

绿豆皮中黄酮类化合物的抗氧化活性及其结构分析

陈洪生, 国慧, 刁静静, 张东杰

Antioxidant Activity and Structural Identification of Flavonoids from Mung Bean Hull

CHEN Hongsheng, GUO Hui, DIAO Jingjing, and ZHANG Dongjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020241>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

响应面优化藜麦糠黄酮类化合物的提取及其抗氧化性研究

Study on Optimization of Extraction Conditions for Flavonoids from *Chenopodium quinoa* Chaff by Response Surface Method and Its Antioxidant Activities

食品工业科技. 2018, 39(23): 193–198

桦褐孔菌黄酮类化合物的提取工艺优化及抗氧化活性

Optimization of extracted process of flavonoids from *Inonotus obliquus* and evaluation of antioxidant activity

食品工业科技. 2018, 39(12): 171–176

蜂产品中黄酮类化合物的提取工艺及功能活性的研究进展

Advance in studies on extraction process and biological activity of flavonoids in bee products

食品工业科技. 2017(13): 339–343

黄酮类化合物吸收代谢及其对胃肠道功能影响的研究进展

Research Progress on Absorption and Metabolism of Flavonoids and Their Effects on the Gastrointestinal Tract Function

食品工业科技. 2019, 40(18): 340–347

鸭蛋卵清蛋白的结构、组成分析及其功能活性研究

Structure, Composition Analysis and Functional Activity of Duck Egg Ovalbumin

食品工业科技. 2020, 41(8): 67–73

食源性黄酮类化合物调控自噬干预疾病的研究进展

Research Progress of Foodborne Flavonoids Interfering with Diseases by Regulating Autophagy

食品工业科技. 2020, 41(16): 326–333



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈洪生,国慧,刁静静,等.绿豆皮中黄酮类化合物的抗氧化活性及其结构分析 [J].食品工业科技,2022,43(2):35-41. doi:10.13386/j.issn1002-0306.2021020241

CHEN Hongsheng, GUO Hui, DIAO Jingjing, et al. Antioxidant Activity and Structural Identification of Flavonoids from Mung Bean Hull[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 35-41. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020241

绿豆皮中黄酮类化合物的抗氧化活性 及其结构分析

陈洪生¹,国慧¹,刁静静^{2,3,*},张东杰^{1,*}

(1.黑龙江八一农垦大学食品学院,黑龙江大庆 163319;

2.黑龙江八一农垦大学,国家杂粮工程技术研究中心,黑龙江大庆 163319;

3.黑龙江八一农垦大学,粮食副产物综合利用教育部工程研究中心,黑龙江大庆 163319)

摘要:本文旨在分析绿豆皮中黄酮类化合物的抗氧化活性及其结构。采用20%、40%、60%、80%乙醇对绿豆皮黄酮粗提物进行梯度洗脱纯化,以总抗氧化能力(total antioxidative capability, T-AOC)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力、2,2'-联氨基-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(2,2'-azinobis-3-ethylbenzothia zoline-6-sulphonic acid, ABTS)自由基清除能力、羟自由基清除能力等为指标,筛选出具有最高抗氧化活性的组分,并对其进行结构鉴定。结果表明,60%洗脱液中绿豆皮黄酮的抗氧化能力最强,其DPPH自由基清除能力为48.03%;ABTS⁺自由基清除能力为57.53%;羟自由基清除能力为12.02%;T-AOC的抗氧化活性为207.64 U/mL,显著高于其他洗脱液($P<0.05$)。绿豆皮中具有最强抗氧化活性的黄酮类化合物分别包括牡荆素(vitexin)、异牡荆素(isovitexin)及圣草酚-6-C- β -D-吡喃葡萄糖苷(eriodictyol-6-C- β -D-glucopyranoside)。

关键词:绿豆皮,黄酮类化合物,抗氧化活性,结构分析

中图分类号:TS201.2

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2022)02-0035-07

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2021020241](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020241)

本文网刊:



Antioxidant Activity and Structural Identification of Flavonoids from Mung Bean Hull

CHEN Hongsheng¹, GUO Hui¹, DIAO Jingjing^{2,3,*}, ZHANG Dongjie^{1,*}

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Heilongjiang Bayi

Agricultural University, Daqing 163319, China;

3. Engineering Research Center of Processing and Utilization of Grain By-products, Ministry of Education,
Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: This paper aimed to analyze the antioxidant activity and structure of flavonoid compounds extracted from mung bean hull. The product of mung bean hull flavonoid extraction was purified by gradient elution with different concentrations of alcohol, such as 20%, 40%, 60% and 80%. The abilities of various eluents in T-AOC, scavenging of 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) free radical, 2,2'-azinobis-3-ethylbenzothia zoline-6-sulphonic acid (ABTS) free radical and hydroxyl radicals, and the compounds with high antioxidant activity were analyzed for structure. The results showed that 60% eluent of mung bean hull flavonoid possess strong antioxidant activity, DPPH scavenging capacity was 48.03%, ABTS⁺ radical scavenging capacity was 57.53%, hydroxyl radicals scavenging capacity was 12.02%, T-AOC was 207.64 U/mL, which was significantly higher than other eluents ($P<0.05$). The flavonoid compounds mainly consisted of three components, such as vitexin, isovitexin, and saccharol-6-C- β -D-glucopyranoside.

