山西主栽黑玉米营养成分及其抗氧化作用

路欣，梁霞，孟婷婷，周柏玲，田志芳

（山西农业大学山西功能食品研究院，山西太原 030031）

摘要：以 9 个不同的山西主栽黑玉米品种的全粉为实验材料，测定了其主要营养成分、氨基酸组分、粘度特性、花青苷色素含量及抗氧化活性，检验了花青苷色素含量与抗氧化力的相关性，评价了 9 个品种黑玉米的营养价值。结果表明，不同品种黑玉米全粉在碳水化合物、粗蛋白、粗脂肪、粗纤维含量上有显著差异（$p<0.05$）。所有品种的组氨酸含量均远高于全蛋模式的 22.00 mg/g pro 标准，分别为黑玉 194（51.41 mg/g pro）；黑玉 195（42.53 mg/g pro）；紫玉 119（39.70 mg/g pro）；晋糯 8 号（33.13 mg/g pro）；晋糯 10 号（43.90 mg/g pro）；晋糯 20 号（42.98 mg/g pro）；紫糯 511（44.06 mg/g pro）；黑玉二合一（55.11 mg/g pro）；黑糯 158（49.48 mg/g pro）；除黑玉 195 的亮氨酸含量比 FAO/WHO 模式的 70.00 mg/g pro 标准高之外，其余品种的亮氨酸含量均大于全蛋模式的 86.00 mg/g pro 标准，分别为：黑玉 194（107.71 mg/g pro）；紫玉 119（101.57 mg/g pro）；晋糯 8 号（112.47 mg/g pro）；晋糯 10 号（98.50 mg/g pro）；晋糯 20 号（129.98 mg/g pro）；紫糯 511（113.83 mg/g pro）；黑玉二合一（148.11 mg/g pro）；黑糯 158（102.76 mg/g pro）。不同品种黑玉米的花青苷色素含量差异较大，在 13.3~42.6 mg/100 g 之间，在体外，黑玉米抑制 DPPH 自由基的能力是维 C 的 1.68 倍，且其清除 DPPH 自由基能力与其花青苷色素含量在 0.01 水平（双侧）具有显著正相关性。

关键词：黑玉米；营养成分；花青苷；抗氧化活性；相关性分析

文章篇号：1673-9078(2021)01-73-83 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.01.0704

Nutrient Composition and Antioxidant Effect of Main Black Corn in Shanxi

LU Xin, LIANG Xia, MENG Ting-ting, ZHOU Bai-ling, TIAN Zhi-fang

(Shanxi Functional Food Research Institute, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: The whole flours of 9 different main black corn varieties in Shanxi were used as experimental materials, the main nutrients, amino acid components, viscosity characteristics, anthocyanin pigment content and antioxidant activity were measured, the correlation between anthocyanin pigment content and antioxidant capacity was tested, and the nutritional values of 9 black corn varieties were evaluated. The results showed that different varieties of black corn whole flour have significant differences in carbohydrate, crude protein, crude fat and crude fiber content ($p<0.05$). The histidine content of all varieties is much higher than the 22.00 mg/g pro standard of the whole egg model, which are Heiyu 194 (51.41 mg/g pro); Heiyu 195 (42.53 mg/g pro); Ziyu 119 (39.70 mg/g pro); Jinnuo No.8 (33.13 mg/g pro); Jinnuo No.10 (43.90 mg/g pro); Jinnuo 20 (42.98 mg/g pro); Zinuo 511 (44.06 mg/ g pro); Heiyu two-in-one (55.11 mg/g pro); Heinuo 158 (49.48 mg/g pro). The leucine content of Heiyu 195 is higher than the 70.00 mg/g pro standard of FAO/WHO model. In addition, the leucine contents of other varieties are greater than the 86.00 mg/g pro standard of the whole egg model: Heiyu 194 (107.71 mg/g pro); Ziyu 119 (101.57 mg/g pro); Jinnuo No. 8 (112.47 mg/g pro); Jinnuo No. 10 (98.50 mg/g pro); Jinnuo No. 20 (129.98 mg/g pro); Zinuo 511 (113.83 mg/g pro); Black jade combo (148.11 mg/g pro); Heinuo 158 (102.76 mg/g pro). The anthocyanin pigment content of different varieties of black corn is quite different, between 13.3~42.6 mg/100 g. *In vitro*, the ability of black corn to inhibit DPPH free radical is 1.68 times that of vitamin C. Moreover, there is a

引文格式：

路欣,梁霞,孟婷婷,等.山西主栽黑玉米营养成分及其抗氧化作用[J].现代食品科技,2021,37(1):73-83

LU Xin, LIANG Xia, MENG Ting-ting, et al. Nutrient composition and antioxidant effect of main black corn in Shanxi [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(1): 73-83

收稿日期：2020-07-25

基金项目：国家重点研发计划项目（2017YFD0401201）；山西省重点研发计划项目（201803D221008-10）；山西省农业科学院“农谷”研发专项（YCX2017D2202）

作者简介：路欣（1988-），女，硕士研究生，研究实习员，研究方向：杂粮主食化加工技术及机理研究

通讯作者：梁霞（1970-），女，副研究员，研究方向：农产品主食化加工技术研究

significant positive correlation at 0.01 level (bilateral) between the anthocyanin pigment content of black corn and the ability to scavenge DPPH.

Key words: black corn; nutritional components; anthocyanin; antioxidant activity; correlation analysis

黑玉米是籽粒色泽为乌色、紫色、蓝色、黑色玉米的总称，属于玉米栽培品种的一个变种[1]，其籽粒角质层不同程度地沉淀黑色素，外观乌黑发亮，其穗呈紫黑色，香甜可口。黑玉米不仅色泽独特，而且营养丰富，富含多种氨基酸和各种人体必需的微量元素，其蛋白质、“生命元素”硒的含量都高于黄玉米[2]；17 种氨基酸的含量有 13 种较高。黑玉米脂肪含量也比黄玉米高 1.3 倍，且为多不饱和脂肪酸，这些不饱和脂肪酸具有降血压，促进平滑肌收缩、扩张血管、阻碍血小板凝固和防止动脉硬化等功能。黑玉米中还含有大量的膳食纤维，膳食纤维在消化系统中具有吸收水分的作用；增加肠道及胃内的食物体积，可增加饱足感；又能促进肠道蠕动，可舒解便秘；同时膳食纤维也能吸附肠道中的有害物质以便排出；改善肠道菌群，为益生菌的增殖提供能量和营养。膳食纤维还能提高面包持水性，抑制面包心水分的散失，使其质地柔软，老化速度下降[3]。在黑玉米中还含有大量的黑色素。研究表明，黑色素属于花青苷类色素，是类黄酮化合物，有很强的清除自由基和抗氧化的能力，并以高效、低毒、高生物利用率而著称。花青苷类色素能有效清除人体内的自由基，减少过氧化物的产生，防止可见光和紫外光的辐射，具有抗肿瘤、抗衰老、护肤养颜的功效[4-7]。花青苷色素等物质能充当起超氧化物歧化酶（SOD）的作用，延缓衰老。目前很多针对中老年保健功能的产品即以黑色素、花青苷色素为原料进行开发。随着食物结构的改变和生活水平的提高，黑玉米在满足人们多元化消费需求方面显现出越来越重要的作用[8]。据 FAD/WHO 规定，黑玉米色素安全无毒，可直接用于食品、药品、化妆品等，具有重要应用价值和发展前景[9]。

