

# 黑小麦粉的抗氧化成分及活性

牛新奎, 韩小贤, 郑学玲\*

(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

**摘要:** 黑小麦是一类具有特殊营养品质的优质小麦, 该试验选用两种特色黑小麦 16W16 和运黑 14207 为研究对象, 对黑小麦全麦粉、面粉和麸皮的抗氧化活性成分和抗氧化能力进行分析研究。结果表明: 两种黑小麦中的花色苷, 多酚和黄酮含量均高于对照小麦。16W16 全麦粉中多酚、黄酮和花色苷含量分别是 3.73 mg GAE/g、2.45 mg RE/g 和 111.33 mg/kg, 铁离子还原能力是 2.34 mg TE/g, 对 DPPH 和 ·OH 自由基清除率分别是 48.18% 和 42.46%。黑小麦 16W16 粗麸中抗氧化成分含量最高, 抗氧化活性最强, 其花色苷, 多酚和黄酮含量分别是 672.31 mg/kg、6.77 mg GAE/g 和 6.67 mg RE/g, 铁离子还原能力是 5.73 mg TE/g, 对 DPPH 和 ·OH 自由基清除率分别是 97.00% 和 88.30%。黑小麦运黑 14207 中的多酚、黄酮和花色苷含量和抗氧化活性均显著低于 16W16, 高于普通对照小麦永良 4 号。分析黑小麦中抗氧化成分含量发现, 即黑小麦中的抗氧化活性物质主要分布在麸皮中。综合分析, 相比于普通小麦, 黑小麦的抗氧化成分含量高, 抗氧化能力强, 是用于开发功能性食品和保健食品的良好材料。

**关键词:** 特色黑小麦; 花色苷; 多酚; 黄酮; 抗氧化活性

文章编号: 1673-9078(2022)09-292-297

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.9.1276

## Antioxidant Components and Activity of *Triticum aestivum* Flour

NIU Xinkui, HAN Xiaoxian, ZHENG Xueling\*

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** *Triticum aestivum* is a high-quality wheat with special nutritional quality. In this experiment, two kinds of characteristic *Triticum aestivum*, 16W16 and Yunhei 14207, were selected as the research objects to analyze the antioxidant active components and capacity of *Triticum aestivum* whole wheat flour, flour, and bran. The results showed that the levels of anthocyanins, polyphenols, and flavonoids in *Triticum aestivum* were higher than those in the control wheat. The levels of polyphenols, flavonoids, and anthocyanins in 16W16 whole wheat flour were 3.73 mg GAE/g, 2.45 mg RE/g, and 111.33 mg/kg, respectively. The iron ion reduction ability of 16w16 whole wheat flour was 2.34 mg TE/g, and the scavenging rates of DPPH and OH free radicals were 48.18% and 42.46%. 16W16 crude bran had the highest content of antioxidant components and strongest antioxidant activity. The levels of anthocyanins, polyphenols, and flavonoids were 672.31 mg/kg, 6.77 mg GAE/g and 6.67 mg RE/g, respectively. The iron ion reduction capacity of the bran was 5.73 mg TE/g, and the DPPH and ·OH free radicals scavenging rates were 97.00% and 88.30%, respectively. Analysis of the antioxidant components in *Triticum aestivum* showed that anthocyanins, polyphenols, and flavonoids in the bran accounted for approximately 99.00%, 50.00%, and 80.00% of the total antioxidant components content, which indicated that the antioxidant substances in *Triticum aestivum* were mainly distributed in the seed coat structure. The levels of polyphenols, flavonoids, and anthocyanins as well as antioxidant activity of Yunhei 14207 were significantly lower than those of 16w16 and higher than those of the control wheat Yongliang 4. Analysis of the content of antioxidant components in *Triticum aestivum* showed that the antioxidant active substances in triticale were mainly distributed in the bran. Comprehensive analysis showed that the content of active components in *Triticum aestivum* was higher and antioxidant ability was stronger than that in *Triticum aestivum*. Therefore, *Triticum aestivum* is a good material for developing functional and health foods.

