

西瓜籽油脂肪酸成分分析及抗氧化活性研究

Fatty acid composition analysis and antioxidant activity of watermelon seed oil

盘鹏慧 罗伟强 莫丹 庞晓

PAN Peng-hui LUO Wei-qiang MO Dan PANG Xiao

(广西民族大学, 广西南宁 530006)

(Guangxi University for Nationalities, Nanning, Guangxi 530006, China)

摘要:目的:研究西瓜籽油脂肪酸成分及抗氧化活性。方法:采用索氏回流法对西瓜籽进行提油,对西瓜籽油进行酯化处理,用气相色谱—质谱联机(GC-MS)对其脂肪酸的成分、含量进行分析,通过其对铁离子的还原能力和对 DPPH 自由基、羟基自由基及超氧阴离子自由基清除能力的测定。结果:西瓜籽油中含有 6 种脂肪酸,其中饱和脂肪酸相对含量达到 50% 以上;西瓜籽油对铁离子具有还原能力,对 DPPH 自由基的 IC_{50} 值为 3.7 mg/mL,对超氧阴离子自由基的 IC_{50} 值为 0.031 mg/mL,对羟基自由基的 IC_{50} 值为 12.04 mg/mL。结论:西瓜籽油富含饱和脂肪酸,有较好的抗氧化活性。

关键词:西瓜籽油;气相色谱—质谱联用;脂肪酸;抗氧化活性

Abstract: Objective: This study focused on the fatty acid composition and antioxidant activity of watermelon seed oil. **Methods:** The watermelon seed oil was extracted by Soxhlet extraction from the watermelon seed, then the watermelon seed oil was esterified. Thereafter, the components and the contents of watermelon seed oil were analyzed and detected used the method of gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and the antioxidant activity of watermelon seed oil was studied by measuring its ability to reduce iron ions and scavenge DPPH radical, hydroxyl radical and superoxide anion. **Results:** The results of GC-MS showed that there were 6 fatty acids in watermelon seed

oil, the relative content of unsaturated fatty acids was more than 50%, the study of antioxidant activity showed that watermelon seed oil had the ability to reduce iron ions, and the IC_{50} value of watermelon seed oil for eliminating DPPH free radical, superoxide anion and hydroxyl free radicals was 3.7 mg/mL, 0.031 mg/mL and 12.04 mg/mL, respectively. **Conclusion:** Watermelon seed oil is rich in unsaturated fatty acids and has good antioxidant activity.

Keywords: watermelon seed oil; gas chromatography-mass spectrometry; fatty acid; antioxidant activity

西瓜籽中含有维生素、微量元素、蛋白质、脂肪等多种营养成分^[1-2],其中脂肪中饱和和脂肪酸含量较丰富^[3-4]。研究^[5]表明,西瓜籽油有辅助降血脂功能。

目前有关各种植物油脂的提取、成分及其含量、抗氧化活性的研究时有报道^[6-12],而有关西瓜籽油的研究多集中在提取工艺方面^[13-14]。研究拟采用索氏法对西瓜籽进行提油,用 GC-MS 对西瓜籽油的脂肪酸组成、含量进行分析,并研究西瓜籽油的体外抗氧化能力,以期西瓜籽油在天然抗氧化剂、医疗、保健等方面的开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

西瓜籽:市售;

石油醚(沸程 60~90 °C)、硫酸、甲醇、硫酸亚铁、无水乙醇、三氯化铁、抗坏血酸(维生素 C)、硫酸亚铁、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器和设备

电子天平:AB204-S 型,上海帅宁仪器有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:GZX-GF101-3BS 型,上海齐欣科学仪器有限公司;

基金项目:广西少数民族预科教育基地研究项目(编号:YJJDC202102);广西民族大学项目(编号:2017MDYB003);广西民族大学大学生创新创业训练计划项目(编号:202010608091);广西壮族自治区教育厅项目(编号:201204LX084);广西民族大学实验技术创新重点项目(编号:2020MDSY005)

