

## 牡丹籽油营养成分和功能作用研究进展

侯天兰<sup>1,2</sup>, 王顺利<sup>3</sup>, 米生权<sup>1</sup>, 张艳贞<sup>1</sup>

(1. 北京联合大学 生物化学工程学院, 北京 100023; 2. 黑龙江八一农垦大学 生命科学技术学院, 黑龙江 大庆 163319; 3. 中国农业科学院 蔬菜花卉研究所, 北京 100081)

**摘要:**近年来牡丹籽油因其丰富的营养成分和活性成分而受到研究者和消费者青睐,并于2011年被卫生部批准为新资源食品。牡丹籽油不仅含有丰富的必需不饱和脂肪酸,还含有植物甾醇、微量元素、丹皮酚等多种具有生理活性的物质,研究证明牡丹籽油具有抗氧化、保肝、降血脂等多种保健功能。对牡丹籽油的营养成分、功能作用等的研究现状和研究进展进行归纳总结,并对产业发展存在的瓶颈问题和前景进行分析,以期对牡丹籽油的进一步开发利用提供参考。

**关键词:**牡丹籽油;营养成分;功能作用

中图分类号:TS221;TS225.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2021)08-0051-06

### Progress on nutritional components and functional activities of peony seed oil

HOU Tianlan<sup>1,2</sup>, WANG Shunli<sup>3</sup>, MI Shengquan<sup>1</sup>, ZHANG Yanzhen<sup>1</sup>

(1. College of Biochemical Engineering, Beijing Union University, Beijing 100023, China; 2. College of Life Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China; 3. Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In recent years, peony seed oil is favored by researchers and consumers because of its rich nutrients and active ingredients, and has been approved as a kind of new resources food by Ministry of Health in 2011. Peony seed oil is not only rich in essential unsaturated fatty acids, but also contains lots of physiological active substances such as phytosterols, minerals, paeonol, etc. It has been proved that peony seed oil has many health functions, such as antioxidation, liver protection and blood lipid lowering. The research status and progress on nutritional components and functional activity of peony seed oil were summarized, and the existing bottleneck problems and prospects of the industry development were analyzed, in order to provide reference for further development and utilization of peony seed oil.

**Key words:** peony seed oil; nutritional component; functional activity

近些年我国食用油年消费量约3 200万t,其中60%~70%依赖进口,食用油安全受到严重威胁。维护粮油安全是我国的战略大局。油用牡丹因其高产、高品质、种植成本低以及籽含油率高等优势可能成为我国解决食用油短缺的一个重要突破口<sup>[1]</sup>。

2014年,国务院办公厅出台《关于加快木本油料产业发展的意见》,为我国油用牡丹产业发展作出了全面部署,油用牡丹产品被迅速摆上了全国食用油产业的大盘子。

牡丹,芍药科芍药属落叶灌木,是原产于我国的重要花卉,包含紫斑牡丹、矮牡丹、凤丹牡丹等9个野生种<sup>[1]</sup>。近年来,牡丹的油用和食用价值广受青睐,其中凤丹牡丹和紫斑牡丹是典型的油用牡丹。牡丹籽皮黑、壳厚、味苦,含油率较高,可达24.12%~37.83%<sup>[2]</sup>,稍高于大豆。牡丹籽油因其营养丰富、独特,又有医疗保健作用,有“液体黄金”之称,2011年牡丹籽油被卫生部批准为新资源食品。

本文对牡丹籽油的营养成分、功能作用方面的

收稿日期:2020-10-04;修回日期:2020-10-15

基金项目:北京联合大学人才强校优选计划(BPHR2018CZ01);北京市自然科学基金(5153025)