引文格式:

牛新奎, 韩小贤, 郑学玲. 黑小麦粉的抗氧化成分及活性[J]. 现代食品科技, 2022, 38(9): 292-297

NIU Xinkui, HAN Xiaoxian, ZHENG Xueling. Antioxidant components and activity of *Triticum aestivum* flour [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(9): 292-297

收稿日期: 2021-11-13

基金项目: 国家小麦产业技术体系专项资金项目 (GARS-03)

作者简介: 牛新奎 (1995-), 男, 研究生, 研究方向: 小麦产后加工和利用、谷物淀粉加工理论与技术, E-mail: 1951724155@qq.com

通讯作者: 郑学玲 (1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 小麦产后加工和利用、谷物淀粉加工理论与技术, E-mail: zhengxueling@126.com

**Key words:** characteristic *Triticum aestivum*; anthocyanins; polyphenols; flavonoids; antioxidant activity

黑小麦是指种子的颜色较深,呈蓝、紫、紫黑、黑等颜色小麦的统称,由黑麦和普通小麦杂交形成的小麦品种,原产于欧洲,主要呈现黑色、紫色或者黑紫色,目前我国也是黑小麦的主要种植区<sup>[1]</sup>。相比于普通小麦,黑小麦中富含膳食纤维,据美国农业部国家营养数据库数据显示<sup>[2]</sup>,黑小麦中膳食纤维的含量达14.6%,比普通小麦高10%。同时黑小麦是一种天然黑色食品,营养价值极高,不仅蛋白质含量高,而且富含多种生物活性成分,包括戊聚糖、阿魏酸、花色苷、多酚、黄酮等<sup>[3,4]</sup>。这些生物活性成分性质稳定,其中花色苷、多酚、黄酮更是天然的抗氧化物质,能够有效地清除体内自由基,提高人体免疫力,降血压,预防癌症<sup>[5-7]</sup>。黑小麦其独特的营养功能特性,符合未来食品发展的趋势,近年来,黑小麦在食品工业中的应用越来越广,其研究价值越来越高。目前黑小麦已经广泛用于制作面包、馒头、营养冲剂等产品<sup>[8,9]</sup>。随着食品科学技术的不断创新和飞速发展,黑小麦将会朝着食品类型多样化、方便化和营养化的方向不断发展。同时,黑小麦现在已经不仅仅作为食品食用,黑小麦在药品,化妆品,染色剂等领域内的应用也越来越广泛<sup>[10,11]</sup>,黑小麦作为一种天然健康的优质原料,将会逐渐应用到各行各业中。

中国的黑小麦种类繁多,但产量比较低,因此目前对黑小麦的研究最主要集中在育种和栽培方面,产后加工和利用方面的系统研究相对较少。本研究选取两种新培育且具有代表性的黑小麦16W16(紫色小麦)和运黑14207(蓝麦)作为研究对象,以普通中筋优质小麦永良4号为对照,对黑小麦全麦粉、面粉和麸皮的主要活性成分(多酚、黄酮和花色苷)的含量和抗氧化活性进行研究,以期黑小麦全麦粉、面粉和麸皮的加工利用提供理论依据。

## 1 材料与设备

### 1.1 材料与试剂

供试黑小麦2种(16W16、运黑14207),由山西省农业科学院提供;普通中筋对照小麦(永良4号)由内蒙古恒丰食品工业股份有限公司提供。

化学试剂均采用分析纯。

### 1.2 仪器与设备

JFXM110 锤式旋风磨,杭州其伟光电科技有限公司;LXJ-IIB 型低速大容量离心机,上海安亭科学仪

器厂;pHS-3C pH计,上海仪电科学仪器;UV762 紫外分光光度计,上海仪电分析有限公司;SHZ-B 型水浴振荡器,上海博讯医疗生物仪器股份有限公司;SCQ-超声清洗器,上海声彦超声仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 黑小麦制粉

全麦粉由旋风磨对整粒小麦直接研磨粉碎过筛得到。面粉和麸皮均由小麦籽粒润麦24h调节水分含量至16%,然后采用MLU-202型布勒实验磨磨粉后制得,其中16W16,运黑14207和永良4号的出粉率分别是67%、68%和69%,符合实验室正常制粉出粉率,16W16、运黑14207和永良4号粗麸得率分别是19%、13%和16%,细麸得率分别是14%、19%和15%。

#### 1.3.2 黑小麦提取液的制备

选用体积分数60%乙醇作为提取溶剂,通过超声辅助对活性成分进行提取。准确称取黑小麦粉1.0g于50mL的离心管中,加入体积分数60%乙醇溶液25mL,混匀后在40℃下,设置超声功率300W进行超声处理1h,然后将浸提液在离心机以5000r/min的速度离心20min,上清液即为黑小麦粉提取液。