作者简介:盘鹏慧,女,广西民族大学讲师,硕士。

通信作者:罗伟强(1962—),男,广西民族大学正高级实验师,学士。E-mail: 456wq@163.com

收稿日期:2021-05-17

高速多功能粉碎机:CS700型,永康市天祺盛世工贸有限公司;

旋转蒸发仪:RE-52AA型,上海亚荣生化仪器厂;

循环水式多用真空泵:SHB-ⅢA型,郑州长城科工贸有限公司;

紫外可见分光光度计:752N型,北京合悦达科技有限公司;

气相色谱-质谱联用仪:Clarus500型,美国铂金埃尔默公司。

1.2 试验方法

1.2.1 西瓜籽油的提取 根据文献[15],将西瓜籽置于洁净的搪瓷盘上,70℃干燥6h。取出,室温冷却后取适量西瓜籽于高速粉碎机中搅拌1min,得西瓜籽细粉。准确称取40.5113g西瓜籽细粉,用滤纸包好放在盛有适量石油醚的烧杯中浸泡6h。将其取出置于500mL的索氏提取器中,用石油醚为溶剂回流5h左右,至溶剂用滤纸检测无油迹后,停止回流。提取液经滤纸过滤后,先用旋转蒸发仪除去大部分溶剂,再通过沸水浴除去残余溶剂,即得浅黄色的西瓜籽油15.469g,提取率为38.18%。

1.2.2 西瓜籽油中脂肪酸的GC-MS分析

(1) 酯化处理:根据文献[16],略有改动。称取0.1g西瓜籽油,加入体积分数5%的硫酸-甲醇溶液2mL,60℃水浴超声30min后,再加入正己烷2mL,充分振荡后静置。取上层清液加入无水硫酸钠,取上层清液进行GC-MS分析。

(2) 气相色谱条件:色谱柱为PE-5弹性石英毛细管柱(30m×0.25mm,0.25μm),以高纯氮气为载气,流速1.00mL/min,程序升温:起始温度80℃,以14℃/min升温至195℃,195℃保持9min,然后以6.0℃/min升温至280℃,280℃保持3min。进样口温度260℃,进样量1.0μL,分流比40:1。

(3) 质谱条件:EI源,电离电压70eV,传输线温度280℃,离子源温度230℃,扫描范围33~500amu。

1.2.3 还原Fe³⁺能力测定 根据文献[17],将西瓜籽油配置成系列浓度梯度溶液,分别取1mL各浓度的西瓜籽油溶液,依次加入2.5mL磷酸盐缓冲溶液(0.2mol/L)、2.5mL的铁氰化钾(10mg/mL),50℃水浴锅中恒温加热20min。再加入2.5mL三氯化乙酸(0.1g/mL),摇匀后,3000r/min离心10min,取上清液2.5mL,加入2.5mL去离子水及0.5mL的三氯化铁(1mg/mL)。室温下反应5min,在700nm处测定该样品吸光度,用去离子水做空白对照,V_C作为阳性对照。做3次平行试验,取平均值。

1.2.4 清除DPPH自由基能力测定 分别量取3mL各浓度的西瓜籽油溶液与2mL DPPH溶液(0.2mmol/L)混合,摇匀后避光静置30min,于517nm处测定其吸光

度^[18-19]。用去离子水做空白对照,V_C作为阳性对照。做3次平行试验,取平均值,按式(1)计算DPPH自由基清除率。

$$E = [1 - (A_1 - A_2) / A_3] \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

E——DPPH自由基清除率,%;

A₁——样品溶液和DPPH溶液的吸光值;

A₂——样品溶液和无水乙醇的吸光值;

A₃——去离子水和DPPH溶液的吸光值。

1.2.5 清除超氧阴离子自由基能力测定 根据文献[20],修改如下:在具塞试管中分别加入1mL各浓度的西瓜籽油溶液、4.5mL Tris-HCl缓冲液(0.05mol/L)、0.1mL邻苯三酚溶液(3mmol/L),混匀,于25℃下反应5min,然后加入1mL HCl溶液(8mmol/L)以终止反应,于299nm处测定其吸光度。用去离子水为空白对照,V_C作为阳性对照。做3次平行试验,取平均值,按式(2)计算超氧阴离子自由基清除率。

$$D = [1 - (A_1 - A_2) / A_3] \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

