

黄粉虫油理化性质及营养特性的研究

郑自奋^{1,2}, 崔芸¹, 林勇³, 刘勇³, 刘祎帆¹, 肖更生¹, 余元善^{2*}, 马路凯^{1,4*}

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院/农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广州 510225; 2. 广东省农业科学院, 蚕业与农产品加工研究所, 广州 510225; 3. 广东泽和诚生物技术有限公司, 广州 510225; 4. 西藏自治区农牧科学院, 农产品开发与食品科学研究所, 拉萨 850000)

摘要: **目的** 研究黄粉虫油的理化性质与营养特性。**方法** 采用索氏抽提法提取黄粉虫油, 运用气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对黄粉虫油的脂肪酸组成和挥发性成分进行分析, 对其理化性质、脂溶性伴随物含量及抗氧化活性进行研究。**结果** 黄粉虫含油量为(29.28±0.21)%, 酸价(KOH)和过氧化值均符合食用油标准, 分别为(0.94±0.06) mg/g 和(4.54±0.29) mmol/kg, 茴香胺值为6.04±0.68, 共轭二烯值为6.97±0.23; 黄粉虫油不饱和脂肪酸的含量高达(81.68±1.95)%, 主要是油酸[(43.41±1.27)%]和亚油酸[(36.34±0.59)%]; 黄粉虫油中的主要脂溶性伴随物为 β -谷甾醇[(12.81±0.10) mg/100 g]、角鲨烯[(35.20±0.09) mg/100 g]和胆固醇[(70.52±0.12) mg/100 g]; 黄粉虫油对1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]阳离子自由基均有一定的清除效果; 黄粉虫油中共鉴定出40种挥发性成分, 主要包括烃、醛、醇、杂环、酯以及胺类物质, 杂环类物质是主要的气味来源, 为黄粉虫油脂提供特殊的香味。**结论** 黄粉虫含油量较高, 油脂脂肪酸组成较好, 营养物质丰富, 可作为一种潜在的油料资源。**关键词:** 黄粉虫油; 理化性质; 脂溶性伴随物; 抗氧化活性; 脂肪酸组成; 挥发性成分

Study on physicochemical property and nutritive peculiarity of *Tenebrio molitor* oil

ZHENG Zi-Fen^{1,2}, CUI Yun¹, LIN Yong³, LIU Yong³, LIU Hui-Fan¹,
XIAO Geng-Sheng¹, YU Yuan-Shan^{2*}, MA Lu-Kai^{1,4*}

(1. College of Light Industry and Food Science, Zhongkai University of Agriculture and Engineering/Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Green Processing and Intelligent Manufacturing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

基金项目: 国家自然科学基金项目(32001622)、广东省自然科学基金面上项目(2021A1515011060)、广东省区域联合基金青年基金项目(2019A1515110823)、广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室项目(2021B1212040013)、广东省普通高校青年创新人才项目(KA2001957)、2021年仲恺农业工程学院创新创业训练计划项目(X202111347157)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32001622), the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2021A1515011060), the Youth Fund Project of Guangdong Regional Joint Fund (2019A1515110823), the Open Foundation of Guangdong Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology (2021B1212040013), the Young Innovative Talents Program of Guangdong Universities (KA2001957), and the 2021 Innovation and Entrepreneurship Training Program of Zhongkai University of Agriculture and Engineering (X202111347157)

*通信作者: 余元善, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品工程。E-mail: 499072725@qq.com

马路凯, 博士, 副教授, 主要研究方向为油脂营养与安全。E-mail: m1991lk@163.com

*Corresponding author: YU Yuan-Shan, Ph.D, Professor, Institute of Sericulture and Agro-products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, No.133, Dongguan Zhuang Yiheng Road, Tianhe District, Guangzhou 510225, China. E-mail: 499072725@qq.com

MA Lu-Kai, Ph.D, Associate Professor, College of Light Industry Food, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, No.24, Dongsha Street, Haizhu District, Guangzhou 510225, China. E-mail: m1991lk@163.com

Guangzhou 510225, China; 2. Institute of Sericulture and Agro-products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510225, China; 3. Guangdong Zehecheng Biotechnology Co., Ltd., Guangzhou 510225, China; 4. Institute of Agricultural Product Development and Food Science, Tibet Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, China)

ABSTRACT: Objective To study the physicochemical property and nutritive peculiarity of *Tenebrio molitor* oil. **Methods** *Tenebrio molitor* oil was extracted by Soxhlet extraction method. The fatty acid composition and volatile components of *Tenebrio molitor* oil were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and its physicochemical property, lipid soluble concomitant content and antioxidant activity were studied. **Results** The oil content of *Tenebrio molitor* was (29.28±0.21)%, the acid value (KOH) and peroxide value were (0.94±0.06) mg/g and (4.54±0.29) mmol/kg, respectively, and the anisidine value was 6.04±0.68. Conjugate diene value was 6.97±0.23. The unsaturated fatty acid content of *Tenebrio molitor* oil was as high as (81.68±1.95)%, mainly oleic acid [(43.41±1.27)%] and linoleic acid [(36.34±0.59)%]. The main lipid soluble concomitant compounds in *Tenebrio molitor* oil were β -sitosterol [(12.81±0.10) mg/100 g], squalene [(35.20±0.09) mg/100 g] and cholesterol [(70.52±0.12) mg/100 g]. *Tenebrio molitor* oil had certain scavenging effect on 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) free radical and 2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonate)(ABTS) cation free radical. A total of 40 volatile components were identified in *Tenebrio molitor* oil, including hydrocarbons, aldehydes, alcohols, heterocyclic substances, esters and amines. Heterocyclic substances were the main odor sources, providing special flavor for *Tenebrio molitor* oil. **Conclusion** *Tenebrio molitor* has high oil content, good fatty acid composition and rich nutrients, which can be used as a potential oil resource.

