

# 不同花色芸豆种皮酚类化合物组成及抗氧化活性

王何柱<sup>1</sup>, 朱 勇<sup>1</sup>, 朱 怡<sup>2</sup>, 何友勋<sup>3</sup>, 秦礼康<sup>1,\*</sup>, 梁亚丽<sup>1</sup>, 陈 月<sup>1</sup>

(1.贵州大学酿酒与食品工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2.贵州省植保植检站, 贵州 贵阳 550001;  
3.毕节市农业科学研究所, 贵州 毕节 551700)

**摘要:** 利用化学萃取法提取7种不同花色芸豆种皮的自由态、结合态酚类化合物, 分析其总酚、总黄酮、总花青素和酚类化合物组成, 同时利用1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)法、2,2'-联氮双-(3-乙基苯并噻唑林-6-磺酸)二胺盐(2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS)法和铁离子还原法测定提取物的抗氧化活性。结果表明: 7种芸豆种皮中总酚含量为0.76~48.73 mg/g, 总黄酮含量为2.93~201.2 mg/g, 总花青素含量为0~2.57 mg/g。黑芸豆种皮的总酚、总花青素最高, 红花芸豆种皮的总黄酮最高; 没食子酸、绿原酸、儿茶素、3,4-二羟基苯甲酸和对羟基苯甲酸是芸豆种皮中的主要酚类化合物, 槲皮素只存在红芸豆种皮中(48.64 μg/g), 对香豆酸在白花芸豆种皮中最高(65.40 μg/g); 黑色芸豆皮的抗氧化能力最强(DPPH自由基清除能力、ABTS阳离子自由基清除能力、铁离子还原能力以每克干基中所含Trolox当量表示, 分别为156.0、260.8、214.7 mg/g); 芸豆种皮中总酚含量与抗氧化值极显著相关( $P<0.01$ )。黑芸豆种皮含有丰富的酚类化合物, 并且表现出一定的抗氧化活性, 可以作为优良的功能食品原料。

**关键词:** 芸豆; 酚类物质; 抗氧化

Phenolic Composition and Antioxidant Activity of Seed Coats of Kidney Beans with Different Colors

WANG Hezhu<sup>1</sup>, ZHU Yong<sup>1</sup>, ZHU Yi<sup>2</sup>, HE Youxun<sup>3</sup>, QIN Likang<sup>1,\*</sup>, LIANG Yali<sup>1</sup>, CHEN Yue<sup>1</sup>

(1. School of Liquor & Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;  
2. Plant Protection and Plant Quarantine Station of Guizhou Province, Guiyang 550001, China;  
3. Bijie Institute of Agricultural Sciences, Bijie 551700, China)

**Abstract:** Free and bound phenolic compounds were extracted chemically from kidney bean seed coats with seven different colors. The total phenolics, total flavonoids, total anthocyanins and phenolic composition of the phenolic extracts were analyzed and their antioxidant activities were determined by 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging, 2,2'-azinobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt (ABTS) radical scavenging and ferric reducing assays. The results showed that the contents of total phenolics, total flavonoids and total anthocyanins in the seven samples ranged from 0.76 to 48.73 mg/g, from 2.93 to 201.2 mg/g, and from 0 to 2.57 mg/g dry mass (DW), respectively. The seed coats of black kidney bean had the highest contents of total phenolics and total anthocyanins, while total flavonoids content was the highest in the seed coats of red kidney bean. Gallic acid, chlorogenic acid, catechin, 3,4-dihydroxybenzoic acid and hydroxybenzoic acid were the main phenolic compounds in the seed coats of kidney beans, and quercetin only existed in the seed coats of red kidney bean (48.64 μg/g). The seed coats of white kidney bean contained the highest content of coumaric acid (65.40 μg/g). The seed coats of black kidney bean possessed the strongest antioxidant capacity with DPPH and ABTS cation radical scavenging capacities of 156.0 mg/g and 260.8 mg/g and ferric reducing power of 214.7 mg/g, respectively. The content of total phenols in the seed coats of kidney beans was significantly correlated with antioxidant activities

收稿日期: 2019-05-09

基金项目: 贵州省食用豆工程技术研究中心项目(黔科合平台人才[2018]5254号); 贵州省重点农业技术推广项目(黔财农[2017]106号);  
贵州省现代农业产业技术体系(特色杂粮)建设项目(黔财农[2018]81号);  
贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2018]5781号)

第一作者简介: 王何柱(1995—)(ORCID: 0000-0002-9533-5828), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品科学与工程。

E-mail: 1306357871@qq.com

\*通信作者简介: 秦礼康(1965—)(ORCID: 0000-0003-3931-4595), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品加工与安全。

E-mail: likangqin@126.com

( $P < 0.01$ )。The seed coats of black kidney bean was rich in phenolic compounds and exhibited antioxidant activities, making it a potential ingredient for functional foods.

**Keywords:** kidney beans; phenolic substances; antioxidant activity

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190509-093

中图分类号: TS214.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2020) 12-0204-07

引文格式:

王何柱, 朱勇, 朱怡, 等. 不同花色芸豆种皮酚类化合物组成及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 204-210.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190509-093. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Hezhu, ZHU Yong, ZHU Yi, et al. Phenolic composition and antioxidant activity of seed coats of kidney beans with different colors[J]. Food Science, 2020, 41(12): 204-210. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190509-093. <http://www.spkx.net.cn>

芸豆 (*Phaseolus vulgaris* L.) 是豆科 (Leguminosae sp.) 菜豆属一年生草本植物的籽粒, 其栽培面积居于世界豆科植物第2位, 仅次于黄豆。芸豆不仅含有丰富的蛋白质、维生素等营养成分, 也是黄酮和花青素等功能成分的重要来源<sup>[1-2]</sup>。黄酮、花青素具有较强的抗氧化活性, 可以保护人体生物大分子免受氧化的危害<sup>[3]</sup>。Zhao Yan等<sup>[4]</sup>在研究豆类提取物与体外抗氧化活性中得出总酚含量较高的提取物具有较高的抗氧化能力, 并且总抗氧化能力与总酚含量之间呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。Wang Yukun等<sup>[5]</sup>在对14种豆类的抗氧化活性研究中, 以铁离子还原/抗氧化能力法 (ferric reducing ability of plasma, FRAP) 计总抗氧化能力, 得出FRAP值在2.406~13.588 mol/g之间, DPPH自由基清除能力在3.211~7.107 mol/g之间, 表现出良好的抗氧化活性。Giusti等<sup>[6]</sup>在对36个豆类样品研究中发现黑皮样品 (黑扁豆和黄豆类) 的抗氧化活性高于浅色品种, 并且暗色品种的总酚含量与IC<sub>50</sub>呈正相关。植物中酚类物质根据其结合方式可分为游离态和结合态, 游离态可以用有机溶剂提取; 结合态则需要通过化学或者酶解的方式进行提取, 一般是一些水合丹宁酸以及与纤维或蛋白结合的原花青素、类黄酮等<sup>[7]</sup>。结合态酚类物质具有良好的生物活性, 可以参与结肠微生物发酵, 产生的发酵产物对人体的健康十分有益<sup>[8]</sup>。目前, 国内对芸豆的抗氧化活性研究主要是对整粒芸豆的游离态提取物做抗氧化研究, 而很少有对不同花色芸豆种皮的游离态和结合态提取物的抗氧化活性进行研究。本实验以7种不同花色芸豆种皮为原料, 研究芸豆种皮的酚类化合物组成及抗氧化活性, 以为芸豆深加工提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

