

# 藜麦全谷物粉对饅抗氧化性影响的研究

吴立根<sup>1</sup>, 王涛<sup>2</sup>, 屈凌波<sup>1,2</sup>, 王岸娜<sup>1\*</sup>

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 陕西省延安市食品质量安全检验检测中心, 延安 716000;  
3. 郑州大学化学化工学院, 郑州 450001)

**摘要:** **目的** 考查藜麦全谷物粉对饅抗氧化特性影响。**方法** 添加藜麦全谷物粉、高粱粉和小米粉到纯小麦粉中,考查不同杂粮含量对饅中多酚和黄酮含量及抗氧化性的影响,在单因素实验的基础,利用Box-Behnken 实验优化饅的工艺条件,并考察藜麦全谷物饅中多酚和黄酮含量及抗氧化性随冷藏时间的变化情况。**结果** 饅的最优制备条件为:藜麦全谷物粉添加 10.5%、高粱粉添加 11.5%、小米粉添加 10.0%、酵母使用量为 1.0%、水分加入量为 52.0%、发酵时间为 86.0 min,在此条件下制备的复合谷物粉饅的感官评价平均得分为 80.60,黄酮含量为 1.20 mg/g、多酚含量为 61.26 mg/g,分别比纯小麦粉饅的感官得分、黄酮和多酚含量提高了 3.40%、9.10%和 16.46%;DPPH·清除率平均值为 58.83%,ABTS<sup>+</sup>·清除率平均值为 51.58%,还原力平均值为 10.67 mg/g,分别比纯小麦粉饅的 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>·清除率和还原力提高了 22.05%、15.39%和 10.00%。藜麦全谷物饅在冷藏条件下,随着储藏时间的延长,其黄酮、多酚含量没有显著变化,但是储藏过程饅中 ABTS<sup>+</sup>·、DPPH·清除率和铁离子还原能力(ferric ion reducing antioxidant power, FRAP)随储藏时间增加而减弱。**结论** 以藜麦全谷物粉、高粱粉和小米粉混粉制备饅,可以显著提高饅的黄酮含量、多酚含量及其抗氧化性能,但复合谷物饅还需要解决储藏过程抗氧化能力降低问题。

**关键词:** 藜麦全谷物粉;饅;抗氧化特性;自由基清除

## Study on the effects of whole grain flour of *Chenopodium quinoa* on the antioxidant properties of Naan

WU Li-Gen<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>2</sup>, QU Ling-Bo<sup>1,2</sup>, WANG An-Na<sup>1\*</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;  
2. Yanan Center for Food Quality and Safety Control, Yanan 716000, China; 3. Institute Green Catalysis, College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**ABSTRACT: Objective** To investigate the effects of whole grain flour of *Chenopodium quinoa* on antioxidative properties of Naan. **Methods** Whole grain flour of *Chenopodium quinoa*, sorghum flour and millet flour were added into pure wheat flour to investigate the effects of different grain content on the content of polyphenols and flavonoids and antioxidant activity of Naan, on the basis of single factor test, Box-Behnken test was used to optimize the preparation conditions of Naan, the content of polyphenols and flavonoids in Naan of whole grain flour of quinoa and

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31201294)、粮食公益性行业科研专项(201313011)、河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(2021BS057)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (31201294), the Special Fund for Grain-scientific Research in the Public Interest (201313011), and the Scientific Research Start-up Fund Project of High-level Talents of Henan University of Technology (2021BS057)

**\*通信作者:** 王岸娜, 博士, 教授, 主要研究方向为食品生物大分子。E-mail: wanganna2017@126.com

**\*Corresponding author:** WANG An-Na, Ph.D, Professor, College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China. E-mail: wanganna2017@126.com

the changes of antioxidant activity with the time of cold storage were investigated. **Results** The optimal preparation conditions of Naan were as follow: Whole grain flour of *Chenopodium quinoa* was 10.5%, sorghum flour was 11.5%, millet flour was 10%, yeast consumption was 1.0%, water content was 52%, and the fermentation time was 86.0 min, the average sensory score of the composite cereal flour Naan prepared under this condition was 80.43, the flavonoid content was 1.2 mg/g, and the polyphenol content was 61.26 mg/g, which were 3.4%, 9.1% and 16.46% higher than that of the pure wheat flour Naan, respectively. The DPPH $\cdot$ , ABTS $^{+}$  $\cdot$  scavenging rate and the reducing power of the composite cereal flour Naan were 58.83%, 51.58%, and 10.67 mg/g, and with the increase of 22.05%, 15.39% and 10% higher than those of pure wheat flour Naan, respectively. With the extension of storage time, the content of flavonoids and polyphenols in composite cereal flour Naan did not change significantly, but the scavenging rates of ABTS $^{+}$  $\cdot$  and DPPH $\cdot$  and the reducing power of ferric ion reducing antioxidant power (FRAP) decreased with the increase of storage time. **Conclusion** The preparation of Naan with wholegrain flour of *Chenopodium quinoa*, sorghum flour and millet flour can significantly increase its flavonoid and polyphenol content and its antioxidant properties. However, it is necessary to solve the problem of reducing antioxidant capacity during storage.