KEY WORDS: *Tenebrio molitor* oil; physicochemical property; lipid soluble concomitant; antioxidant activity; fatty acid composition; volatile component

0 引言

黄粉虫俗称面包虫,原产于欧洲和北美洲,呈金黄色圆筒状,具有生长迅速、繁殖周期短的优点。其富含蛋白质,含有多种氨基酸,其中人体必需的氨基酸含量占氨基酸总量的 40%左右,是一种潜在的优质蛋白源^[1-2]。自 20 世纪 50 年代驯养至今,黄粉虫在我国养殖规模逐年增大,已成为最理想的人工饲养饲料昆虫之一,在我国饲料行业占有重要地位^[3-4]。

黄粉虫富含油脂,具有降低血脂胆固醇、健脑益智、调节免疫力等功效^[5-6]。油脂容易导致饲料氧化变质,为了延长黄粉虫蛋白饲料的储藏期,在加工的过程需要去除含量较高的油脂。因此,油脂成为黄粉虫加工过程中的副产物,如何有效利用黄粉虫加工过程产生大量的油脂副产物已成为行业急需解决的问题,如果不对加工副产物进行有效利用,不仅会造成资源浪费,也不利于环境友好型社会的建立。目前对黄粉虫的研究主要集中于蛋白质和氨基酸的提取^[7],对黄粉虫油的研究较少,且关于黄粉虫油的理化特性少见报道。因此本研究以黄粉虫为研究对象,采用索氏提取法提取油脂,对黄粉虫油的基础理化指标、脂肪酸组成、脂溶性伴随物及挥发性物质组成进行分析,并与多种动植物油进行对比,以期黄粉虫油作为食用油资源提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄粉虫购于广东泽和诚生物科技有限公司;黄鳍金枪鱼鱼头购于广东南洋渔业公司;猪油购于浙江金恩食品科技股份有限公司;花生油、大豆油购于益海(广州)粮油工业有限公司;橄榄油购于莱阳鲁花浓香花生油有限公司。

正己烷、异辛烷、无水乙醇、冰乙酸、石油醚、硫代硫酸钠、碘化钾、氢氧化钾、过硫酸钾、2,4,6-三甲基吡啶、维生素 C (vitamin C, VC)、特丁基对苯二酚(tert-butylhydroquinone, TBHQ)(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);1,1-二苯基-2-三硝基苯胍(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)(上海麦克林生化科技有限公司);2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS] [纯度 98%,阿拉丁试剂(上海)有限公司]; α -、 β -、 γ -、 θ -生育酚标准品(纯度 \geq 96%,美国 Sigma 公司)。

1.2 仪器与设备

FA3204B 电子天平(精度为 0.1 mg,上海精科天美科学仪器有限公司);UV-1780 紫外分光光度计(广州化兴科学仪器有限公司);400Y 多功能粉碎机(永康市铂欧五金制

品有限公司); 90-3 恒温磁力搅拌器(上海亚荣生化仪器厂); IKA RV8 旋转蒸发仪(艾卡仪器设备有限公司); DB-WAX 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)、HP-INNOWAX 毛细管柱(30 m×0.32 mm, 0.25 μm)、7890A/5975 气相色谱-质谱联用仪(美国 Agilent 公司); Milli-Q 超纯水机(美国 Millipore 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 黄粉虫油的提取方法

参考文献[8]方法,称取经 80℃烘干处理的黄粉虫,粉碎后过 80 目筛,用滤纸筒包裹,移至索氏提取器中,加入石油醚作为提取溶剂,在 45℃下浸提 2 h,经冷却后过滤,将滤液置于真空旋转蒸发仪中,50℃加热蒸发,除去溶剂,得到粗黄粉虫油。黄粉虫油得率采用公式(1)计算:

$$\text{油得率}/\% = \frac{W_1}{W_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中, W_1 为黄粉虫油的质量, g; W_2 为黄粉虫的质量, g。

1.3.2 金枪鱼油的提取方法

提取方法同 1.3.1,取金枪鱼头部鱼肉,将其粉碎,制成鱼糜,用滤纸筒包裹,采用索氏抽提法提取金枪鱼油。

1.3.3 黄粉虫油基本理化指标的测定

黄粉虫油的酸价、过氧化值、茴香胺值的测定分别参考 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》、GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》、GB/T 24304—2009《动植物油脂 茴香胺值的测定》;茴香胺值的测定方法同时参考文献[9]方法并稍做修改。共轭二烯值的测定参考文献[10]的方法:称取 0.020~0.030 g 油样于小烧杯中,用 10 mL 异辛烷溶解,定容至 100 mL,于 232 nm 波长处测定吸光度,以异辛烷调零。反式脂肪酸含量测定参考 GB 5009.257—2016《食品安全国家标准 食品中反式脂肪酸的测定》。

1.3.4 黄粉虫油体外抗氧化活性测定

DPPH 自由基清除率参考文献[11]方法,稍做改动。用无水乙醇配制样品溶液,吸取样品溶液(50、100、150、200、250 和 300 mg/mL) 2.0 mL,加入 2.0 mL DPPH 溶液(0.2 mmol/L),混合均匀后放置一段时间。用无水乙醇调零,在 517 nm 波长下测定样品溶液和 DPPH 溶液混合液的吸光度($A_{\text{样品}}$),再测定 2.0 mL 样品溶液和 2.0 mL 无水乙醇混合液的吸光度($A_{\text{对照}}$),最后测定 2.0 mL 无水乙醇和 2.0 mL DPPH 溶液混合溶液的吸光度($A_{\text{空白}}$)。以 VC、TBHQ 为阳性对照,同时做空白。DPPH 自由基清除率计算公式如式(2)。

$$\text{清除率}/\% = \left[1 - \frac{(A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}})}{A_{\text{空白}}} \right] \times 100\% \quad (2)$$

ABTS 阳离子自由基清除率参考 BRITO 等^[12]的方法,过硫酸钾水溶液(2.45 mmol/L)与 ABTS 水溶液(7 mmol/L)按 1:2 ($V:V$)比例混合,混合溶液置于室温下避光反应 12~16 h 产生 ABTS 自由基。使用前用 95%乙醇将 ABTS