食物蛋白质营养价值的高低，主要取决于所含必须氨基酸的种类、数量和组成比例。玉米是人类获得蛋白质的主要来源之一，不同地区、不同品种的黑玉米蛋白质组成各不相同，实验通过对山西主栽的 9 个黑玉米品种的蛋白质和氨基酸含量进行营养分析，对其蛋白质品质进行综合评价。

山西黑玉米种植主要集中在中部、北部地区，目前已形成以忻州、朔州、晋中、长治、吕梁等地为主的种植产业带和以忻州为主的加工产业带[8]。本实验选用了 9 种山西主栽的优质黑玉米品种为研究对象，分别为黑玉 194、黑玉 195、紫玉 119、晋糯 8 号、晋糯 10 号、晋糯 20 号、紫糯 511、黑玉二合一和黑糯 158，均来自山西省农业科学院玉米研究所和品种资源研究所。

花青苷是一类广泛存在于自然界的花、果、种和叶中的水溶性天然色素，属于黄酮多酚类化合物，是由花青素在自然状态下与各种糖形成的糖苷。其颜色有红色、紫色、蓝色等，近年来主要是以食用天然色素的形式被开发利用。已知天然存在的花青苷有 250 多种。花青苷具有类黄酮典型的结构，花青苷的苷元是 2-苯基苯并吡喃盐（2-phenylbenzo-pyryalium）或黄烊盐（flavylium）的多羟基和甲氧基衍生物。以 C6-C3-C6 为基本骨架，花色基元结构如下[10]：

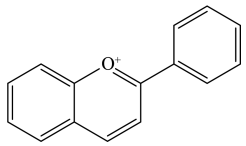

图 1 花色基元的结构

Fig.1 The structure of color primitives

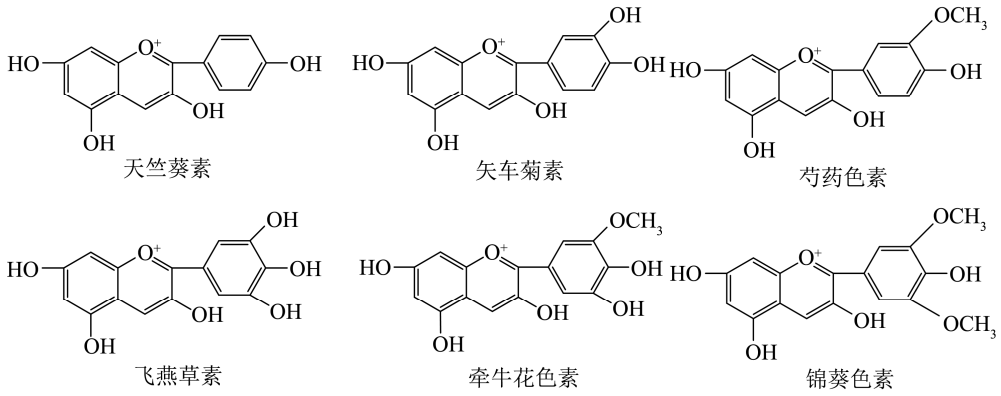

图 2 主要花色素的结构

Fig.2 The structure of major anthocyanins

大多数花青素的B环各碳位上取代基不同，形成了各种各样的花青素，现在已知的有20多种。花青素溶于水和乙醇，不溶于乙醚、氯仿等有机溶剂，遇醋酸铅试剂会沉淀，并能被活性炭吸附。其颜色随 pH 值的不同而改变，在酸性条件下显色较好，呈红色，在中性、近中性条件下呈无色，在碱性条件下呈蓝色。花青素的颜色pH值不同而改变是由于在不同pH值条件下其分子构型不同。食品中常见的花青素主要有：天竺葵花色素、矢车菊花色素、飞燕草花色素、芍药花色素等。主要花色素的结构如图2所示。根据宋艳的研究，山西黑玉米色素中主要有三种花青苷，分别为矢车菊花青苷（58%）、天竺葵花青苷和芍药花青苷[11]。因此本实验中黑玉米花青苷色素用矢车菊花青苷色素当量计。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

9个黑玉米品种：黑玉194、黑玉195、紫玉119、晋糯8号、晋糯10号、晋糯20号、紫糯511、黑玉二合一和黑糯 158（由山西省农业科学院玉米研究所和品种资源研究所提供）。

石油醚、盐酸、甲醇、乙醇、水杨酸、DPPH 试剂、过氧化氢等试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

880110 磨粉机，德国 Brabender 公司；Brabender GmbH & Co.KG 粘度仪，德国 Brabender 公司；KDY-9820 凯氏定氮仪，南北仪器；101-0A 型电热鼓风干燥箱，天津市泰斯特仪器有限公司；S-433D 全自动氨基酸分析仪，德国赛卡姆公司；721G 可见分光光度计，上海仪电分析仪器有限公司；恒温电热水浴锅 DZKW-4 型，北京中兴伟业仪器有限公司。

1.3 方法

黑玉米全粉的制备：取一定量的不同品种黑玉米，麸皮分离，用实验室盘式磨粉机磨粉，过80目筛，麸皮粉碎至80目后回添。

1.3.1 不同品种黑玉米营养成分测定

水分参照 GB 5009.3-2016 测定，灰分参照 GB 5009.4-2016 测定。粗脂肪的测定，用索氏提取法。粗蛋白参照 GB/T 24901-2010 测定。粗纤维参照 GB/T 5515-2008 测定。碳水化合物的含量由下式计算得到。

$$W_{碳水}=100-W_{水分}-W_{灰分}-W_{粗脂肪}-W_{粗蛋白}-W_{粗纤维}$$

式中：$W_{碳水}$为碳水化合物质量分数，$W_{水分}$、$W_{灰分}$、$W_{粗脂肪}$、$W_{粗蛋白}$和$W_{粗纤维}$分别为黑玉米中水分、灰分、粗脂肪、粗蛋白和粗纤维的质量分数。

1.3.2 黑玉米氨基酸组分含量分析和营养价值评价

1.3.2.1 样品前处理

取一定量的黑玉米全粉，加入石油醚（30~60 ℃）用超声提取法提取，脱去脂溶性成分，过滤，风干[10]。准确称取处理后的样品 0.1 mg 于 20 mL 安培管中（样品装在称量纸上垂直代入安培管中，防止样品粘在瓶口）；加入 10 mL 6 mol/L 盐酸溶液，充入氮气，封口，放入恒温烘箱（110 ℃）中水解 24 h；水解完成后冷却、混匀、开管，过滤；取 0.5 mL 滤液置于旋转蒸发仪中，低于 60 ℃，抽真空，蒸干；加入 3~5 mL 样品稀释液再次溶解，震荡混匀后过膜（0.22 μm）装入进样瓶中。

1.3.2.2 上机检测

采用全自动氨基酸分析仪，对 17 种氨基酸进行上机检测。分析条件：色谱柱：LCA K06/Na；流动相：柠檬酸钠 A=0.12 N，pH 3.45，B=0.2 N，pH 10.85；温度：58 ℃~74 ℃梯度控温；流速：洗脱泵 0.45 mL/min+衍生泵 0.25 mL/min；压力：30 bar~40 bar；紫外检测波长为 570 nm 和 440 nm。

1.3.2.3 氨基酸营养价值评价

采用联合国粮农组织（FAO）和世界卫生组织（WHO）提出的氨基酸评分（Amino acid score，AAS），并根据 FAO/WHO 氨基酸评分标准模式和鸡蛋模式进行营养价值评定[12]。AAS 按下式计算[13]：

