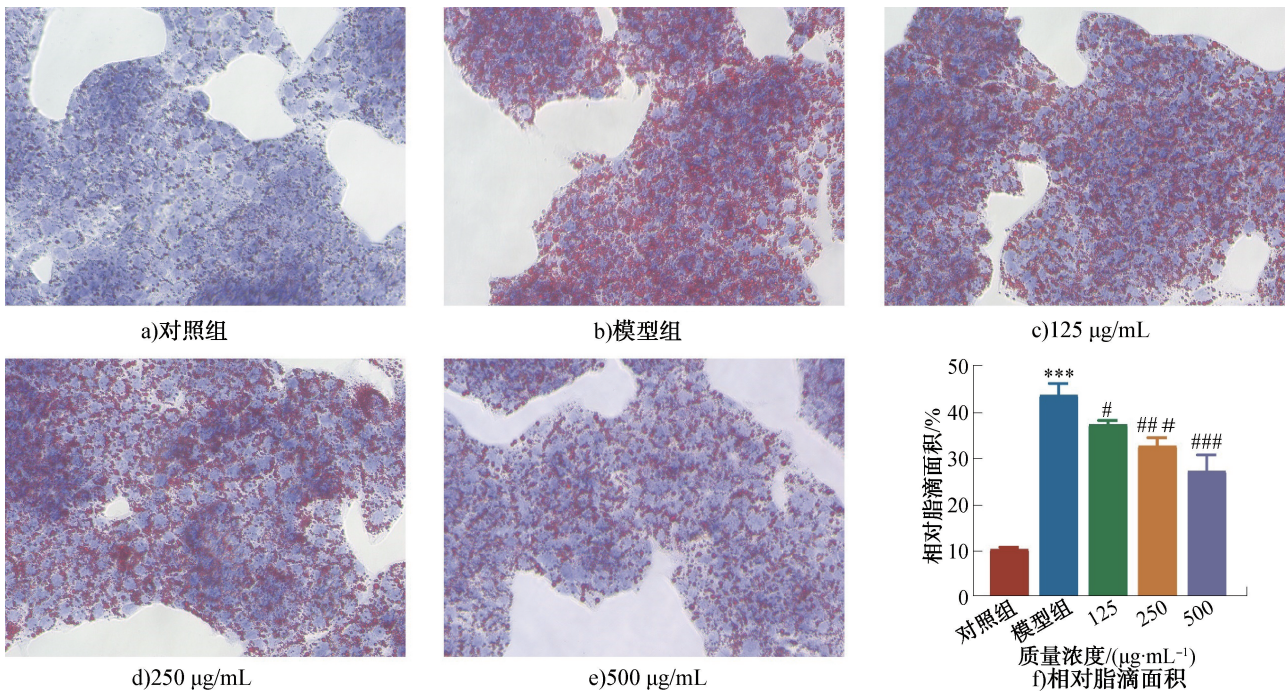


图3 油红O染色后HepG2细胞脂滴形成情况  
Fig. 3 Lipid droplet formation in HepG2 cells observed by oil red O staining

可通过抑制氧化应激和炎症反应,减少脂质累积<sup>[53]</sup>。脂滴异常累积与氧化应激之间存在密切的双向恶性循环关系:脂质过度累积可诱导线粒体 ROS 生成,进而引发氧化应激;而 ROS 水平升高又可激活脂质合成通路,进一步加剧脂质累积。因此,喀什“新新2号”核桃油中富含的不饱和脂肪酸、生育酚、多酚等成分,可能主要通过抗氧化作用来打破上述循环,进而发挥降脂作用,这为该核桃油在 MAFLD 等代谢性疾病预防和治疗中的应用提供了依据。