自由基溶液稀释至 734 nm 处的吸光度为 0.700±0.020。取 0.12 mL 上述溶液与 3.88 mL 样品溶液(质量浓度分别为 10、20、30、40、50、60 mg/mL)充分混合,于 30℃条件下反应 30 min。用无水乙醇调零,于 734 nm 波长处测定吸光度,结果记为 A_1 样品。用 3.88 mL 的无水乙醇溶液代替样品溶液作为对照,于 734 nm 波长处其吸光度,结果记为 A_1 对照。每个样品平行测定 3 次,取平均值。以 VC、TBHQ 为阳性对照,同时做空白。ABTS 阳离子自由基清除率计算公式如式(3):

$$\text{清除率}/\% = \frac{A_{\text{对照}} - A_{\text{样品}}}{A_{\text{样品}}} \times 100\% \quad (3)$$

1.3.5 脂肪酸组成测定

黄粉虫油、大豆油、花生油、橄榄油、猪油和金枪鱼油的脂肪酸甲酯化及气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)测定参考文献[10]的方法。

1.3.6 生育酚、角鲨烯、甾醇含量测定

黄粉虫油中生育酚、角鲨烯、甾醇的测定分别参考 GB 5009.82—2016《食品安全国家标准 食品中维生素 A、D、E 的测定》第一法、LS/T 6120—2017《粮油检验 植物油中角鲨烯的测定 气相色谱法》和 GB/T 25223—2010《动植物油脂甾醇组成和甾醇总量的测定 气相色谱法》。

1.3.7 胆固醇含量测定

参考文献[13]的方法,采用 GC-MS 测定胆固醇含量。

1.3.8 GC-MS 挥发性成分分析

参考文献[14]的方法:称取 5 g 样品置于萃取瓶中,加入 100 μL 2,4,6-三甲基吡啶(0.05 mg/mL)作为内标物,密封,置于 60℃水浴中,磁力搅拌速度 500 r/min,平衡 20 min 后,插入萃取针萃取 30 min。

GC 条件:进样口温度 250℃,气质接口温度 280℃,载气流速 1.5 mL/min,分流比 4:1 ($V:V$)。

MS 条件:离子源温度 230℃,四极杆温度 150℃,电喷雾离子源(electron spray ionization, ESI)电离 70 eV,全扫描 35~550 Da。

1.4 数据处理

所有实验重复 3 次,取平均值,采用软件 SPSS 22.0 处理实验数据、利用 Origin 2019 绘图,所得的数据结果为平均值±标准偏差,通过 Duncan 法分析结果差异, $P < 0.05$ 表示具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 黄粉虫油得率及理化性质

黄粉虫油呈黄色,得率高达(29.28±0.21)%。油脂的理化性质可以反映油脂的品质,因此对黄粉虫油的基本理化性质进行分析研究是必不可少的。黄粉虫油的酸价为(0.94±0.06) mg/g,证明黄粉虫油中存在少量的游离脂肪酸,

可能对油脂的氧化稳定性有一定的影响。黄粉虫油的过氧化值较高为(4.54±0.29) mmol/kg, 表明在提取油过程中油脂易发生氧化。经与 GB 10146—2015《食品安全国家标准 食用动物油脂》中动物油脂的理化性质对照发现, 黄粉虫油的酸价和过氧化值均在国家标准范围之内。黄粉虫油的茴香胺值为 6.04±0.68, 高于大豆油与花生油^[15], 低于猪油^[16]和鱼油^[17], 表示在氧化过程中其劣变程度低, 生成的二级产物含量较少, 品质较高。黄粉虫油的共轭二烯值为 6.97±0.23, 共轭二烯值的形成水平与亚油酸的氧化有关^[18]。反式脂肪酸含量[(0.17±0.04)%]也较低, 说明黄粉虫油的抗氧化性能较好, 油也相对安全, 可作为潜在的食用油脂资源。

2.2 黄粉虫油的脂肪酸组成及含量

黄粉虫油共检测出 12 种脂肪酸。其中饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)的含量为(18.32±1.58)%, 主要是棕榈酸 [(13.30±1.32)%], 还含有少量的肉豆蔻酸 [(2.74±0.03)%]和硬脂酸[(1.66±0.14)%]。黄粉虫油富含不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, USFA), 含量高达(81.68±1.95)%, 其中单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid, MUFA)和多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)的含量分别为(43.74±1.30)%和(37.94±0.65)%。USFA 中含量最高的为油酸[(43.41±1.27)%], 依次还有亚油酸[(36.34±0.59)%]、亚麻酸[(1.43±0.04)%](表 1)。油酸具有降低血脂、软化血管、降低胆固醇重要作用, 油酸含量已成为评定食用油品质的重要指标之一^[19-20], 黄粉虫油中油酸含量较高, 表明其可作为一种富含油酸的新型油脂。亚油酸具有降低血脂、降血糖、抗衰老和抗动脉粥样硬化的作用^[21-22], 亚油酸是一种人体重要的必需脂肪酸, 是人体自身不能合成、必须从食物中直接获取的脂肪酸。中国营养学会推荐人体食用脂肪酸最佳 SFA/MUFA/PUFA 比例标准为 1:1:1, 要求 SFA 与 USFA 的比例最好为 1:2, 黄粉虫油中的 SFA、MUFA 和 PUFA 的比例为 1:2.4:2.1, 脂肪酸分布相对较均衡, 说明其有作为优质的营养保健调和食用油的潜力。

2.3 黄粉虫油与常见植物油、动物油的脂肪酸组成及含量对比

花生油、大豆油和橄榄油是生活中最常见的食用植物油, 猪油和金枪鱼油是生活中常见的动物油, 其安全性与营养性已被保证, 黄粉虫油与其作比较, 能够更直观地分析出油脂的优劣程度。由表 2 可知, 黄粉虫油与其他 3 种植物油和两种动物油含有 7 种相同的脂肪酸, 主要为油酸、亚油酸和棕榈酸。其中橄榄油的油酸含量最高 [(75.19±1.94)%], 其次是黄粉虫油 [(43.41±1.27)%]; 亚油酸含量最高的是大豆油 [(46.10±1.13)%], 其次是黄粉虫油 [(36.34±0.59)%]。油酸和亚油酸对防止动脉硬化、降低