AAS=（待测蛋白质中某一必需氨基酸的含量，%）×100/（FAO/WHO 评分模式中相应必需氨基酸的含量，%）

1.3.3 黑玉米粘度特性测定

黑玉米糊化特性指标参照 GB/T 22427.7-2008 方法二测定。

1.3.4 不同品种黑玉米花青苷色素提取物的制备及花青苷色素含量测定

1.3.4.1 不同品种黑玉米花青苷色素提取液的制备

溶液配制：0.1 mol/L 盐酸溶液：吸取 0.41 mL 盐酸于 50 mL 容量瓶中，用蒸馏水定容至刻度线。

提取液：0.1 mol/L 盐酸溶液与 95%乙醇溶液按 2:3 的比例混匀（pH=1.3）。

准确称取不同品种黑玉米全粉 8 g 于烧杯中，按料液比 1:10（g/mL）加入提取液，在温度 50 ℃，避光条件下浸提 2 h，提取 2 次，合并滤液，滤液在真空旋蒸仪上设置温度 80 ℃、真空度 0.05 MPa 进行浓缩至 20 mL，得到黑玉米花青苷色素提取液。

花青苷色素提取工艺为：

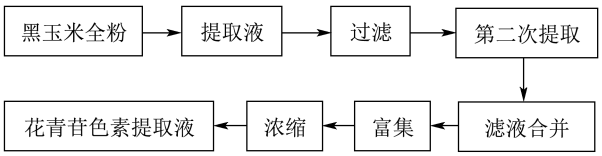

图 3 黑玉米花青苷色素的提取工艺

Fig.3 Extraction technology of black corn anthocyanin pigment

1.3.4.2 不同品种黑玉米花青苷色素含量的测定

花青苷色素含量测定采用 pH 示差法[14]。

花青素发色团结构的转换是 pH 值的函数，而且起干扰作用的棕褐色（降解）产物的特征光谱不随 pH 值的变化而变化。结合朗伯-比耳定律可得出，在两个不同的 pH 值下，花青素溶液的吸光值的差值与花青素的含量成比例。因此通过两个 pH，同一波长（以矢车菊素-3-O-葡萄糖苷最大可见吸收波长）下的吸光值差值（波长的选择参照文献[15]），依据下式计算花青苷色素含量：

$$A=(A_{\lambda\max pH1.0}-A_{\lambda\min pH1.0})-(A_{\lambda\max pH4.5}-A_{\lambda\min pH4.5})$$

$$X=\frac{A}{\varepsilon L}\times M\times DF\times\frac{V}{W}\times100\times1000$$

式中：X-黑玉米花青苷色素含量，mg/100 g；A-吸光度；ε-矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的摩尔吸收系数（26900）；L-光路路径长度（1 cm）；M-花青苷色素的摩尔质量（449.2）；DF-稀释倍数；V-体积 mL；W-样品质量，mg。

1.3.5 不同品种黑玉米花青苷色素提取物抗氧化活性测定

1.3.5.1 DPPH 自由基清除力的测定

DPPH 自由基清除力的测定参考 Brandwilliams[16]等的方法，吸取提取液 0.5 mL 于 10 mL 离心管中，加入 2 mL 2.0×10^{-4} mol/L DPPH·溶液，再加入 2.5 mL 甲醇，充分混合，避光静置 30 min，于 517 nm 处测定吸光度值（$A_{样品}$）。同时测定 2 mL 2.0×10^{-4} mol/L DPPH·溶液与 3 mL 无水甲醇混合液的吸光度值（$A_{空白}$），0.5 mL 提取液与 4.5 mL 无水甲醇混合液的吸光度（$A_{背景}$），按照下式计算提取液对 DPPH·的清除率，同时测定维 C 对 DPPH 自由基的清除率作为对比。

$$清除率/\%=\frac{A_{空白}-(A_{样品}-A_{背景})}{A_{空白}}\times100\%$$

1.3.5.2 羟自由基（·OH）清除力的测定

·OH 清除力的测定参考 Smimoff[17]等的方法，10 mL 比色管中依次加入 2 mL 不同品种的黑玉米花青苷色素提取物、0.6 mL 8.0 mmol/L $FeSO_4$ 溶液、2 mL 3.0 mmol/L 水杨酸和 0.5 mL 0.002 mol/L H_2O_2 于 37 ℃条件下水浴 1 h，于 510 nm 波长处测定样品吸光度（A_1），以蒸馏水代替水杨酸样品本底吸光度（A_2），按照下式计算·OH 清除率。

$$清除率/\%=\frac{A_0-(A_1-A_2)}{A_0}\times100\%$$

1.3.5.3 $ABTS^+$·清除力的测定

参照 Guedes[18]等的方法并略有改动。吸取提取液 100 μL，加入 3 mL 的 ABTS 自由基工作液，混合均匀，室温下避光反应 6 min，734 nm 处测定吸光度。根据下式计算提取液对 $ABTS^+$·的清除率。

$$清除率/\%=\frac{A_0-A_1+A_2}{A_0}\times100\%$$

式中：A_0 为空白管的吸光度；A_1 为样品管的吸光度；A_2 为甲醇代替 ABTS 工作液测定吸光度。

1.3.6 抗氧化活性与花青苷色素含量相关性分析

用 SPSS 19.0 数据分析软件对黑玉米花青苷色素提取液的抗氧化力与花青苷色素含量数据进行相关性分析。

1.4 统计方法

所有的分析数据至少重复 3 次进行，表示为 $\bar{x}\pm s$ 表示，组间数据比较采用一维方差分析（ANOVA）。用 SPSS 19.0 数据分析软件（SPSS Inc., Chicago, IL, USA）分析。$p<0.05$ 认为有显著差异。

2 结果与讨论

2.1 不同品种黑玉米的营养成分

黑玉米全粉基本营养成分测定结果见表 1。由表 1 可知，不同品种黑玉米全粉在碳水化合物、粗蛋白、粗脂肪、粗纤维含量上有显著差异（$p<0.05$）。几种黑玉米的碳水化合物含量低于水稻（75%），而粗蛋白质量分数高于水稻（6.81%）。粗脂肪质量分数高于小麦（2.47%）、水稻（0.55%）、大麦（1.30%）[19]、谷子（晋谷 21 号 4.21%）[20]。灰分质量分数均高于水稻（0.19%）[19]。这些营养成分的含量和比例说明黑玉米与水稻、小麦等粮食相比，营养成分更高且热量更低，能满足现代人对主食的需求和对健康饮食的追求。黑玉米碳水化合物、蛋白质、脂肪、纤维素含量的差别与黑玉米品种、生长环境的不同有关。

表 1 黑玉米的主要营养成分/%

Table 1 The main nutrients of black corn

样品	水分	灰分	碳水化合物	粗蛋白	粗脂肪	粗纤维
晋糯 8 号	11.07±0.11[f]	1.39±0.08[b]	70.06±0.12[f]	11.47±0.06[a]	4.99±0.04[cd]	1.02±0.05[d]
紫玉 119	12.59±0.08[c]	1.22±0.13[b]	67.95±0.03[h]	10.83±0.04[b]	5.24±0.05[b]	2.17±0.04[a]
黑糯 158	15.45±0.15[a]	1.08±0.07[b]	67.54±0.11[i]	10.51±0.04[c]	4.65±0.06[d]	0.77±0.05[f]
晋糯 20 号	12.18±0.05[d]	1.11±0.1[b]	71.47±0.04[d]	9.54±0.07[d]	4.82±0.08[d]	0.88±0.06[e]
晋糯 10 号	12.16±0.06[d]	1.06±0.13[b]	71.71±0.05[c]	9.34±0.10[e]	4.87±0.06[d]	0.86±0.04[e]
黑玉 195	11.67±0.09[e]	1.90±0.13[a]	71.25±0.05[e]	9.17±0.06[e]	4.73±0.04[d]	1.28±0.04[b]
黑玉二合一	10.79±0.15[g]	1.09±0.09[b]	72.87±0.05[a]	8.71±0.06[f]	5.23±0.05[b]	1.31±0.03[b]
黑玉 194	11.30±0.09[f]	1.28±0.04[b]	72.65±0.04[b]	8.17±0.08[g]	5.45±0.05[a]	1.15±0.03[c]
紫糯 511	15.11±0.11[b]	1.16±0.04[b]	69.61±0.03[g]	8.17±0.08[g]	5.22±0.04[b]	0.73±0.05[f]