#### 1.3.3 总酚含量测定

参照向莉<sup>[12]</sup>采用Folin-Ciocalteu法测定总酚含量:吸取提取液0.5mL,加入福林酚试剂0.75mL,再加入质量分数10%的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>试剂1.5mL,定容至10mL,在35℃水浴中反应30min,在765nm处测定吸光度,60%乙醇溶液代替提取液为空白对照。以不同浓度的没食子酸标准品(μg/mL)为X轴,吸光度A为Y轴制图,得到线性回归方程:

$$Y=4.7876X+0.0105, R^2=0.999 \quad (1)$$

根据标准曲线及样品吸光度,计算黑小麦的总黄酮含量,结果表示为:(mg GAE/g)(GAE: Gallic Acid Equivalent, 没食子酸当量)。

#### 1.3.4 黄酮含量测定

参照李帑洛<sup>[13]</sup>采用NaNO<sub>2</sub>-Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>比色法测定黄酮含量:吸取提取液1.0mL,加入质量分数5%的NaNO<sub>2</sub>溶液1.0mL,静置反应6min;再加入质量分数10%的Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>溶液1.0mL,静置反应6min;最后加入质量分数4%的NaOH溶液4mL,定容至10mL,静置反应15min,在510nm处测定吸光度,60%乙醇溶液代替提取液为空白对照。以不同浓度的芦丁标准品(mg/mL)为X轴,吸光度A为Y轴制图,得到线性回归方程:

$$Y=5.5998X-0.0046, R^2=0.999 \quad (2)$$

根据标准曲线及样品吸光度, 计算黑小麦的总黄酮含量, 结果表示为: (mg RE/g) (RE: Rutin Equivalent, 芦丁当量)。

### 1.3.5 花色苷含量测定

参照耿然<sup>[14]</sup>采用 pH 示差法并稍作修改: 取 2 支离心管, 分别吸取提取液 2.0 mL, 在两只离心管中分别加入 KCl-HCl 的缓冲液 (pH 值 1.0) 和 CH<sub>3</sub>COONa 缓冲液 (pH 值 4.5) 8.0 mL, 然后以 5 000 r/min 的转速离心 20 min, 使杂质沉淀, 以体积分数 60% 的乙醇溶液代替提取液做空白对照, 测量 530 nm 波长下测定吸光度 A<sub>1.0</sub> 和 A<sub>4.5</sub>, 花色苷含量公式如下:

$$C = \frac{(A_{1.0} - A_{4.5}) \times V \times n \times M}{\epsilon \times m} \times 1000 \quad (3)$$

式中:

C—花色苷含量, 表示 1 kg 黑小麦粉中花色苷含量, mg/kg;

A<sub>1.0</sub>—pH 值 1.0 时花色苷的吸光度;

A<sub>4.5</sub>—pH 值 4.5 时花色苷的吸光度;

V—提取液的总体积, mL;

n—稀释倍数 (5);

M—矢车菊-3-葡萄糖苷 (Cy-3-Glu) 相对分子量 (449);

ε—Cy-3-Glu 的消光系数 (29600);

m—样品质量, g。

### 1.3.6 抗氧化性测定

#### 1.3.6.1 铁离子还原能力的测定

参考 Goncalves<sup>[15]</sup>的方法并做出调整: 量取提取液 0.5 mL 于试管中, 加入 0.2 mol/L PB 缓冲液 2.5 mL, 加入 1% 铁氰化钾溶液 (m/V) 2.5 mL, 混匀, 于 50 °C 水浴中反应 20 min, 之后加入 10% 的三氯乙酸 (TCA, m/V) 2.5 mL 终止反应。离心后取上清液 2.5 mL, 加入蒸馏水 1.0 mL, 0.1% 的三氯化铁溶液 (m/V) 0.5 mL, 于 700 nm 下测定其吸光度, 60% 乙醇溶液代替提取液为空白对照。以不同浓度的 Trolox 溶液 (mg/mL) 为 X 轴, 吸光度 A 为 Y 轴制图, 得到线性回归方程:

$$Y=5.0287X-0.0136, R^2=0.999 \quad (4)$$

根据标准曲线及样品吸光度, 结果表示为还原每克样品的所需的 Trolox 质量: (mg TE/g) (TE: Trolox Equivalent, 水溶性维生素 E 当量)。

#### 1.3.6.2 DPPH 自由基清除率的测定

参考 Hu 等<sup>[16]</sup>的检测方法进行测定: 取 3 支离心管, 向离心管中依次加入提取液、体积分数 60% 乙醇和 0.25 mmol/L DPPH 溶液, 在 37 °C 下避光反应 30 min, 5 000 r/min 的速度离心 10 min, 将上清液在 510 nm 处测定吸光值, 通过公式 (5) 计算 DPPH 自由基清除率 K<sub>1</sub>。

$$K_1 = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

K<sub>1</sub>—DPPH 自由基清除率, %;