D——超氧阴离子自由基清除率,%;

A₁——样品溶液、Tris-HCl缓冲液、邻苯三酚溶液、HCl溶液的吸光值;

A₂——样品溶液、Tris-HCl缓冲液、无水乙醇、HCl溶液的吸光值;

A₃——去离子水、Tris-HCl缓冲液、邻苯三酚溶液、HCl溶液的吸光值。

1.2.6 清除羟基自由基能力测定 根据文献[21],修改如下:在试管中分别加入1mL各浓度的西瓜籽油溶液,然后依次加入6mmol/L FeSO₄溶液、6mmol/L的水杨酸-乙醇溶液和8mmol/L H₂O₂溶液各1mL,混匀,在37℃恒温水浴加热30min,于510nm处测定样品吸光度。用去离子水为空白对照,V_C作为阳性对照。做3次平行试验,取平均值,按式(3)计算羟基自由基清除率。

$$F = [1 - (A_1 - A_2) / A_3] \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

F——羟基自由基清除率,%;

A₁——样品溶液、硫酸亚铁溶液、水杨酸乙醇溶液、H₂O₂溶液的吸光值;

A₂——样品溶液、硫酸亚铁溶液、无水乙醇的吸光值;

A₃——去离子水、硫酸亚铁溶液、水杨酸乙醇溶液、H₂O₂溶液的吸光值。

2 结果与分析

2.1 西瓜籽油GC-MS分析

对西瓜籽油中脂肪酸的成分用GC-MS法进行分析,

总离子流图见图 1。通过计算机质谱数据库和人工谱图解析相结合的手段进行检索,分析判定各成分,共鉴定出 8 种化合物,其中 6 种为脂肪酸。运用面积归一化法对化合物进行相对定量,结果见表 1。

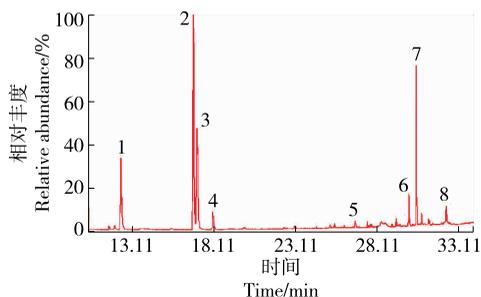


图 1 西瓜籽油甲脂化后总离子流色谱图

Figure 1 Total ion flow chromatogram of watermelon seed oil after methylated

表 1 西瓜籽油脂肪酸组成的分析结果

Table 1 The identification results of fatty acids in watermelon seed oil

序号	化合物名称	保留时间/min	相对含量/%
1	十六烷酸甲酯	12.45	11.56
2	(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸甲酯	16.88	34.70
3	(E)-9-十八碳烯酸甲酯	17.10	15.76
4	10-十八碳烯酸甲酯	18.06	2.75
5	十七烷酸甲酯	26.74	1.08
6	邻苯二甲酸二辛酯	30.00	5.10
7	1-甲基壬烯苯	30.46	26.05
8	(2E,6E)-3,7,11-三甲基-2,6,10-十二碳三烯-1-醇	32.29	3.00

由表 1 可看出,西瓜籽油中的脂肪酸含量较高,其中亚油酸甲脂、反油酸甲酯、油酸甲酯均为不饱和脂肪酸,不饱和脂肪酸达 53.21%。不饱和脂肪酸中,尤以(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸(俗称亚油酸)含量较高,达 34.70%。亚油酸是人体必需的脂肪酸之一,其可降低血液中胆固醇含量,如人体缺乏亚油酸,胆固醇就会与一些饱和脂肪酸结合,导致代谢障碍,从而引发心脑血管方面的疾病。因此,西瓜籽油可作为功能性油脂进行开发。