注：表中数值为平均值±标准差（n=3），同一列中不同字母表示有显著性差异（$p<0.05$），下同。

表 2 不同品种黑玉米氨基酸组成及含量（mg/g）

Table 2 Amino acid composition and content of different varieties of black corn (mg/g)

品种	晋糯 8 号	黑玉 195	晋糯 10 号	晋糯 20 号	紫玉 119	黑玉 194	黑糯 158	黑玉二合一	紫糯 511
天冬氨酸（Asp）	6.2±0.14	8.2±0.21	5.4±0.16	5.5±0.23	5.2±0.19	4.6±0.34	5.5±0.11	5.0±0.28	4.4±0.19
苏氨酸（Thr）*	3.1±0.27	4.3±0.14	3.3±0.25	3.0±0.18	3.1±0.20	0.29±0.11	2.6±0.15	2.6±0.13	2.6±0.21
丝氨酸（Ser）	4.5±0.28	3.6±0.13	4.2±0.24	3.9±0.26	3.4±0.18	3.3±0.22	4.4±0.17	2.7±0.12	3.4±0.27
谷氨酸（Glu）	17.0±0.57	15.3±0.62	16.1±0.48	15.3±0.66	15.0±0.59	12.5±0.43	15.6±0.68	13.1±0.45	12.9±0.55
脯氨酸（Pro）	2.8±0.12	14.5±0.56	8.4±0.38	0.5±0.02	2.5±0.16	8.0±0.28	3.4±0.33	2.7±0.19	2.8±0.26
甘氨酸（Gly）	3.0±0.17	2.8±0.11	3.6±0.23	3.2±0.28	3.8±0.19	3.0±0.20	3.9±0.14	2.7±0.22	3.3±0.13
丙氨酸（Ala）	7.4±0.25	5.6±0.16	7.1±0.20	7.0±0.18	6.6±0.13	5.9±0.21	6.0±0.17	5.4±0.22	5.0±0.28
半胱氨酸（Cys）*	0.8±0.02	0.8±0.06	0.1±0.01	1.8±0.14	0.3±0.04	0.6±0.08	0.1±0.02	2.7±0.16	1.7±0.14
缬氨酸（Val）*	4.4±0.21	4.6±0.18	3.1±0.22	2.7±0.17	3.8±0.16	3.5±0.20	3.4±0.11	3.6±0.19	4.9±0.15
蛋氨酸(Met)*	1.4±0.09	1.5±0.12	2.3±0.08	3.2±0.10	1.7±0.05	1.3±0.08	0.3±0.01	1.0±0.09	1.1±0.12
异亮氨酸(Ile)*	2.6±0.14	1.4±0.10	1.5±0.09	2.8±0.07	2.8±0.11	2.4±0.08	3.9±0.23	3.3±0.19	2.0±0.21
亮氨酸(Leu)*	12.9±0.56	6.5±0.21	9.2±0.33	12.4±0.50	11.0±0.62	8.8±0.41	10.8±0.53	12.9±0.59	9.3±0.60
酪氨酸(Tyr)*	3.9±0.23	2.9±0.18	4.3±0.15	2.1±0.20	4.4±0.13	3.9±0.17	2.2±0.15	3.3±0.10	1.8±0.09
苯丙氨酸(Phe)*	4.4±0.25	1.2±0.08	2.6±0.11	4.9±0.16	4.6±0.14	4.4±0.21	1.7±0.09	3.6±0.23	3.8±0.15
赖氨酸(Lys)*	2.1±0.08	2.0±0.10	2.1±0.15	3.1±0.19	2.5±0.20	2.2±0.16	2.6±0.11	2.4±0.17	2.2±0.15
组氨酸(His)	3.8±0.16	3.9±0.20	4.1±0.18	4.1±0.23	4.3±0.30	4.2±0.35	5.2±0.39	4.8±0.24	3.6±0.31
精氨酸(Arg)	4.3±0.25	4.1±0.18	4.6±0.13	3.8±0.10	3.4±0.15	4.9±0.19	7.8±0.22	4.9±0.10	5.7±0.39
∑AA	84.6	83.1	81.4	78.7	76.4	76.3	75.4	74.9	84.6
∑EAA	35.6	25.2	28.5	36.0	34.2	30.0	27.6	35.4	29.4
∑EAA/∑AA	0.42	0.30	0.35	0.46	0.45	0.39	0.37	0.47	0.35

注：*为必需氨基酸，∑AA 为氨基酸总量，∑EAA 为必需氨基酸总量。

2.2 不同品种黑玉米的氨基酸组分含量

由表 2 结果得出，9 个黑玉米氨基酸品种齐全，含有包括苏氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、组氨酸、精氨酸等 9 中必需氨基酸（半必需氨基酸）在内的 17 种氨基酸。总氨基酸含量最高的是晋糯 8 号和紫糯 511，必需氨基酸总量最高的是晋糯 8 号。黑玉二合一的必需氨基酸含量为 35.40 mg/g，占氨基酸总量的 47%，比例是最高的。此比例高于其他文献报道的不同品种谷子和黍子的必需氨基酸占总氨基酸的比例 38.95%[20]。从必需氨基酸/总氨基酸来看，这几种黑玉米的比值符合 FAO/WHO 推荐值，说明这几种黑玉米的氨基酸组成较为均衡。

2.3 黑玉米的营养价值评价

根据现代营养学观点，食物蛋白质的氨基酸组成

越接近人体蛋白质的组成，并为人体消化吸收时，该食物的营养价值才越高[21]。上述数据和结果尚不能全面反应黑玉米氨基酸组分与人体蛋白组分的差异以及其所含必需氨基酸组分是否平衡，营养价值高低体现不明显，有待氨基酸营养价值评价分析。由于组氨酸是婴幼儿、尿毒症患者、幼龄动物的必需氨基酸，因此将其参数也列为以下评价中。

由表 3 和表 4 分析可知，9 个黑玉米品种均含有丰富的亮氨酸、苯丙氨酸、酪氨酸和组氨酸。全蛋模式标准高于 FAO/WHO 模式标准。所有品种的组氨酸含量均远远高于全蛋模式的 22.00 mg/g pro 标准，分别为黑玉 194（51.41 mg/g pro）；黑玉 195（42.53 mg/g pro）；紫玉 119（39.70 mg/g pro）；晋糯 8 号（33.13 mg/g pro）；晋糯 10 号（43.90 mg/g pro）；晋糯 20 号（42.98 mg/g pro）；紫糯 511（44.06 mg/g pro）；黑玉二合一（55.11 mg/g pro）；黑糯 158（49.48 mg/g pro）；除黑玉 195 的亮氨酸含量比 FAO/WHO 模式的 70.00 mg/g pro 标准高之外，其余品种的亮氨酸含量均大于全蛋模式的 86.00 mg/g pro 标准，分别为：黑玉 194（107.71 mg/g pro）；紫玉 119（101.57 mg/g pro）；晋糯 8 号（112.47 mg/g pro）；晋糯 10 号（98.50 mg/g pro）；晋糯 20 号（129.98 mg/g pro）；紫糯 511（113.83 mg/g pro）；黑玉二合一（148.11 mg/g pro）；黑糯 158（102.76 mg/g pro）。此外，晋糯 20 号，紫糯 511 和黑玉二合一，三个品种的氨基酸总值大于 FAO/WHO 模式的 367.00 mg/g pro 标准，分别为：晋糯 20 号（420.34 mg/g pro），紫糯 511（403.91 mg/g pro）和黑玉二合一（461.54 mg/g pro）。氨基酸评分是将所测样品中氨基酸的含量与 FAO/WHO 推荐模式的氨基酸含量进行比较，由氨基酸评分也可以直观的看出以上结论。