作者简介:侯天兰(1997),女,硕士研究生,研究方向为疾病分子机理及生物活性物质研发(E-mail)1656156679@qq.com。

通信作者:张艳贞,教授(E-mail)yanzhen@buu.edu.cn;王顺利,副研究员(E-mail)wangshunli@caas.cn。

研究成果和产业发展瓶颈问题进行综述和分析,以期为牡丹籽油的进一步开发利用及走向千家万户的餐桌提供参考和依据。

## 1 牡丹籽油的营养成分

### 1.1 不饱和脂肪酸

牡丹籽油含有丰富的 $\alpha$ -亚麻酸、油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸,其中 $\alpha$ -亚麻酸含量高达40%左右<sup>[3]</sup>。樊永康等<sup>[4]</sup>对不同工艺提取的牡丹籽油脂肪酸组成的比较分析发现,牡丹籽油不饱和脂肪酸含量为88.21%~96.62%,其中 $\alpha$ -亚麻酸含量为34.21%~74.09%,亚油酸含量为13.65%~33.62%。张晓等<sup>[5]</sup>采用气相色谱法分析不同产区、不同品种牡丹籽油的脂肪酸组成,结果发现,牡丹籽油不饱和脂肪酸含量为88.2%~93.5%,其中单不饱和脂肪酸含量为21.0%~43.2%,多不饱和脂肪酸含量为45.6%~71.8%,必需脂肪酸亚油酸含量为16.5%~33.7%、 $\alpha$ -亚麻酸含量为28.1%~46.9%。赵能等<sup>[6]</sup>对滇牡丹籽油和凤丹牡丹籽油脂肪酸组成进行了测定,发现二者不饱和脂肪酸含量分别为88.62%、85.48%。韩继刚等<sup>[7]</sup>综述报道牡丹籽油中不饱和脂肪酸含量达到83.05%~90.00%,其中 $\alpha$ -亚麻酸含量达到31.56%~66.85%。程安玮等<sup>[8]</sup>综述报道牡丹籽油中不饱和脂肪酸含量达90%以上,其中 $\alpha$ -亚麻酸含量超过40%,是橄榄油中的60倍。不同提取工艺和测定方法所测牡丹籽油中不饱和脂肪酸含量之间存在较大差异,推测除了与牡丹品种和种植环境有关外,提取体系对分子结构的影响、不同测定方法的灵敏度和精确度等都会影响最终的测定结果。但总体来看,牡丹籽油不饱和脂肪酸含量高,尤其是人体必需脂肪酸 $\alpha$ -亚麻酸和亚油酸含量较为丰富。

高含量的 $\alpha$ -亚麻酸是牡丹籽油营养和保健功能的重要物质基础<sup>[9]</sup>。 $\alpha$ -亚麻酸是人体所有 $\omega$ -3多不饱和脂肪酸的前体物质,可在人体内经多种酶作用合成二十碳五烯酸(EPA),再经过 $\beta$ -氧化转换成二十二碳六烯酸(DHA)<sup>[10]</sup>。其中,EPA是体内三烯前列腺素的前体物质,DHA是大脑、视网膜等神经系统磷脂的主要成分,它们对人体生长发育和正常代谢起重要作用。另外, $\alpha$ -亚麻酸具有抗动脉粥样硬化、预防心脑血管疾病、减肥、降血脂<sup>[10-11]</sup>、抗脂肪形成与累积、抗炎、预防糖尿病及其并发症等作用<sup>[12]</sup>。

### 1.2 不皂化物

牡丹籽油除了含有大量的不饱和脂肪酸外,还

含有少量的不皂化物,如甾醇类、色素、脂溶性维生素等。王洋等<sup>[13]</sup>对牡丹籽油中的不皂化物进行了GC-MS分析,结果发现,牡丹籽油中含有甾醇、角鲨烯、 $\gamma$ -VE、1,2,3,4,4a,10a-六氢-6-羟基-1,1,4-三甲基-7-(1-甲基乙基),9,10-菲二酮、岩皂甾醇以及2,4-亚甲基-9,19-cyclolanostan-3-醇,其中以甾醇类化合物为主。毛程鑫等<sup>[14]</sup>利用HPLC测定牡丹籽油中维生素E的含量,结果显示,牡丹籽油中维生素E的总含量为56.30 mg/100 g,且主要以 $\gamma$ -生育酚为主,含量为48.42 mg/100 g。

植物甾醇是合成维生素D<sub>3</sub>的重要中间体,并具有促进胆固醇降解代谢<sup>[15]</sup>、抗大肠癌<sup>[16]</sup>等药用和保健价值;角鲨烯是一种有效的单线态氧淬灭剂,可以保护机体皮脂免受紫外线引起的过氧化反应<sup>[17]</sup>,同时还具有降血脂<sup>[18]</sup>、保护细胞<sup>[19]</sup>等功能;维生素E是重要的天然抗氧化剂,在体内发挥强抗氧化作用,具有延长红细胞寿命、抗衰老、提高免疫力等多种生理功能。