2.2 西瓜籽油的抗氧化能力

2.2.1 Fe³⁺ 还原力 样品在 700 nm 处的吸光值越大,其还原 Fe³⁺ 能力则越强^[22-23]。由图 2 可知,西瓜籽油和 V_C 都有还原能力,浓度增加二者还原能力亦随之增强,西瓜籽油的还原能力低于 V_C 的还原能力。

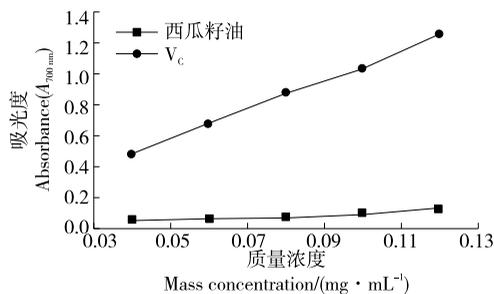


图 2 西瓜籽油对 Fe³⁺ 的还原能力

Figure 2 Effect of watermelon seed oil on reducing Fe³⁺

2.2.2 DPPH 自由基清除能力 由图 3 可知,V_C 对 DPPH 自由基的清除能力很好,对 DPPH 自由基的清除率在 2~10 mg/mL 的质量浓度范围内均在 97% 左右,且浓度变化对清除率的影响不大。而在 2~10 mg/mL 的质量浓度范围内,西瓜籽油清除 DPPH 自由基的能力呈剂量依赖性增强,当西瓜籽油质量浓度 < 6 mg/mL 时,西瓜籽油对 DPPH 自由基的清除能力随质量浓度的增加明显增大,当质量浓度超过 6 mg/mL 时,西瓜籽油对 DPPH 自由基的清除能力随质量浓度增大而增加的增幅减慢。当质量浓度为 2 mg/mL 时,西瓜籽油对 DPPH 自由基的清除率为 27.48%,当质量浓度增加到 10 mg/mL 时,西瓜籽油对 DPPH 自由基的清除率达到 90.73%,接近同质量浓度 V_C 的清除能力。根据回归方程,得出西瓜籽油清除 DPPH 自由基的 IC₅₀ 值为 3.7 mg/mL。

2.2.3 超氧阴离子自由基清除能力 由图 4 可知,西瓜籽油和 V_C 对超氧阴离子自由基的清除能力均随质量浓度的增加而有所增大,在 0.02~0.10 mg/mL 的质量浓度范围内,V_C 对超氧阴离子自由基的清除率从 18.80% 增大到 40.17%,西瓜籽油对超氧阴离子自由基的清除率仅从 48.72% 增大到 58.12%,西瓜籽油对超氧阴离子自由基的清除能力随质量浓度增大而增强的幅度相对较小。当质量浓度为 0.02 mg/mL 时,V_C 对超氧阴离子自由基的清除率为 18.80%,而西瓜籽油对超氧阴离子自由基的清除率达到了 48.72%,可见西瓜籽油对超氧阴离子自由基