**KEY WORDS:** whole grain flour of quinoa; Naan; antioxidant properties; free radical scavenging rate

## 0 引言

饅产品是指用小麦粉、食用植物油、生活饮用水等为主要原料,添加(或不添加)食盐及其他辅料,经过原辅料处理、调粉、发酵(或不发酵)、成型、烘烤、冷却而成的具有新疆地方特色的食品<sup>[1-2]</sup>。目前,饅的研究工作主要集中在饅加工技术和饅坑的改进、饅的起源、历史及文化及饅的营养价值等<sup>[3-4]</sup>,以多谷物或全谷物为原料制备饅,并对其品质和功能性影响的研究比较少。

藜麦(*Chenopodium quinoa*)是联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)认定唯一的单作物即可满足人类所需全部营养的拟谷物<sup>[5]</sup>,是全球 10 大健康营养食品之一<sup>[6]</sup>,藜麦中赖氨酸水平为小麦、玉米的两倍<sup>[7]</sup>,蛋白质消化率高达 91.6%<sup>[8]</sup>,此外,还含有大量的植物化学素如多酚<sup>[9]</sup>、甾醇、黄酮等,藜麦也因其营养的独特性及其丰富的功能成分而受到世界各国科研人员的关注<sup>[10]</sup>。研究表明,藜麦全谷物食品或高粱、小米中的多酚具有抑制癌症、降低血压、清除自由基、延缓衰老、抗脂质过氧化等功能<sup>[11]</sup>,酚类对机体的调节功能与其抗氧化活性、抗炎症效果<sup>[12]</sup>、脂代谢/胆固醇调节能力有关系<sup>[13-15]</sup>,多酚可调节谷胱甘肽自由基清除系统来改善血液的抗氧化能力,同时通过降低 C-反应蛋白和白细胞介素-6 来发挥抗炎作用,此外,多酚也能够对多数的脂质中间体进行调控,增强血管反应性和血管内皮功能<sup>[16-17]</sup>,降低罹患高血压<sup>[16-19]</sup>与心血管和冠状动脉疾病<sup>[20]</sup>风险的作用。谷物中的酚类化合物可以通过增加胰岛素分泌来改善高血糖状态,并可以抑制葡萄糖生成酶、葡萄糖-6-磷酸酶(G6Pase)和磷酸烯醇丙酮酸羧激酶的生物活性从而降低血葡萄糖<sup>[21]</sup>。

新疆少数民族多喜食肉类,对于膳食中脂类摄入较高,水果的摄入可以减少脂类氧化带来的自由基伤害,但

对于中老年消费者来讲,水果中高含糖量依然是风险因素,而饅作为当地人的主食,如利用藜麦全谷物粉制备饅,既可丰富饅的营养价值,藜麦全谷物粉富含的多酚和膳食纤维又可以在一定程度上提升其功能特性。因此,本研究着重评价添加藜麦全谷物粉饅的多酚和总黄酮含量、1,1-二苯基-2-苦基肼自由基(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical, DPPH $\cdot$ )和 2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐阳离子自由基[2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate radical cation, ABTS $^{+}$  $\cdot$ ]清除能力、铁离子还原能力(ferric ion reducing antioxidant power, FRAP)及感官品质,并考察藜麦全谷物粉的添加量对饅感官品质和抗氧化特性的影响,以及低温储藏条件下复合谷物饅抗氧化性的变化,为改善升级传统饅的生产,实现大规模工业化生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

藜麦(青海省农林科学研究研究院);小米(豫谷 18,安阳市农业科学院)、高粱(河南大程粮油集团);面粉(新疆粮油有限公司);酵母(安琪酵母股份有限公司)。

芦丁标准品(纯度 95%)、没食子酸标准品(纯度 98%)、ABTS $^{+}$  $\cdot$ 、DPPH $\cdot$ 、福林酚试剂(美国 Sigma 公司);乙醇、碳酸钠、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、过硫酸钾、铁氰化钾、磷酸钠、三氯乙酸、三氯化铁(分析纯,上海化学试剂有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