表 3 不同品种黑玉米必需氨基酸含量与 FAO/WHO 模式和全蛋模式的比较（mg/g）

Table 3 Comparison of essential amino acid content of different black corn varieties with FAO/WHO model and whole egg model

氨基酸	Thr	Val	Met+Cys	Ile	Leu	Phe+Tyr	Lys	His	总值
黑玉 194	35.5	42.84	23.26	29.38	107.71	101.59	26.93	51.41	418.62
黑玉 195	46.89	50.16	25.08	15.27	70.88	44.71	21.81	42.53	317.33
紫玉 119	28.62	35.09	18.47	25.85	101.57	83.1	23.08	39.7	355.48
晋糯 8 号	27.03	38.36	19.18	22.67	112.47	72.36	18.31	33.13	343.51
晋糯 10 号	35.33	33.19	25.7	16.06	98.5	73.88	22.48	43.9	349.58
晋糯 20 号	31.45	28.3	52.41	29.35	129.98	73.38	32.49	42.98	420.34
紫糯 511	31.82	59.98	34.27	24.48	113.83	68.54	26.93	44.06	403.91
黑玉二合一	29.85	41.33	42.48	37.89	148.11	79.22	27.55	55.11	461.54
黑糯 158	24.74	32.35	3.81	37.11	102.76	37.11	24.74	49.48	312.1
FAO/WHO 模式	40	50	35	40	70	60	55	17	367
全蛋模式	47	66	57	54	86	93	70	22	495

表 4 不同品种黑玉米的必需氨基酸评分（AAS）

Table 4 The essential amino acid score (AAS) of different varieties of black corn

必需氨基酸	Thr	Val	Met+Cys	Ile	Leu	Phe+Tyr	Lys	His
黑玉 194	88.75	85.68	66.46	73.45	153.87	169.32	48.96	302.41
黑玉 195	117.23	100.32	71.66	38.18	101.26	74.52	39.65	250.18
紫玉 119	71.55	70.18	52.77	64.63	145.1	138.5	41.96	233.53
晋糯 8 号	67.58	76.72	54.8	56.68	160.67	120.6	33.29	194.88
晋糯 10 号	88.33	66.38	73.43	40.15	140.71	123.13	40.87	258.24
晋糯 20 号	78.63	56.6	149.74	73.38	185.69	122.3	59.07	252.82
紫糯 511	79.55	119.96	97.91	61.2	162.61	114.23	48.96	259.18
黑玉二合一	74.63	82.66	121.37	94.73	211.59	132.03	50.09	324.18
黑糯 158	61.85	64.70	10.89	92.78	146.80	61.85	44.98	291.06

2.4 不同品种黑玉米的加工特性

由表 5 和图 4 可以看出，不同品种黑玉米全粉的糊化温度、峰值粘度及崩解值、回生值有一定差异，黑糯 158 的峰值粘度和崩解值最高，分别为 142 BU 和 30 BU，说明其冷稳定性最好，制成面制品的弹性和咀嚼性也最好，因此，加工时可根据黑玉米全粉的糊化特性选择适宜的品种。淀粉糊化特性是反映淀粉

品质的一个重要指标。相关研究表明，开始糊化的温度、峰值粘度以及最终恒温阶段结束粘度等糊化特性，均在一定程度上影响面条、馒头等面制品的外观特征和食用品质[22]。面粉中淀粉的糊化峰值粘度、崩解值越大，面条的弹性、咀嚼度和感官品质越好；糊化衰减度越大，糊化温度越高，面条的品质（如硬度、弹性、粘聚性等）越差[23]。随着峰值粘度的增加，玉米面条的弹性和咀嚼性显著提高[24]。面粉糊化特性与面条质量密切相关，峰值粘度可以作为评价面条质量优劣的重要指标[25-27]。不同品种黑玉米全粉的糊化特性可能与其本身的淀粉总量、直链淀粉含量、直支比、发芽情况、颗粒度等有关。

表 5 不同品种黑玉米全粉的糊化特性

Table 5 Gelatinization characteristics of different varieties of black corn whole flour

品种	糊化温度/℃	峰值粘度/BU	最低粘度/BU	最终粘度/BU	崩解值/BU	回生值/BU
黑玉 194	74.4	112	99	206	13	95
黑玉 195	75.7	102	99	205	3	102
紫玉 119	74.9	144	122	272	22	142
晋糯 8 号	72.8	188	173	245	15	74
晋糯 10 号	69.1	74	69	116	5	40
晋糯 20 号	69.2	38	38	69	0	25
紫糯 511	72.1	121	107	177	14	74
黑玉二合一	73.9	165	150	333	15	184
黑糯 158	72.9	172	142	234	30	127

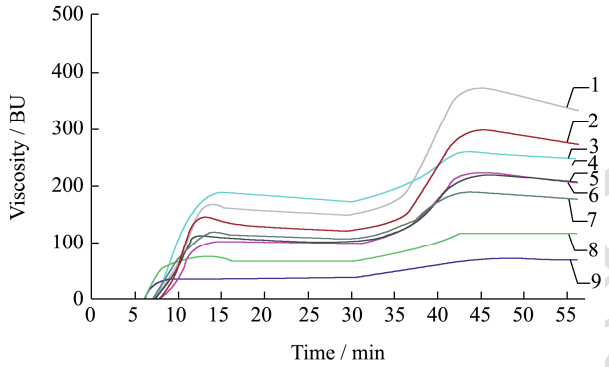

图 4 不同品种黑玉米的粘度曲线

Fig.4 Viscosity curves of different varieties of black corn

注：图中数字 1~9 代表的黑玉米品种分别为：1：黑玉二合一；2：紫玉 119；3：晋糯 8 号；4：黑糯 158；5：黑玉 194；6：黑玉 195；7：紫糯 511；8：晋糯 10 号；9：晋糯 20 号。

2.5 不同品种黑玉米的花青苷色素含量

花青苷色素是黑玉米的特征性功能成分，由图 5 可以看出，标注不同字母的黑玉米品种间花青苷色素的含量有显著差异（$p<0.05$），其中，黑玉二合一的花青苷色素含量最高，为 42.63 mg/100 g。其后依次为紫玉 119，(35.20 mg/100 g)；黑玉 194，(29.48 mg/100 g)；晋糯 8 号(21.03 mg/100 g)；紫糯 511(19.42 mg/100 g)；黑玉 195(18.87 mg/100 g)；黑糯 158(17.84 mg/100 g)；晋糯 10 号（14.92 mg/100 g）；晋糯 20 号（13.31 mg/100 g）。均高于其他文献报道的紫洋葱提取液中总花青素含量的 9.07 mg/100 g，以及黑豆皮提取液中总花青素含量的 6.56 mg/100 g[28]。不同品种黑玉米花青苷色素含量的差别与其基因型以及生长环境的不同有关。