### 1.3 微量元素

牡丹籽油含有大量人体所需的微量元素。翟文婷等<sup>[20]</sup>采用ICP-MS测定了牡丹籽油中的微量元素,结果表明,牡丹籽油微量元素中Ca、Na含量最高,分别为156.4、145.9 mg/kg,其次为Fe、K、Zn和Mg,含量在20~60 mg/kg之间,Cu含量最低,为0.73 mg/kg。

微量元素虽然在人体中的含量不到人体体重的万分之一,却具有强大的生物学作用和生理功能,主要表现为协助输送宏量元素,作为酶的组成成分或激活剂,在激素和维生素中起独特作用,影响核酸代谢等<sup>[21]</sup>,甚至具有一定的临床诊断和治疗价值。因此,牡丹籽油可能具有新的比较安全的药用与食用价值。

### 1.4 其他成分

牡丹籽油还含有丹皮酚、皂苷、多糖、有机酸、黄酮等100多种具有生理活性的营养物质,具有降血压、血脂、血糖,抗氧化,增强免疫力,保护肝脏,软化血管,延缓衰老,促进新陈代谢,调节激素水平等生理功能<sup>[22]</sup>。陈程等<sup>[23]</sup>采用HPLC测定了牡丹籽油中有机酸类成分的含量,结果表明,牡丹籽油中的没食子酸、齐墩果酸的含量分别为0.408 5、110.12  $\mu$ g/mL。这些成分特有的化学结构以及各成分之间可能存在的“协同”或“拮抗”作用,是牡丹籽油具有多种生理调节功能的物质基础。

## 2 牡丹籽油的功能作用

### 2.1 抗氧化作用

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)是一种很稳定的氮中心的自由基, DPPH 自由基的清除能力是反映抗氧化活性的经典指标。张萍<sup>[24]</sup>采用 DPPH 法和过氧化值法测定了牡丹籽油的抗氧化活性,结果表明,掺杂牡丹籽油的花生油过氧化值明显低于纯花生油,并且掺入牡丹籽油的量越少,过氧化值越高,说明牡丹籽油具有一定的体外抗氧化功效。饶鸿雁<sup>[25]</sup>实验证明牡丹籽油的抗氧化活性明显强于核桃油,牡丹籽油 DPPH 自由基清除的半最大效应值( $EC_{50}$ )为 0.13 g/mL,核桃油 DPPH 自由基清除的  $EC_{50}$  为 0.25 g/mL,质量浓度为 0.3 g/mL 的核桃油 DPPH 自由基清除能力与质量浓度为 0.2 g/mL 的牡丹籽油基本相当。杨鹿等<sup>[26]</sup>研究显示牡丹籽油的 DPPH 自由基清除率高于橄榄油。翟文婷等<sup>[20]</sup>通过 DPPH 自由基清除实验评估牡丹籽油的抗氧化功效,得出牡丹籽油 DPPH 自由基清除的  $EC_{50}$  为 29.30 mg/mL。刘丛彬等<sup>[27]</sup>通过自由基清除实验和脂代谢紊乱模型大鼠体内实验研究牡丹籽油体内抗氧化作用,结果发现:牡丹籽油清除自由基能力与其浓度成正比;与模型对照组比较,牡丹籽油中、高剂量处理组超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)酶比活力有显著提高,丙二醛含量显著降低,证明牡丹籽油具有明显的体内抗氧化作用。赵能等<sup>[6]</sup>比较了滇牡丹籽油和凤丹牡丹籽油的抗氧化活性,结果发现,二者清除 DPPH 自由基能力均高于橄榄油,滇牡丹籽油清除 DPPH 自由基能力稍低于凤丹牡丹籽油,而抗酪氨酸酶活性强于凤丹牡丹籽油,这可能有品种间遗传基因差异的影响,也可能有种植环境和采收时间的影响。

### 2.2 保肝作用

翟文婷等<sup>[28]</sup>研究表明,牡丹籽油对四氯化碳诱导的小鼠急性肝损伤具有明显的保护作用。对于模型小鼠,在 1.3~12 g/(kg·d) 剂量范围内连续灌胃牡丹籽油 4 周,可显著降低小鼠血清的谷草转氨酶和谷丙转氨酶水平( $P < 0.01$ );中等剂量(4.0 g/(kg·d))的作用强度甚至显著强于天然抗氧化剂丹酚酸 A( $P < 0.01$ ),并可显著降低小鼠肝脏指数和肝脏丙二醛(MDA)水平,同时提高小鼠肝脏的 SOD 和 GSH-Px 水平。彭安芳等<sup>[29]</sup>采用环磷酰胺(CTX)建立小鼠肝损伤模型,以灌胃 0.7 mL 生理盐水和 30 mg/kg CTX 为模型小鼠,以联苯双酯为阳性