收稿日期: 2021-03-01

基金项目: 黑龙江八一农垦大学青年创新人才项目(ZRCQC201810); 黑龙江省自然科学基金创新研究团队(TD2020C003)。

作者简介: 陈洪生(1979-),男,博士,副教授,研究方向:食品科学,E-mail:hsch0608@163.com。

* 通信作者: 刁静静(1981-)(ORCID: 0000-0002-4309-8808),女,博士,副研究员,研究方向:食品科学,E-mail:diaojing62@163.com。

张东杰(1966-)(ORCID: 0000-0003-3536-8422),男,博士,教授,研究方向:农产品加工与贮藏,E-mail:byndzdj@163.com。

Key words: mung bean hull; flavonoids; antioxidant activity; structure analysis

绿豆(*Vigna radiata*)是一种药食同源的食用豆,其富含蛋白质、碳水化合物、矿物质和维生素,还含有丰富的多酚、酚酸和黄酮类化合物等活性成分,这些活性成分由于其较强的抗氧化能力而有利于预防癌症、糖尿病、心血管疾病等非传染性慢性病^[1-2]。我国在对绿豆进行工业利用过程中会产生大量绿豆皮,这些绿豆皮多被用作动物饲料或者直接废弃物^[3]。绿豆皮中含有大量的黄酮类、多酚类化合物,这些功效成分具有抗肿瘤^[4]、降低血脂、降胆固醇等生理功能^[5]。因此,绿豆皮可以用来制取黄酮类物质,以提高资源利用率。近年来,国内外有关绿豆皮的研究主要集中在功能成分的制取及营养功效评价,朱文学等^[6]采用超声波辅助水提取绿豆皮黄酮工艺的研究;Yao 等^[4]和 Peng 等^[7]的研究发现绿豆中富含多酚,这些酚类物质具有较强的 DPPH 自由基清除能力。Lee 等^[8]研究发现绿豆皮提取物黄酮具有抗炎作用。罗磊等^[9]研究表明绿豆皮黄酮对氧化损伤人脐静脉内皮细胞具有保护作用。以上这些研究都证实绿豆皮黄酮具有较好的抗氧化、抗炎等生物活性,但绿豆皮黄酮类物质中起主要作用的活性组分的具体组成,目前还不甚清楚。

本试验采用自主研制的连续化制备色谱对绿豆皮黄酮粗提物进行梯度分离,收集不同分级产物分析其抗氧化能力,采用 LC-MS 分析具有最强抗氧化能力级分的结构,以得出绿豆皮黄酮中最强抗氧化活性的组分结构,以期为绿豆皮的高值化利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

山西明绿豆 大庆萨尔图区博微物资经销处;AB-8 大孔吸附树脂 购于天津南开大学树脂有限公司;芦丁、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-phenyl-2- picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氨-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(2, 2'-azinobis-3-ethylbenzothiazoline -6-sulphonic acid, ABTS) 上海 Macklin 公司;6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸(6-hydroxy-2,5,7,8-tetra-methylchroman-2-carboxylic acid, Trolox) Sigma 公司;乙腈(色谱级)、甲醇(色谱级)、三氯化铁、水杨酸、亚硝酸钠、氢氧化钠、无水乙醇、硝酸铝等试剂

安达市清顺化学试剂公司;总抗氧化能力(total antioxidative capability, T-COA)试剂盒 购于南京建成生物工程研究所。

AL-204 电子天平 北京瑞泽康科技有限公司;粉碎机 天津市泰斯特仪器有限公司;连续化制备型不锈钢分离柱 实验室自制;UPLC-Triple-TOF/MS 系统: AcquityTM ultra 型高效液相色谱仪 美国 Waters 公司;TU1810 型紫外分光光度计 北京普析通用仪器有限公司;CW-200 型超声-微波协同萃取仪 上海新拓分析仪器科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 绿豆皮黄酮粗提液的制备 采用康维良等^[10]的方法稍作改动,将绿豆皮在 40 ℃ 下恒温干燥,粉碎,过 80 目筛后密封保存。配制料液比为 1:31(g/mL)绿豆皮粉末样品溶液,采用超声-微波协同萃取仪进行绿豆皮黄酮的提取,微波功率为 521 W, 时间 30 min, 结束后将提取物进行 3500 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 低温保存备用, 得到绿豆皮黄酮粗提液(测得绿豆皮提取物中黄酮含量为 2.26%)。

1.2.2 绿豆皮黄酮的分离纯化 采用本实验室自制的连续化制备型不锈钢分离装置,根据课题组前期分离纯化条件对绿豆皮黄酮粗提物进行分离纯化。以 1 mL/min 流速将绿豆皮黄酮粗提物泵入分离柱中进行饱和吸附,然后分别采用 1~1.5 倍体积的 20%、40%、60%、80% 乙醇进行梯度洗脱,收集不同洗脱级分的洗脱液备用。