FDV DUTPUT-2HP 超微粉碎机(日本佑崎有限公司);FA2004N 电子分析天平(感量 0.1 mg,上海菁海仪器有限公司);UV-3802S 型紫外分光光度计/紫外可见分光光度计(上海优尼科仪器有限公司);JC-CS-950F 超声波处理器(青岛聚创环保集团有限公司);JIDI-18D 台式多用途高速离心机(广

州吉迪仪器有限公司); HH-US 恒温水浴(江苏新春兰科学仪器有限公司); FYL-YS-128L 低温冰箱(北京富意联电器有限公司); DCDWMF-86 低温石磨磨粉机(河南大程粮油集团)。

1.3 实验方法

1.3.1 饅加工工艺

藜麦经过清理除杂, 调质处理(调质水分 14%~16%, 水分 pH 7.0~8.5, 常温下调质 10 h), 经过低温石磨磨粉机碾磨制备藜麦全谷物粉; 将高粱、小米用高速粉碎机粉碎 10 min, 过 80 目筛。

称取混合面粉(藜麦全谷物粉、小米粉、高粱粉和小麦粉按比例混合)、盐、水、酵母、植物油, 其中油和盐的用量参照文献<sup>[22-23]</sup>, 和面形成面团, 醒发条件为湿度 80%、温度 35 ℃, 一次醒发 1 h 和二次醒发 15 min, 将醒发好的面团擀制成直径 17 cm、中间厚度为: 0.6 cm; 边缘厚度为: 1.3 cm 的圆形饅坯, 用饅针戳出均匀的花纹, 置上下火 260 ℃烤箱烘烤 15 min 后取出, 表面刷植物油, 放入烤箱继续烘烤 3 min, 取出<sup>[24]</sup>。

1.3.2 实验设计

分别考察单独添加藜麦全谷物粉、小米粉和高粱粉到小麦粉中, 加适量水和酵母和面, 发酵焙烤成饅, 其中藜麦全谷物粉、小米粉和高粱粉单独添加量的变化范围均为 0%、5%、10%、15%、20%、水的添加量变化范围为 40、45、50、55、60 mL、酵母添加量变化范围为 0.70、0.75、0.80、0.85、0.90 g、发酵时间变化范围是 80、85、90、95、100 min, 对饅感官评价评分、总酚含量、总黄酮含量、DPPH·清除能力、ABTS<sup>+</sup>·清除能力及铁离子还原能力的影响。在单因素实验结果的基础上, 以感官评分为指标, 根据 Box-Behnken 中心组合实验设计原理对 6 个单因素进行响应面优化实验, 因素水平见表 1。

1.3.3 总酚和总黄酮含量测定

(1)总酚含量的测定

采用福林酚法<sup>[25]</sup>并稍做改动。准确称取 1 g 冻干并粉碎的饅粉末置于离心管中, 加入 13 mL 45%乙醇, 混合均匀, 在 45 ℃、600 W 条件下超声 50 min, 在 4000 r/min 条件下离心 20 min。取 1 mL 上清液于 10 mL 容量瓶中, 加 1 mL 福林酚试剂, 摇匀, 静置 6 min, 加入 2 mL 7.5%碳酸钠溶液, 蒸馏水定容至刻度, 摇匀, 静置 90 min。以蒸馏水为空白对照, 在 760 nm 处测量吸光度, 3 次测定取平均值。以没食子酸含量为横坐标( $X$ ,  $\mu\text{g/mL}$ ), 吸光度为纵坐标( $Y$ ), 得回归方程  $Y=0.1109X-0.0019$  ( $r^2=0.9989$ ), 总酚量以 mg 没

食子酸当量/g 干物质表示。

(2)总黄酮含量的测定

精确称取 1 g 冻干并粉碎的饅粉末置于离心管中, 加入 10 mL 体积分数 60%的乙醇, 混合均匀, 在 40 ℃、600 W 条件下超声 30 min, 在 4000 r/min 条件下离心 20 min。取制备好的提取液 5 mL 于 25 mL 容量瓶中, 用 60%乙醇补充至 10 mL, 加 1 mL 5%亚硝酸钠, 摇匀, 静置 6 min, 再加 1 mL 10%硝酸铝, 摇匀, 静置 6 min, 再加 5 mL 10% NaOH, 并用 60%乙醇定容至刻度线, 摇匀, 静置 15 min。以 60%乙醇为空白对照, 在 510 nm 处测量吸光值, 3 次测定取平均值。以芦丁含量为横坐标( $X_1$ ,  $\text{mg/mL}$ ), 吸光度为纵坐标( $Y_1$ ), 得回归方程  $Y_1=1.0757X_1-0.0054$  ( $r^2=0.9995$ )。总黄酮量以 mg 芦丁当量/g 干物质表示。