II1、英国红、龙12-2614、科芸1号、天镇黄芸豆、By2015-1、毕芸2号7种芸豆的颜色分别为黑色、红色、

白色、白花色、黄色、红花色、黑红色。7种芸豆的产地为贵州省毕节市, 由贵州省毕节市农科所提供。将芸豆种皮通过手工剥离后, 用粉碎机将种皮粉碎后, 全部通过30目钢筛后于-20℃保存。

没食子酸、6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸 (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid, Trolox)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、福林-酚 美国Sigma公司; 3,4-二羟基苯甲酸、绿原酸、儿茶素、对羟基苯甲酸、咖啡酸、对香豆酸、阿魏酸、槲皮素、反式肉桂酸、芦丁、2,2'-联氮双-(3-乙基苯并噻唑林-6-磺酸)二胺盐 (2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 2,4,6-三(2-吡啶基)-1,3,5-三嗪 (2,4,6-tri(2-pyridyl)-1,3,5-triazine, TPTZ) 北京索莱宝科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

RE-2000B型旋转蒸发仪 上海亚荣生化仪器厂; H2-16KR型台式高速冷冻离心机 湖南可成仪器设备有限公司; L5S紫外-可见分光光度计 上海仪电分析仪器有限公司; TS-100C恒温摇床 上海天呈实验仪器制造有限公司; 1260 Infinity高效液相色谱仪 美国安捷伦公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 游离态与结合态酚类提取物制备

参考Adom等<sup>[9]</sup>的方法并略作修改, 将1 g样品与20 mL冷冻丙酮 (80%) 混合后, 振荡10 min, 然后8 500 r/min离心10 min。收集上清液并重复提取2次, 将收集的上清液倒入烧瓶中并在45℃的旋转蒸发器中旋蒸至10 mL左右, 然后用蒸馏水定容到25 mL得到游离态酚类物质。提取游离态酚类物质后, 在剩余的残渣中加入10 mL的蒸馏水振荡5 min后加入10 mL 14 mol/L氢氧化钠溶液振荡1 h。结束后用浓盐酸调节pH 7, 然后加入20 mL正己烷振荡5 min后超声处理10 min, 8 500 r/min离心10 min, 弃去上清液以除去脂质成分, 重复1次上述步

骤。向剩余混合物中加入20 mL乙酸乙酯进行提取，每次离心之前进行超声处理，收集上清液并重复提取4次，将收集的上清液倒入旋蒸瓶中并在45 °C的旋转蒸发器中旋蒸至干，然后用蒸馏水定容至10 mL得到结合态酚类物质。每个样品均一式3份，得到的提取液保存在-20 °C条件下。

### 1.3.2 总酚含量测定

参考Singleton等<sup>[10]</sup>的方法并稍加改进。采用Folin-Ciocalteu比色法测定总酚含量，准确移取100 μL稀释适当倍数的提取液和没食子酸标准溶液至试管中，之后加入400 μL蒸馏水和100 μL的福林-酚试剂，混匀静置6 min后加入1 mL 7%的碳酸钠溶液和0.8 mL的蒸馏水，避光反应2 h后，以蒸馏水代替样品作空白，在760 nm波长处用酶标仪测定吸光度，同时分别吸取0、20、60、100、150、200、300、400、500、600 μg/mL的没食子酸标准品按上述步骤进行，并绘制标准曲线，将样品测得的吸光度代入并通过计算和转换得到结果，结果以每克干基中所含没食子酸当量表示（mg/g）。

### 1.3.3 总黄酮含量测定

参照Bakar等<sup>[11]</sup>的方法进行。准确吸取0.5 mL稀释至适当倍数提取液或芦丁标准溶液，分别加入2.25 mL的蒸馏水和0.15 mL 5%的亚硝酸钠溶液，反应6 min后加入0.3 mL 10%的氯化铝溶液，振荡混匀静置5 min，加入1 mL 1 mol/L的氢氧化钠溶液，摇匀后在510 nm波长处测定吸光度。以蒸馏水代替提取液作对照。每个处理重复3次，同时吸取0、100、200、300、400、600、800、1 000 μg/mL的芦丁标准品按上述步骤进行，并绘制标准曲线，将样品测得的吸光度代入标准曲线，通过计算和转换得到结果，结果以每克干基中所含芦丁当量表示（mg/g）。

### 1.3.4 总花青素的定量分析

参考Fuleki等<sup>[12]</sup>的方法，花青素含量的测定采用pH示差法，取1 mL的提取液分别用pH 1盐酸-氯化钠缓冲液及pH 4.5的醋酸-醋酸钠缓冲液定容至5 mL，以蒸馏水作为空白对照，用紫外分光光度计测定花青素在520 nm和700 nm波长处的吸光度，以矢车菊-3-葡萄糖苷（Cy-3-Glu）计，利用Fuleki公式对待测液中花青素含量进行测定。

$$\Delta A = (A_{520 \text{ nm}, \text{ pH } 1.0} - A_{700 \text{ nm}, \text{ pH } 1.0}) - (A_{520 \text{ nm}, \text{ pH } 4.5} - A_{700 \text{ nm}, \text{ pH } 4.5}) \quad (1)$$

$$C = \frac{\Delta A \times V \times DF \times M}{\varepsilon \times m \times L} \quad (2)$$

式中： $\Delta A$ 为花青素总吸光度； $A_{520 \text{ nm}}$ 为花青素在520 nm波长处的吸光度； $A_{700 \text{ nm}}$ 为花青素在700 nm波长处的吸光度； $C$ 为花青素含量/（mg/g）； $V$ 为提取液总体积/mL；DF为稀释倍数； $M$ 为Cy-3-Glu的分子质量（449.2 g/mol）； $\varepsilon$ 为Cy-3-Glu的消光系数（29 600 L/（mol · cm））； $m$ 为样品质量/g； $L$ 为光程，数值为1 cm。