1.2.3 绿豆皮黄酮抗氧化能力的测定

1.2.3.1 DPPH 自由基清除能力的测定 参照陈青青等^[11]方法稍作改动,分别取样品 0.1 mL 样品(浓度 2%),加入 3.9 mL DPPH(30 μmol/L)溶液,避光 30 min, 517 nm 测吸光度,按式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_3}{A_2}\right) \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: A_1 为静置 30 min 后样品的吸光度; A_2 为等体积的乙醇对照的吸光度; A_3 为待测样品与 DPPH 等体积乙醇吸光度。

1.2.3.2 ABTS⁺自由基清除能力 参照陈青青等^[11]方法,分别取样品 0.1 mL 样品(浓度 2%),加入 5 mL ABTS⁺工作液静置 10 min, 734 nm 测吸光度,以 0.1 mL 乙醇作为对照。ABTS⁺自由基清除率按式(2)计算;

$$\text{ABTS}^+ \text{自由基清除率}(\%) = \frac{A_s - A_m}{A_s} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: A_s 为乙醇对照组吸光度; A_m 为样品吸光度。

1.2.3.3 羟自由基清除能力 参照封燕等^[12]的方法稍作改动,分别取样品 0.1 mL 样品(浓度 2%),依次加入 1 mL 6 mmol/L FeSO₄ 溶液、1 mL 6 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液和 1 mL 6 mmol/L H₂O₂ 溶液,于 37 ℃ 水浴 30 min, 510 nm 测吸光度,以 0.1 mL 蒸馏水代替样品作为对照组。羟自由基清除率按式(3)计算;

$$\text{羟自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

式中: A_i 为待测样品吸光度; A_j 为对照组吸光度; A_0 为双蒸水代替 H_2O_2 溶液作为底物对照的吸光度。

1.2.3.4 T-AOC 的测定 采用 T-AOC 检测试剂盒进行分析。

1.2.4 绿豆皮黄酮类化合物的结构分析 称取 10 mg 冻干后的样品粉末, 加甲醇 10 mL 溶解, 10000 r/min 离心 15 min, 取上清液用于测试。使用 0.1% 甲酸乙腈为流动相, 流速为 0.5 mL/min, 检测波长 280 nm。采用 Waters T3 色谱柱(50 mm×3.0 mm i.d., 1.8 μ m), 进样量 5 μ L, 柱温箱 40 °C。采用 UPLC-Triple-TOF/MS 系统进行黄酮结构测定, 并根据 SciFinder 和 Reaxy 数据库检索和推测黄酮类化合物组分。

1.3 数据处理

所得数据均为三次重复的平均值, 用 Statistix 8(分析软件, St Paul, MN) 进行数据分析, 平均数之间显著性差异($P<0.05$)通过 Turkey HSD 进行多重比较分析。并采用 SigmaPlot 12.5 作图。

2 结果与分析

2.1 绿豆皮黄酮类化合物的分离

图 1 反映的是绿豆皮黄酮梯度洗脱样品图。由图 1 可知, 绿豆皮黄酮饱和吸附后, 采用不同洗脱溶剂等体积洗脱制备得到的绿豆皮黄酮级分浓度不同, 随着洗脱剂乙醇浓度的增强, 洗脱样品的颜色也逐渐变深, 其中 60% 洗脱样品颜色最深, 表明 60% 洗脱样品中得到的溶质相对较多, 80% 醇洗液在连续分离中既可将分离柱中的剩余组分洗脱下来, 还可起到清洗分离柱的效果, 以保证分离柱的下一轮吸附洗脱。图 2 反映的是绿豆皮黄酮梯度洗脱四个级分的得率。由图 2 可知, 四种洗脱溶剂得到的黄酮类化合物浓度分别为 0.0056、0.021、0.0257、0.0044 mg/mL, 与图 1 结果结合分析得出, 绿豆皮黄酮类化合物集中在 40% 和 60% 洗脱样品中, 达到绿豆皮黄酮粗提物的 80% 以上; 其中 60% 洗脱样品浓度最高; 20% 醇洗液由于极性相对较低, 洗脱液中含量较低; 由于绿豆皮黄酮类化合物集中在 40% 和 60% 洗脱样品中, 因而 80% 醇洗液中样品也较低。结合图 1 和图 2 也可以看出绿豆皮黄酮类化合物组分集中在