1.3.4 抗氧化性测定

称取 2 g 左右冻干并粉碎的饅粉末样品, 加入 45 mL 乙醇 (60%~70%), 混合均匀, 150 W 超声提取 80 min, 在 8000 r/min 条件下离心 15 min, 收集滤液, 残渣再重复提取一次, 合并滤液, 弃去滤渣, 将滤液用旋转蒸发器浓缩, 用乙醇定容至 10 mL, 即为样品溶液。

(1)DPPH·清除能力的测定

参考 AMIOT 等<sup>[17]</sup>的检测方法, 并稍作改进。用无水乙醇将 DPPH·配制成 254  $\mu\text{mol/L}$  的 DPPH·溶液。取样品液 1.2 mL, 加入 0.8 mL 无水乙醇, 再加入 DPPH·反应液 2 mL, 避光反应 30 min。在波长 517 nm 处测定吸光值。按照公式(1)计算 DPPH·的清除率:

$$\text{DPPH}\cdot\text{清除率}/\%=\frac{A_0-A_1}{A_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中:  $A_1$  为样品溶液与 DPPH·反应液反应的吸光值;  $A_0$  为空白组, 即水溶液与 DPPH·反应液反应的吸光值。

(2)ABTS<sup>+</sup>·清除能力的测定

将 7 mmol/L ABTS<sup>+</sup>·溶液(现配)与 2.45 mmol/L K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 溶液(现配)按 1:1 混合, 将所得溶液室温下避光放置 12~16 h, 用无水乙醇稀释 ABTS<sup>+</sup>·溶液, 使其在 734 nm 处吸光值为 0.70±0.02, 得到 ABTS<sup>+</sup>·反应液。取 0.3 mL 样品液, 加入 0.2 mL ABTS<sup>+</sup>·反应液, 避光反应 30 min。在波长 734 nm 处测定吸光值。按照公式(2)计算 ABTS<sup>+</sup>·清除率:

$$\text{ABTS}^+\cdot\text{清除率}/\%=\frac{A_c-A_1}{A_c}\times 100\% \quad (2)$$

式中:  $A_1$  为样品溶液与 ABTS<sup>+</sup>·反应液反应的吸光值;  $A_c$  为空白组, 即无水乙醇溶液与 ABTS<sup>+</sup>·反应液反应的吸光值。

表 1 Box-Behnken 实验设计因素与水平表  
Table 1 Box-Behnken test design factors and level table

| 水平因素 | A 藜麦全谷物粉添加量/% | B 小米粉添加量/% | C 高粱粉添加量/% | D 酵母添加量/% | E 水添加量/% | F 发酵时间/min |
|------|---------------|------------|------------|-----------|----------|------------|
| -1   | 0             | 0          | 0          | 0.4       | 40       | 30         |
| 0    | 10            | 10         | 10         | 0.8       | 50       | 90         |
| 1    | 20            | 20         | 20         | 1.2       | 60       | 150        |

(3)铁离子还原能力的测定

取 1 mL 样品液, 加入 2.5 mL 0.2 mol/L (pH 6.6)磷酸缓冲液, 再加入 2.5 mL  $K_3Fe(CN)_6$  溶液(1%,  $m:V$ ), 混匀, 于 50 °C 水浴锅中保温 20 min, 再加入 2.5 mL 三氯乙酸 (10%,  $m:V$ ), 以终止反应。3000 r/min 离心 10 min, 离心后取上清液 2.5 mL 依次加入 2.5 mL 蒸馏水和 2.5 mL 三氯化铁溶液(0.1%,  $m:V$ ), 700 nm 下测其吸光度值, 平行测定 3 次取平均值。以没食子酸含量为横坐标( $X_3$ , mg/mL), 吸光度为纵坐标 ( $Y_3$ ), 得回归方程  $Y_3=0.0178X_3-0.0064$  ( $r^2=0.9987$ )。FRAP 以 mg 没食子酸当量/g 干物质表示。

1.3.5  饅感官评价

感官评定小组成员包括 8 名具有相关经验人员, 根据普通饅的评分标准逐项进行评价, 其中形态和色泽特征在饅烤制熟后 5 min 内评价, 风味和适口性在饅烤熟后 30 min 内评价, 理化特性在饅烤熟后 12 h 进行评价。评分标准以《实验室饅感官评价指标和评分标准》<sup>[26]</sup>为基础并稍作改良, 详见表 1, 判定规则同《实验室饅感官评价指标和评分