对照组,以牡丹籽油低、中、高 3 个剂量为实验组,结果发现,与模型组相比,除牡丹籽油低剂量组对谷草转氨酶(AST)的降低无显著作用( $P > 0.05$ )外,阳性对照组和牡丹籽油中、高剂量组对 AST、谷丙转氨酶(ALT)、MDA 水平均有显著降低作用( $P < 0.05$ ),说明牡丹籽油对环磷酰胺导致的小鼠肝损伤有明显的保护效果。因此,对易受肝病困扰的人群来说,选择牡丹籽油代替部分食用油可能会大有裨益。

### 2.3 降血脂作用

2012 年全国调查结果显示,中国成人血脂异常总体患病率高达 40.40%。以低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)或总胆固醇(TC)升高为特点的血脂异常是动脉粥样硬化性心血管疾病(ASCVD)重要的危险因素;其他类型的血脂异常,如甘油三酯(TG)增高或高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)降低与 ASCVD 发病危险的升高也存在一定的关联<sup>[30]</sup>。王芸<sup>[31]</sup>研究了牡丹籽油对高脂模型大鼠的降脂作用,发现灌胃各剂量牡丹籽油的大鼠血清中 TC 水平都更低,而且中、高剂量的牡丹籽油还能降低 TG 水平,同时提高 HDL-C 水平。原海忠等<sup>[32]</sup>对牡丹籽油干预高血压合并高脂血症的临床效果进行了研究,将 110 例高血压合并高脂血症患者随机分为观察组和对照组,对照组口服辛伐他汀片和苯磺酸氨氯地平片,观察组口服牡丹籽油软胶囊和苯磺酸氨氯地平片,连续用药 30 d 后检测 2 组患者的临床总有效率、血压、血脂及不良反应。结果显示,30 d 后 2 组患者收缩压(SBP)、舒张压(DBP)和 TC、TG、LDL-C 以及超敏 C 反应蛋白(hs-CRP)水平显著降低,且观察组显著低于对照组( $P < 0.01$ ),证明了牡丹籽油联合西医基础用药对高血压合并高脂血症患者在临床疗效、血压、血脂以及 hs-CRP 水平方面具有较好的改善作用。苏建辉<sup>[33]</sup>研究显示:与猪油和红花籽油相比,牡丹籽油可显著降低大鼠体重和血脂;荧光定量 PCR 结果进一步揭示牡丹籽油可显著性下调固醇调节元件结合蛋白(SREBP1C)、脂肪酸合成酶(FAS)和乙酰辅酶 A 羧化酶(ACC)的 mRNA 丰度( $P < 0.05$ ),升高过氧化物酶体增殖物激活型受体(PPAR $\alpha$ )、乙酰辅酶 A 氧化酶(AOX)和解耦连蛋白 2(UCP-2)的 mRNA 丰度( $P < 0.05$ ),可见牡丹籽油通过抑制脂肪合成和促进脂肪酸 $\beta$ -氧化降低了血脂水平。

### 2.4 降血糖作用

董振兴等<sup>[34]</sup>用尾端静脉注射四氧嘧啶的方法

建立高血糖小鼠模型,并以牡丹籽油灌胃(1.95 ~ 7.8 g/(kg·d))30 d,考察牡丹籽油对高血糖小鼠血糖的降低作用。结果发现,牡丹籽油各剂量组均可显著降低小鼠血糖水平,并呈现一定的剂量效应。苏建辉<sup>[33]</sup>研究牡丹籽油对链脲佐菌素(STZ)诱导的糖尿病小鼠体重、血糖水平和糖耐量、胰岛素、糖化血红蛋白等的影响时发现,牡丹籽油(40 mg/(kg·d))一方面通过抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶和 $\alpha$ -淀粉酶活性延缓小肠对碳水化合物的吸收显著性降低血糖( $P < 0.05$ ),另一方面通过显著促进胰岛素释放、肝脏糖原合成及降低糖化血红蛋白水平降低血糖( $P < 0.05$ )。