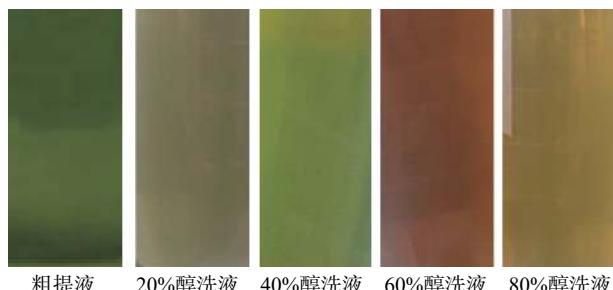


图 1 绿豆皮黄酮洗脱样品图

Fig.1 Elution sample diagram of flavonoids from mung bean hull

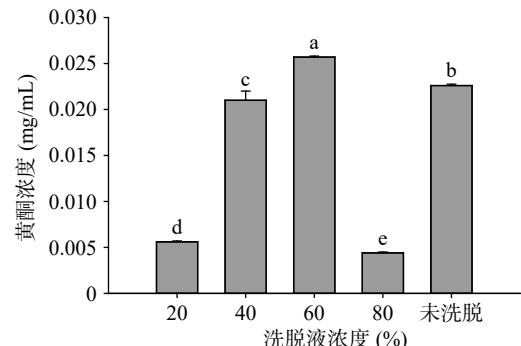


图 2 绿豆皮提取物梯度洗脱样品黄酮浓度

Fig.2 Concentrations of flavonoid of mung bean hull extract by gradient elution

40%~60% 醇洗液中。

2.2 不同级分绿豆皮黄酮的抗氧化能力

图 3 反映的是梯度洗脱后不同级分绿豆皮黄酮的抗氧化能力。由图可知, 等浓度的各个洗脱级分的 DPPH[·]、ABTS^{·+}、·OH 清除能力和总抗氧化能力不同, 20%、80% 洗脱级分的抗氧化能力最低, 60% 洗脱级分的抗氧化能力显著强于其他洗脱级分($P<0.05$), 与未分级样品相比, 60% 洗脱级分的 ABTS^{·+}、·OH 清除能力和总抗氧化能力显著高于等浓度的黄酮粗提物($P<0.05$), 但 DPPH[·]清除能力显著低于黄酮粗提物($P<0.05$), 这说明洗脱样品中的组分与未分级绿豆皮黄酮粗提物存在不同, 不同的抗氧化组分其作用效果及机理不同, 这与自由基种类也存在一定的相关性, ABTS^{·+}和·OH 属于带电荷的自由基, 而 DPPH[·]却并不带电荷, 所以抗氧化效果不同; 40% 洗脱级分尽管抗氧化能力强于 20% 和 80% 洗脱样品, 但显著低于 60% 洗脱级分($P<0.05$), 这也表明不同洗脱样品中的组分不同, 因此抗氧化能力不同, 也表明绿豆皮黄酮中主要抗氧化组分集中在 60% 洗脱液中。

2.3 60% 醇洗脱绿豆皮黄酮类化合物结构分析

图 4 反映的是 60% 醇洗样品的液相色谱图, 由图可知, 纯化后绿豆皮黄酮样品中的吸收峰主要有 3 个, 分别出现在 4.59、6.06 和 6.20 min, 说明 60% 醇洗脱液中绿豆皮黄酮类化合物主要含有 3 种物质。

2.3.1 成分 I 分析 图 5 是成分 I 的一级二级质谱图和可能的结构式。该化合物的出峰时间为 4.59 min, $[M-H]^-$ 为 449.1107, 根据高分辨质谱结果拟合的分子式为 $C_{21}H_{22}O_{11}$, 根据二级质谱 $[M-90-H]$ 、 $[M-120-H]$ 等碎片离子, 该化合物为碳苷, 且含有六元糖, 根据 cifinder 和 reaxy 数据库检索, 推测该化合物为圣草酚-6-C- β -D-吡喃葡萄糖苷(eriodictyol-6-C- β -D-glucopyranoside)。

2.3.2 成分 II 分析 图 6 是成分 II 的一级二级质谱图和可能的结构式。该化合物的出峰时间为 6.06 min, $[M-H]^-$ 为 431.0992, 根据高分辨质谱结果拟合的分子式为 $C_{21}H_{20}O_{10}$, 根据二级质谱 $[M-90-H]$ 、 $[M-120-H]$