### 1.3.5 酚类化合物组成分析

参考Irmak<sup>[13]</sup>和Ti Huihui<sup>[14]</sup>等的方法，吸取提取物1 mL并过0.45 μm的滤膜，各样品的分析采用Agilent Technologies 1260 infinity系统，ZORBAX SB-C<sub>18</sub>色谱柱（250 mm×4.6 mm, 5 μm）。检测器为紫外吸收检测器；流动相A为乙腈，流动相B为1%的冰乙酸溶液；检测波长280 nm；柱温30 °C；流速1.0 mL/min；进样量20 μL。高效液相色谱总运行时间为50 min，梯度洗脱的程序如下：0~5 min, 5%~15% A、95%~85% B；5~35 min, 15%~35% A、85%~65% B；35~40 min, 35%~45% A、65%~55% B；40~50 min, 45%~5% A、55%~95% B。通过样品与样品加标后的出峰时间进行对比定性，并通过将样品各酚类物质的峰面积代入各标准品的标准曲线定量。

### 1.3.6 抗氧化活性测定

#### 1.3.6.1 DPPH自由基清除能力测定

参考Paško等<sup>[15]</sup>的方法进行。分别吸取0、0.05、0.1、0.15、0.2、0.3 mL 0.1 mg/mL的Trolox标准溶液于容量瓶中，加4 mL 0.1 mmol/L的DPPH溶液，加无水乙醇定容至5 mL。混匀静置30 min，用紫外分光光度计在517 nm波长处测定吸光度并绘制标准曲线。吸取0.1 mL稀释适当倍数的提取液，加入4 mL 0.1 mmol/L的DPPH溶液，用无水乙醇定容至5 mL。混匀静置30 min，用紫外分光光度计在517 nm波长处测定吸光度。以蒸馏水代替样品作空白，DPPH自由基清除能力以每克干基中所含Trolox当量表示（mg/g）。

#### 1.3.6.2 ABTS阳离子自由基清除能力测定

参考Arnao等<sup>[16]</sup>的方法并稍加修改。吸取1 mL ABTS母液，加入22 mL甲醇进行稀释，使吸光度达到1.1±0.02。准确吸取150 μL稀释适当倍数的提取液和Trolox标准溶液，加入2 850 μL的ABTS溶液，在黑暗条件下反应2 h，用紫外分光光度计在734 nm波长处测定吸光度。以蒸馏水代替样品作空白，分别吸取0、100、200、300、400、500、600 μmol/L的Trolox标准溶液按上述步骤进行，并绘制标准曲线，结果以每克干基中所含Trolox当量表示（mg/g）。

#### 1.3.6.3 FRAP测定

参考Benzie等<sup>[17]</sup>的方法并稍加修改。首先将150 μL稀释适当倍数的提取液或Trolox标准溶液与2 850 μL的FRAP溶液（300 mmol/L醋酸钠缓冲溶液-20 mmol/L FeCl<sub>3</sub>-10 mmol/L TPTZ 10:1:1, V/V）混匀，37 °C反应10 min，用酶标仪在593 nm波长处测定吸光度。以蒸馏水代替样品作空白，分别吸取0、100、200、300、400、500、600 μmol/L的Trolox标准溶液按上述步骤进行，并绘制标准曲线，结果以每克干基中所含Trolox当量表示（mg/g）。

## 1.4 数据分析

每个实验重复3次,结果表示为 $\bar{x}\pm s$ 。所有数据利用Excel、SPSS 16.0、Origin 9.0统计和绘图,进行数据方差显著性分析。

## 2 结果与分析

## 2.1 不同花色芸豆种皮的总酚、总黄酮、总花青素含量

**表1 芸豆种皮中游离态和结合态酚类物质、黄酮和花青素含量**  
**Table 1 Contents of free and bound phenolic substances, flavonoids and anthocyanins in seed coats of kidney beans**

酚类物质	mg/g						
	III(黑)	英国红(红)	龙12-2614(白)	科芸1号(白花)	天镇黄芸豆(黄)	By2015-1(红花)	毕芸2号(黑红)
游离态酚类物质	44.07±2.54 <sup>a</sup>	32.12±0.07 <sup>f</sup>	0.73±0.21 <sup>f</sup>	36.46±1.9 <sup>b</sup>	28.13±2.46 <sup>d</sup>	34.41±1.42 <sup>c</sup>	41.90±1.12 <sup>a</sup>
结合态酚类物质	4.63±0.14 <sup>a</sup>	2.76±0.22 <sup>e</sup>	0.03±0.00 <sup>d</sup>	3.38±0.15 <sup>b</sup>	4.81±0.48 <sup>b</sup>	4.52±0.06 <sup>d</sup>	3.80±0.15 <sup>b</sup>
总酚	48.73±2.68 <sup>a</sup>	34.88±0.29 <sup>f</sup>	0.76±0.21 <sup>f</sup>	39.84±2.05 <sup>b</sup>	32.94±2.94 <sup>d</sup>	38.93±1.48 <sup>b</sup>	45.70±1.27 <sup>a</sup>
游离态黄酮	98.19±0.76 <sup>b</sup>	144.9±1.15 <sup>b</sup>	2.75±0.23 <sup>f</sup>	180.9±6.29 <sup>b</sup>	139.8±4.80 <sup>b</sup>	194.9±7.80 <sup>b</sup>	121.5±2.79 <sup>d</sup>
结合态黄酮	6.38±0.54 <sup>a</sup>	4.23±0.39 <sup>e</sup>	0.18±0.04 <sup>d</sup>	3.89±0.14 <sup>b</sup>	6.02±0.11 <sup>b</sup>	6.31±0.09 <sup>b</sup>	5.48±0.25 <sup>b</sup>
总黄酮	104.6±1.3 <sup>b</sup>	149.1±1.5 <sup>b</sup>	2.93±0.27 <sup>f</sup>	184.8±6.4 <sup>b</sup>	145.8±4.9 <sup>b</sup>	201.2±7.9 <sup>b</sup>	127.0±3.0 <sup>d</sup>
游离态花青素	2.56±0.18 <sup>b</sup>	0.04±0.00 <sup>f</sup>	Nd	0.04±0.00 <sup>f</sup>	Nd	0.09±0.00 <sup>c</sup>	1.08±0.07 <sup>b</sup>
结合态花青素	0.01±0.00 <sup>b</sup>	Nd	Nd	Nd	0.01±0.00 <sup>b</sup>	0.02±0.00 <sup>f</sup>	Nd
总花青素	2.57±0.18 <sup>b</sup>	0.04±0.00 <sup>f</sup>	Nd	0.04±0.00 <sup>f</sup>	Nd	0.10±0.00 <sup>c</sup>	1.10±0.07 <sup>b</sup>