## 2.5 增强免疫作用

朱宗磊<sup>[35]</sup>通过给予小鼠不同剂量的牡丹籽油软胶囊30 d,测定小鼠相关指标,探讨牡丹籽油软胶囊在辅助降血脂和提高机体免疫力方面的功能。结果发现,牡丹籽油对小鼠脾脏指数、胸腺指数及NK细胞活性无影响,对单核-巨噬细胞吞噬功能、抗体生成细胞数具有较明显的影响,小鼠血清抗体体积数显著增加,说明牡丹籽油可以一定程度增强小鼠免疫力。孙燕等<sup>[36]</sup>给21日龄ICR清洁级雄性小鼠连续灌胃不同剂量的牡丹籽油及牡丹籽油复合物20 d,测定并分析小鼠血清NO、NOS,脾脏白介素-2(IL-2)、IL-6、肿瘤坏死因子- $\alpha$ (TNF- $\alpha$ )和肠黏膜分泌性免疫球蛋白(sIgA)的变化。结果发现,牡丹籽油可明显提高小鼠血清中NO水平和IL-2水平,明显降低脾脏TNF- $\alpha$ 水平,并能显著提高肠道黏膜sIgA水平,说明牡丹籽油具有一定的提高动物机体免疫力的作用。

## 2.6 防晒作用

紫外线中对人体皮肤伤害最大的是UVA和UVB,UVA波长为320~400 nm,UVB波长为275~320 nm。张萍<sup>[24]</sup>实验发现牡丹籽油的吸收波长为200~420 nm,包含了UVA和UVB的波长范围,可以起到一定的防晒作用。高婷婷<sup>[37]</sup>将牡丹籽油与葵花籽油、花生油、油茶籽油、玉米油进行紫外吸收对比实验,发现牡丹籽油对310~370 nm紫外线的吸收能力远高于其他4种植物油,证实牡丹籽油有良好的防晒潜力,可以研发为防晒化妆品。

## 2.7 其他功能

### 2.7.1 抗癌作用

邹佳文等<sup>[38]</sup>以结肠癌细胞HCT116为模型,评估了牡丹籽油对HCT116结肠癌细胞体外增殖和细胞周期的影响。结果表明,牡丹籽油能显著

抑制HCT116细胞的增殖和迁移,增强细胞周期相关基因p15、p21、p53的mRNA的相对表达( $P < 0.01$ ),调控细胞周期G1/S期关键靶基因的表达使细胞周期阻滞在G1/S期,并能抑制MAPK信号通路的激活,显著抑制其下游转录因子AP-1和NF- $\kappa$ B的活性,说明牡丹籽油可能通过抑制MAPK信号通路/AP-1和NF- $\kappa$ B活性下调,调控细胞周期相关基因的表达,从而抑制结肠癌细胞的增殖。Xiao等<sup>[39]</sup>通过MTT法对牡丹籽提取物中15种化合物进行了体外抗癌活性评价,结果表明,提取物中苯乙烯类化合物对5种肿瘤细胞和酪氨酸酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶和乙酰胆碱酯酶活性均有抑制作用。

### 2.7.2 治疗皮肤烫伤

陈伟等<sup>[40]</sup>为评价牡丹籽油对大鼠烫伤所致创面的治疗作用,利用SD雄性大鼠复制烫伤模型,以牡丹籽油给药治疗14 d,观察创面的变化。结果发现,牡丹籽油能有效减少大鼠烫伤后创面面积,减少炎症细胞,增加新生血管,促进表皮再生,促进皮肤组织受损超微结构的改善,说明牡丹籽油对皮肤烫伤有显著治疗效果。

### 2.7.3 治疗便秘

原海忠等<sup>[41]</sup>选取100例中老年便秘患者,随机分为治疗组和对照组,对照组口服麻仁润肠丸,治疗组口服牡丹籽油软胶囊,考察牡丹籽油对老年便秘的临床治疗作用。结果表明,在用牡丹籽油治疗2周后,治疗组症状评分较治疗前降低,总有效率为88.0%,与对照组无统计学差异( $P > 0.05$ ),说明牡丹籽油能改善中老年便秘患者的症状,值得临床推广应用。

## 3 牡丹籽油产业发展瓶颈

### 3.1 品质判定

如前所述,不同批次、不同品种和产地所得牡丹籽油营养成分的种类相对稳定,但含量差异较大,造成品质判定难度加大。这就需要对牡丹籽油制订相应适用的品质评价标准,这样才能激发厂商投入,从功效营养成分入手改善加工工艺。