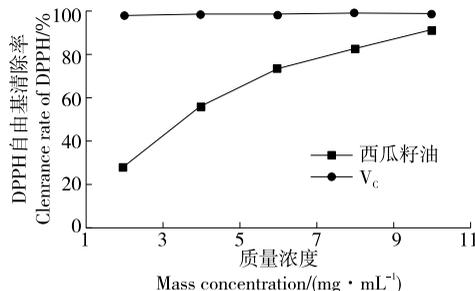


图 3 西瓜籽油对 DPPH 自由基的清除能力

Figure 3 The DPPH scavenging activity of watermelon seed oil

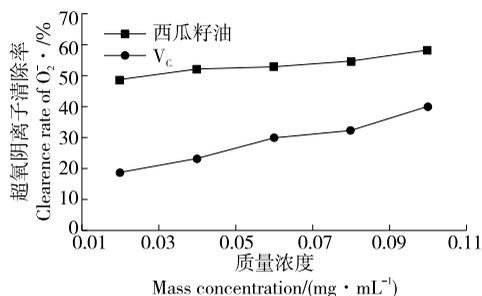


图4 西瓜籽油对超氧阴离子自由基的清除能力

Figure 4 The superoxide anion free radicals activity of watermelon seed oil

的清除能力比V_c的大得多。根据回归方程,得出西瓜籽油清除超氧阴离子自由基的IC₅₀值为0.031 mg/mL。

2.2.4 羟基自由基清除能力 由图5可知,西瓜籽油和V_c对羟基自由基的清除能力均随质量浓度的增加而增大,但西瓜籽油对羟基自由基的清除率增加较缓慢。质量浓度从0.2 mg/mL增加到1.0 mg/mL时,V_c对羟基自由基的清除率从72.93%增加到98.92%,而西瓜籽油对羟基自由基的清除率仅从4.68%增加到11.87%。由此可见,西瓜籽油对羟基自由基的清除能力不仅随质量浓度增大而增加的幅度较小,且对羟基自由基的清除能力较弱。根据回归方程,得出西瓜籽油清除羟基自由基的IC₅₀值为12.04 mg/mL。

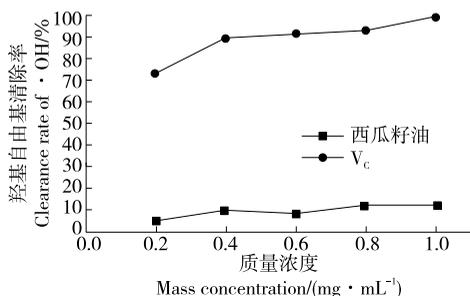


图5 西瓜籽油对羟基自由基的清除能力

Figure 5 The hydroxyl free radicals activity of watermelon seed oil

3 结论

试验采用索氏回流法对西瓜籽进行提油,经GC-MS检测分析其含有6种脂肪酸,其中不饱和脂肪酸相对含量达到50%以上,亚油酸含量达到34.70%,具有较高的营养价值。通过抗氧化试验研究表明,西瓜籽油对DPPH自由基的IC₅₀值为3.7 mg/mL,对超氧阴离子自由基的IC₅₀值为0.031 mg/mL,对羟基自由基的IC₅₀值为12.04 mg/mL,对3种自由基清除能力的排序为超氧阴离子自由基>DPPH自由基>羟基自由基。西瓜籽油有良好的抗氧化能力,在医疗、保健等领域具有广阔的应用前

景。后期将针对各不饱和脂肪酸对其抗氧化性的贡献作用进行深入分析。

参考文献

- [1] 江苏新医学院. 中药大辞典:上册[S]. 上海:上海人民出版社, 1977: 852-853.
Jiangsu New Medical College. Dictionary of traditional Chinese medicine: Volumes I[S]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1977: 852-853.
- [2] 张文文. 西瓜子营养成分分析研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2011: 18-20.
ZHANG Wen-wen. Analysis of nutritional components in watermelon seeds[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011: 18-20.
- [3] 胡滨,陈一资,刘爱萍,等. 混料设计优化水酶法提取西瓜籽油的工艺研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(2): 3-8.
HU Bing, CHEN Yi-zi, LIU Ai-ping, et al. Optimization of aqueous enzymatic extraction of watermelon seed oil by mixture design[J]. China Oils and Fats, 2016, 41(2): 3-8.
- [4] 张文文,杨敬辉,吴琴燕. 尿素包合法提纯西瓜子油中不饱和脂肪酸的研究[J]. 江西农业学报, 2011, 23(10): 51-54.
ZHANG Wen-wen, YANG Jing-hui, WU Qin-yan. Study on purification of unsaturated fatty acid in seed-oil of watermelon with urea clathration method[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2011, 23(10): 51-54.
- [5] 胡滨,陈一资,苏赵. 西瓜籽油辅助降血脂功能研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(2): 56-62.
HU Bing, CHEN Yi-zi, SU Zhao. Function of watermelon seed oil on reducing blood lipid in rats[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(2): 56-62.
- [6] 周琪,韦家辉,盛智丽,等. 双酶法提取红松籽油及其抗氧化分析[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(1): 57-63.
ZHOU Qi, WEI Jia-hui, SHENG Zhi-li, et al. Double enzymatic extraction of korean pine seed oil and analysis of antioxidant[J]. Food Research and Development, 2019, 40(1): 57-63.
- [7] 刘安,罗松,李祁广,等. 不同工艺制备辣椒籽油的体外抗氧化活性比较[J]. 食品与机械, 2016, 32(6): 168-170.
LIU An, LUO Song, LI Qi-guang, et al. Comparing antioxidant activity of pepper seed oil in vitro produced by different process[J]. Food & Machinery, 2016, 32(6): 168-170.
- [8] 罗伟强,唐水秀,毛慧珊,等. 丝瓜籽油成分分析及其抗氧化活性研究[J]. 食品开发与研究, 2021, 42(9): 49-53.
LUO Wei-qiang, TANG Shui-xiu, MAO Hui-shan, et al. Component analysis and antioxidant activity of luffa seed oil[J]. Food Research and Development, 2021, 42(9): 45-59.
- [9] 杜丽清,帅希祥,涂行浩,等. 水剂法提取澳洲坚果油的化学成分及其抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 140-144.
DU Li-qing, SHUAI Xi-xiang, TU Xing-hao, et al. Studied on antioxidant activities and compositions of macadamia nuts oil by a-