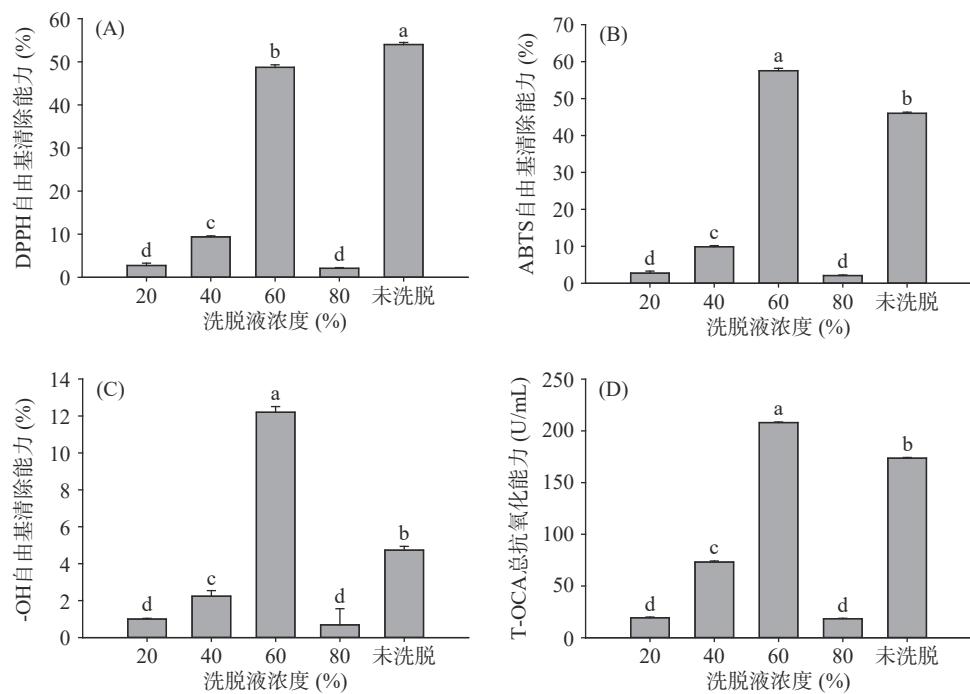


图 3 不同级分绿豆皮黄酮的抗氧化能力

Fig.3 Antioxidant activity of mung bean hull flavonoid from different fractions

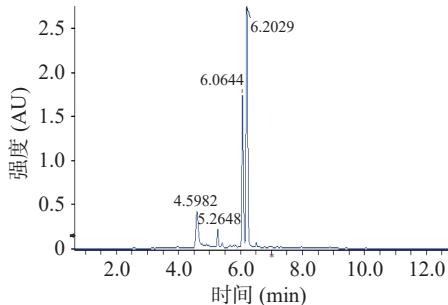


图 4 60% 乙醇洗脱液中黄酮类化合物的液相分析图谱

Fig.4 HPLC chromatograms of mung bean hull flavonoids in 60% ethanol elution liquid

等碎片离子, 该化合物的为碳苷, 且含有六元糖, 根据 Scifinder 和 Reaxy 数据库检索, 根据保留时间分析, 推测该化合物为牡荆素(vitexin)。

2.3.3 成分Ⅲ分析 图 7 是成分 III 的一级二级质谱图和可能的结构式。该化合物的出峰时间为 6.20 min, $[M-H]^-$ 为 431.1007, 根据高分辨质谱结果拟合的分子式为 $C_{21}H_{20}O_{10}$, 根据二级质谱 $[M-90-H]$ 、 $[M-120-H]$ 等碎片离子, 该化合物的为碳苷, 且含有六元糖, 根据 Scifinder 和 Reaxy 数据库检索, 推测该化合物为异牡荆素(isovitexin)。

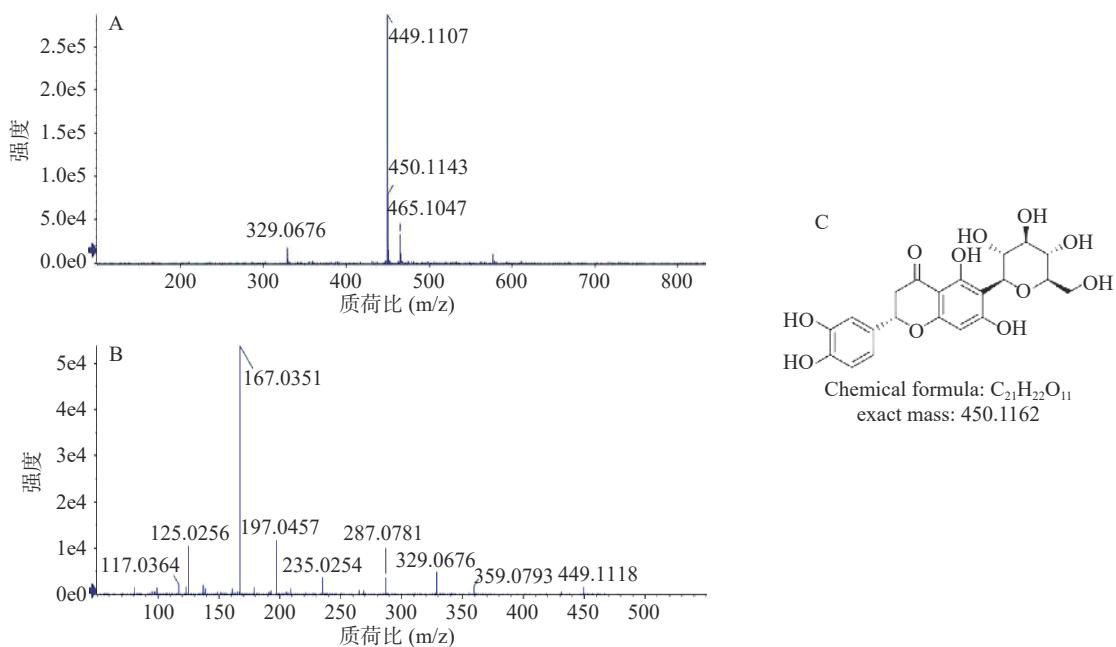


图 5 成分 I 的一级(A)、二级(B)质谱及可能的结构式(C)

Fig.5 Ingredients I primary(A), secondary(B) mass spectrogram and possible structural formula(C)