### 3.2 功能作用与营养成分的关系研究

目前的研究多数采用“油”这一包含各种营养成分的“复杂”成分,研究结果不管是体内还是体外、即便是人体试食实验也不能明确真正起作用的化学成分是哪一种或哪几种,这与未来高端保健功能食品所要求的功效因子明确方向不完全相符,这可能受活性成分提取纯化工艺发展的限制,也可能受机体功能作用通路研究技术的限制。

### 3.3 优良油用牡丹品种选育和规范化种植、采收

如前分析,不同实验室研究功能作用强弱的不同,有品种间遗传基因差异的影响,也可能有种植环境和采收时间的影响。因此,还需进一步加强油用牡丹优良品种选育工作和规范化种植、科学化采收。

## 4 应用前景

作为新兴食用油,牡丹籽油因其丰富的不饱和脂肪酸、维生素E、植物甾醇及微量元素等营养成分和抗氧化、保肝、降血脂等功能作用具有广泛的应用前景。作为人口大国,我国对食用油的需求量大,植物油进口依存度较高。因此,大力发展牡丹籽油不仅可以为国家粮油安全提供保障,而且牡丹还能防风固沙、保护水源,其综合利用产业链长,附加值高,具有很好的经济效益、生态效益和社会效益。近些年来,越来越多的人更加关注食品的营养价值和保健功能,随着牡丹籽油加工工艺日益成熟和产量的提升,牡丹籽油定会作为一种高级保健性油脂走向人们的餐桌,满足人们大健康需求。

### 参考文献:

- [1] WANG S L, BERUTO M, XUE J Q, et al. Molecular cloning and potential function prediction of homologous SOCl genes in tree peony[J]. *Plant Cell Rep*, 2015, 34: 1459 - 1471.
- [2] 王顺利,任秀霞,薛璟祺,等. 牡丹籽油成分、功效及加工工艺的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(3): 139 - 146.
- [3] MAO Y Y, HAN J G, TIAN F, et al. Chemical composition analysis, sensory, and feasibility study of tree peony seed[J]. *Food Sci*, 2017, 82: 553 - 561.
- [4] 樊永康,项婷,王微,等. 牡丹籽油营养成分及加工工艺研究进展[J]. *食品与机械*, 2018, 34(10): 196 - 201.
- [5] 张晓,王佳雅,张丹. 牡丹籽油的理化指标、卫生指标和脂肪酸组成分析[J]. *现代食品*, 2018(4): 82 - 85, 98.
- [6] 赵能,肖丰坤,施蕊,等. 滇牡丹籽油与凤丹牡丹籽油品质及活性对比研究[J]. *中国油脂*, 2016, 41(6): 92 - 95.
- [7] 韩继刚,李晓青,刘焯,等. 牡丹油用价值及其应用前景[J]. *粮食与油脂*, 2014(5): 21 - 25.
- [8] 程安玮,孙金月,王维婷,等. 牡丹籽油的研究进展[J]. *食品科学技术学报*, 2016, 34(3): 79 - 84.
- [9] 杨昕艳. 牡丹籽油的研究与开发[J]. *农产品加工*, 2017(9): 69 - 72.
- [10] KIM K, NAM Y A, KIM H S, et al. *Alpha* - linolenic acid: nutraceutical, pharmacological and toxicological evaluation[J]. *Food Chem Toxicol*, 2014, 70: 163 - 178.
- [11] 李加兴,李忠海,刘飞,等.  $\alpha$  - 亚麻酸的生理功能及其富集纯化[J]. *食品与机械*, 2009(5): 172 - 177.
- [12] ZHANG W, LI R, LI J, et al. *Alpha* - linolenic acid exerts an endothelial protective effect against high glucose injury via PI3K/Akt pathway[J]. *Plos One*, 2013, 8(7): 1 - 7.