A<sub>0</sub>—(4 mL 60% 乙醇+4 mL DPPH 溶液) 吸光度值;

A<sub>1</sub>—(1 mL 提取液+3 mL 60% 乙醇+4 mL DPPH 溶液) 吸光度值;

A<sub>2</sub>—(1 mL 提取液+3 mL 60% 乙醇+4 mL 无水乙醇) 吸光度值。

#### 1.3.6.3 ·OH 清除率的测定

参考王盼等<sup>[17]</sup>的检测方法基础稍作修改进行测定: 取三支离心管, 向离心管中依次加入 9 mmol/L 的 FeSO<sub>4</sub> 溶液、提取液、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液, 混匀后室温下静置 10 min, 再加入 9 mmol/L 的水杨酸-乙醇溶液, 混匀后在 25 °C 下水浴反应 30 min, 以蒸馏水做空白对照, 在 510 nm 出测定吸光值, 通过公式 (6) 计算·OH 清除率 K<sub>2</sub>:

$$K_2 = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

K<sub>2</sub>—·OH 自由基清除率, %;

A<sub>0</sub>—(2.0 mL FeSO<sub>4</sub>+2.0 mL 60% 乙醇+2.0 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+2.0 mL 水杨酸-乙醇) 吸光度值;

A<sub>1</sub>—(2.0 mL FeSO<sub>4</sub>+2.0 mL 提取液+2.0 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+2.0 mL 水杨酸-乙醇) 吸光度值;

A<sub>2</sub>—(2.0 mL FeSO<sub>4</sub>+2.0 mL 提取液+2.0 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+2.0 mL 无水乙醇) 吸光度值。

## 1.4 数据处理

试验数据以 3 次平行实验的平均值±标准差表示, 使用 Excel 2010、Origin 2017 和 SPSS 25.0 软件对试验数据进行处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 黑小麦多酚含量分析

多酚具有极强的抗氧化能力, 能够有效地保护体内生物大分子免受氧化损伤<sup>[18]</sup>。图 1 为黑小麦全麦粉、麸皮和面粉中多酚的含量。由图 1 可知, 在全麦粉中, 黑小麦 16W16 中多酚含量为 3.73 mg/g, 比对照小麦永良 4 号高出 23%; 运黑 14207 全麦粉中多酚含量是 3.16 mg/g, 比对照小麦高出 4%。多酚在三种小麦的制粉产物中, 含量由高到低依次为粗麸、细麸和面粉。16W16、运黑 14207 和永良 4 号中粗麸中多酚含量分别为 6.67、5.35 和 4.28 mg/g, 根据面粉和麸皮所占比例及多酚总含量计算, 分别占多酚总含量的 30.09%、28.29% 和 25.03%;

16W16、运黑 14207 和永良 4 号面粉中多酚含量分别是 3.01、3.02 和 2.86 mg/g，分别占多酚总含量 50.28%、56.36%和 58.86%，均高于 50%。实验结果表明，在此次实验中，黑小麦中多酚含量显著高于对照小麦，多酚在面粉中含量显著低于麸皮和全麦粉，但面粉中多酚含量占总多酚含量的 50%以上，即多酚主要存在于面粉中。