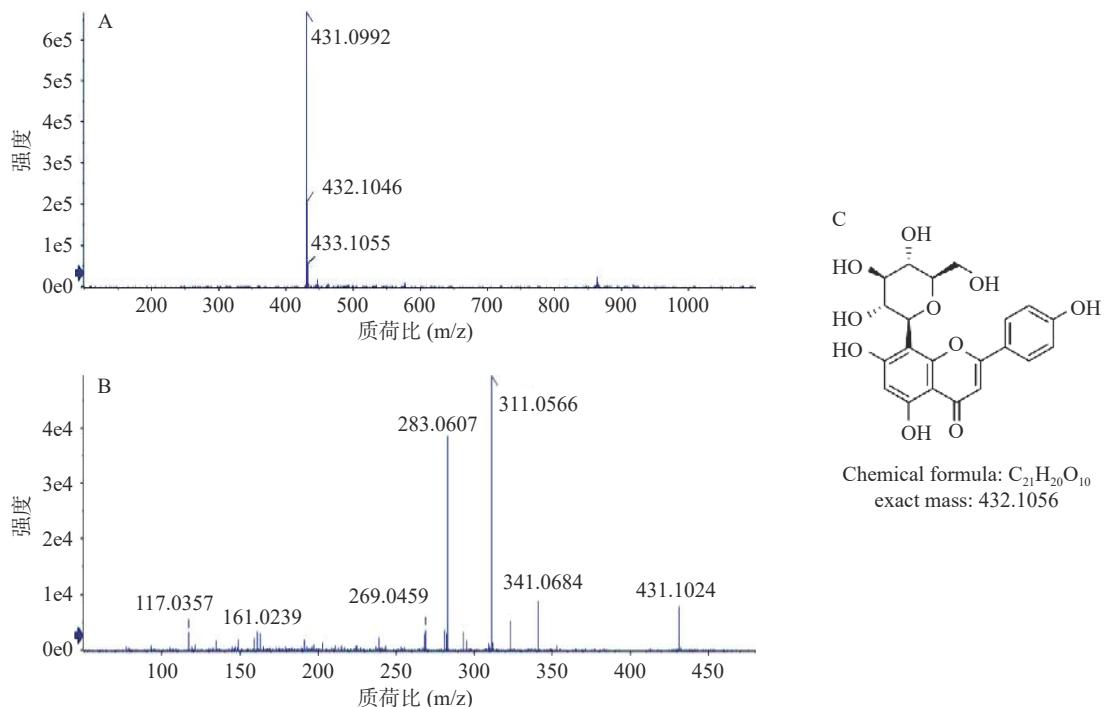


图 6 成分 II 的一级(A)、二级(B)质谱及可能的结构式(C)

Fig.6 Ingredients II primary(A), secondary(B) mass spectrogram and possible structural formula(C)

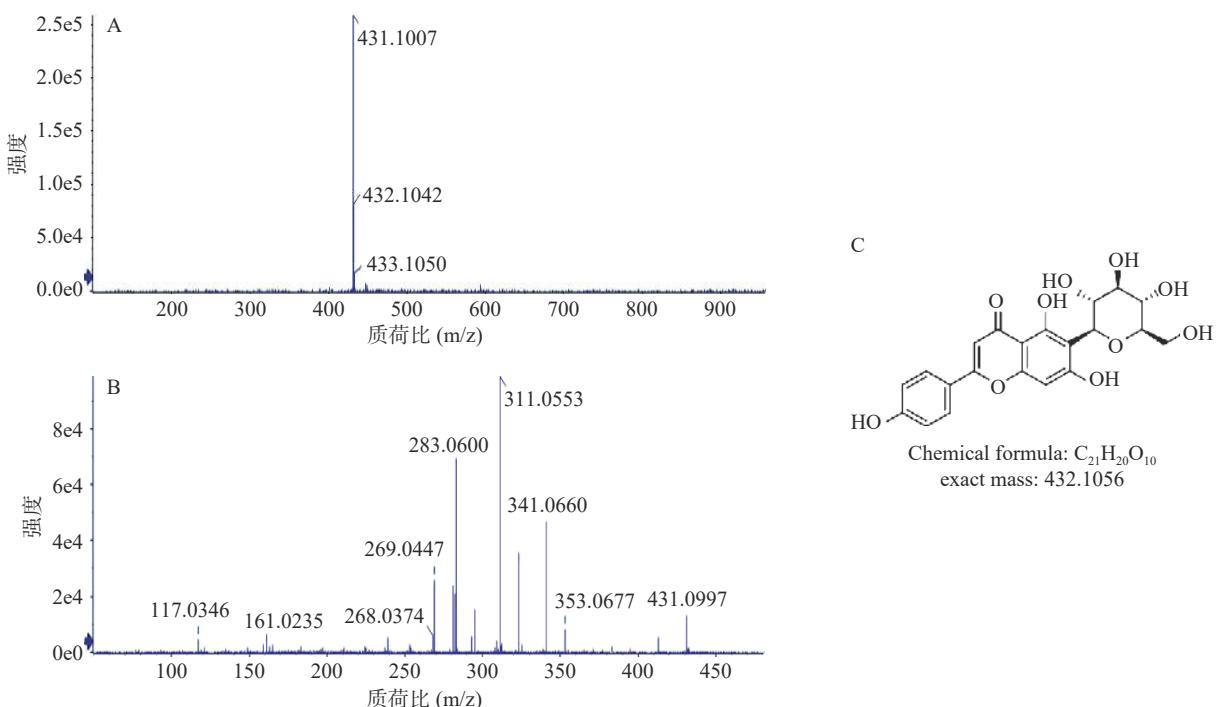


图 7 成分 III 的一级(A)、二级(B)质谱及可能的结构式(C)