血浆胆固醇、治疗高血压等具有显著作用^[23], 说明黄粉虫油对人体生理机能有益。大豆油中的亚麻酸含量最高 [(7.83±0.05)%], 其次是黄粉虫油的亚麻酸含量 [(1.43±0.04)%], 亚麻酸作为人体的必需脂肪酸, 有着降血压、改善心脑血管疾病等功效^[24], 说明黄粉虫油脂有一定的营养价值。黄粉虫油的 USFA 含量略低于橄榄油, 但高于花生油、大豆油、金枪鱼油和猪油。USFA 具有抗病毒、抗氧化、抗肿瘤、提高机体免疫力的功能^[25], 说明黄粉虫油对人体健康的负面影响相对较小, 具有一定的保健功效, 可开发功能性油脂产品。油亚比指的是油酸与亚油酸的比值, 行业内普遍认为油亚比为 1:1 时对人体健康最有益。比较 6 种油的油亚比, 其中黄粉虫油的油亚比为 1.19, 最接近 1, 说明黄粉虫油的油酸和亚油酸含量分布相对均衡, 油脂品质较好。通过与花生油、大豆油、橄榄油、金枪鱼油和猪油进行对比, 证明黄粉虫油的各项理化指标良好, 有望开发为食用油。

表 1 黄粉虫油的脂肪酸组成及含量
Table 1 Fatty acid composition and content of *Tenebrio molitor* oil

脂肪酸	含量/%
月桂酸(C12:0)	0.19±0.03
十三烷酸(C13:0)	0.07±0.01
肉豆蔻酸(C14:0)	2.74±0.03
十五烷酸(C15:0)	0.13±0.02
棕榈酸(C16:0)	13.30±1.32
十七烷酸(C17:0)	0.23±0.03
硬脂酸(C18:0)	1.66±0.14
油酸(C18:1)	43.41±1.27
亚油酸(C18:2)	36.34±0.59
反式亚油酸(C18:2n6t)	0.17±0.02
亚麻酸(C18:3)	1.43±0.04
顺-11-二十烯酸(C20:1)	0.33±0.03
SFA	18.32±1.58
MUFA	43.74±1.30
PUFA	37.94±0.65
USFA	81.68±1.95

2.4 黄粉虫油的营养成分含量

由表 3 可知, 黄粉虫油中 4 种生育酚单体含量均低于 0.12 mg/100 g, 含量极少, 生育酚为维生素 E 的水解产物, 可参与人体内多种代谢反应, 特别是在抗氧化、抑制胆固醇合成以及预防心血管疾病等方面^[26-28], 而油脂是人们从膳食中摄取维生素 E 的主要来源之一。黄粉虫油中生育酚含量极低, 后续可通过调整饲养条件, 增加其生育酚含量。

表 2 黄粉虫油与常见植物油、动物油的脂肪酸组成及含量对比

Table 2 Comparison of fatty acid composition and content of *Tenebrio molitor* oil with common vegetable oil and animal oil

脂肪酸组成	黄粉虫油/%	花生油/%	大豆油/%	橄榄油/%	金枪鱼油/%	猪油/%
月桂酸(C12:0)	0.19±0.03	/	/	/	/	/
十三烷酸(C13:0)	0.07±0.01	/	/	/	/	/
豆蔻酸(C14:0)	2.74±0.03	0.28±0.04	0.08±0.01	/	2.21±0.04	/
十五烷酸(C15:0)	0.13±0.02	/	0.03±0.01	/	0.71±0.04	/
棕榈油酸(C16:1)	/	0.11±0.01	0.12±0.03	0.71±0.04	7.78±0.12	/
棕榈酸(C16:0)	13.30±1.32 ^{bc}	12.12±0.37 ^{ab}	14.34±1.08 ^c	11.50±0.64 ^a	18.19±0.08 ^d	28.92±0.22 ^c
十七烷酸(C17:0)	0.23±0.03 ^c	0.06±0.01 ^a	0.15±0.04 ^b	0.19±0.04 ^{bc}	0.62±0.06 ^c	0.42±0.04 ^d
硬脂酸(C18:0)	1.66±0.14 ^a	3.94±0.23 ^c	5.17±0.24 ^c	4.35±0.28 ^d	2.93±0.07 ^b	21.16±0.08 ^f
油酸(C18:1)	43.41±1.27 ^e	41.03±0.82 ^d	24.28±1.14 ^a	75.19±1.94 ^f	28.74±0.20 ^b	38.54±0.16 ^c
亚油酸(C18:2)	36.34±0.59 ^e	32.50±1.30 ^d	46.10±1.13 ^f	6.07±0.23 ^b	1.09±0.06 ^a	9.03±0.07 ^c
反式亚油酸 (C18:2n6t)	0.17±0.02	/	/	/	/	/
亚麻酸(C18:3)	1.43±0.04 ^c	0.09±0.01 ^a	7.83±0.05 ^d	0.75±0.05 ^b	0.78±0.06 ^b	0.03±0.01 ^a
十九碳烯酸(C19:1)	/	0.03±0.01	/	/	/	/
二十烷酸(C20:0)	/	1.91±0.03	0.65±0.05	0.62±0.04	/	/
二十碳烯酸(C20:1)	0.33±0.03 ^a	1.33±0.05 ^c	0.29±0.03 ^a	0.43±0.04 ^b	1.72±0.03 ^d	0.48±0.06 ^b
二十碳二烯酸 (C20:2)	/	0.28±0.03	0.07±0.01	/	/	/
二十碳四烯酸 (C20:4)	/	/	/	/	2.53±0.03	/
二十碳五烯酸 (C20:5)	/	/	/	/	5.08±0.07	/
二十一碳烯酸 (C21:1)	/	/	0.06±0.01	/	/	/
山萘酸(C22:0)	/	4.18±0.07	0.65±0.04	0.16±0.03	/	/
芥酸(C22:1)	/	/	/	/	/	1.42±0.05
二十二碳四烯酸 (C22:4)	/	/	/	/	1.26±0.05	/
二十二碳五烯酸 (C22:5)	/	/	/	/	1.16±0.04	/
二十二碳六烯酸 (C22:6)	/	/	/	/	25.20±0.25	/
二十三烷酸(C23:0)	/	0.05±0.01	/	/	/	/
二十四烷酸(C24:0)	/	1.94±0.07	0.18±0.03	0.03±0.01	/	/
二十六烷酸(C26:0)	/	0.15±0.03	/	/	/	/
SFA	18.32±1.58	24.63±0.86	21.25±1.50	16.85±1.04	24.66±0.29	50.50±0.34
MUFA	43.74±1.30	42.5±0.89	24.75±1.21	76.33±2.02	38.24±0.35	40.44±0.27
PUFA	37.94±0.65	32.87±1.34	54.00±1.19	6.82±0.28	37.10±0.56	9.06±0.08
USFA	81.68±1.95	75.37±2.23	78.75±2.40	83.15±2.30	75.34±0.91	49.50±0.35
SFA/USFA	1:4.46	1:3.06	1:3.71	1:4.93	1:3.06	1:0.98