标准》, 即以品评总分判定, 85 分为优秀。

1.3.6  储藏稳定性

将饅用食用级聚乙烯(poly ethylene, PE)袋热熔封口, 储藏在(7.0±0.5) °C下, 贮藏 10 d 时间, 分别在 0、1、3、6、10 d 取样测定。

1.3.7  数据处理

使用 Excel 2007 进行数据处理, 数据表示为平均值±标准偏差; 用 SPSS 19.0 进行方差分析, 对实验数据进行单因素方程分析-最小显著性差异(least significant difference, LSD)检验, 分析数据差异显著性(以  $P<0.05$  表示差异显著); 采用 Origin 2016 进行绘图。

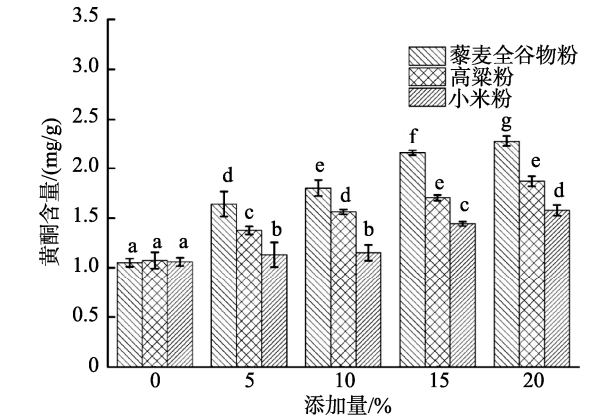
2  结果与分析

2.1  藜麦全谷物粉、小米粉和高粱粉添加量对饅总黄酮和多酚含量的影响

藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉添加量对饅中黄酮和多酚含量的影响见图 1~2。由图 1 可知, 随着藜麦全谷物粉、

表 2  评分标准表  
Table 2  Table of scoring criteria

| 项目   | 评分标准                                                                                                                                                                                          |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 组织结构 | 无大的气泡(直径>2 mm), 气孔均匀整齐 4~5 分; 无大气泡, 气孔不匀 1~3 分; 明显大气泡 0~1 分<br>不掉渣 4~5 分; 较少掉渣 2~3 分; 掉渣多 0~1 分                                                                                               |
| 适口性  | 软硬适中 8~10 分; 硬度偏软或偏硬 4~7 分; 硬度大 1~3 分<br>不黏牙 8~10 分; 稍粘牙 4~7 分; 粘牙 0~3 分                                                                                                                      |
| 外观形状 | 切面均匀、平整 4~5 分; 切面较均匀、略有平整 2~3 分; 切面不平整 0~1 分<br>表面光滑 4~5 分; 表面较光滑 2~3 分; 表面明显缺陷 0~1 分                                                                                                         |
| 色泽   | 表面平整 4~5 分; 表面较平整 2~3 分; 表面塌陷或鼓泡 0~1 分<br>表面无明显裂纹 4~5 分; 表面有稀疏的细小裂纹 2~3 分; 表面布满裂纹 0~1 分<br>金黄色 8~10 分; 浅黄色、焦色不足或棕黄 4~7 分; 白色且无焦色或棕黑 0~3 分<br>焦色色泽均匀适中 8~10; 焦色均匀但略有焦斑或白斑 5~7 分; 明显焦斑或白斑 1~4 分 |
| 风味   | 滋味淡香、有甜味 10~15 分; 滋味一般, 无异味 5~9 分; 有异味 1~4 分<br>浓郁麦香味 11~15 分; 无香味 6~10 分; 有异味 1~5 分                                                                                                          |



注: 图中不同字母标识代表显著性差异  $P<0.05$ , 下同。  
图 1  藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉添加量对饅总黄酮含量的影响( $n=3$ )

Fig.1  Effects of the wholegrain flour of quinoa, the flour of sorghum and millet on the content of flavonoids in Naan ( $n=3$ )