## 2.5 核桃油对脂肪堆积 HepG2 细胞脂质代谢的影响

脂质代谢异常通常表现为脂质三项(TC、TG 和 LDL-C)含量升高及 HDL-C 含量降低。HepG2 细胞作为人肝细胞模型,具备合成和分泌载脂蛋白 A-I

的能力,该蛋白是 HDL 的主要蛋白组分<sup>[54]</sup>。因此,细胞内 HDL-C 含量的提升可间接反映胆固醇逆向转运能力的增强,这是其降脂作用机制的组成部分<sup>[55]</sup>。核桃油对脂肪堆积 HepG2 细胞脂质代谢的影响如图 4 所示。由图 4 可知,模型组呈现显著的脂质代谢紊乱特征,其 TC、TG 和 LDL-C 含量分别较对照组升高了约 1.84 倍、8.66 倍和 6.25 倍,而 HDL-C 含量急剧下降至对照组的 9.28%。当核桃油的质量浓度从 125  $\mu\text{g}/\text{mL}$  增至 500  $\mu\text{g}/\text{mL}$  时,其对 TC 的抑制率从 12.94% 提高至 42.19%,对 TG 的抑制率由 12.57% 提高至 42.21%,尤其是对 LDL-C 的清除效率呈现倍增趋势(33.66%~71.96%),表现出明显的剂量依赖关系。此外,高剂量组 HDL-C 含量升至模型组的 4.55 倍,显著优于中、低剂量组的 2.71~2.78 倍。