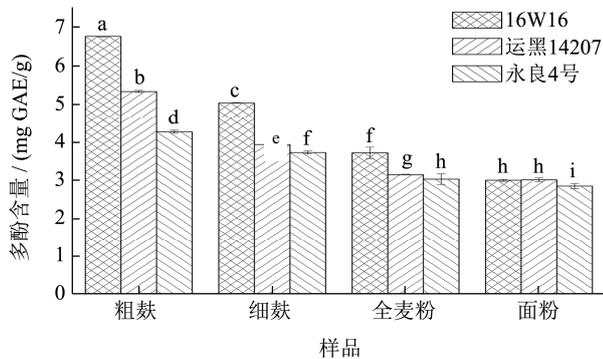


图1 黑小麦粉中多酚含量

Fig.1 The polyphenol content in *Triticum aestivum* flour

注：柱形图上不同字母表示具有显著差异 ( $p < 0.05$ )，下同。

## 2.2 黑小麦黄酮含量分析

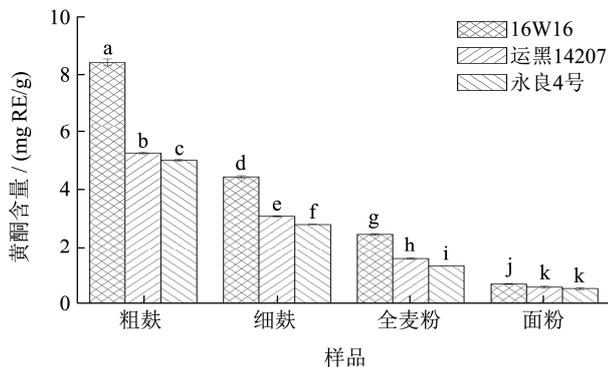


图2 黑小麦粉中黄酮含量

Fig.2 The flavone content in *Triticum aestivum* flour

黄酮类化合物是大自然中的一大类化合物的统称，由于黄酮分子结构中含有大量酚羟基，小麦胚芽黄酮类化合物具有抗氧化活性，能抑制多种化学物质诱变，具有提高机体的免疫等功能<sup>[19]</sup>。图2是黑小麦粉全麦粉和制粉产物各组分中黄酮的含量。由图2可知，16W16黑小麦全粉的黄酮含量为 2.45 mg/g，是永良4号 (1.33 mg/mL) 黄酮含量的 1.84 倍；运黑 14207 的黄酮含量是 1.58 mg/g，比永良4号高 19%。根据面粉、粗麸和细麸所占比例及黄酮含量计算，和永良4号类似，16W16和运黑14207中粗麸、细麸和面粉中黄酮的含量分别占总黄酮含量的 57%、23%和 20%左右。实验结果表明：黑小麦麸皮和全麦粉中，黄酮含量显著高于普通小麦 ( $p < 0.05$ )；与多酚不同，并且麸皮中的黄酮含量占总黄酮含量的 80%左右，即黄酮

主要存在于黑小麦的麸皮中。

## 2.3 黑小麦花色苷含量分析

花色苷是一种天然的医药保健活性物质成分，由于其具有良好的抗氧化、降血脂、抑制肿瘤的作用，在医疗和保健品上具有十分广泛的应用<sup>[20]</sup>。图3是黑小麦全麦粉和制粉产物各组分中花色苷的含量，由图3可知，16W16和运黑14207黑小麦全粉中的花色苷含量是 111.33 mg/kg 和 74.73 mg/kg，分别是对照小麦永良4号全粉中花色苷含量的 19.1 倍和 7.3 倍。与全麦粉不同，16W16面粉中花色苷含量低于运黑14207，16W16和运黑14207面粉中花色苷含量分别为 1.58 mg/kg 和 8.15 mg/kg。根据面粉和麸皮所占比例及花色苷含量可得各组分花色苷占总花色苷比例，16W16粗麸中花色苷含量是 672.31 mg/kg，占总花色苷含量的 79%，细麸中花色苷含量是 234.61 mg/kg，占花色苷总量的 20.33%，面粉占花色苷含量仅占花色苷总含量的 0.64%。根据运黑14207的测试结果发现，运黑14207粗麸中花色苷含量是 124.60 mg/kg，占总花色苷含量的 69.79%，细麸中花色苷含量是 74.73 mg/kg，占总花色苷含量的 28.84%，面粉中的花色苷含量仅占总花色苷含量的 1.38%。结果表明，黑小麦中的花色苷显著高于普通小麦 ( $p < 0.05$ )，并且黑小麦中花色苷存在于黑小麦麸皮中含量大约为总含量的 99%，即花色苷主要存在黑小麦的种皮结构中。

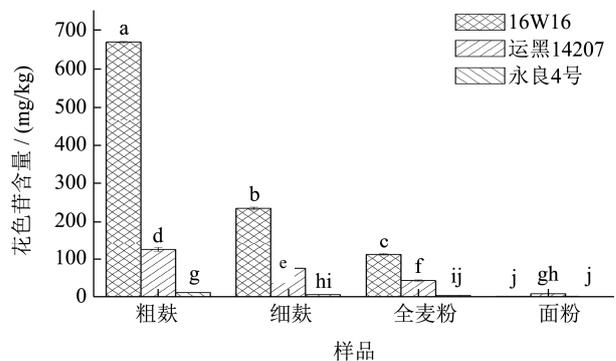


图3 黑小麦粉中花色苷含量

Fig.3 The anthocyanin content in *Triticum aestivum* flour

综合分析，16W16和运黑14207中的抗氧化活性成分均显著高于普通对照小麦永良4号 ( $p < 0.05$ )，黑小麦中的花色苷、多酚和黄酮在粗麸中含量最高，说明其主要存在于黑小麦的种皮结构。