- queous extraction[J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(10): 140-144.
- [10] 吕秋冰, 罗霜, 杨恒, 等. 水酶法提取冬瓜籽油工艺优化及体外抗氧化活性研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(3): 16-21.
LU Qiu-bing, LUO Shuang, YANG Heng, et al. Optimization of aqueous enzymatic extraction process of wax gourd seed oil and its antioxidant activity in vitro[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(3): 16-21.
- [11] 曾琳, 林秋美, 韩成云, 等. 香榧叶精油的化学成分、抗氧化及抑菌活性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(2): 98-102.
ZENG Lin, LIN Qiu-mei, HAN Cheng-yun, et al. Study on chemical constituents, antioxidant and antibacterial activities of essential oil from *Torreya grandis* leaves[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(2): 98-102.
- [12] 刘文韬, 刘子畅, 周航, 等. 冬枣核油的营养成分和抗氧化能力分析[J]. *中国油脂*, 2020, 45(2): 141-144.
LIU Wen-tao, LIU Zi-chang, ZHOU Hang, et al. Nutrient composition and antioxidant ability of winter jujube kernel oil[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(2): 141-144.
- [13] 严小平, 李成平, 金建昌. 超声波法提取西瓜籽油的最佳工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(3): 53-56.
YAN Xiao-ping, LI Cheng-ping, JIN Jiang-chang, et al. Study on the optimum technology of ultrasonic extraction of watermelon seed oil[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2012, 27(3): 53-56.
- [14] BABOLI Z M, KORDI A A S. Characteristics and composition of watermelon seed oil and solvent extraction parameters effects[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society(JAOCS)*, 2010, 87(6): 667-671.
- [15] 陈晖, 江苗, 刘雪锋, 等. 丝瓜籽油索氏提取工艺的优化及理化特性研究[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(1): 43-45.
CHEN Hui, JIANG Miao, LIU Xue-feng, et al. Optimization of Soxhlet extraction and analysis of physicochemical properties of *Luffa* seed oil[J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(1): 43-45.
- [16] 唐芳, 李小元, 吴卫国, 等. 山茶油脂肪酸甲酯化条件研究[J]. *粮食与油脂*, 2010(8): 36-39.
TANG Fang, LI Xiao-yuan, WU Wei-guo, et al. Study on methyl-esterification conditions of fatty acid in camellia oil[J]. *Cereals & Oils*, 2010(8): 36-39.
- [17] 李玉英, 王玉玲, 王转花. 藜麦营养成分分析及黄酮提取物的抗氧化和抗菌活性研究[J]. *山西农业科学*, 2018, 46(5): 729-733.
LI Yu-ying, WANG Yu-ling, WANG Zhuan-hua. Study on nutritional components of quinoa and the antioxidant and antibacterial activity of flavonoids extracts[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(5): 729-733.
- [18] SUN T, HO C T. Antioxidant activities of buckwheat extracts[J]. *Food Chemistry*, 2005, 90(4): 743-749.
- [19] 杨虎, 张生堂, 高国强. 玫瑰黄酮的提取及其清除 DPPH 自由基活性研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(24): 152-155.
YANG Hu, ZHANG Sheng-tang, GAO Guo-qiang. Extraction and DPPH radical scavenging activity of flavonoids from rose flower buds[J]. *Food Science*, 2012, 33(24): 152-155.
- [20] 胡滨, 陈一资, 王雪铭. 红花籽油的抗氧化功能研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(6): 86-92.
HU Bing, CHEN Yi-zi, WANG Xue-ming. Study on antioxidant function of safflower seed oil[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(6): 86-92.
- [21] 韩子晗, 孙尧, 杨富雅, 等. 林蛙卵油的提取、成分分析及抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(11): 60-65.
HAN Zi-han, SUN Rao, YANG Fu-ya, et al. Extraction, component analysis and antioxidant activity of rana chensinensis egg oil[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(11): 60-65.
- [22] 林海. 欧李仁油抗氧化活性的研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(15): 105-111.
LIN Hai. Study on antioxidation activities of Chinese dwarf chetty seed oil[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(15): 105-111.
- [23] 李丽丽, 孙泽宇, 刘雄民, 等. 柠檬桉树脂总黄酮的提取纯化及抗氧化活性[J]. *精细化工*, 2019, 36(8): 1 571-1 576.
LI Li-li, SUN Ze-yu, LIU Xiong-min, et al. Extraction, purification and antioxidant activities of total flavonoids in eucalyptus citriodora resin[J]. *Fine Chemicals*, 2019, 36(8): 1 571-1 576.
- [24] 高瑾, MANONOSE Tariro-upenyu, 李志豪, 等. 丙二醛氧化对籽瓜种仁蛋白质结构及功能特性的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(11): 17-21, 151.
GAO Jin, MANONOSE Tariro-upenyu, LI Zhi-hao, et al. Effects of malondialdehyde oxidation on structure and functional properties of watermelon seed protein[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(11): 17-21, 151.
- [25] 姚云平, 于淼航, 陈丽媛, 等. 利用二茂铁检测植物油过氧化值方法的建立[J]. *食品与机械*, 2021, 37(6): 76-80, 149.
YAO Yun-ping, YU Miao-hang, CHEN Li-yuan, et al. Establishment of method for estimation of peroxide value in vegetable oil with ferrocene[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(6): 76-80, 149.