注: 同行不同肩标字母表示差异显著( $P<0.05$ ) ; Nd未检测出。下同。

从表1可以看出,7种不同花色芸豆种皮中游离态酚类物质含量为0.73~44.07 mg/g,其中黑色种皮中游离态酚类物质的含量最高,白色的含量最低。结合态酚类物质含量范围为0.03~4.81 mg/g,其中黄色的种皮中结合态酚类物质含量最高,白色的含量最低。黑色芸豆种皮总酚含量最高,其次为黑红色、白花色、红花色、红色、黄色,白色种皮的总酚含量最低。这显著高于Xu Baojun等<sup>[18]</sup>报道中全黑豆的总酚含量9.0 mg/g,是因为芸豆酚类物质主要来源于种皮,本实验采用种皮为实验原料,所以总酚含量明显高于其他实验结果。Xu Baojun等<sup>[19]</sup>通过对9种豆类的抗氧化活性研究,得出黑色豆皮芸豆的酚类物质含量比其他颜色豆类高,这与本实验结论一致,并且红色种皮芸豆的总酚要高于黄色种皮。本实验结果表明,游离态酚类物质占总酚的比例都在85%以上,其中白色芸豆种皮中游离态多酚含量占比高达96.05%,可以说明芸豆种皮中的酚类物质主要是以游离态酚类物质为主。

7种不同花色芸豆种皮中游离态黄酮含量在2.75~194.9 mg/g,结合态黄酮含量范围在0.18~6.38 mg/g,其中红花色芸豆种皮中总黄酮含量最高,红色芸豆种皮总黄酮含量要高于黑色和黄色。Kan Lijiao等<sup>[20]</sup>研究的26种芸豆中发现总黄酮含量范围0.19~7.05 mg/g,远低于本实验的结果,可能是因为黄酮主要存在于芸豆种皮部位。Gan Renyou等<sup>[21]</sup>在对28种颜色豆皮的总酚类含量、总黄酮含量和抗氧化能力研究中得出紫红色芸豆和斑点芸豆的总黄酮含量高于

红色芸豆,本实验中红花色芸豆的黄酮含量也高于红色芸豆。

从表1可以看出,游离态花青素含量为0~2.56 mg/g,结合态花青素含量为0~0.02 mg/g。其中总花青素含量最高的是黑色芸豆,含量最低为白色芸豆和黄色芸豆,可以看出深色种皮中花青素的含量较高。聂莘等<sup>[22]</sup>在研究4种粮豆作物的花色苷抗氧化性能比较的实验中得出黑豆花色苷含量大于红豆,从表1可以看出黑色芸豆种皮中总花青素含量约是红色的64倍,结果一致。赵艳等<sup>[23]</sup>在研究杂豆的体外抗氧化活性中,采用香草醛-盐酸法测得5种杂豆的原花青素含量在1.08~11.61 mg/g之间变化,这与本实验的结果差别较大,是因为赵艳采用儿茶素做为标准品。张芳轩等<sup>[24]</sup>研究发现60种黑大豆种皮中总花色苷含量为98.8~2 132.5 mg/100 g,本实验中黑色芸豆种皮总花青素含量也在此范围内。