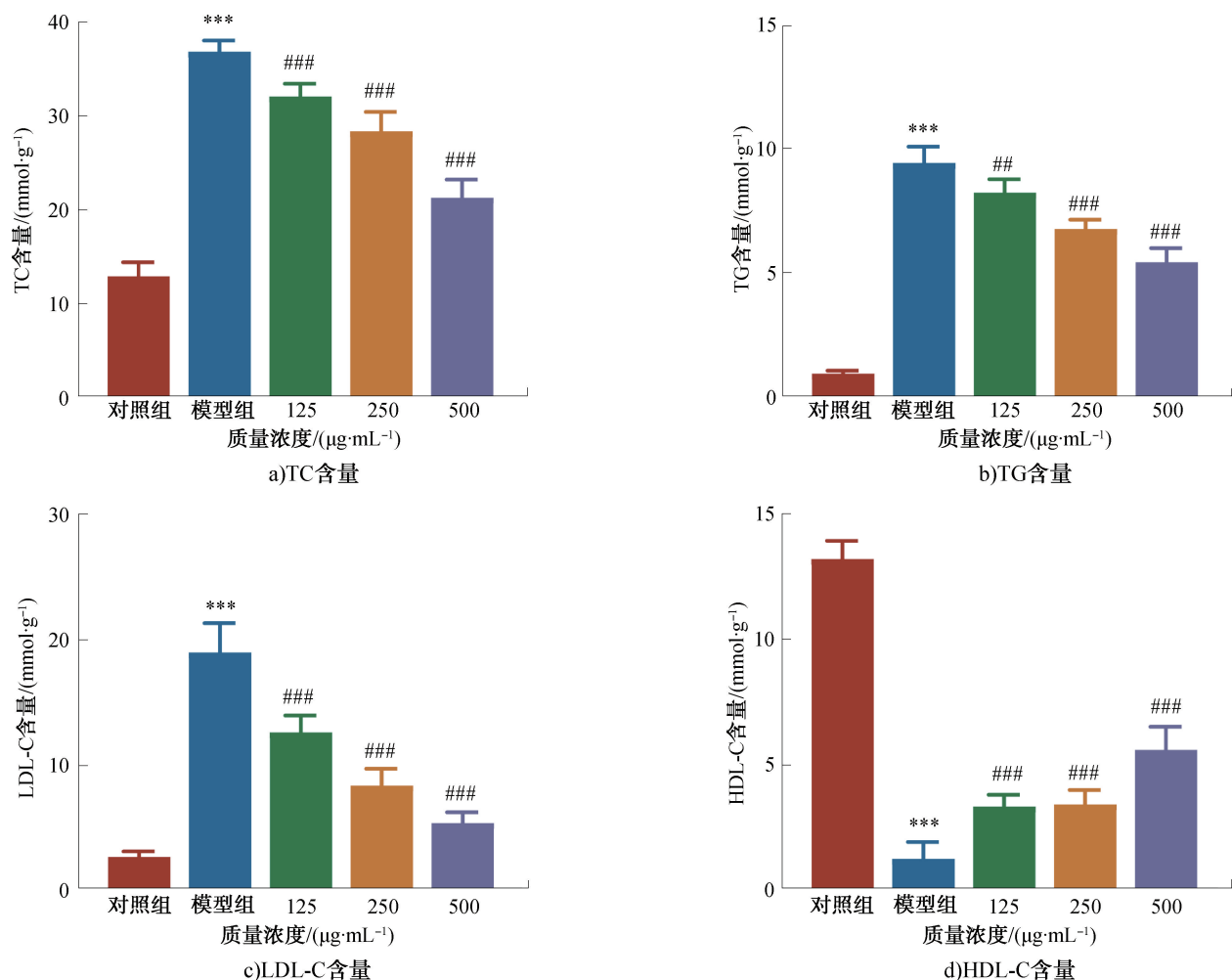


图 4 核桃油对脂肪堆积 HepG2 细胞脂质代谢的影响

Fig. 4 Effects of walnut oil on lipid metabolism in HepG2 cells with fat accumulation

上述结果表明,该核桃油具有综合调节脂质代谢的功能,其机制可能与文献报道的山核桃油<sup>[56]</sup>及墨西哥奇亚籽油<sup>[57]</sup>有相似之处。具体而言,该核桃油中的 $\alpha$ -亚麻酸等主要活性成分可能通过抑制固醇调节元件结合蛋白1C(Sterol Regulatory Element-binding Proteins 1c, SREBP-1c)通路,下调脂肪酸合成酶(Fatty Acid Synthase, FAS)、乙酰辅酶A羧化酶(Acetyl-CoA Carboxylase, ACC)等脂质合成关键酶的转录表达<sup>[58]</sup>;同时,其富含的谷甾醇可能通过竞争性抑制TC吸收,协同调节脂质代谢<sup>[59]</sup>。鉴于脂质合成通路的激活与氧化应激密切相关,本研究进一步对核桃油的抗氧化能力进行了评估。

## 2.6 核桃油对脂肪堆积 HepG2 细胞抗氧化活性的影响

在缺氧条件下,ROS可形成自由基并引发脂质过氧化反应,产生如MDA等稳定的终产物。MDA不仅可进一步损害蛋白质或核酸,尤其会对大脑造成伤害,其含量升高也与细胞损伤密切相关,因此常被作为评估抗氧化活性的关键指标。SOD和GSH-Px均能有效清除过量的ROS,保护细胞免受自由基损害<sup>[60]</sup>。核桃油对脂肪堆积 HepG2 细胞抗氧化活性的影响如图5所示。由图5可知,模型组呈现典型的氧化应激状态,脂质过氧化终产物MDA含量激增至对照组的10.66倍,而内源性抗氧化酶SOD和GSH-Px的活性分别被抑制至对照组的13.93%和16.43%。随着核桃油质量浓度从125  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 增至500  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,其对MDA生成的抑制率从28.99%显著提高至76.57% ( $P < 0.001$ ),且将SOD和GSH-Px活性分别提高至模型组的3.15倍和5.10倍。

上述结果表明,该核桃油能有效缓解脂质堆积引发的氧化应激。在MAFLD的进程中,肝脏脂质超载会促进脂肪毒素的生成,进而诱导线粒体功能障碍和内质网应激,最终导致ROS的过度产生<sup>[61]</sup>。本研究结果与富含不饱和脂肪酸及其他生物活性成分的油脂普遍具有抗氧化特性的报道相一致<sup>[62]</sup>。高剂量组对GSH-Px活性的显著提升表明,该核桃油可能优先增强谷胱甘肽代谢系统,其降脂作用与较强的抗氧化能力密切相关,其机制可能在于通过