(上接第 126 页)

- [22] 刘静. 裂殖壶 *Schizochytrium* sp. FJU-512 在温度胁迫下的差异蛋白质组学研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2010: 19.
LIU Jin. Differential proteomics analysis of *Schizochytrium* sp. FJU-512 in response to temperature stress[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2010: 19.
- [23] 王芸, 张玥莉. 不同产地紫苏梗中总黄酮含量比较及其提取工艺的考察[J]. *上海医药*, 2018, 39(13): 76-79.
WANG Yun, ZHANG Yue-li. Comparison of the content of total flavonoids in the stem of *perilla frutescens* from different region and the study on extracting process[J]. *Shanghai Medical & Pharmaceutical Journal*, 2018, 39(13): 76-79.

- [24] 高瑾, MANONOSE Tariro-upenyu, 李志豪, 等. 丙二醛氧化对籽瓜种仁蛋白质结构及功能特性的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(11): 17-21, 151.
GAO Jin, MANONOSE Tariro-upenyu, LI Zhi-hao, et al. Effects of malondialdehyde oxidation on structure and functional properties of watermelon seed protein[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(11): 17-21, 151.
- [25] 姚云平, 于淼航, 陈丽媛, 等. 利用二茂铁检测植物油过氧化值方法的建立[J]. *食品与机械*, 2021, 37(6): 76-80, 149.
YAO Yun-ping, YU Miao-hang, CHEN Li-yuan, et al. Establishment of method for estimation of peroxide value in vegetable oil with ferrocene[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(6): 76-80, 149.