## 2.4 黑小麦的抗氧化活性分析

### 2.4.1 铁离子还原能力分析

铁离子还原能力的主要是基于氧化还原反应，在反应过程中，提取液中的活性成分将  $Fe^{3+}$  还原成为  $Fe^{2+}$ ，其还原能力用每克干物质黑小麦粉消耗的 Trolox

当量 (TE) 表示, 每克干黑小麦粉消耗的 TE 越高, 表明黑小麦粉的抗氧化能力越强, 根据吸光度的变化测定其抗氧化能力的强弱。图 4 为黑小麦粉提取液铁离子抗氧化能力的测定, 由图 4 可知, 16W16 和运黑 14207 全麦粉的铁离子还原能力为 2.34 和 1.54 mg TE/g, 分别高出对照小麦粉铁离子还原能力的 125% 倍和 48%。在黑小麦粉的各制粉产物中, 黑小麦粉粗麸的抗氧化能力最强, 16W16 粗麸粉的抗氧化能力为 5.73 mg TE/g, 是 16W16 全麦粉抗氧化能力的 2.45 倍。

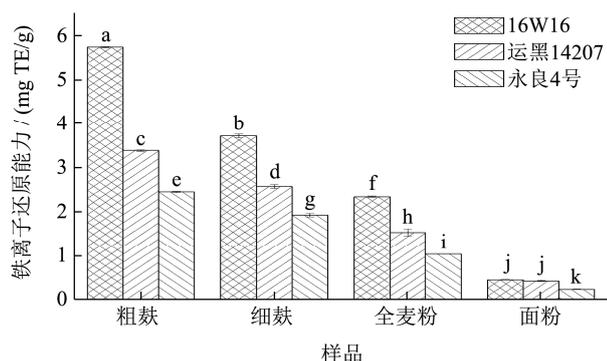


图 4 黑小麦粉铁离子还原能力测定

Fig.4 Determination of iron ion reduction ability of *Triticum aestivum* flour

### 2.4.2 DPPH 自由基清除率分析

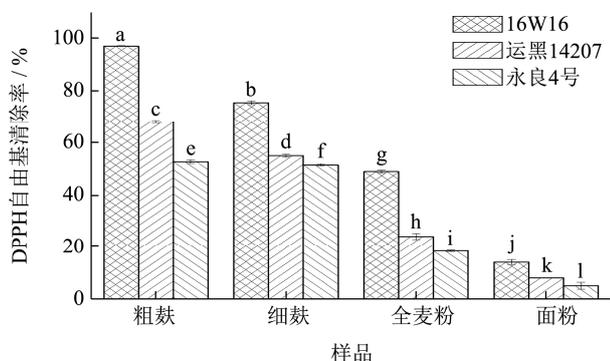


图 5 黑小麦粉对 DPPH 自由基清除率测定

Fig.5 Determination of DPPH radical scavenging rate of *Triticum aestivum* flour

1-二苯基-2-三硝基苯胍简称 DPPH, DPPH 是一种稳定的有机自由基, 被广泛应用与测定天然产物的抗氧化能力。一般情况下, 对 DPPH 自由基清除率越强, 其抗氧化能力越强。图 5 为黑小麦粉提取液对 DPPH 自由基清除率测定结果。由图 5 可知, 测定结果与铁离子还原能力测定结果类似, 16W16 和运黑 14207 全麦粉提取液对 DPPH 自由基清除率分别是 48.18% 和 24.05%, 均显著高于对照小麦永良 4 号 ( $p < 0.05$ )。16W16 粗麸、细麸和面粉自由基清除率分别是 97.00%、75.28% 和 14.08%, 运黑 14207 粗麸、细麸和面粉对 DPPH 自由基清除率分别是 67.95%、