Fig.7 Ingredients III primary(A), secondary(B), mass spectrogram and possible structural formula(C)

3 讨论与结论

本研究结果表明, 绿豆皮较强的抗氧化活性与其富含黄酮类化合物有关。罗磊等^[9]和 Kanatt 等的研究表明, 绿豆皮比仁核具有较强的抗氧化性, 这是由于皮壳中含有较高的黄酮类化合物。Li 等^[14]的研究发现荞麦皮壳中含有较高的黄酮类化合物, 其主要黄酮类物质是牡荆素和异牡荆素, 这两种组分被认为是最主要的抗氧化剂。有研究表明绿豆具有清热

解毒作用是由于其活性部位提高了机体对氧自由基的清除能力, 减轻了过量的氧自由基引起的机体损伤^[15-17]。本研究通过连续制备色谱分离纯化得出的抗氧化活性组分经鉴定推测出其主要含有牡荆素、异牡荆素和圣草酚-6-C- β -D-吡喃葡萄糖苷。牡荆素和异牡荆素具有较高的抗氧化能力已被很多研究所证实, 牡荆素能保护 DNA 氧化损伤, 使细胞免受·OH 诱导的氧化损伤, 降低 CSHFD 小鼠肝脏脂肪沉积,

减轻脂质代谢,抑制肝脏炎症反应。此外,牡荆素可显著降低肝巨噬细胞浸润,明显下调肝 SREBP-1c、FAS、ACC mRNA 和蛋白表达^[18-19]。异牡荆素可通过抑制机体的氧化反应改善顺铂诱导的肾损伤^[20]。黄酮类化合物的 B 环是其清除自由基的主要活性部位,当该环存在邻酚羟基结构时,抗氧化活性增强。潘国庆等^[21]的研究表明,B 环上有邻位羟基,自由基清除能力会显著增强,如槲皮素比山柰素的 B 环上多了一个邻位羟基,其活力显著增强。胡栋宝等^[22]的研究发现,黄酮类化合物的 B 环上含有邻位羟基容易形成分子内氢键,这有利于分散苯氧自由基上的单电子,此种结构具有较高的抗氧化活性^[23]。本研究推测的另外一种成分圣草酚-6-C- β -D-吡喃葡萄糖苷的 B 环上有一个邻位羟基,由此,除了牡荆素和异牡荆素这两种抗氧化组分外,这可能是 60% 洗脱样品中绿豆皮黄酮具有较强抗氧化能力的另外一个原因。本文对绿豆加工副产物中绿豆皮的黄酮类化合物进行了提取及分离纯化,鉴定出绿豆皮黄酮中具有较强抗氧化能力的 3 个组分结构,这为绿豆加工副产物资源的利用提供了理论依据。