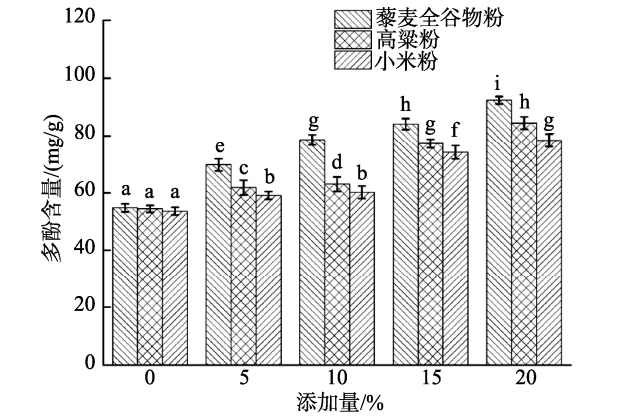


图 2  藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉添加量对饅多酚含量的影响( $n=3$ )

Fig.2  Effects of the wholegrain flour of quinoa, the flour of sorghum and millet on the content of polyphenols in Naan ( $n=3$ )

高粱粉、小米粉添加量的增加, 所制备馒头的黄酮含量也随之增加; 当各谷物粉添加量增加到 20% 时, 所得馒头中黄酮含量分别为  $(2.278 \pm 0.05)$ 、 $(1.87 \pm 0.05)$  和  $(1.57 \pm 0.05)$  mg/g, 比纯小麦馒头黄酮含量分别增加了 50.86%、47.24% 和 61.86%。由图 2 可知, 当藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉添加量为 20% 时, 所制得的馒头的多酚含量分别为  $(92.41 \pm 0.26)$ 、 $(84.51 \pm 2.15)$  和  $(78.40 \pm 2.28)$  mg/g, 比相应的纯小麦馒头中所含多酚的量分别增加了 44.91%、47.23% 和 46.21%; 且在相同添加量的情况下, 馒头总黄酮含量高低依次为藜麦全谷物粉 > 高粱粉 > 小米粉, 对多酚含量高低顺序为藜麦全谷物粉 > 高粱粉 > 小米粉 ( $P < 0.05$ )。添加藜麦全谷物粉、高粱粉和小米粉所制备的馒头的总黄酮和多酚含量升高的原因可能是藜麦、高粱和小米中黄酮及总酚含量高于小麦粉<sup>[26]</sup>, 且藜麦、高粱和小米所含总黄酮和多酚差异使得其对应的馒头产品中总黄酮和多酚含量有所差异<sup>[24]</sup>。

## 2.2 藜麦全谷物粉、小米粉和高粱粉的添加对馒头自由基清除能力的影响

藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉对馒头中 DPPH· 和 ABTS<sup>+</sup>· 清除率的影响见图 3~4。由图 3 可知, 随着藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉添加量从 0% 增加到 20%, 所得馒头的 DPPH· 清除率分别由  $(15.37 \pm 0.78)\%$ 、 $(14.73 \pm 1.04)\%$  和  $(14.77 \pm 0.99)\%$  显著上升至  $(54.26 \pm 1.34)\%$ 、 $(63.91 \pm 0.21)\%$  和  $(59.17 \pm 1.06)\%$  ( $P < 0.05$ )。由图 4 可知, 随着藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉添加量从 0% 增加到 20%, 馒头的 ABTS<sup>+</sup>· 清除率分别由  $(37.77 \pm 0.15)\%$ 、 $(36.99 \pm 0.27)\%$  和  $(37.06 \pm 0.26)\%$  逐渐上升至  $(62.20 \pm 0.45)\%$ 、 $(57.58 \pm 0.50)\%$  和  $(56.78 \pm 0.26)\%$  ( $P < 0.05$ )。20% 添加量时, 所得馒头的 DPPH· 清除率的强弱的顺序为高粱粉 > 小米粉 > 藜麦全谷物粉, ABTS<sup>+</sup>· 清除率能力的强弱顺序为藜麦全谷物粉 > 高粱粉 ≈ 小米粉。

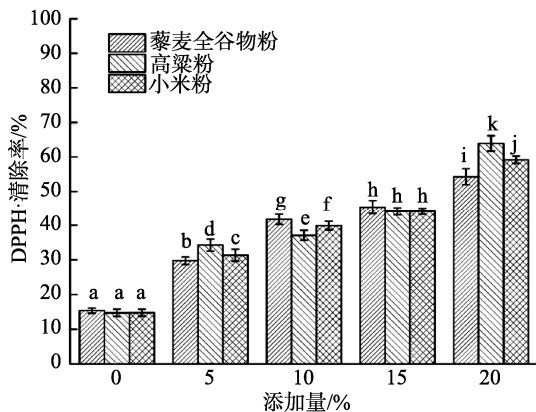


图 3 藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉添加量对馒头 DPPH· 清除率的影响 ( $n=3$ )

Fig.3 Effects of the wholegrain flour of quinoa, the flour of sorghum and millet on the DPPH· scavenging rate of Naan ( $n=3$ )