54.81% 和 8.09%, 即黑小麦粉的抗氧化能力由大到小依次为粗麸粉 > 细麸粉 > 全麦粉 > 面粉, 说明黑小麦中麸皮的抗氧化活性更强。

### 2.4.3 OH 自由基清除率分析

图 6 为黑小麦粉对 ·OH 清除率的结果, 测定的结果与铁离子还原能力和 DPPH 自由基清除率略有不同, 运黑 14207 粗麸、细麸、全麦粉和面粉对 ·OH 的清除率分别是 79.91%、44.92%、36.02% 和 22.97%, 与对照小麦永良 4 号无显著性差异 ( $p > 0.05$ )。16W16 粗麸、细麸和全麦粉对 ·OH 的清除率分别是 88.30%、70.16% 和 42.46%, 均显著高于对照小麦永良 4 号 ( $p < 0.05$ )。即黑小麦运黑 14207 对 ·OH 清除率与普通对照小麦无显著性差异, 黑小麦 16W16 对 ·OH 清除率最高, 即黑小麦 16W16 的抗氧化活性更强。

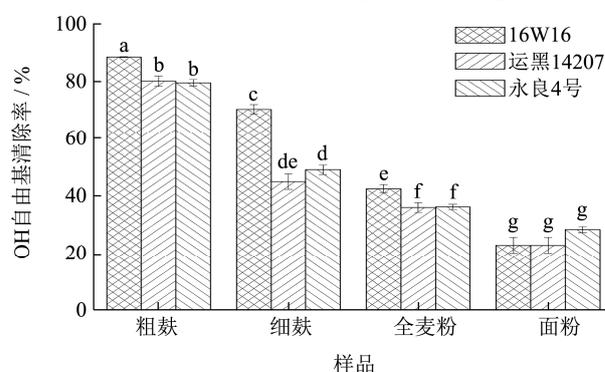


图 6 黑小麦粉对 ·OH 清除率的测定

Fig.6 Determination of ·OH scavenging rate of *Triticum aestivum* flour

本实验通过三种方式对黑小麦各组分的抗氧化活性进行测定。综合分析, 两种黑小麦全麦粉的抗氧化能力高于对照小麦永良 4 号, 其中 16W16 的抗氧化活性最强; 通过比较两种黑小麦的麸皮和面粉进行抗氧化活性测定发现, 粗麸粉的抗氧化活性更强, 其中黑小麦 16W16 粗麸粉的抗氧化活性最强。

## 3 结果

试验通过对黑小麦各组分中生物活性物质及抗氧化性的研究发现: 黑小麦中的花色苷, 多酚和黄酮含量均显著高于所选的普通小麦 ( $p < 0.05$ ), 黑小麦各组分的抗氧化能力高于所选的普通对照小麦 ( $p < 0.05$ )。黑小麦麸皮中的花色苷和黄酮分别占总质量的 99% 和 80% 左右, 即黑小麦中的花色苷、多酚和黄酮主要存在于黑小麦麸皮中, 即黑小麦的种皮部位。通过布勒磨加工后得到的产物中, 16W16 粗麸粉中抗氧化成分含量最高, 其多酚、黄酮和花色苷的含量分别为 6.67 mg GAE/g、8.42 RE/g 和 672.31 mg/kg; 16W16 粗麸粉的抗氧化能力最强, 其铁离子还原能力

为 5.73 mg TE/g, 对 DPPH·和·OH 的清除率分别是 97.00%和 88.30%。综合分析, 在全麦粉中, 黑小麦 16W16 抗氧成分含量最高, 16W16 粗麸粉抗活性能力最强; 在制粉产物中, 粗麸粉抗氧成分含量最高, 16W16 粗麸粉抗活性能力最强。总之, 黑小麦 16W16 可以作为一种很好的黑色食品的来源。

随着社会的不断发展, 黑小麦由于其特殊的营养保健价值备受关注, 本实验对黑小麦的抗氧化性进行研究。黑小麦面粉多酚含量显著高于对照小麦, 可以用于面条、馒头等主食的制作; 但是由于黑小麦面粉中抗氧化成分含量与对照面粉的差异比较小, 因此黑小麦在食品中一般保留全麦粉使用。相信随着黑小麦产业体系的不断发展, 黑小麦将会通过其他加工手段或与其他食品进行复合, 从而改善其口感, 并且最大限度地降低其营养成分在加工过程中造成的不必要流失, 通过对其营养价值的开发, 不断改善人们的饮食结构, 更加科学合理地供人们食用。