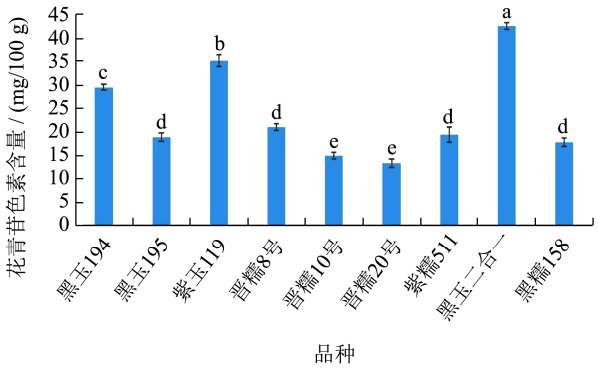

图 5 不同品种黑玉米花青苷色素含量

Fig.5 Anthocyanin pigment content of different varieties of black corn

2.6 不同品种黑玉米花青苷色素提取物清除自由基能力比较

2.6.1 不同品种黑玉米花青苷色素提取物清除 DPPH 自由基能力

不同品种黑玉米花青苷色素提取物对 DPPH 自由基清除率见图 6，可以看出，标注不同字母的黑玉米品种间其花青苷色素提取物对 DPPH 自由基的清除率有显著差异（$p<0.05$），其中，清除力最强的为黑玉二合一，达到 98.38%，最弱的为紫糯 511，为 57.07%，9 种黑玉米花青苷色素提取物对 DPPH 自由基清除力由大到小为：黑玉二合一>紫玉 119>黑玉 194>黑玉

195>晋糯 8 号>晋糯 10 号>晋糯 20 号>黑糯 158>紫糯 511。

IC_{50} 值是对自由基清除率达 50%时所需的样品有效剂量，IC_{50} 值越小，则自由基清除能力越强，抗氧化性越好。如图 7 所示，黑玉二合一、黑玉 195 和黑糯 158 的花青苷色素提取液清除 DPPH 自由基的 IC_{50} 值分别为 85.21、98.54、133.59 μg/mL，均小于 Vc 清除 DPPH 自由基的 IC_{50} 值 143.43 μg/mL，即清除自由基的能力约是 Vc 的 1.68 倍、1.46 倍和 1.07 倍，与文献报道的结果相同[28]，说明黑玉米花青苷色素提取液的抗氧化能力强于 Vc。

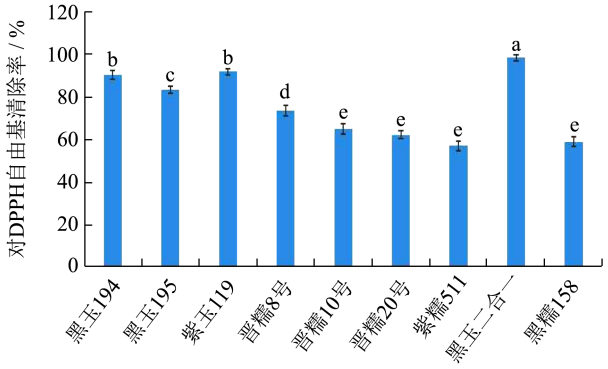

图 6 不同品种黑玉米花青苷色素提取物对 DPPH·自由基的清除率

Fig.6 Scavenging rate of anthocyanin pigment extracts from different varieties of black corn on DPPH· radicals

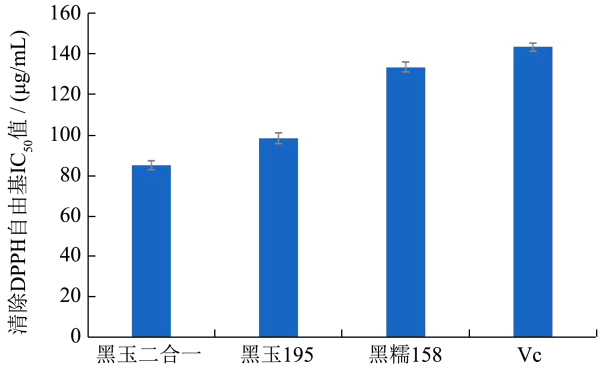

图 7 3 种黑玉米花青苷色素提取液和 VC 对 DPPH 自由基清除率的 IC_{50} 值

Fig.7 DPPH free radical scavenging ability of 3 kinds of black corn anthocyanin pigment extract and Vc

2.6.2 不同品种黑玉米花青苷色素提取物清除·OH 能力

不同品种黑玉米花青苷色素提取物对·OH 自由基清除率见图 8，可以看出，标注不同字母的品种间其花青苷色素提取物对·OH 的清除率有显著差异（p<0.05），其中，清除力最强的为黑玉 158，达到 88.34%，最弱的是晋糯 10 号，为 57.96%，9 种黑玉米花青苷色素提取物对·OH 清除力由大到小为：黑玉 158>晋糯 8 号>黑玉 195>黑玉 194>紫糯 511>晋糯 20 号>紫玉 119>黑玉二合一>晋糯 10 号。

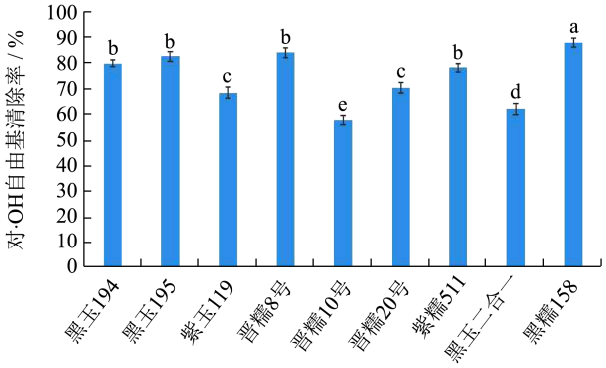

图 8 不同品种黑玉米花青苷色素提取物对·OH 自由基的清除率

Fig.8 The scavenging rate of different varieties of black corn anthocyanin pigment extracts on OH radical

2.6.3 不同品种黑玉米花青苷色素提取物清除 $ABTS^+$ 自由基能力

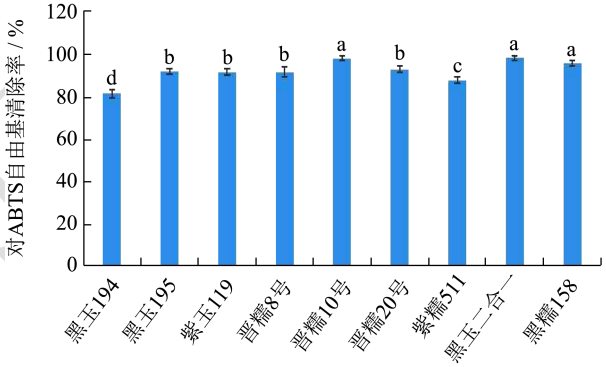

图 9 不同品种黑玉米花青苷色素提取物对 ABTS 自由基清除率

Fig.9 The scavenging rate of different varieties of black corn anthocyanin pigment extracts on ABTS free radicals

不同品种黑玉米花青苷色素提取物对 $ABTS^+$·清除率如图 9 所示。晋糯 10 号、黑玉二合一和黑糯 158 三个品种的黑玉米花青苷色素提取物清除 $ABTS^+$·的能力显著高于其他品种（p<0.05），分别为：晋糯 10 号（98.20%）；黑玉二合一（98.35%）；黑糯 158（95.79%）。而紫糯 511 的清除能力最低，为 87.99%。