注: /表示无; 同行不同小写字母具有显著性差异($P<0.05$)。

角鲨烯是一种对人体有益的不饱和烃类化合物, 具有活化细胞、促进脂肪代谢、调节血脂、抗衰老、抗肿瘤等作用^[29-30]。角鲨烯主要存在于鲨鱼肝油中, 常见的植物

油中所含的角鲨烯含量较低。由表 5 可知, 黄粉虫油中角鲨烯的含量为(35.20±0.09) mg/100 g, 与常见植物油^[31]如花生油(21.83 mg/100 g)、山茶油(13.93 mg/100 g)、玉米胚

芽油(16.49 mg/100 g)相比含量较高。因此高含量的角鲨烯是黄粉虫油的特色成分, 可作为高含量角鲨烯的功能性油脂资源进行开发利用。

表 3 黄粉虫油的营养成分含量
Table 3 Nutrient content of *Tenebrio molitor* oil

项目	含量/(mg/100 g)
α -生育酚	<0.12
β -生育酚	<0.12
γ -生育酚	<0.12
δ -生育酚	<0.12
角鲨烯	35.20±0.09
胆固醇	70.52±0.12
芸薹甾醇	3.83±0.02
芸薹甾烷醇	3.64±0.01
豆甾醇	3.95±0.05
β -谷甾醇	12.81±0.10
谷甾烷醇	5.43±0.08

甾醇是一种广泛存在于生物体内的天然活性物质, 植物甾醇最为常见, 其营养价值高, 且具有抗炎、促进人体新陈代谢等多种功效^[32]。动物性甾醇中一般胆固醇含量较高。黄粉虫油含有 6 种不同类型的甾醇, 胆固醇的含量最高, 为(70.52±0.12) mg/100 g, 与常见动物油^[33-34]如猪油(28.97 mg/100 g)相比含量较高, 与牛油(205 mg/100 g)相比含量较低。高胆固醇会导致动脉粥样硬化, 进而诱发缺血性心血管疾病^[35], 胆固醇过低时, 会出现一种胰岛素分泌过多的综合征, 增加患糖尿病、高血压、心脑血管疾病等的风险^[36], 所以日常饮食要合理控制胆固醇的摄入量。其次是 β -谷甾醇, 含量为(12.81±0.10) mg/100g, 与常用植物油^[37]如大豆油(175.6 mg/100 g)、菜籽油(341.5 mg/100 g)、橄榄油(216.35 mg/100 g)相比, 其含量相对较低。 β -谷甾醇具有抗炎、抗氧化、抗菌、降脂、抗肿瘤等作用^[38]。这可为后期开发黄粉虫功能性油脂资源提供依据。

2.5 黄粉虫油的体外抗氧化活性

由图 1a 可知, 在 50~300 mg/mL 的质量浓度范围内, TBHQ 与 VC 对 DPPH 自由基的清除率较高, 均保持在 90% 以上, 说明 TBHQ 及 VC 对 DPPH 自由基的清除能力很强。随着油质量浓度的增大, 黄粉虫油对 DPPH 自由基的清除率也逐渐增大, 总体看黄粉虫油对 DPPH 自由基的清除率低于 TBHQ 和 VC, 当质量浓度为 300 mg/mL 时, 黄粉虫油的清除率达到 33.51%, 其半数抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC₅₀)值为 425.45 mg/mL。由图 1b 可知, 在 10~60 mg/mL 的质量浓度范围内, TBHQ 与 VC 对

ABTS 阳离子自由基的清除率较高, 均保持在 90% 以上, 说明 TBHQ 及 VC 对 ABTS 阳离子自由基的清除能力很强。随着油质量浓度的增大, 黄粉虫油对 ABTS 阳离子自由基的清除率也逐渐增大, 黄粉虫油对 ABTS 阳离子自由基的清除率与 TBHQ 和 VC 相比仍有较大的差距, 当质量浓度为 60 mg/mL 时, 黄粉虫油的清除率达到 15.06%, 其 IC₅₀ 值为 99.17 mg/mL。因此, 黄粉虫油具有一定的自由基清除活性。