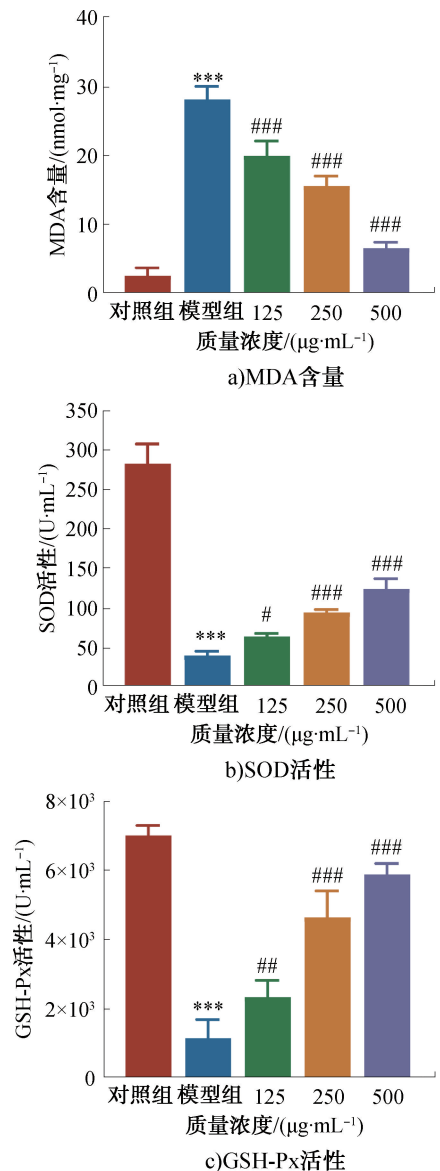


图5 核桃油对脂肪堆积 HepG2 细胞抗氧化活性的影响

Fig. 5 Effects of walnut oil on antioxidant activity in HepG2 cells with fat accumulation

清除ROS、降低MDA以抑制脂质过氧化,进而阻断氧化应激对脂质合成通路(SREBP-1c/FAS/ACC)的激活,间接减少脂质累积<sup>[58]</sup>。

## 3 结论

本研究以喀什“新新2号”核桃油为对象,分析了其组成特征,评价了其调节脂质代谢与抗氧化能力,得到如下结论:该核桃油中 $\omega 6/\omega 3$ 脂肪酸比例为4.48:1,符合国际膳食指南推荐范围。该核桃油中 $\gamma$ -生育酚和谷甾醇含量丰富,分别占生育酚总

量和植物甾醇总量的 69.84% 和 79.70%, 同时, 其角鲨烯含量丰富, 达 86.00 mg/100 g。这一独特组成由其品种特性、产地环境与加工工艺共同决定。FTIR 光谱证实了该核桃油高度不饱和的酯类结构特征。此外, 该核桃油能够剂量依赖性地抑制 HepG2 细胞脂质累积, 其降脂效应可能与提升 SOD、GSH-Px 活性及降低 MDA 含量以改善氧化应激有关。抗氧化不仅是缓解脂质累积的结果, 更是主动调节脂质代谢的关键机制。综上所述, 喀什“新新2号”核桃油展现出作为新型健康食用油在调节脂质代谢方面的潜力。该研究为喀什“新新2号”核桃油作为高附加值健康产品的开发提供了理论依据, 并为膳食干预 MAFLD 等脂质代谢紊乱疾病提供了新思路。未来研究将通过动物实验验证该核桃油的体内功效, 深入阐明其对 PPAR- $\alpha$ /SREBP-1c/Nrf2 通路的调控机制, 并优化工艺以更好地保留其活性成分及保障产品稳定性。