自由基具有高度的活性，是人体生命活动中各种生化反应的中间代谢产物。人体内自由基过多就会导致膜质过氧化和细胞损伤，引起人体衰老、动脉粥样硬化、癌症等严重疾病。因此日常饮食中摄入一些抗氧化剂或自由基清除剂维持体内自由基代谢平衡是十分重要的[29]。本实验表明，9 中黑玉米花青苷色素具有一定的清除自由基的能力，说明黑玉米具有一定的抗氧化生理功能，为黑玉米花青苷色素的应用提供了依据。实验还表明，9 中黑玉米花青苷色素提取物的清除自由基能力的强弱并不完全一致，可能是花青苷色素种类和含量的差异导致，这与朱敏的研究结果一

致[30]。花青苷色素提取液的有效成分不止一种，包括多种花青苷元、类黄酮及多酚物质，从而使 9 种黑玉米花青苷色素提取物的清除自由基能力强弱有差异。

2.7 不同品种黑玉米抗氧化作用与花青苷色素含量相关性分析

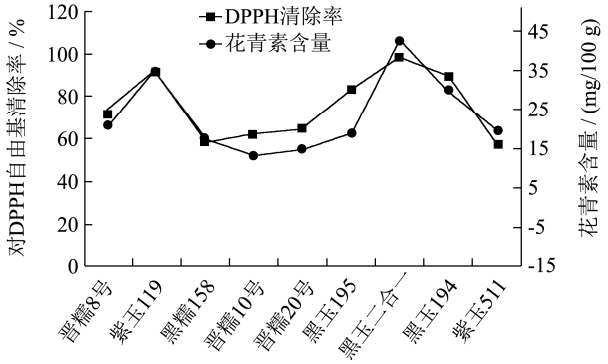

图 10 不同品种黑玉米花青苷色素提取物 DPPH 自由基清除率与花青苷色素含量

Fig.10 The scavenging rate of DPPH free radicals and the content of anthocyanin pigment in different varieties of black corn anthocyanin pigment extract

表 6 不同品种黑玉米花青苷色素含量与其抗氧化力相关性分析描述性统计量

Table 6 Descriptive statistics of correlation analysis of anthocyanin pigment content and antioxidant capacity of different black corn varieties

项目	均值	标准差	N
花青苷色素含量	23.622	9.9516	9
DPPH 自由基清除率	75.6156	15.71210	9

表 7 不同品种黑玉米花青苷色素含量与其抗氧化力相关性分析表

Table 7 Correlation analysis table of anthocyanin pigment content of different varieties of black corn and its antioxidant capacity

项目		花青苷色素含量	DPPH 自由基清除率
花青苷色素含量	Pearson 相关性	1	0.865**
	显著性		0.003
	N	9	9
DPPH 自由基清除率	Pearson 相关性	0.865**	1
	显著性	0.003	
	N	9	9

注：**是在 0.01 水平（双侧）上具有显著相关。

由图 10 可以直观的看出，不同品种黑玉米花青苷色素提取物 DPPH 自由基清除率与花青苷色素含量的高低趋势保持一致。花青苷色素含量高的品种，其 DPPH 自由基清除率也高，花青苷色素含量低的品种，其 DPPH 自由基清除率也低。而 DPPH 自由基清除率在体外试验中反应了物质的抗氧化能力，也就是说，不同品种黑玉米花青苷色素提取物的抗氧化力与花青苷色素含量的高低趋势保持一致。下面通过统计软件来分析花青苷色素含量与抗氧化力的相关关系（Pearson Correlation），结果如表 6、7 所示。

由表 6、7 可知，黑玉米花青苷色素提取物清除 DPPH 自由基能力与其花青苷色素含量在 0.01 水平（双侧）具有显著正相关性，这一结果表明，山西主栽黑玉米花青苷色素提取物的抗氧化活力与其花青苷色素含量显著正相关。此结果与宋昱的研究结果一致[31]。这一结果进一步支持了以下结论：山西主栽黑玉米表现出的抗氧化力与其花青苷色素含量正相关。这就提示我们，山西主栽黑玉米的抗氧化力一定程度上取决于其花青苷色素含量。黑玉米花青苷色素含量可以作为评价其抗氧化活性的指标，在生产和应用中可以增加花青苷色素的浓度和纯度来提高抗氧化能力。

3 结论

山西主栽的 9 个黑玉米品种：黑玉 194、黑玉 195、紫玉 119、晋糯 8 号、晋糯 10 号、晋糯 20 号、紫糯 511、黑玉二合一和黑糯 158 在碳水化合物、粗蛋白、粗脂肪、粗纤维含量上有显著差异（$p<0.05$）。所有品种的组氨酸含量均远高于全蛋模式的 22.00 mg/g pro 标准，分别为黑玉 194（51.41 mg/g pro）；黑玉 195（42.53 mg/g pro）；紫玉 119（39.70 mg/g pro）；晋糯 8 号（33.13 mg/g pro）；晋糯 10 号（43.90 mg/g pro）；晋糯 20 号（42.98 mg/g pro）；紫糯 511（44.06 mg/g pro）；黑玉二合一（55.11 mg/g pro）；黑糯 158（49.48 mg/g pro）；除黑玉 195 的亮氨酸含量比 FAO/WHO 模式的 70.00 mg/g pro 标准高之外，其余品种的亮氨酸含量均大于全蛋模式的 86.00 mg/g pro 标准，分别为：黑玉 194（107.71 mg/g pro）；紫玉 119（101.57 mg/g pro）；晋糯 8 号（112.47 mg/g pro）；晋糯 10 号（98.5 mg/g pro）；晋糯 20 号（129.98 mg/g pro）；紫糯 511（113.83 mg/g pro）；黑玉二合一（148.11 mg/g pro）；黑糯 158（102.76 mg/g pro）。不同品种黑玉米的花青苷色素含量差异较大，在 13.3~42.6 mg/100 g 之间，在体外，在体外，黑玉米抑制 DPPH 自由基的能力是维 C 的 1.68 倍，且其清除 DPPH 自由基能力与其花青苷色素含量在 0.01 水平（双侧）具有显著正相关性。本研究可为黑玉米的营养品质、加工特性和抗氧化性研究的资源利用提供借鉴。

参考文献

[1] 马越,赵晓燕,徐亚民.黑玉米的营养价值与保健作用[J].中国种业,2010,10:16-18
MA Yue, ZHAO Xiao-yan, XU Ya-min. The nutritional value and health function of black corn [J]. China Seed Industry, 2010, 10: 16-18

[2] 田春莲,陈建华,李立君,等.黑玉米色素的提取工艺及特性研究[J].中国林副特产,2003,3:30-31
TIAN Chun-lian, CHEN Jian-hua, LI Li-jun, et al. Study on the extraction technology and characteristics of black corn pigment [J]. Forest By-Products and Speciality in China, 2003, 3: 30-31

[3] 娄爽爽.黑玉米深加工农业产品价值开发与设计研究[D].上海:东华大学,2018:13-14
LOU Shuang-shuang. Research on value development and design of black corn deep-processing agricultural products [D]. Shanghai: Donghua University, 2018: 13-14

[4] 王霞,高云.黑甜玉米中黑色素提取及纯化工艺研究[J].食品科学,2004,25:198-200
WANG Xia, GAO Yun. Study on extraction and purification technology of melanin from black sweet corn [J]. Food Science, 2004, 25: 198-200

[5] 周波,王晓红,陈丽丽,等.玉米紫色植株色素体外抗氧化活性实验研究[J].现代食品科技,2007,4(23):23-25
ZHOU Bo, WANG Xiao-hong, CHEN Li-li. Experimental study on antioxidant activity of corn purple plant pigment *in vitro* [J]. Modern Food Technology, 2007, 4(23): 23-25