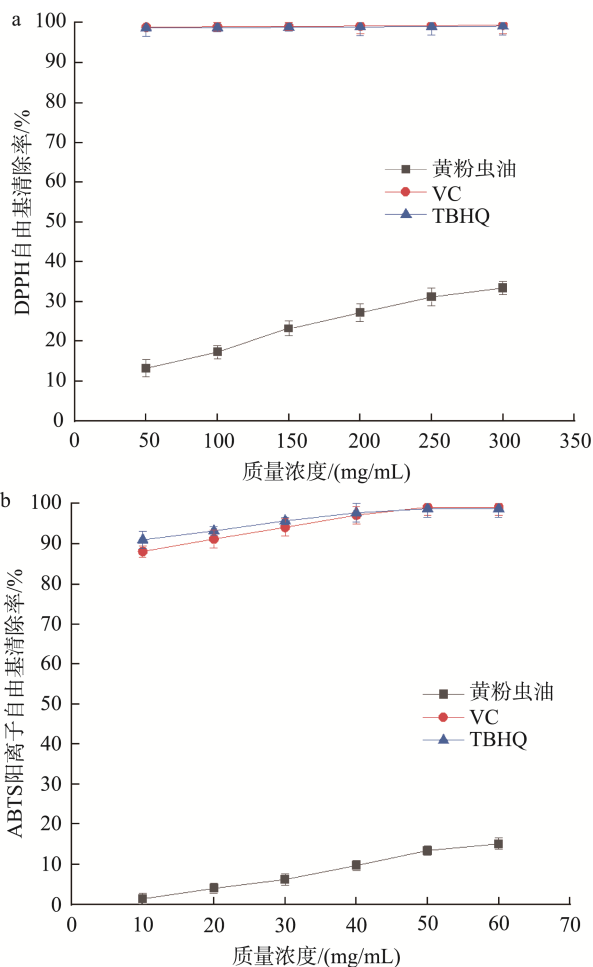


图 1 黄粉虫油的体外抗氧化活性

Fig.1 Antioxidant activities of *Tenebrio molitor* oil in vitro

2.6 黄粉虫油的挥发性成分

黄粉虫油中的风味物质组成如表 4 所示, 黄粉虫油含有 40 种挥发性成分物质, 分别是烃类(18 种)、胺类(6 种)、醛类(1 种)、酯类(3 种)、醇类(2 种)、杂环类(7 种)、其他(3 种)。烃类是黄粉虫油中主要的挥发性物质, 其相对含量是 67.32%, 其次是杂环类(11.04%)、胺类(9.05%)、醇类(6.05%)、醛类(0.89%)、酯类(0.50%)化合物。杂环类物质的阈值低, 对气味贡献较大, 但烃类物质阈值高, 对气味贡献较小。因此, 黄粉虫油中杂环类物质是主要的气味来源。

表 4 黄粉虫油的挥发性成分
Table 4 Volatile components of *Tenebrio molitor* oil

种类	保留时间 /min	化合物	相对含量 /%
烃类	3.99	环氧乙烷	6.49
	4.98	二甲基二甲氧基硅烷	3.64
	5.22	苯	9.12
	5.84	丙炔	6.97
	6.91	甲苯	5.75
	9.14	乙基苯	0.74
	18.94	十甲基环五硅氧烷	6.19
	20.80	十二烷	3.41
	24.44	十三烷	0.36
	25.30	十二甲基环六硅氧烷	8.57
	29.89	正二十烷	0.05
	30.99	十四甲基环七硅氧烷	4.52
	34.14	正十六烷	0.34
	36.45	十六烷基环八硅氧烷	3.72
	37.61	氯代十八烷	0.09
	41.55	十八甲基环九硅氧烷	0.82
	51.96	1,2-双(三甲基硅)苯	0.03
14.44	1-甲基(1-甲基乙烯基)环己烯	6.51	
醇类	4.12	2-氯乙醇	5.63
	13.82	2,2-二氯乙醇	0.42
醛类	27.11	2-丁基-2-辛烯醛	0.89
酯类	35.84	癸酸十六烷酯	0.15
	38.47	12-甲基十三烷酸甲酯	0.04
	44.18	棕榈酸甲酯	0.31
杂环类	2.39	吡啶-2-醇	0.45
	7.50	2-甲基咪唑	3.75
	8.09	2-甲基腺苷	2.04
	12.97	2,4,6-三甲基吡啶	3.91
	17.66	乙氧基亚甲基丙二腈	0.67
	32.42	双(2-甲基-3-咪唑基)二硫	0.18
	49.92	4-氯-6-甲氧基-2-甲基喹啉	0.04
胺类	3.00	4-氯苯乙胺	4.21
	3.38	十六胺	4.22
	13.59	4-乙基苯基胺	0.47
	26.19	二炔丙胺	0.03
	46.47	N-甲基-1-十八胺	0.09
47.71	4-溴-2-氯苯胺	0.03	
其他	2.69	三正丁基溴化锡	5.02
	31.60	2,5-二叔丁基酚	0.11
	48.31	乙溴酰脲	0.02

3 结 论

本研究以黄粉虫为研究对象,采取索氏抽提法提取黄粉虫油,对其理化性质进行分析。结果表明,黄粉虫油得率为(29.28±0.21)%,酸价(KOH)、过氧化值、茴香胺值、共轭二烯值均符合植物油食品安全标准。同时还对黄粉虫油的脂肪酸组成及脂溶性营养物质进行检测,黄粉虫油富含 USFA,主要是油酸[(43.41±1.27)%]与亚油酸[(36.34±0.59)%];主要的脂溶性营养物质为 β -谷甾醇[(12.81±0.10) mg/100 g]和角鲨烯[(35.20±0.09) mg/100 g]。黄粉虫油对 DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基有一定的清除能力。黄粉虫油共检测出 40 种挥发性成分,杂环类物质是主要的气味来源,为黄粉虫油脂提供特殊的香味。高油酸、高角鲨烯及其风味为黄粉虫油在食品、医药、化妆品领域的开发利用提供了一定依据。下一步将研究黄粉虫油的总酚、总黄酮等活性成分,探索其抗炎及抗癌的作用。