## 参考文献:

- [1] 国家林业和草原局. 中国林业和草原统计年鉴 2023 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2024: 30.  
National Forestry and Grassland Administration. China forestry and grassland statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2024: 30.
- [2] 郝金莲, 王如月, 罗莎莎, 等. 采收期对叶城县 6 个核桃品种品质影响初探 [J]. 核农学报, 2023, 37(3): 649-659.  
HAO J L, WANG R Y, LUO S S, et al. Preliminary study on effect of harvesting times on the quality of six walnut varieties in Yecheng County [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(3): 649-659.
- [3] 郝金莲. 采收期对新疆“温 185”和“新新 2 号”核桃果实品质的影响 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.  
HAO J L. Effect of harvesting time on walnut fruit quality of Xin Jiang *J. regia* ‘Wen 185’ and *J. regia* ‘Xinxin 2’ [D]. Ürümqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.
- [4] NGUYEN T H D, VU D C. A review on phytochemical composition and potential health-promoting properties of walnuts [J]. Food Reviews International, 2023, 39(1): 397-423.
- [5] YAN S X, WANG X S, YANG C K, et al. Insights into walnut lipid metabolism from metabolome and transcriptome analysis [J]. Frontiers in Genetics, 2021, 12: 715731.
- [6] GAO P, LIU R J, JIN Q Z, et al. Key chemical composition of walnut (*Juglans regia*. L) oils generated with different processing methods and their cholesterol-lowering effects in HepG2 cells [J]. Food Bioscience, 2022, 45: 101436.
- [7] GU J, SHI Y N, ZHU N, et al. Celastrol functions as an emerging manager of lipid metabolism: Mechanism and therapeutic potential [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2023, 164: 114981.
- [8] JEEYAVUDEEN M S, KHAN S K A, FOUUDA S, et al. Management of metabolic-associated fatty liver disease: The diabetology perspective [J]. World Journal of Gastroenterology, 2023, 29(1): 126-143.
- [9] KANG E S, HUR J, JO Y, et al. Comparative effects of nanoemulsions loaded with duck oil and lard oil on palmitate-induced lipotoxicity [J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(2): e13117.
- [10] ONTAWONG A, BOONPHANG O, PASACHAN T, et al. Hepatoprotective effect of coffee pulp aqueous extract combined with simvastatin against hepatic steatosis in high-fat diet-induced obese rats [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 54: 568-577.
- [11] WONGPHUKHIAW S, JAKO P, PUENGPAN S, et al. Beneficial effects of molasses extract in treatment of nonalcoholic fatty liver disease in high-fat diet-induced obese rats through regulation of lipid metabolism, bile acid, and oxidative stress [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2025, 22: 102085.
- [12] ZHOU Y J, XU N, ZHANG X C, et al. Chrysin improves glucose and lipid metabolism disorders by regulating the AMPK/PI3K/AKT signaling pathway in insulin-resistant HepG2 cells and HFD/STZ-induced C57BL/6J mice [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(20): 5618-5627.
- [13] WANG J K, HE Y T, YU D Q, et al. *Perilla* oil regulates intestinal microbiota and alleviates insulin resistance through the PI3K/AKT signaling pathway in type-2 diabetic KKAY mice [J]. Food and Chemical Toxicology, 2020, 135: 110965.
- [14] XIN M L, WANG H L, WANG M, et al. Attenuating effect of *Polygala tenuifolia* Willd. seed oil on progression of MAFLD [J]. Frontiers in Pharmacology, 2023, 14: 1253715.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定: GB 5009.168—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
National Health and Family Planning Commission of The People’s Republic of China, China Food and Drug Administration. National food safety standard—Determination of fatty acid in foods: GB 5009.168—2016 [S]. Beijing: Chinese Specification Press, 2017.
- [16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食