[6] 张钟,郭元新,李凤霞.黑糯玉米芯色素清除 $O_2^{\cdot-}$·和·OH 的体外实验研究[J].食品与发酵工业,2006,32(11):36-38
ZHANG Zhong, GUO Yuan-xin, LI Feng-xia. *In vitro* experimental study on the elimination of $O_2^{\cdot-}$· and ·OH by black waxy corncob pigment [J]. Food and Fermentation Industry, 2006, 32(11): 36-38

[7] 周波,王晓红,郭连营.玉米紫色植株花色苷色素延缓衰老的功能[J].中国临床康复,2006,23(4):23-25
ZHOU Bo, WANG Xiao-hong, GUO Lian-ying. Anti-aging function of anthocyanin pigment of purple corn plant [J]. China Clinical Rehabilitation, 2006, 23(4): 23-25

[8] 田志芳,梁霞,孟婷婷,等.山西黑玉米食品加工与产业科技支持[J].农产品加工,2019,6:71-73
TIAN Zhi-fang, LIANG Xia, MENG Ting-ting, et al. Shanxi black corn food processing and industrial technology support [J]. Agricultural Products Processing, 2019, 6: 71-73

[9] 王金亭.天然黑玉米色素研究与应用进展[J].粮食与油脂,2013,26(2):44-49
WANG Jin-ting. Research and application progress of natural black corn pigment [J]. Food and Oil, 2013, 26(2): 44-49

[10] 宋艳.黑玉米中黑色素和氨基酸的研究.[D].无锡:江南大学,2008
SONG Yan. Research on melanin and amino acids in black corn [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008

[11] 宋艳,汪云.黑玉米中黑色素的提取工艺及组分研究[J].天然产物研究与开发,2008,20:1084-1087
SONG Yan, WANG Yun. Study on the extraction process and composition of melanin from black corn [J]. Research and Development of Natural Products, 2008, 20:1084-1087

[12] 李金华.全谷物膳食中杂粮的蛋白质营养综合评价,[J]食品科技,2019,44(12):151-156
LI Jin-hua. Comprehensive evaluation of protein nutrition of whole grain diets [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(12): 151-156

[13] FAO. Energy and protein requirements, report of a joint FAO/WHO AdHoc expert committee [J]. Food Nutrition Meetings Report Series, 1973, 52: 40-72

[14] Lapidot T H S, Akiri B. pH-dependent forms of red wine anthocyanins as antioxidants [J]. J Agric Food Chem, 1999, 47: 67-70

[15] 巩芳芳,廖碧芳,董佳佳,等.黑枸杞花青素提取工艺优化和含量测定[J].郑州大学学报(医学版),2019,54(4):531-534
GONG Fang-fang, LIAO Bi-fang, DONG Jia-jia, et al. Optimization of extraction process and content determination of anthocyanins from black wolfberry [J]. Journal of Zhengzhou University (Medical Edition), 2019, 54(4): 531-534

[16] Brandwilliams W, Cuvelier M E, Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity [J]. LWT - Food Science and Technology, 1995, 28(1): 25-30

[17] Smirnoff N, Cumbes Q J. Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes [J]. Phytochemistry, 1989, 28(4): 1057-1060

[18] Guedes A C, Amaro H M, Ciao M S, et al. Optimization of ABTS radical cation assay specifically for determination of antioxidant capacity of intracellular extracts of microalgae and cyanobacteria [J]. Food Chemistry, 2013, 138(1): 638-643

[19] Navruz-varli S, Sanlier N. Nutritional and health benefits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. Journal of Cereal, 2016, 69: 371-376

[20] 郑楠楠.谷子和黍子营养功能成分和抗氧化作用的差异化

研究[D].天津:天津科技大学,2018:15-20
ZHENG Nan-nan. Differential research on the nutritional functional components and antioxidant effects of millet and millet [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018: 15-20

[21] 马艳弘,周剑忠,黄开红,等.外源硒对发芽大豆脂肪酸与蛋白质氨基酸组成及营养价值的影响[J].江苏农业学报,2011,27(3):652-657
MA Yan-hong, ZHOU Jian-zhong, HUANG Kai-hong, et al. Effects of exogenous selenium on the composition and nutritional value of fatty acids and protein amino acids of germinated soybeans [J]. Jiangsu Agricultural Journal, 2011, 27(3): 652-657

[22] Mcdonough C M, Floyd C D, Waniska R D, et al. Effect of accelerated aging on maize, sorghum, and sorghum meal [J]. Journal of Cereal Science, 2004, 39(3): 351-361

[23] 赵登登.淀粉种类和性质与鲜湿面条品种关系的研究[D].长沙:中南林业科技大学,2014:32-34
ZHAO Deng-deng. Study on the relationship between starch types and properties and fresh and wet noodle varieties [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014: 32-34

[24] 刘亚伟,王瑞娟,刘晓峰,等.玉米粉改性对玉米面条质构特性的影响[J].粮食与饲料工业,2015,12(7):29-31
LIU Ya-wei, WANG Rui-juan, LIU Xiao-feng, et al. The effect of corn flour modification on the texture characteristics of corn noodles [J]. Food and Feed Industry, 2015, 12(7): 29-31

[25] 王芳芳.小麦面粉糊化特性与面条品质性状的 QTL 定位[D].泰安:山东农业大学,2016:33-34
WANG Fang-fang. QTL mapping of wheat flour gelatinization characteristics and noodle quality traits [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016: 33-34

[26] 刘璇.小麦淀粉糊化特性的关联分析研究[D].郑州:河南农业大学,2014:1-4
LIU Xuan. Correlation analysis of wheat starch gelatinization characteristics [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014: 1-4

[27] 张庆霞.玉米粉配比对玉米-小麦混合粉品质的影响[J].食品研究与开发,2018,39(10):12-16
ZHANG Qing-xia. The effect of corn flour ratio on the quality of corn-wheat mixed flour [J]. Food Research and Development, 2018, 39(10): 12-16

[28] 李甘.紫洋葱及黑豆种皮中花青素的定性定量分析和生物活性的研究[D].太原:山西大学,2019:31-51
LI Gan. Qualitative and quantitative analysis and biological activity of anthocyanins in purple onion and black bean seed coats [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019: 31-51

[29] 高俊玲,崔建忠,孙树勋.氧自由基检测技术的研究进展[J].华北煤炭医学院学报,1999,1(5):403-404
GAO Jun-ling, CUI Jian-zhong, SUN Shu-xun. Research progress of oxygen free radical detection technology [J]. Journal of North China Coal Medical College, 1999, 1(5): 403-404

[30] 朱敏.紫玉米高产栽培生理机制及其花青素特性研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2011:129-136
ZHU Min. Study on the physiological mechanism of high-yield cultivation of purple corn and its anthocyanin characteristics [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011: 129-136

[31] 宋昱,方策,马飞,等.不同品种花生衣原花青素含量及抗氧化活性研究[J].山东农业科学,2020,52(6):108-114
SONG Yu, FANG Ce, MA Fei, et al. Study on the Proanthocyanidin content and antioxidant activity of different peanut varieties [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(6): 108-114

（上接第 116 页）

[15] 陈桂香,岳龙飞,王振清,等.钢筋混凝土地下粮仓准静态温度场数值模拟[J].中国粮油学报,2014,29(3):79-83
CHEN Gui-xiang, YUE Long-fei, WANG Zhen-qing, et al. Quasistatic temperature field simulation of reinforced concrete underground warehouse grain [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(3): 79-83