参考文献

- 陈继发. 黄粉虫的营养特性及其在畜禽饲料中的应用效果[J]. 中国畜牧兽医, 2021, 48(7): 2424-2430.
CHEN JF. Nutritional characteristics and application effect of *Mealworms* in livestock and poultry diets [J]. *Chin J Anim Husbandry Vet Med*, 2021, 48(7): 2424-2430.
- 朱琳, 王向誉, 聂磊, 等. 黄粉虫的主要功能成分及其应用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(3): 10-12, 14.
ZHU L, WANG XY, NIE L, et al. Research progress on main functional constituents and application of *Tenebrio molitor* [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2018, 46(3): 10-12, 14.
- 李艳芳, 伍爱萍, 徐匆, 等. 黄粉虫的应用现状及展望[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(36): 99-101.
LI YF, WU AIP, XU C, et al. Application status and prospect of *Tenebrio molitor* [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2015, 43(36): 99-101.
- 许齐爱, 彭伟录, 李小玺, 等. 经济昆虫黄粉虫与大麦虫研究进展[J]. 安徽农学通报, 2008, (21): 158-160.
XU QAI, PENG WL, LI XX, et al. Research progress of economic insect *Mealworms* and barley worms [J]. *Anhui Agric Sci Bull*, 2008, (21): 158-160.
- 张建新, 张立佳, 王临宾, 等. 黄粉虫油对高脂血症小鼠血脂水平及抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 263-266.
ZHANG JX, ZHANG LJ, WANG LB, et al. Effects of *mealworm* oil on lipid levels and antioxidant capacity of hyperlipidemia mice [J]. *Food Sci*, 2011, 32(5): 263-266.
- 王浩然, 吴琪, 张天宝, 等. 3 种抗氧化剂对黄粉虫油的氧化抑制作用[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(23): 185-187, 191.
WANG HR, WU Q, ZHANG TB, et al. Effects of three antioxidants on oxidation inhibition of *mealworm* oil [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2021, 49(23): 185-187, 191.
- 吴福中, 林华峰, 刘志红, 等. 中国黄粉虫产品开发利用的现状及其对策[J]. 中国农学通报, 2005, (8): 72-75.
WU FZ, LIN HF, LIU ZH, et al. Current situation and countermeasures of development and utilization of *Mealworm* products in China [J]. *J Chin*

- Agric Sci Bull, 2005, (8): 72–75.
- [8] 赵腾飞, 应晓国, 张宾, 等. 大黄鱼鱼油的制备及其理化性质[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 6–10, 17.
ZHAO TF, YING XG, ZHANG B, *et al.* Preparation and physicochemical properties of fish oil from large yellow croaker [J]. China Oils Fats, 2021, 46(10): 6–10, 17.
- [9] 丁俭, 齐宝坤, 王立敏, 等. 5 种不同植物油脂氧化程度与脂肪酸比例变化的相关性研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(8): 84–91.
DING J, QI BK, WANG LM, *et al.* Study on the relationship between oxidation degree and fatty acid proportion of five different plant oils [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2017, 32(8): 84–91.
- [10] 马路凯. 植物油中丙二醛、4-羟基-2-己烯醛和 4-羟基-2-壬烯醛的热响应机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
MA LK. Study on thermal response mechanism of malondialdehyde, 4-hydroxy-2-hexenal and 4-hydroxy-2-nonenal in vegetable oil [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [11] 连喜军, 王亮, 王屹, 等. DPPH 法研究不同品种甘薯抗性淀粉抗氧化性[J]. 粮食与油脂, 2009, (6): 26–28.
LIAN XJ, WANG L, WANG H, *et al.* Study on antioxidant activity of resistant starch of different varieties of sweet potato by DPPH method [J]. Cere Oils, 2009, (6): 26–28.
- [12] BRITO BDND, CHISTÉ RC, PENA RDS, *et al.* Bioactive amines and phenolic compounds in cocoa beans are affected by fermentation [J]. Food Chem, 2017, 228: 484–490.
- [13] 张颖霞, 张成, 杨慧, 等. 气相色谱法测定动植物油脂中甾醇方法的改进[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(5): 65–68.
ZHANG YX, ZHANG C, YANG H, *et al.* Improvement of determination of sterols in animal and vegetable fats by gas chromatography [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2019, 27(5): 65–68.
- [14] 吴忠红, 谭慧林, 赵雅霞, 等. GC-MS 结合电子鼻分析甜瓜籽油挥发性风味成分[J]. 中国油脂, 2020, 45(12): 28–33.
WU ZH, TAN HL, ZHAO YX, *et al.* Analysis of volatile flavor components in melon seed oil by GC-MS combined with electronic nose [J]. China Oils Fats, 2020, 45(12): 28–33.
- [15] 栾霞, 王瑛瑶, 张蕊, 等. 油脂储藏过程中茴香胺值、过氧化值的变化研究[J]. 粮油加工, 2009, (12): 77–79.
LUAN X, WANG YY, ZHANG R, *et al.* Study on changes of anisole value and peroxide value during oil storage [J]. Cere Oils Process, 2009, (12): 77–79.
- [16] 张雨, 章丹丹, 陈婧婧, 等. 猪脂肪控制氧化条件优化研究[J]. 肉类工业, 2019, (7): 43–46.
ZHANG Y, ZHANG DD, CHEN JJ, *et al.* Optimization of control oxidation conditions of pig fat [J]. Meat Ind, 2019, (7): 43–46.
- [17] 陈京美, 刘小芳, 苗钧魁, 等. 我国原料鱼油质量现状分析与标准修订[J]. 饲料工业, 2016, 37(19): 59–64.
CHEN JM, LIU XF, MIAO JK, *et al.* Quality status analysis and standard revision of raw fish oil in China [J]. Feed Ind, 2016, 37(19): 59–64.
- [18] BELINGHERI C, GIUSSANI B, RODRIGUEZ-ESTRADA MT, *et al.* Oxidative stability of high-oleic sunflower oil in a porous starch carrier [J]. Food Chem, 2015, 166: 346–351.
- [19] 曹永强, 谢甫锦, 董丽杰, 等. 大豆种子油酸含量研究进展[J]. 大豆科学, 2015, 34(2): 329–334.
CAO YQ, XIE FT, DONG LJ, *et al.* Research progress of oleic acid content in soybean seeds [J]. Soybean Sci, 2015, 34(2): 329–334.
- [20] 朱绪春, 乌云塔娜, 姜仲茂, 等. 3 种野生扁桃油脂的理化性质及脂肪酸组成研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(3): 93–95.
ZHU XC, WUYUN TN, JIANG ZM, *et al.* Study on physicochemical properties and fatty acid composition of three kinds of wild almond oils [J]. China Oils Fats, 2016, 41(3): 93–95.
- [21] 余玲, 毛振涛, 张小勇. 漆籽油的脱蜡工艺[J]. 中国油脂, 2022, 47(4): 15–18, 23.
YU L, MAO ZT, ZHANG XY. Dewaxing process of lacquer seed oil [J]. China Oils Fats, 2022, 47(4): 15–18, 23.
- [22] 湛迪, 肖朝歌, 卢文静, 等. 不同热处理方法对休闲瓜子品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(4): 808–813.
SHEN D, XIAO CG, LU WJ, *et al.* Effects of different heat treatment methods on quality of pine nuts [J]. Acta Agric Zhejiangensis, 2022, 34(4): 808–813.
- [23] 张卓, 李琦, 陈宇飞, 等. 响应面法水飞蓟籽油曲奇配方优化[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(10): 96–99, 103.
ZHANG Z, LI Q, CHEN YF, *et al.* Optimization of milk thistle seed oil cookie recipe by response surface methodology [J]. Cere Oils, 2021, 34(10): 96–99, 103.
- [24] 廖振林, 李倩滢, 陈俊杰, 等. 亚麻籽油组分的功能活性研究进展[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 379–389, 337.
LIAO ZL, LI QY, CHEN JJ, *et al.* Research progress on functional activity of linseed oil components [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 37(11): 379–389, 337.
- [25] 刘海, 王进, 许杰, 等. 产地、物种及加工工艺对油茶籽油中的微量元素及重金属含量的影响[J]. 中国油脂, 2022, 47(4): 24–28.
LIU H, WANG J, XU J, *et al.* Effects of origin, species and processing technology on trace elements and heavy metals contents in *Camellia oleifera* seed oil [J]. China Oils Fats, 2022, 47(4): 24–28.
- [26] 肖旭华, 汪薇, 杨宏. 超声波辅助水酶法提取芝麻油的工艺优化研究[J]. 轻工学报, 2018, 33(5): 30–36.
XIAO XH, WANG W, YANG H. Optimization of ultrasonic assisted water enzymatic extraction of sesame oil [J]. J Light Ind, 2018, 33(5): 30–36.
- [27] 张亚非, 吴凤兰, 方富威, 等. 大剂量维生素 C 和 E 对大鼠食物性高胆固醇血症的预防作用[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 1992, (2): 17–21.
ZHANG YF, WU FL, FANG FW, *et al.* Effects of high dose vitamin C and vitamin E on food hypercholesterolemia in rats [J]. J Jinan Univ (Nat Sci Med Ed), 1992, (2): 17–21.
- [28] GLICKMAN-SIMON R, LINDSAY T. Cannabinoids for chronic pain, mediterranean diet and cognitive function; vitamin E and selenium for cataract prevention; acupuncture and moxibustion for primary dysmenorrhea; massage therapy and *in vitro* fertilization [J]. J Sci Heal, 2015, 11(6): 489–493.
- [29] 金祖汉, 金捷, 毛培江, 等. 角鲨烯对四氯化碳急性肝损伤模型小鼠的抗氧化和护肝作用研究[J]. 浙江中医药大学学报, 2015, 39(9): 666–670.
JIN ZH, JIN J, MAO PJ, *et al.* Effects of squalene on antioxidant and liver protection in mice with acute liver injury induced by carbon tetrachloride [J]. J Zhejiang Chin Med Univ, 2015, 39(9): 666–670.
- [30] 马路凯, 崔芸, 毛国兴, 等. 鹰嘴桃仁油的品质及挥发性成分研究[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 104–109.