- 品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中维生素A、D、E的测定:GB 5009.82—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- National Health and Family Planning Commission of The People's Republic of China, China Food and Drug Administration. National food safety standard—Determination of vitamins a, d and e in foods:GB 5009.82—2016 [S]. Beijing: Chinese Specification Press, 2017.
- [17] 全国粮油标准化技术委员会. 动植物油脂 甾醇组成和甾醇总量的测定 气相色谱法:GB/T 25223—2010 [S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- National Grain and Oil Standardization Technical Committee. Animal and vegetable fats and oils—Determination of individual and total sterols contents—Gas chromatographic method: GB/T 25223—2010 [S]. Beijing: Chinese Specification Press, 2010.
- [18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化委员会. 动植物中角鲨烯含量的测定:GB/T 43732—2024[S]. 北京:中国标准出版社,2024.
- National Biochemical Testing Standardization Technical Committee (SAC/TC 387). Determination of squalene in animals and vegetables:GB/T 43732—2024[S]. Beijing: Chinese Specification Press, 2024.
- [19] 全国粮油标准化技术委员会(SAC/TC 270). 粮油检验 植物油中多酚的测定 分光光度法:LS/T 6119—2017 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- National Grain and Oil Standardization Technical Committee (SAC/TC 270). Inspection of grain and oils—Determination of polyphenols in vegetable oil—Spectrometric method: LS/T 6119—2017 [S]. Beijing: Chinese Specification Press, 2017.
- [20] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中多环芳烃的测定:GB 5009.265—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
- National Health Commission of The People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard—Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in foods: GB 5009.265—2021 [S]. Beijing: Chinese Specification Press, 2021.
- [21] BALAMURUGAN V T, HARITHA J, ARUNCHENDHURAN R, et al. Classification of groundnut oil using advanced ATR-MIR spectroscopy and chemometrics [J]. Food Analytical Methods, 2022, 15(7): 1778–1786.
- [22] LIAO J Q, NAI Y F, FENG L, et al. Walnut oil prevents scopolamine-induced memory dysfunction in a mouse model[J]. Molecules, 2020, 25(7): 1630.
- [23] 高盼. 我国核桃油的组成特征及其抗氧化和降胆固醇功效评估[D]. 无锡:江南大学,2019.
- GAO P. Chemical composition antioxidant capacity and cholesterol-lowering effect of walnut oil in China [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [24] CHEN X, RAN J Q, MAZHAR M, et al. The balanced unsaturated fatty acid supplement constituted by woody edible oils improved lipid metabolism and gut microbiota in high-fat diet mice[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1203932.
- [25] YANG H B, XIAO X, LI J J, et al. Chemical compositions of walnut (*Juglans* spp.) oil: Combined effects of genetic and climatic factors[J]. Forests, 2022, 13(6): 962.
- [26] RABADÁN A, PARDO J E, PARDO-GIMÉNEZ A, et al. Effect of genotype and crop year on the nutritional value of walnut virgin oil and defatted flour [J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1092–1099.
- [27] PYCIA K, KAPUSTA I, JAWORSKA G, et al. Antioxidant properties, profile of polyphenolic compounds and tocopherol content in various walnut (*Juglans regia* L.) varieties [J]. European Food Research and Technology, 2019, 245(3): 607–616.
- [28] MITSIKARIS P D, KOKOKIRIS L, PRITSA A, et al. Investigating the tocopherol contents of walnut seed oils produced in different European countries analyzed by HPLC-UV: A comparative study on the basis of geographical origin [J]. Foods, 2022, 11(22): 3719.
- [29] 王蒙蒙, 寇宇星, 周笙, 等. 不饱和脂肪酸室温氧化过程中自由基的变化 [J]. 食品科学, 2021, 42(11): 56–62.
- WANG M M, KOU Y X, ZHOU S, et al. Changes of free radicals during oxidation of unsaturated fatty acids at room temperature [J]. Food Science, 2021, 42(11): 56–62.
- [30] RUSU M E, FIZESAN I, POP A, et al. Walnut (*Juglans regia* L.) Septum: Assessment of bioactive molecules and *in vitro* biological effects [J]. Molecules, 2020, 25(9): 2187.
- [31] DURMAZ G, GOKMEN V. Effect of refining on bioactive composition and oxidative stability of hazelnut oil [J]. Food Research International, 2019, 116: 586–591.
- [32] LIU L F, CAI H L, ZHANG Y F, et al. Chemical compositions and oxidative stabilities of cold-pressed walnut oils (*Juglans regia* L.): Effects of chemical refining, water degumming, and molecular distillation [J]. Journal of Food Science, 2024, 89(11): 7589–7598.
- [33] SONG H Y, CONG Z F, WANG C L, et al. Research progress on Walnut oil: Bioactive compounds, health benefits, extraction methods, and medicinal uses [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(12): e14504.
- [34] RÉBUFA C, ARTAUD J, LE DRÉAU Y. Walnut (*Juglans regia* L.) oil chemical composition depending on variety, locality, extraction process and storage conditions: A comprehensive review [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 110: 104534.
- [35] RABADÁN A, ÁLVAREZ-ORTÍ M, PARDO J E. A comparison of the effect of genotype and weather