- [13] 王洋,纪姝晶,毛文岳,等. GC - MS法分析葵花籽蜡和牡丹籽油的不皂化物及其中的二十八烷醇[J]. *河北农业大学学报*, 2012, 35(4): 104 - 107.
- [14] 毛程鑫,李桂华,李普选,等. 牡丹籽油的脂肪酸组成及理化特性分析[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(4): 142 - 146.
- [15] CLEGHORN C L, SKEAFF C M, MANN J, et al. Plant sterol - enriched spread enhances the cholesterol - lowering potential of a fat - reduced diet[J]. *Eur J Clin Nutr*, 2003, 57: 170 - 176.
- [16] WESTSTRATE J A, AYESH R, BAUER - PLANK C, et al. Safety evaluation of phytosterol esters. Iv. Faecal concentration of bile acids and neutral sterols in healthy normolipidaemic volunteers consuming a controlled diet either with or without a phytosterol ester - enriched margarine[J]. *Food Chem Toxicol*, 1993, 37: 1063 - 1071.
- [17] KELLY G S. Squalene and its potential clinical uses[J]. *Alt Med Rev*, 1999, 4(1): 30 - 36.
- [18] GUILLÉN N, ACÍN S, NAVARRO M A, et al. Squalene in a sex - dependent manner modulates atherosclerotic lesion which correlates with hepatic fat content in apoE - knockout male mice [J]. *Atherosclerosis*, 2008, 197(1): 72 - 83.
- [19] BULLON P, QUILES J L, MORILLO J M, et al. Gingival vascular damage in atherosclerotic rabbits: hydroxytyrosol and squalene benefits [J]. *Food Chem Toxicol*, 2009, 47(9): 2327 - 2331.
- [20] 翟文婷,朱献标,李艳丽,等. 牡丹籽油化学成分的抗氧化活性研究[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2013, 26(2): 147 - 150.
- [21] 刘波静. 粮油食品中微量元素的分析及营养机制的研究[J]. *中国粮油学报*, 2001, 16(3): 1 - 9.
- [22] 郭乃妮,王天瑞,刘榜迪,等. 牡丹籽油的提取及应用研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2019, 27(3): 20 - 23.
- [23] 陈程,罗国平,张存芳,等. HPLC法测定牡丹籽油中2种有机酸类成分的含量[J]. *中国食品添加剂*, 2018(2): 177 - 180.
- [24] 张萍. 牡丹籽油的制备、纯化、成分分析及功效评价[D]. 北京:首都师范大学, 2009.
- [25] 饶鸿雁. 牡丹籽油的提取及其抗氧化活性研究[D]. 济南:齐鲁工业大学, 2015.
- [26] 杨鹿,王洪新,苏建辉,等. 牡丹籽油优势抗氧化剂研究[J]. *中国油脂*, 2015, 40(2): 46 - 49.
- [27] 刘丛彬,宣自华,董振兴,等. 牡丹籽油体外及对脂代谢紊乱大鼠体内抗氧化作用的研究[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(6): 53 - 56.