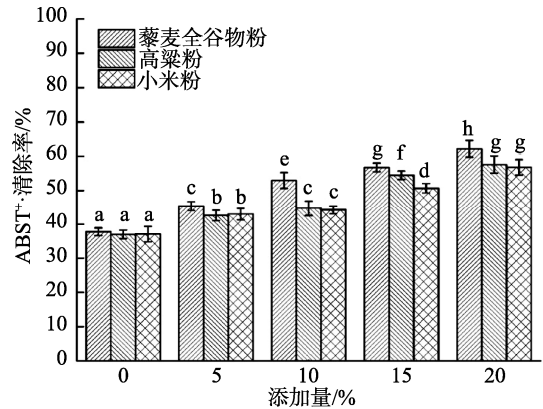


图 4 藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉添加量对馒头 ABTS<sup>+</sup>· 清除率的影响 ( $n=3$ )

Fig.4 Effects of the wholegrain flour of quinoa, the flour of sorghum and millet on the scavenging rate of Naan ABTS<sup>+</sup>· free radical ( $n=3$ )

藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉对馒头还原力的影响见图 5。由图 5 可知, 随着藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉从 0% 增加到 20%, 馒头的还原力分别由  $(11.25 \pm 0.31)\%$ 、 $(11.06 \pm 0.12)$  和  $(10.53 \pm 0.27)\%$  显著增强至  $(23.98 \pm 0.43)\%$ 、 $(14.80 \pm 0.33)\%$  和  $(16.06 \pm 0.29)\%$  ( $P < 0.05$ ); 20% 添加量时, 所得馒头的还原力强弱的顺序为藜麦全谷物粉 > 小米粉 > 高粱粉。

食物中多酚、总黄酮含量与其 DPPH· 和 ABTS<sup>+</sup>· 清除率的影响极显著相关<sup>[27-28]</sup>, 所得馒头中多酚、总黄酮的含量越高, 其 ABTS<sup>+</sup>·、DPPH· 清除率的能力越强。因而, 馒头生产原料小麦粉中加入适当的多酚和总黄酮相对更高的藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉可以有效提高馒头的 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>· 清除率和还原力<sup>[25]</sup>。

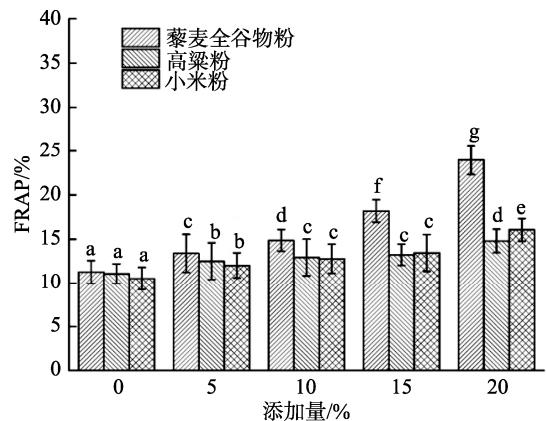


图 5 藜麦全谷物粉、高粱粉、小米粉添加量对馒头 FRAP 的影响 ( $n=3$ )

Fig.5 Effects of the wholegrain flour of quinoa, the flour of sorghum and millet on the reducing power of Naan ( $n=3$ )