- conditions on the nutritional composition of most important commercial nuts [ J ]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 244: 218–224.
- [36] MA X, HUANG C B, ZHENG C, et al. Effect of oil extraction methods on walnut oil quality characteristics and the functional properties of walnut protein isolate [ J ]. *Food Chemistry*, 2024, 438: 138052.
- [37] SHEN Y B, ZHENG L Y, PENG Y, et al. Physicochemical, antioxidant and anticancer characteristics of seed oil from three *Chenopodium quinoa* genotypes [ J ]. *Molecules*, 2022, 27 ( 8 ): 2453.
- [38] GAO P, LIU R J, JIN Q Z, et al. Comparison of different processing methods of iron walnut oils (*Juglans sigillata*): Lipid yield, lipid compositions, minor components, and antioxidant capacity [ J ]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2018, 120(9): 1800151.
- [39] HASHIM M, AHMAD B, DROUET S, et al. Comparative effects of different light sources on the production of key secondary metabolites in plants *in vitro* cultures [ J ]. *Plants*, 2021, 10(8): 1521.
- [40] WEI J C, YANG Y, PENG Y, et al. Biosynthesis and the transcriptional regulation of terpenoids in tea plants (*Camellia sinensis*) [ J ]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(8): 6937.
- [41] JIAO J, XU X J, LU Y, et al. Identification of genes associated with biosynthesis of bioactive flavonoids and taxoids in *Taxus cuspidata* Sieb. et Zucc. plantlets exposed to UV-B radiation [ J ]. *Gene*, 2022, 823: 146384.
- [42] LI A R, DU Q H, ZENG Y L, et al. Light regulated CoWRKY15 acts on CoSQS promoter to promote squalene synthesis in *Camellia oleifera* seeds [ J ]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(20): 11134.
- [43] LI Y Q, KONG D X, FU Y, et al. The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants [ J ]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 148: 80–89.
- [44] GU Y Y, ZHU Z Y, ZENG Y L, et al. CoHMGR2 as a critical regulator of squalene biosynthesis key period in *Camellia oleifera* seed kernels [ J ]. *Physiologia Plantarum*, 2025, 177(3): e70352.
- [45] GAO P, CAO Y, LIU R J, et al. Phytochemical content, minor-constituent compositions, and antioxidant capacity of screw-pressed walnut oil obtained from roasted kernels [ J ]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2019, 121(1): 1800292.
- [46] ZHANG J J, GAO Y, XU X, et al. *In situ* rapid analysis of squalene, tocopherols, and sterols in walnut oils based on supercritical fluid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry [ J ]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(43): 16371–16380.
- [47] PYCIA K, KAPUSTA I, JAWORSKA G. Impact of the degree of maturity of walnuts (*Juglans regia* L.) and their variety on the antioxidant potential and the content of tocopherols and polyphenols [ J ]. *Molecules*, 2019, 24(16): 2936.
- [48] GRAJZER M, SZMALCEL K, KU ŹMI ŃSKI Ł, et al. Characteristics and antioxidant potential of cold-pressed oils: Possible strategies to improve oil stability [ J ]. *Foods*, 2020, 9(11): 1630.
- [49] SADIGHARA P. Antioxidants as modulators of PAH contaminants in food and living organisms: An overview study [ J ]. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2025, 45(1): 123–135.
- [50] WANG J W, ZHANG K, SHENG J, et al. Investigation on walnut kernel oil extraction using different methods [ J ]. *BioResources*, 2023, 18(1): 869–883.
- [51] 刘畅. 东北山核桃油绿色提取及其体外活性评价 [ D ]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- LIU C. Green extraction of Manchurian walnuts kernel oil and its preliminary evaluation of *in vitro* biological activities [ D ]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [52] 帅希祥. 澳洲坚果油组成、营养及其油凝胶体系构建和应用 [ D ]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- SHUAI X X. Composition and nutrition of macadamia oil and construction of oleogel system and its application [ D ]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [53] ZHANG Y D, DAI Z Z, PU S M, et al. Mechanistic studies on the alleviation of lipid accumulation and oxidative stress by *Majia* pomelo seed oil [ J ]. *Food Bioscience*, 2024, 62: 105322.
- [54] KING T W, COCHRAN B J, RYE K A. ApoA-I and diabetes [ J ]. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 2023, 43(8): 1362–1368.
- [55] ZANOTTI I, POTÌ F, CUCHEL M. HDL and reverse cholesterol transport in humans and animals: Lessons from pre-clinical models and clinical studies [ J ]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular and Cell Biology of Lipids*, 2022, 1867(1): 159065.
- [56] ZHANG Y, WU L Y, YAO Z X, et al. Hypolipidemic effects of hickory nut oil using cold pressure extraction [ J ]. *Food Science and Biotechnology*, 2016, 25(1): 41–46.
- [57] SHEN Y B, ZHENG L Y, JIN J, et al. Phytochemical and biological characteristics of Mexican *Chia seed* oil [ J ]. *Molecules*, 2018, 23(12): 3219.
- [58] SU J H, MA C Y, LIU C X, et al. Hypolipidemic activity of peony seed oil rich in  $\alpha$ -linolenic, is mediated through inhibition of lipogenesis and upregulation of fatty acid  $\beta$ -oxidation [ J ]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(4): H1001–H1009.
- [59] ZHU H Y, CHEN L J, CHEN Z X, et al. Synthesis of cholesterol analogues and comparison on their effect on plasma cholesterol with  $\beta$ -Sitosterol [ J ]. *Food Chemistry*,