- [2] TURNWALD S E, LORIER M A, WRIGHT L J, et al. Oleic acid oxidation using hydrogen peroxide in conjunction with transition metal catalysis[J]. *J Mater Sci* 1998, 17(15): 1305 - 1307.
- [3] 崔杨棣. 壬二酸性质、制备与应用[J]. *粮食与油脂*, 2004(9): 3 - 6.
- [4] JOHNSON S A. *Candida (Monilia) albicans*: effect of amino acids, glucose, pH, chlortetracycline (aureomycin), dibasic sodium and calcium phosphates, and anaerobic and aerobic conditions on its growth[J]. *AMA Arch Dermatol Syphilol*, 1954, 70(1): 49 - 60.
- [5] 朱琬莹, 曾建立, 杜泽学. 壬二酸生产工艺进展[J]. *石油化工*, 2019, 48(4): 411 - 418.
- [6] LU M, PENG L, XIE Q, et al. Solvent - free oxidative cleavage of epoxy fatty acid methyl esters by a "release and capture" catalytic system[J]. *Green Chem*, 2019, 21(3): 560 - 566.
- [7] 李平辉, 刘跃进. 相转移催化氧化法合成壬二酸的研究[J]. *石油炼制与化工*, 2009, 40(6): 21 - 25.
- [8] 宋河远, 陈静, 童进. 油酸相转移催化氧化制备壬二酸的研究[J]. *化学试剂*, 2005, 27(2): 65 - 67, 108.
- [9] LI X, SYONG J C P, ZHANG Y. Sodium stannate promoted double bond cleavage of oleic acid by hydrogen peroxide over a heterogeneous  $WO_3$  catalyst [J]. *Green Chem*, 2018, 20(15): 3619 - 3624.
- [10] 郑敏睿, 张猛, 胡立红, 等. 磷钨酸季铵盐催化制备环氧化桐油甲酯及其性能研究[J]. *林产化学与工业*, 2017, 37(3): 61 - 66.
- [11] 高伟琳, 朱凯. 过氧磷酸季铵盐催化合成环氧柏木烷[J]. *日用化学工业*, 2019, 49(2): 108 - 112.
- [12] 徐常龙, 曹小华, 周德志, 等. 磷钨酸季铵盐的制备、表征及催化合成己二酸[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 49(3): 402 - 405.
- [13] 朱超, 雷梦, 冯波, 等. 磷钨杂多酸季铵盐催化合成环氧大豆油的研究[J]. *粘接*, 2016(8): 39 - 42.
- [14] ANTONELLI E, D'ALOISIO R, GAMBARO M, et al. Efficient oxidative cleavage of olefins to carboxylic acids with hydrogen peroxide catalyzed by methyltrioctylammonium tetrakis (oxodiperoxotungsto) phosphate (3 -) under two - phase conditions. Synthetic aspects and investigation of the reaction course[J]. *J Org Chem*, 1998, 63(21): 7190 - 7206.
- [15] 冯树波, 杨华, 郑二丽, 等. 磷钨杂多酸季铵盐催化脂肪酸甲酯环氧化[J]. *分子催化*, 2010, 24(3): 222 - 227.
- [16] KHLEBNIKOVA T B, PAI Z P, FEDOSEEVA L A, et al. Catalytic oxidation of fatty acids. II. Epoxidation and oxidative cleavage of unsaturated fatty acid esters containing additional functional groups [J]. *React Kinet Catal L*, 2009, 98(1): 9 - 17.
- [17] 赵杰, 安腾奇, 王明明, 等. 异硬脂酸制备工艺的研究[J]. *中国油脂*, 2016, 41(9): 74 - 78.
- [18] PIZZIO L, ROMANELLI G, VAZQUEZ P, et al. Keggin heteropolyacid - based catalysts for the preparation of substituted ethyl  $\beta$  - arylaminocrotonates, intermediates in the synthesis of 4 - quinolones [J]. *Appl Catal A - Gen* 2006, 308: 153 - 160.
- [19] LOPEZ - SALINAS E, HERNANDEZ - CORTEZ J G, SCHIFTER I, et al. Thermal stability of 12 - tungstophosphoric acid supported on zirconia [J]. *Appl Catal A - Gen*, 2000, 193(1/2): 215 - 225.
- (上接第 55 页)
- [28] 翟文婷, 朱献标, 李艳丽, 等. 牡丹籽油对小鼠急性肝损伤的保护作用[J]. *中国油脂*, 2013, 38(11): 43 - 45.
- [29] 彭安芳, 郭慧鹏, 冯秀宽, 等. 牡丹籽油对环磷酰胺致小鼠遗传毒性和肝损伤的保护作用[J]. *中国油脂*, 2018, 43(10): 74 - 76.
- [30] 中国成人血脂异常防治指南(2016年修订版)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2017.
- [31] 王芸. 牡丹籽油营养成分及功能作用的研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [32] 原海忠, 杨建业, 冯国宝, 等. 牡丹籽油治疗高血压合并高脂血症的临床效果及对血脂水平的改善作用[J]. *光明中医*, 2019, 34(17): 2602 - 2605.
- [33] 苏建辉. 牡丹籽油及其复方降血糖、降血脂活性及机理研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2016.
- [34] 董振兴, 彭代银, 宣自华, 等. 牡丹籽油降血脂、降血糖作用的实验研究[J]. *安徽医药*, 2013, 17(8): 1286 - 1289.
- [35] 朱宗磊. 牡丹籽油软胶囊稳定性及功能研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [36] 孙燕, 李成忠, 左伟勇. 牡丹籽油对小鼠免疫功能的影响[J]. *上海农业学报*, 2018, 34(6): 65 - 68.
- [37] 高婷婷. 牡丹籽油成分分析及储藏条件研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [38] 邹佳文, 罗依, AKAN O D, 等. 牡丹籽油抑制结肠癌细胞 HCT116 的体外增殖和调控细胞周期的作用研究[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(5): 1 - 8.
- [39] XIAO T, GUO S, ZHANG S S, et al. Chemical characterization of main bioactive constituents in *Paeonia ostii* seed meal and GC - MS analysis of seed oil [J/OL]. *J Food Biochem*, 2020, 44: e13088 [2020 - 05 - 30]. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13088>.
- [40] 陈伟, 叶知全, 张照英, 等. 牡丹籽油对大鼠烫伤模型的治疗作用[J]. *中成药*, 2017, 39(8): 1709 - 1712.
- [41] 原海忠, 杨建业, 冯国宝, 等. 牡丹籽油治疗中老年便秘的临床观察[J]. *中国民间疗法*, 2019, 27(17): 39 - 40.