## 2.2 不同花色芸豆种皮的酚类化合物组成

**表2 7种不同花色芸豆种皮中酚类物质的组成和含量**

**Table 2 Compositions and contents of phenolic compounds in seven seed coats of kidney beans with different colors**

酚类物质	mg/g						
	III(黑)	英国红(红)	龙12-2614(白)	科芸1号(白花)	天镇黄芸豆(黄)	By2015-1(红花)	毕芸2号(黑红)
游离态	Nd	1.27±0.02 <sup>d</sup>	2.56±0.00 <sup>b</sup>	4.24±0.01 <sup>b</sup>	0.63±0.01 <sup>c</sup>	10.26±0.19 <sup>b</sup>	0.58±0.01 <sup>c</sup>
没食子酸/(mg/g)	0.04±0.00 <sup>f</sup>	Nd	Nd	Nd	0.05±0.00 <sup>b</sup>	0.26±0.00 <sup>b</sup>	0.01±0.00 <sup>d</sup>
总和	0.04±0.00 <sup>f</sup>	1.27±0.02 <sup>d</sup>	2.56±0.00 <sup>b</sup>	4.24±0.01 <sup>b</sup>	0.68±0.01 <sup>c</sup>	10.52±0.19 <sup>b</sup>	0.59±0.01 <sup>c</sup>
3,4-羟基苯甲酸/(μg/g)	Nd	100.9±2.3 <sup>b</sup>	Nd	Nd	Nd	26.7±0.8 <sup>c</sup>	207.3±2.2 <sup>b</sup>
结合态	235.9±4.1 <sup>f</sup>	279.2±2.6 <sup>e</sup>	216.3±5.5 <sup>f</sup>	749.1±4.6 <sup>b</sup>	406.7±4.3 <sup>d</sup>	467.5±7.8 <sup>b</sup>	489.8±3.5 <sup>b</sup>
总和	235.9±4.1 <sup>f</sup>	380.1±4.9 <sup>f</sup>	216.3±5.5 <sup>f</sup>	749.1±4.6 <sup>b</sup>	406.7±4.3 <sup>d</sup>	494.2±8.6 <sup>b</sup>	697.1±5.7 <sup>b</sup>
绿原酸/(μg/g)	Nd	358.9±1.9 <sup>f</sup>	32.34±0.53 <sup>f</sup>	940.3±10.2 <sup>b</sup>	121.9±2.1 <sup>f</sup>	653.9±10.2 <sup>b</sup>	487.3±2.8 <sup>c</sup>
结合态	9.06±0.06 <sup>f</sup>	9.52±0.12 <sup>b</sup>	Nd	26.37±0.38 <sup>b</sup>	29.04±0.37 <sup>b</sup>	20.70±0.46 <sup>c</sup>	10.03±0.63 <sup>d</sup>
总和	9.06±0.06 <sup>f</sup>	368.4±2.0 <sup>f</sup>	32.34±0.53 <sup>f</sup>	966.7±10.6 <sup>b</sup>	150.9±2.5 <sup>f</sup>	674.6±10.7 <sup>b</sup>	497.3±3.4 <sup>c</sup>
儿茶素/(μg/g)	866.5±10.9 <sup>b</sup>	865.0±7.0 <sup>b</sup>	53.58±2.56 <sup>f</sup>	3683±18 <sup>b</sup>	601.4±3.0 <sup>b</sup>	2 258±34 <sup>b</sup>	701.5±9.0 <sup>b</sup>
结合态	152.0±2.9 <sup>f</sup>	43.47±2.27 <sup>f</sup>	Nd	72.83±2.09 <sup>d</sup>	81.37±1.75 <sup>d</sup>	103.0±2.3 <sup>b</sup>	69.56±0.71 <sup>d</sup>
总和	1019±14 <sup>f</sup>	908.7±9.2 <sup>f</sup>	53.58±2.56 <sup>f</sup>	3756±20 <sup>b</sup>	683.1±4.8 <sup>b</sup>	2 361±36 <sup>b</sup>	771.1±9.7 <sup>b</sup>
对羟基苯甲酸/(μg/g)	6.12±0.68 <sup>f</sup>	134.3±6.5 <sup>b</sup>	6.11±0.45 <sup>f</sup>	653.3±9.2 <sup>b</sup>	211.9±7.9 <sup>b</sup>	415.0±10.4 <sup>b</sup>	293.5±10.1 <sup>b</sup>
结合态	8.25±1.02 <sup>f</sup>	20.64±2.18 <sup>e</sup>	5.30±0.58 <sup>f</sup>	49.24±0.89 <sup>b</sup>	168.3±7.6 <sup>b</sup>	36.67±2.05 <sup>c</sup>	29.64±0.93 <sup>d</sup>
总和	14.37±1.70 <sup>f</sup>	154.9±8.7 <sup>b</sup>	11.41±1.03 <sup>f</sup>	702.5±10.1 <sup>b</sup>	380.2±15.5 <sup>b</sup>	451.7±12.4 <sup>b</sup>	323.1±11.0 <sup>b</sup>
游离态	15.09±0.93 <sup>d</sup>	64.69±4.19 <sup>f</sup>	12.13±1.28 <sup>d</sup>	Nd	Nd	30.65±3.41 <sup>b</sup>	55.74±4.11 <sup>b</sup>
咖啡酸/(μg/g)	13.18±2.18 <sup>b</sup>	7.42±0.53 <sup>f</sup>	6.27±0.80 <sup>f</sup>	13.44±1.16 <sup>b</sup>	12.88±2.05 <sup>b</sup>	13.19±0.92 <sup>b</sup>	10.22±0.83 <sup>b</sup>
结合态	28.27±3.11 <sup>c</sup>	72.11±4.72 <sup>e</sup>	18.40±2.08 <sup>d</sup>	13.44±1.16 <sup>b</sup>	12.88±2.05 <sup>d</sup>	43.84±4.33 <sup>b</sup>	65.96±4.94 <sup>b</sup>
总和	38.27±3.11 <sup>c</sup>	104.23±5.49 <sup>e</sup>	21.64±2.26 <sup>d</sup>	26.88±2.05 <sup>b</sup>	26.76±2.05 <sup>d</sup>	78.72±4.33 <sup>b</sup>	71.92±4.94 <sup>b</sup>
对香豆酸/(μg/g)	5.84±0.46 <sup>f</sup>	Nd	Nd	21.39±0.97 <sup>a</sup>	11.46±0.52 <sup>c</sup>	15.61±0.61 <sup>b</sup>	Nd
结合态	13.46±0.51 <sup>b</sup>	2.14±0.23 <sup>f</sup>	8.63±0.81 <sup>f</sup>	44.01±2.72 <sup>b</sup>	6.10±0.67 <sup>b</sup>	13.47±1.09 <sup>b</sup>	Nd
总和	19.30±0.97 <sup>c</sup>	2.14±0.23 <sup>f</sup>	8.63±0.81 <sup>f</sup>	65.40±3.69 <sup>b</sup>	17.56±1.19 <sup>b</sup>	29.08±1.70 <sup>b</sup>	Nd
阿魏酸/(μg/g)	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
结合态	24.97±1.89 <sup>b</sup>	7.45±0.68 <sup>f</sup>	11.77±0.90 <sup>d</sup>	19.36±0.69 <sup>c</sup>	39.74±2.37 <sup>b</sup>	16.63±0.47 <sup>c</sup>	9.51±0.57 <sup>d</sup>
总和	24.97±1.89 <sup>b</sup>	7.45±0.68 <sup>f</sup>	11.77±0.90 <sup>d</sup>	19.36±0.69 <sup>c</sup>	39.74±2.37 <sup>b</sup>	16.63±0.47 <sup>c</sup>	9.51±0.57 <sup>d</sup>
槲皮素/(μg/g)	Nd	48.64±1.22 <sup>a</sup>	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
结合态	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
总和	Nd	48.64±1.22 <sup>a</sup>	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
反式肉桂酸/(μg/g)	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
结合态	Nd	Nd	Nd	1.50±0.18 <sup>b</sup>	Nd	1.95±0.14 <sup>a</sup>	1.57±0.15 <sup>b</sup>
总和	Nd	Nd	Nd	1.50±0.18 <sup>b</sup>	Nd	1.95±0.14 <sup>a</sup>	1.57±0.15 <sup>b</sup>

由表2可以看出,没食子酸、绿原酸、儿茶素主要集中在游离态酚类化合物中,3,4-二羟基苯甲酸主要集中在结合态酚类物质中,其中阿魏酸只在结合态酚类化合物中检测出,可以得出游离态和结合态酚类物质的组成有较大的差异。Kim等<sup>[25]</sup>在种皮组织中,棕色和黑色种皮大豆的总浓度显著高于黄、绿种皮大豆,并且酚类化合物的含量与种皮颜色之间存在相关性。但是在本实验中这种相关性不明显,可能是品种不同的原因。

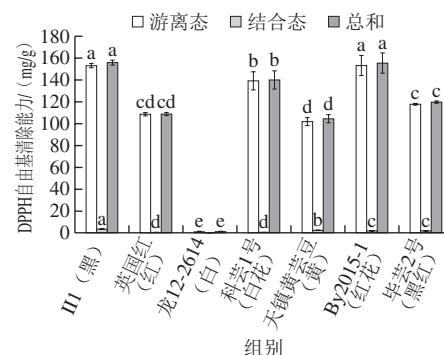
表2结果表明,黑色芸豆种皮中儿茶素含量最高,白色芸豆种皮中没食子酸的含量最高,红黑色芸豆种皮中3,4-二羟基苯甲酸和儿茶素含量较高,红色、白花色、黄色、红花色芸豆种皮中都是没食子酸的和儿茶素的含量较高。这与Xu Baojun等<sup>[18]</sup>的研究具有差异,其在对黑豆种皮中游离态多酚的组分分析中检测出原儿茶酸、2,3,4-三羟基苯甲酸和香草酸以及6种肉桂型酚酸(咖啡酸,绿原酸, m-香豆素、阿魏酸、o-香豆素和反式肉桂酸),其中咖啡酸、绿原酸、反式肉桂酸是种皮中的主要酚酸。造成这种差异的原因可能是品种、农艺措施(灌溉、施肥、病虫害管理)、成熟度收获、收获后贮存和气候条件不同的影响<sup>[26]</sup>。