2024,461;140820.

- [60] XU L, LI W, CHEN S Y, et al. Oenothlein B ameliorates hepatic injury in alcoholic liver disease mice by improving oxidative stress and inflammation and modulating the gut microbiota[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1053718.

- [61] CLARE K, DILLON J F, BRENNAN P N. Reactive oxygen

species and oxidative stress in the pathogenesis of MAFLD [J]. *Journal of Clinical and Translational Hepatology*, 2022, 10(5): 939–946.

- [62] GAO Y, LI C, CHEN B, et al. Anti-hyperlipidemia and antioxidant activities of *Amygdalus pedunculata* seed oil [J]. *Food & Function*, 2016, 7(12): 5018–5024.

## Compositional characteristics of Kashgar ‘Xinxin 2’ walnut oil and evaluation of its lipid metabolism-regulating and antioxidant activities in HepG2 cells

ZHENG Qiaowen<sup>1,2</sup>, SUN Yining<sup>3</sup>, DENG Weiliang<sup>1</sup>, CHEN Xiaole<sup>1</sup>, CHEN Kunzhui<sup>1</sup>,  
QIN Weiming<sup>1</sup>, SHEN Yingbin<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>

1. School of Life Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Ürümqi 830052, China;

3. College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

**Abstract: [Objective]** This study aimed to investigate the chemical composition of Kashgar ‘Xinxin 2’ walnut oil and evaluate its potential to regulate lipid metabolism and exert antioxidant effects. **[Methods]** Chromatographic techniques were used to analyze the fatty acid profile and the contents of minor bioactive components in Kashgar ‘Xinxin 2’ walnut oil. A lipid accumulation model was established in HepG2 cells. Intracellular lipid droplet formation was observed by oil red O staining, and relevant lipid metabolism and oxidative stress markers were determined. **[Results]** The relative content of unsaturated fatty acids in Kashgar ‘Xinxin 2’ walnut oil was 91.01%, with linoleic acid, oleic acid, and  $\alpha$ -linolenic acid accounting for 62.70%, 14.30%, and 14.01%, respectively, yielding an  $\omega 6/\omega 3$  ratio of 4.48 : 1. The oil was also rich in tocopherols (27.06 mg/100 g), phytosterols (332.00 mg/100 g), squalene (86.00 mg/100 g), and polyphenols (6.79 mg/100 g). Treatment with a high dose (500  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) of the walnut oil significantly inhibited intracellular lipid droplet formation in HepG2 cells, with inhibition rates of 42.19%, 42.21%, 71.96%, and 76.57% for total cholesterol (TC), triglycerides (TG), low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C), and malondialdehyde (MDA), respectively. Conversely, the levels of high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C) and the activities of superoxide dismutase (SOD) and glutathione peroxidase (GSH-Px) increased to 4.55, 3.15, and 5.10 times those of the model group, respectively. **[Conclusion]** Kashgar ‘Xinxin 2’ walnut oil is rich in unsaturated fatty acids and various minor bioactive components, and it demonstrates significant potential in regulating lipid metabolism and exerting antioxidant effects at the cellular level, suggesting its promise as a novel healthy edible oil capable of modulating lipid metabolism.

**Key words:** walnut oil; compositional characteristic; lipid metabolism; antioxidant activity; HepG2 cells

[责任编辑: 杨晓娟 申慧珊]