- MA LK, CUI Y, MAO GX, *et al.* Study on quality and volatile components of chickpea kernel oil [J]. *China Oils Fats*, 2021, 46(10): 104–109.
- [31] 朱云. 植物油中角鲨烯含量及其在油脂加工与使用过程中的变化[J]. *中国油脂*, 2019, 44(12): 136–138.
- ZHU Y. Content of squalene in vegetable oil and its change in oil processing and use [J]. *China Oils Fats*, 2019, 44(12): 136–138.
- [32] 李志军, 王锋, 刘和, 等. 油莎豆产业发展现状及建议[J]. *现代农业科技*, 2022, (8): 225–231.
- LI ZJ, WANG J, LIU H, *et al.* Current situation and suggestions of soybean industry [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2022, (8): 225–231.
- [33] 朱庆英, 裘爱泳, 汤志勇, 等. 猪油中胆固醇含量的测定[J]. *中国油脂*, 2002, (4): 72–74.
- ZHU QY, QIU AIY, TANG ZY, *et al.* Determination of cholesterol content in lard [J]. *China Oils Fats*, 2002, (4): 72–74.
- [34] 任美燕, 丁晓雯, 罗金凤, 等. 正交试验优化中性氧化铝吸附剂降低牛油中胆固醇工艺[J]. *食品科学*, 2012, 33(24): 170–173.
- REN MY, DING XW, LUO JF, *et al.* Optimization of neutral alumina adsorbent to reduce cholesterol in butter by orthogonal experiment [J]. *Food Sci*, 2012, 33(24): 170–173.
- [35] 郭子楠, 潘京金, 贺明君, 等. 降胆固醇功能性食品的研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(1): 269–277.
- GUO ZN, PAN JJ, HE MJ, *et al.* Research progress of cholesterol-lowering functional food [J]. *Food Sci*, 2022, 43(1): 269–277.
- [36] 敖拉哈. 低胆固醇同样危害人体健康[J]. *安全与健康*, 2012, (1): 49.
- AO LH. Low cholesterol also harm human health [J]. *Saf Health*, 2012, (1): 49.
- [37] 韩军花, 杨月欣, 冯妹元, 等. 中国常见植物食物中植物甾醇的含量和居民摄入量初估[J]. *卫生研究*, 2007, (3): 301–305.
- HAN JH, YANG YX, FENG MY, *et al.* Phytosterol content in common plant food in China and preliminary estimation of population intake [J]. *J Hyg Res*, 2007, (3): 301–305.
- [38] 陈元堃, 曾奥, 罗振辉, 等. β -谷甾醇药理作用研究进展[J]. *广东药科大学学报*, 2021, 37(1): 148–153.
- CHEN YK, ZENG AO, LUO ZH, *et al.* Research progress on pharmacological effects of β -sitosterol [J]. *J Guangdong Pharmaceut Univ*, 2021, 37(1): 148–153.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



郑自奋, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。
E-mail: 609285132@qq.com



余元善, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品工程。
E-mail: 499072725@qq.com



马路凯, 博士, 副教授, 主要研究方向为油脂营养与安全。
E-mail: m19911k@163.com