没食子酸和反式肉桂酸的最高含量都出现在红花色芸豆种皮中,含量分别为10.52 mg/g和1.95 μg/g,3,4-二羟基苯甲酸、绿原酸、对羟基苯甲酸、对香豆酸的最高含量都出现在白花色芸豆种皮中,含量分别为749.1、966.7、702.5、65.40 μg/g。儿茶素的最高含量在红花色芸豆种皮中,含量为2 361 μg/g;咖啡酸的最高含量出现在红色芸豆种皮中,含量为72.11 μg/g;阿魏酸的最高含量出现在黄色芸豆种皮中,含量为39.74 μg/g;槲皮素只在英国红中检测出,其含量为48.64 μg/g。Luthria等<sup>[27]</sup>研究15种干食用豆中酚酸含量得出阿魏酸是所有大豆品种中的主要酚酸。每100 g干豆样品中阿魏酸的平均含量为17.8 mg,而对香豆酸和芥子酸的平均含量分别为6.3、7.0 mg/100 g。仅在2个黑豆品种中可定量检测到咖啡酸(1.1 mg/100 g)。可以发现本实验结果远大于Luthria等<sup>[27]</sup>的实验结果,一方面是因为本实验的原料是种皮,而Luthria等<sup>[27]</sup>的实验原料是整粒豆,另一方面可能是由于品种和产地的影响<sup>[28]</sup>。

### 2.3 芸豆种皮提取物对DPPH自由基清除率的影响

从图1可知,黑色芸豆种皮的总清除能力最强,达到了156.0 mg/g,其余依次为红花色、白花色、黑红色、红色、黄色、白色,并且游离态对DPPH自由基的清除能力明显高于结合态。Pitura等<sup>[29]</sup>在研究6种不同颜色芸豆种皮的抗氧化活性时,得出芸豆种皮提取液对DPPH自由基的清除能力在42 280~57 820 μmol/100 g之间,并且还得出深色颜色种皮有较强的抗氧化活性,这些都与本实验的结论一致。梁亚静等<sup>[30]</sup>研究发芽对芸豆抗氧化活性影响中得出黑芸豆的DPPH自由基清除能力为

24.73 μmol/g,奶花芸豆为27.47 μmol/g,明显低于本实验的结果,是由于其采用的原料的是整个芸豆,而本实验是芸豆种皮。Emily等<sup>[31]</sup>在对14种豆类的研究中得到DPPH自由基抗氧化活性范围为32.36~120.16 μmol/g,远低于本实验结论,可以说明芸豆的抗氧化活性成分主要存在于种皮中,在此之前也有报道证实过酚类物质和活性成分大多都存在于芸豆种皮之中<sup>[32]</sup>。Xu Baojun等<sup>[19]</sup>研究中发现黑大豆对DPPH自由基清除率高于普通豆类,这与本实验结果保持一致。



同一状态提取物字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )，下同。

图1 芸豆提取物对DPPH自由基的清除能力

Fig. 1 DPPH radical scavenging capacities of extracts of kidney bean seed coats

### 2.4 芸豆种皮提取物对ABTS阳离子自由基清除能力的影响

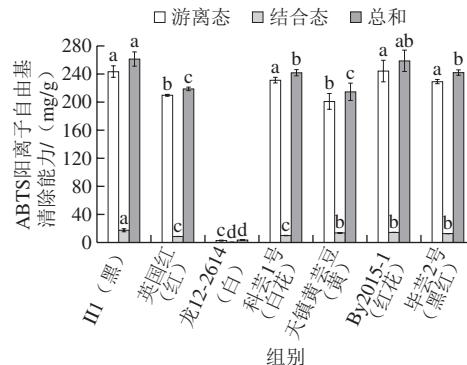


图2 芸豆种皮提取物对ABTS阳离子自由基清除能力

Fig. 2 ABTS cation radical scavenging capacities of extracts of kidney bean seed coats

由图2可以看出,芸豆种皮ABTS阳离子自由基清除能力为260.8 mg/g,其中游离态提取物对ABTS阳离子自由基清除能力的范围为3.24~243.8 mg/g,结合态提取物清除能力的范围为0.52~17.94 mg/g,其中黑色芸豆的总清除能力最强,白色芸豆的最弱,并且红色芸豆略高于黄色。芸豆种皮游离态对ABTS阳离子自由基的清除能力也大于结合态,所以芸豆中游离态提取物对抗氧化活性的贡献大于结合态。Peng Han等<sup>[33]</sup>在对黑大豆种皮和子

叶中酚类物质研究时得出黑豆种皮的可提取酚类物质对ABTS阳离子自由基清除能力为 $165.86 \mu\text{mol/g}$ , 低于本实验的结果, 可能是原料品种和提取剂的不同导致的<sup>[34]</sup>。程安玮等<sup>[35]</sup>研究了4种豆类游离态和结合态提取物的抗氧化活性, 发现结合态提取物对ABTS阳离子自由基抗氧化能力都达到了90%, 游离态提取物对ABTS抗氧化能力在60%以上, 明显低于结合态, 这与本实验研究结果相反, 可能是因为原料和提取方法不同。

## 2.5 荚豆种皮提取物对FRAP的影响

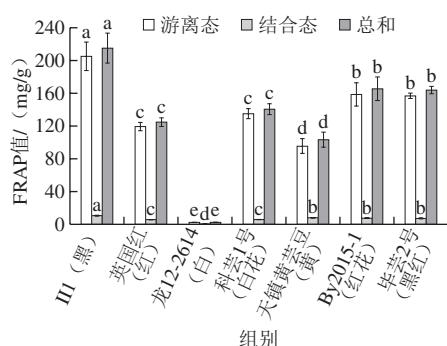


图3 荚豆种皮提取物的FRAP值

Fig. 3 Ferric reducing antioxidant power (FRAP) of extracts of kidney bean seed coats