## 参考文献

- [1] 裴自友, 孙玉, 孙善澄, 等. 中国黑小麦研究利用现状[J]. 种子, 2002, 4: 42-44  
PEI Ziyou, SUN Yu, SUN Shancheng, et al. Research and utilization status of black wheat in China [J]. Seed, 2002, 4: 42-44
- [2] Moura F, Lewis K D, Falk M C. Applying the FDA definition of whole grains to the evidence for cardiovascular disease health claims [J]. Journal of Nutrition, 2009, 139(11): 2220S-6S
- [3] Chen Z, Ma Y, Yang R, et al. Effects of exogenous Ca<sup>2+</sup> on phenolic accumulation and physiological changes in germinated wheat (*Triticum aestivum* L.) under UV-B radiation [J]. Food Chemistry, 2019, 288(AUG.1): 368-376
- [4] Dhua S, Kumar K, Y Kumar, et al. Composition, characteristics and health promising prospects of black wheat: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 780-794
- [5] Bae I Y, Ji S A, Oh I K, et al. Optimized preparation of anthocyanin-rich extract from black rice and its effects on *in vitro* digestibility [J]. Food Ence and Biotechnology, 2017, 26(5): 1-8
- [6] Zhu F. Triticale: Nutritional composition and food uses [J]. Food Chemistry, 2018, 241: 468-479
- [7] Senol F S, Kan A, Coksari G, et al. Antioxidant and anticholinesterase effects of frequently consumed cereal grains using *in vitro* test models [J]. International Journal of Food Sciences & Nutrition, 2012, 63(5): 553-559
- [8] 翟晓霏. 黑小麦活性成分及功能性食品开发研究进展[J]. 现代食品, 2021, 5: 53-55  
ZHAI Xiaofei. Research progress on active ingredients and functional foods of triticale [J]. Modern Food, 2021, 5: 53-55
- [9] 吴莹莹, 马丹妮, 李华. 黑小麦营养价值功能性物质及其影响因素的研究进展[J]. 农产品加工, 2019, 18: 58-60  
WU Yinghan, MA Danni, LI Hua. Advances in research on nutritional value functional substances and influencing factors of triticale [J]. Farm Products Processing, 2019, 18: 58-60
- [10] Lachman J, Martinek P, Z Kotiková, et al. Genetics and chemistry of pigments in wheat grain - a review [J]. Journal of Cereal Science, 2017, 74: 145-154
- [11] Gupta R, Meghwal M, Prabhakar P K. Bioactive compounds of pigmented wheat (*Triticum aestivum*): potential benefits in human health [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110(1): 240-252
- [12] 向莉. 黑粒小麦多酚的提取纯化及抗氧化活性的研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2012  
XIANG Li. Separation, purification and antioxidant activity of polyphenol in black wheat [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2012
- [13] 李帛洛, 符枫雪, 郭玉, 等. 超声辅助优化小麦胚芽中总黄酮提取工艺[J]. 应用化工, 2020, 49(4): 926-928  
LI Qianluo, FU Fengxue, GUO Yu, et al. Optimization the extraction of total flavonoids from wheat germ with ultrasound-assisted [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(4): 926-928
- [14] 耿然. 黑小麦花色苷特性分析及其全麦粉馒头品质研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019  
GENG Ran. Analysis of anthocyanin characteristics of black wheat and its quality of whole wheat steamed bread [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019
- [15] Gonalves F, Gonalves J C, Ferro A C, et al. Evaluation of phenolic compounds and antioxidant activity in some edible flowers [J]. Open Agriculture, 2020, 5(1): 857-870
- [16] Hu F, Lu R, Bao H, et al. Free radical scavenging activity of extracts prepared from fresh leaves of selected Chinese medicinal plants [J]. Fitoterapia, 2004, 75(1): 14-23
- [17] 王盼, 王毅红, 方玉梅. 金荞麦总黄酮提取物抗氧化作用研究[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(8): 23-24  
WANG Pan, WANG Yihong, FANG Yumei. Study on anti-oxidation activity of the total flavone extract from *Fagopyrum dibotrys* [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(8): 23-24
- [18] Piccolella S, Crescente G, Candela L, et al. Nutraceutical polyphenols: new analytical challenges and opportunities [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2019, 175: 112774
- [19] Huang R, Zhang Y, Shen S, et al. Antioxidant and pancreatic lipase inhibitory effects of flavonoids from different citrus peel extracts: an *in vitro* study [J]. Food Chemistry, 2020, 326: 126785
- [20] 王艳龙, 石绍福, 韩豪, 等. 中国黑米花色苷研究现状及展望[J]. 中国生化药物杂志, 2010, 31(1): 63-66  
WANG Yanlong, SHI Shaofu, HAN Hao, et al. The present status and prospect of studying black rice anthocyanin in China [J]. Chinese Journal of Biochemical Pharmaceutics, 2010, 31(1): 63-66