参考文献

- [1] LUO J, CAI W, WUA T, XU B. Phytochemical distribution in hull and cotyledon of adzuki bean (*Vigna angularis* L.) and mung bean (*Vigna radiata* L.), and their contribution to antioxidant, anti-inflammatory and anti-diabetic activities[J]. *Food Chem*, 2016, 201: 350-360.
- [2] SINGH J P, KAUR A, SINGH N, et al. *In vitro* antioxidant and antimicrobial properties of jambolan (*Syzygium cumini*) fruit polyphenols[J]. *LWT Food Sci Technol*, 2016, 65: 1025-1030.
- [3] GIRISH T K, PRATAPE V M, RAO U J S P. Nutrient distribution, phenolic acid composition, antioxidant and alpha-glucosidase inhibitory potentials of black gram (*Vigna mungo* L.) and its milled by-products[J]. *Food Res Int*, 2012, 46: 370-377.
- [4] PENG X F, ZHENG Z P, CHENG K W, et al. Inhibitory effect of mung bean extract and its constituents vitexin and isovitexin on the formation of advanced glycation endproducts[J]. *Food Chemistry*, 2008, 106(2): 475-481.
- [5] 裴凌鹏, 惠伯棣, 金宗濂, 等. 黄酮类化合物的生理活性及其制备技术研究进展[J]. *食品科学*, 2004, 25(2): 203-207. [PEI Lingpeng, HUI bodi, JIN Zonglian, et al. Review on health function processing technology and market prospects of flavonoids[J]. *Food Science*, 2004, 25(2): 203-207.]
- [6] 朱文学, 焦鲲鹏, 罗磊, 等. 绿豆皮黄酮的超声波辅助水提工艺优化及抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2015, 36(16): 12-17. [ZHU Wenwen, JIAO Kunpeng, LUO Lei, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction and antioxidative activities of total flavonoids from mung bean (*Phaseolus radiatus*) Hull[J]. *Food Science*, 2015, 36(16): 12-17.]
- [7] YAO Y, CHENG X Z, WANG L X, et al. Biological potential of sixteen legumes in China[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2011, 12: 7048-7058.
- [8] LEE S, LEE J H, LEE H, et al. Effect of mung bean ethanol extract on pro-inflammatory cytokines in LPS stimulated macrophages[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2011, 20(2): 519-524.
- [9] 罗磊, 杜冠尚, 张向辉, 等. 绿豆皮牡荆素对 H₂O₂损伤 HUVEC 细胞的预防和治疗作用[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(1): 8. [LUO Lei, DU Guanshang, ZHANG Xianghui, et al. Preventive and therapeutic effects of vitexin from mung bean skin on HUVEC cells injured by H₂O₂[J]. *Chinese Journal of Grain and Oil*, 2021, 36(1): 8.]
- [10] 康维良, 张东杰, 翟爱华, 等. 绿豆皮中黄酮树脂纯化条件优化及纯化物分析[J]. *农产品加工*, 2020(12): 60-65,69. [KANG Weiliang, ZHANG Dongjie, ZHAI Aihua, et al. Optimization of purification condition and purification material analysis of flavone resin in mung bean skin[J]. *Agricultural Products Processing*, 2020(12): 60-65,69.]
- [11] 陈青青, 李柯, 唐晓清, 等. 华东覆盆子果、茎与叶的酚类成分及抗氧化活性分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(24): 209-215. [CHEN Qingqing, LI Ke, TANG Xiaoqing, et al. Analysis of phenolic composition and antioxidant activities in fruits, stems and leaves of *Rubus chingii* Hu[J]. *Food Science*, 2020, 41(24): 209-215.]
- [12] 封燕, 贡小辉, 韦德群, 等. 金蝉花多糖的抗氧化活性及结构分析[J]. *食品科学*, 2016, 37(13): 19-24. [FENG Yan, GONG Xiaohui, WEI Dequn, et al. Antioxidant activity and preliminary structure analysis of polysaccharides from *Cordyceps cicadas*[J]. *Food Science*, 2016, 37(13): 19-24.]
- [13] KANATT S R, ARJUN K, SHARMA A. Antioxidant and antimicrobial activity of legume hulls[J]. *Food Research International*, 2011, 44(10): 3182-3187.
- [14] LI P C, TANG Y F, LIU L M, et al. Therapeutic potential of buckwheat hull flavonoids in db/db mice, a model of type 2 diabetes[J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 52: 284-290.
- [15] 陆付耳, 章菊花, 李鸣真, 等. 热毒清抗自由基作用的实验研究[J]. *中西医结合杂志*, 1991, 11 (6) : 362-363. [LU Fuer, ZHANG Juhua, LI Mingzhen, et al. The scavenging effect of Re-Du-Qing(热毒清) on free radicals[J]. *Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine*, 1991, 11 (6) : 362-363.]
- [16] LU Fuer, DENG Zeming, HOU Anji. Influence of Re Du Qing on the metabolism of oxygen free radicals in rabbits with endotoxic DIC[J]. *Journal of Tongji Medical University*, 1993, 22: 52-54.
- [17] 王旭. 绿豆中清热解毒成分的提取及稳定性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2011. [WANG Xu. Study on extraction and stability of heat clearing and detoxifying components in mung beans[D]. Harbin: Harbin Business University, 2011.]
- [18] 陈班, 李达欢, 李熙灿. 牡荆素保护 DNA 氧化损伤的活性评价及机制分析[J]. *食品与机械*, 2018, 34(1): 130-134. [CHEN Ban, LI Dahuan, LI Xican. Active evaluation of DNA protection to oxidative damage and its possible mechanisms of vitexin *in vitro*[J]. *Food and Machinery*, 2018, 34(1): 130-134.]
- [19] LI C J, CHEN Y, YUAN X, et al. Vitexin ameliorates

- chronic stress plus high fat diet-induced nonalcoholic fatty liver disease by inhibiting inflammation[J]. European Journal of Pharmacology, 2020; 882.
- [20] LIU S X, ZHANG X X, WANG J. Isovitexin protects against cisplatin-induced kidney injury in mice through inhibiting inflammatory and oxidative responses[J]. International Immunopharmacology, 2020; 83.
- [21] 潘国庆, 梁永欣. 黄酮类化合物结构与抗氧化活性关系研究 [J]. 青海科技, 2005(3): 28-30. [PAN Guoqing, LIANG Yongxin. Study on the relationship between flavonoids structure and antioxidant activity[J]. *Qinghai Science and Technology*, 2005(3): 28-30.]
- [22] 胡栋宝, 赵剑雄. 中药满山红中 4 个黄酮类化合物结构及其抗氧化活性的理论研究 [J]. 中国中药杂志, 2016(14): 2675-2679. [HU Dongbao, ZHAO Jianxiong. Density functional theory investigation on antioxidation activity of four flavonoids from Rhododendri Daurici Folium[J]. *Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2016(14): 2675-2679.]
- [23] 宋小峰, 原增艳, 申笑菡, 等. 山楂叶总黄酮富集工艺的优化及其清除自由基能力的检测 [J]. 中国生物制品学杂志, 2020, 33(2): 184-188. [SONG Xiaofeng, YUAN Zengyan, SHEN Xiaohan, et al. Optimization of enrichment process of total flavones of haw leaves and test for ability in scavenging of radicals[J]. *Chinese Journal of Bioproducts*, 2020, 33(2): 184-188.]