从图3可以看出, 荚豆种皮提取物的FRAP值范围在 $1.83\sim214.7 \text{ mg/g}$ 之间, 各颜色之间的强弱关系为: 黑色>红花色>黑红色>白花色>红色>黄色>白色。游离态提取物的抗氧化能力明显强于结合态, 这与前两种测抗氧化能力的结果保持一致。Xu Baojun等<sup>[36]</sup>研究得出一些豆类的FRAP值, 其中黑豆为 $1.27\sim9.93 \text{ mmol}/100 \text{ g}$ ; 黄色大豆为 $0.13\sim0.34 \text{ mmol}/100 \text{ g}$ , 红芸豆为 $2.85\sim9.22 \text{ mmol}/100 \text{ g}$ , 黑豆的FRAP值明显大于黄豆的, 与本实验结果一致。Rocchetti等<sup>[37]</sup>在研究谷物和豆类的抗氧化活性中, 得到芸豆的FRAP值为 $198.1 \mu\text{mol}/100 \text{ g}$ , 小于本实验结论, 一方面是因为本实验采用的是种皮为原料, 另一方面, 荚豆的品种和产地也不同。通过分析3种抗氧化方法的结果表明黑色芸豆种皮的抗氧化能力最强, 白色芸豆种皮最弱。

## 2.6 总酚、总黄酮、总花青素和单个酚类物质与抗氧化活性的相关性

表3 总酚、总黄酮、总花青素和单个酚类物质与抗氧化活性的相关性  
Table 3 Correlations of antioxidant activity with total phenolics, total flavonoids, total anthocyanins and individual phenolic acids

项目	总酚	总黄酮	总花青素	没食子酸	3,4-二羟基苯甲酸	绿原酸	儿茶素	对羟基苯甲酸	咖啡酸	对香豆酸	阿魏酸	槲皮素	反式肉桂酸
DPPH自由基	0.946**	0.836*	0.402	0.242	0.440	0.478	0.600	0.466	0.206	0.393	0.217	-0.024	0.475
ABTS阳离子自由基	0.972**	0.852*	0.356	0.119	0.494	0.456	0.509	0.472	0.303	0.278	0.225	0.063	0.433
FRAP	0.965**	0.633	0.657	0.051	0.314	0.277	0.393	0.215	0.309	0.187	0.120	-0.040	0.370

注: \*\*极显著相关,  $P<0.01$ ; \*显著相关,  $P<0.05$ 。

通过相关性分析可以得出, 总酚含量与3个抗氧化值极显著相关( $P<0.01$ ), 总黄酮含量与DPPH和ABTS 2种方法的抗氧化值显著相关, 并且单个酚类物质与3种抗氧化活性之间的相关性较低。梁亚静等<sup>[30]</sup>在研究萌发对芸豆酚类物质及抗氧化活性的影响中得出多酚、黄酮含量与4个抗氧化值(DPPH、ABTS、FRAP、氧化自由基吸收能力(oxygen radical absorbance capacity, ORAC))极显著相关( $P<0.01$ ), Xu Baojun等<sup>[36]</sup>在研究萃取溶剂对豆科植物酚类物质及抗氧化活性影响中发现, 当提取溶剂为80%的丙酮时, 总酚含量与DPPH、FRAP、ORAC之间极显著相关, 并且其相关性大于黄酮含量与DPPH、FRAP、ORAC的相关性, 这与本实验结果保持一致。Shi Zhenxing等<sup>[34]</sup>研究绿豆时对其对抗氧化活性与总酚、总黄酮和个别酚酸进行了相关性分析, 发现阿魏酸和咖啡酸与抗氧化活性相关性较低。

## 3 结论

本实验研究了黑色、红色、白色、白花色、黄色、红花色、黑红色7种不同花色芸豆种皮中酚类物质的含量以及抗氧化活性, 同时对酚类物质的组成成分进行分析, 并对总酚、黄酮、花青素和单个酚类物质的含量和抗氧化能力进行相关性分析。结果表明, 黑色芸豆种皮总酚含量最高, 其次为黑红色、白花色、红花色、红色、黄色、白色种皮的总酚含量最低。不同花色芸豆种皮中游离态黄酮含量在 $2.75\sim194.9 \text{ mg/g}$ , 结合态黄酮含量范围在 $0.18\sim6.38 \text{ mg/g}$ , 黑色芸豆的总花青素含量最高。种皮中主要的酚类物质是没食子酸和儿茶素, 并且没食子酸、绿原酸、儿茶素主要集中在游离态酚类化合物中, 3,4-二羟基苯甲酸和阿魏酸主要集中在结合态酚类物质中; DPPH、ABTS、FRAP 3种不同的抗氧化方法结果显示黑色芸豆种皮的抗氧化能力都是最强的, 白色种皮的最弱。不同花色芸豆种皮的活性成分含量和抗氧化能力存在差异, 为开发多样化芸豆产品提供了理论依据。对其酚类物质的种类和含量的分析, 有助于在加工中更大程度地保留其活性。

## 参考文献:

- CHÁVEZ-MENDOZA C, SÁNCHEZ E. Bioactive compounds from Mexican varieties of the common bean (*Phaseolus vulgaris*): implications for health[J]. Molecules, 2017, 22(8): 1360. DOI:10.3390/molecules22081360.
- SINGH B, SINGH J P, SHEVKANI K, et al. Bioactive constituents in pulses and their health benefits[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(4): 858-870. DOI:10.1007/s13197-016-2391-9.
- GARCÍA-LAFUENTE A, MORO C, MANCHÓN N, et al. In vitro anti-inflammatory activity of phenolic rich extracts from white and red

- common beans[J]. Food Chemistry, 2014, 161: 216-223. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.04.004.
- [4] ZHAO Y, DU S K, WANG H, et al. *In vitro* antioxidant activity of extracts from common legumes[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 462-466. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.12.006.
- [5] WANG Y K, ZHANG X, CHEN G L, et al. Antioxidant property and their free, soluble conjugate and insoluble-bound phenolic contents in selected beans[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 24: 359-372. DOI:10.1016/j.jff.2016.04.026.
- [6] GIUSTI F, CAPRIOLI G, RICCIUTELLI M, et al. Determination of fourteen polyphenols in pulses by high performance liquid chromatography-diode array detection (HPLC-DAD) and correlation study with antioxidant activity and colour[J]. Food Chemistry, 2016, 221: 689-697. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.11.118.
- [7] ARRANZ S, SAURA-CALIXTO F, SHAHA S, et al. High contents of nonextractable polyphenols in fruits suggest that polyphenol contents of plant foods have been underestimated[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(16): 7298-7303. DOI:10.1021/jf9016652.
- [8] SAURA-CALIXTO F, SERRANO J, GOÑI I. Intake and bioaccessibility of total polyphenols in a whole diet[J]. Food Chemistry, 2007, 101(2): 492-501. DOI:10.1016/j.foodchem.2006.02.006.
- [9] ADOM K K, LIU R H. Antioxidant activity of grains[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(21): 4696-4704. DOI:10.1021/jf0205099.
- [10] SINGLETON V L, ORTHOFER R, LAMUELA-RAVENTÓS R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-ciocalteu reagent[J]. Methods in Enzymology, 1999, 299(1): 152-178. DOI:10.1016/S0076-6879(99)99017-1.
- [11] BAKAR M F A, MOHAMED M, RAHMAT A, et al. Phytochemicals and antioxidant activity of different parts of bambangan (*Mangifera pajang*) and tarap (*Artocarpus odoratissimus*)[J]. Food Chemistry, 2009, 113(2): 479-483. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.07.081.
- [12] FULEKI T, FRANCIS F J. Quantitative methods for anthocyanins. 4. determination of individual anthocyanins in cranberry and cranberry products[J]. Journal of Food Science, 1968, 33(5): 471-478. DOI:10.1111/j.1365-2621.1968.tb03658.x.
- [13] IRMAK S, JONNALA R S, MACRITCHIE F. Effect of genetic variation on phenolic acid and pectic acid contents of Pegaso wheat lines[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 48(1): 20-26. DOI:10.1016/j.jcs.2007.07.007.
- [14] TI H H, LI Q, ZHANG R F, et al. Free and bound phenolic profiles and antioxidant activity of milled fractions of different indica rice varieties cultivated in southern China[J]. Food Chemistry, 2014, 159: 166-174. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.03.029.
- [15] PAŠKO P, BARTOŇ H, ZAGRODZKI P, et al. Anthocyanins, total polyphenols and antioxidant activity in amaranth and quinoa seeds and sprouts during their growth[J]. Food Chemistry, 2009, 115(3): 994-998. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.01.037.
- [16] ARNAO M B, CANO A, ACOSTA M. The hydrophilic and lipophilic contribution to total antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2001, 73(2): 239-244. DOI:10.1016/s0308-8146(00)00324-1.
- [17] BENZIE I F F, STRAIN J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": the FRAP assay[J]. Analytical Biochemistry, 1996, 239(1): 70-76. DOI:10.1006/abio.1996.0292.
- [18] XU B J, CHANG S K C. Antioxidant capacity of seed coat, dehulled bean, and whole black soybeans in relation to their distributions of total phenolics, phenolic acids, anthocyanins, and isoflavones[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(18): 8365-8373. DOI:10.1021/jf801196d.
- [19] XU B J, YUAN S H, CHANG S K C. Comparative analyses of phenolic composition, antioxidant capacity, and color of cool season legumes and other selected food legumes[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(2): 167-177. DOI:10.1111/j.1750-3841.2006.00261.x.
- [20] KAN L J, NIE S, HU J, et al. Nutrients, phytochemicals and antioxidant activities of 26 kidney bean cultivars[J]. Food & Chemical Toxicology an International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association, 2016, 108(Part B): 467-477. DOI:10.1016/j.fct.2016.09.007.
- [21] GAN R Y, DENG Z Q, YAN A X, et al. Pigmented edible bean coats as natural sources of polyphenols with antioxidant and antibacterial effects[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 73: 168-177. DOI:10.1016/j.lwt.2016.06.012.
- [22] 聂芊, 廖顺雯, 刘涛. 四种粮豆作物的花色苷抗氧化性能比较[J]. 食品科学, 2007, 28(9): 46-48. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2007.09.004.
- [23] 赵艳, 杜双奎, 王欣欣, 等. 5种杂豆体外抗氧化性研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 6-10. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2015.10.002.
- [24] 张芳轩, 张名位, 张瑞芬, 等. 不同黑大豆种质资源种皮花色苷组成及抗氧化活性分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(24): 5088-5099. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2010.24.013.
- [25] KIM J A, JUNG W S, CHUN S C, et al. A correlation between the level of phenolic compounds and the antioxidant capacity in cooked-with-rice and vegetable soybean (*Glycine max* L.) varieties[J]. European Food Research and Technology, 2006, 224(2): 259-270. DOI:10.1007/s00217-006-0377-y.
- [26] NINFALI P, BACCHIOCCA M. Polyphenols and antioxidant capacity of vegetables under fresh and frozen conditions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(8): 2222-2226. DOI:10.1021/jf020936m.
- [27] LUTHRIA D, PASTORCORRALES M. Phenolic acids content of fifteen dry edible bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties[J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2006, 19(2): 205-211. DOI:10.1016/j.jfca.2005.09.003.
- [28] ALSIKH N, DE CAMARGO A C, SHAHIDI F. Phenolics of selected lentil cultivars: antioxidant activities and inhibition of low-density lipoprotein and DNA damage[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 8(Part B): 1022-1038. DOI:10.1016/j.jff.2015.05.018.
- [29] PITURA K, ARNTFIELD S D. Characteristics of flavonol glycosides in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seed coats[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 26-32. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.07.220.
- [30] 梁亚静, 韩飞, 梁盈, 等. 萌发对芸豆酚类物质及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 142-146. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.16.021.
- [31] EMILY M T P, RONGHUA L, MARTA H, et al. Total polyphenol content, carotenoid, tocopherol and fatty acid composition of commonly consumed Canadian pulses and their contribution to antioxidant activity[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 38: 602-611. DOI:10.1016/j.jff.2016.11.006.
- [32] SINGH B, SINGH J P, KAUR A, et al. Phenolic composition and antioxidant potential of grain legume seeds: a review[J]. Food Research International, 2017, 101: 1-16. DOI:10.1016/j.foodres.2017.09.026.
- [33] PENG H, LI W, LI H, et al. Extractable and non-extractable bound phenolic compositions and their antioxidant properties in seed coat and cotyledon of black soybean (*Glycine max* (L.) Merr.)[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 32: 296-312. DOI:10.1016/j.jff.2017.03.003.
- [34] SHI Z X, YAO Y, ZHU Y Y, et al. Nutritional composition and antioxidant activity of twenty mung bean cultivars in China[J]. The Crop Journal, 2016, 4(5): 398-406. DOI:10.1016/j.cj.2016.06.011.
- [35] 程安玮, 吴剑夫, 秦宏伟, 等. 4种豆类中多酚、类黄酮含量及抗氧化活性研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(10): 28-32. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2017.10.005.
- [36] XU B J, CHANG S K C. A comparative study on phenolic profiles and antioxidant activities of legumes as affected by extraction solvents[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(2): 159-166. DOI:10.1111/j.1750-3841.2006.00260.x.
- [37] ROCCHETTI G, LUCINI L, JOSE M L R, et al. Gluten-free flours from cereals, pseudocereals and legumes: phenolic fingerprints and *in vitro* antioxidant properties[J]. Food Chemistry, 2019, 271: 157-164. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.07.176.