## 2.3 藜麦全谷物粉馒头的工艺优化

在单因素实验的基础上, 根据 Box-Behnken 中心组合实验设计原理对 6 个单因素进行响应面优化实验, 实验结果见表 3。

表 3 响应面设计结果与表示

| Table 3 Response surface design results and representation |     |     |     |     |     |       |      |
|------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|
| 序号                                                         | A/% | B/% | C/% | D/% | E/% | F/min | 感官评价 |
| 1                                                          | 0   | 0   | 0   | 1.2 | 50  | 90    | 77.8 |
| 2                                                          | 10  | 10  | 20  | 1.2 | 5   | 30    | 52.3 |
| 3                                                          | 10  | 20  | 10  | 0.8 | 40  | 150   | 42.1 |
| 4                                                          | 20  | 0   | 10  | 1.2 | 50  | 90    | 46.6 |
| 5                                                          | 10  | 10  | 0   | 1.2 | 50  | 150   | 78.9 |
| 6                                                          | 20  | 20  | 10  | 0.4 | 50  | 90    | 50.9 |
| 7                                                          | 10  | 0   | 0   | 0.8 | 40  | 90    | 58.6 |
| 8                                                          | 0   | 10  | 20  | 0.8 | 50  | 150   | 60.2 |
| 9                                                          | 10  | 10  | 10  | 0.8 | 50  | 90    | 85.4 |
| 10                                                         | 10  | 10  | 20  | 0.4 | 50  | 150   | 57.8 |
| 11                                                         | 0   | 10  | 10  | 1.2 | 60  | 90    | 79.3 |
| 12                                                         | 10  | 10  | 0   | 0.4 | 50  | 30    | 67.7 |
| 13                                                         | 10  | 20  | 10  | 0.8 | 60  | 30    | 59.2 |
| 14                                                         | 10  | 0   | 10  | 0.8 | 60  | 150   | 63.9 |
| 15                                                         | 20  | 10  | 0   | 0.8 | 50  | 150   | 64.7 |
| 16                                                         | 10  | 0   | 10  | 0.8 | 40  | 30    | 56.1 |
| 17                                                         | 10  | 0   | 20  | 0.8 | 60  | 90    | 71.8 |
| 18                                                         | 20  | 10  | 10  | 0.4 | 60  | 90    | 52.8 |
| 19                                                         | 20  | 10  | 20  | 0.8 | 50  | 30    | 50.7 |
| 20                                                         | 0   | 0   | 10  | 0.4 | 50  | 90    | 71.5 |
| 21                                                         | 10  | 10  | 10  | 0.8 | 50  | 90    | 84.2 |
| 22                                                         | 10  | 20  | 20  | 0.8 | 40  | 90    | 48.0 |
| 23                                                         | 0   | 10  | 0   | 0.8 | 50  | 30    | 56.7 |
| 24                                                         | 0   | 10  | 10  | 0.4 | 40  | 90    | 52.2 |
| 25                                                         | 10  | 10  | 10  | 0.8 | 50  | 90    | 75.3 |
| 26                                                         | 10  | 20  | 0   | 0.8 | 60  | 90    | 64.7 |
| 27                                                         | 20  | 10  | 10  | 1.2 | 40  | 90    | 62.6 |
| 28                                                         | 10  | 0   | 0   | 0.8 | 60  | 90    | 64.8 |
| 29                                                         | 20  | 10  | 20  | 0.8 | 50  | 150   | 56.6 |
| 30                                                         | 20  | 20  | 10  | 1.2 | 50  | 90    | 60.1 |
| 31                                                         | 20  | 0   | 10  | 0.4 | 50  | 90    | 63.8 |
| 32                                                         | 10  | 0   | 10  | 0.8 | 60  | 30    | 59.3 |
| 33                                                         | 10  | 10  | 0   | 0.4 | 50  | 150   | 62.3 |
| 34                                                         | 0   | 10  | 10  | 1.2 | 40  | 90    | 56.9 |
| 35                                                         | 10  | 20  | 10  | 0.8 | 60  | 150   | 53.2 |
| 36                                                         | 20  | 10  | 10  | 1.2 | 60  | 90    | 55.3 |
| 37                                                         | 10  | 10  | 10  | 0.8 | 50  | 90    | 81.5 |
| 38                                                         | 10  | 0   | 10  | 0.8 | 40  | 150   | 53.1 |
| 39                                                         | 0   | 0   | 10  | 1.2 | 50  | 90    | 70.4 |
| 40                                                         | 0   | 10  | 0   | 0.8 | 50  | 150   | 67.3 |
| 41                                                         | 20  | 10  | 10  | 0.4 | 40  | 90    | 57.4 |
| 42                                                         | 10  | 10  | 10  | 0.8 | 50  | 90    | 82.2 |
| 43                                                         | 10  | 10  | 20  | 0.4 | 50  | 30    | 36.3 |
| 44                                                         | 10  | 20  | 0   | 0.8 | 40  | 90    | 51.5 |
| 45                                                         | 10  | 10  | 0   | 1.2 | 50  | 30    | 59.1 |
| 46                                                         | 20  | 10  | 0   | 0.8 | 50  | 30    | 62.6 |
| 47                                                         | 10  | 20  | 10  | 0.8 | 40  | 30    | 54.4 |
| 48                                                         | 10  | 10  | 10  | 0.8 | 50  | 90    | 78.2 |
| 49                                                         | 10  | 0   | 20  | 0.8 | 40  | 90    | 52.6 |
| 50                                                         | 0   | 20  | 10  | 0.4 | 50  | 90    | 56.8 |
| 51                                                         | 0   | 10  | 10  | 0.8 | 50  | 30    | 56.5 |
| 52                                                         | 0   | 10  | 10  | 0.4 | 60  | 90    | 60.4 |
| 53                                                         | 10  | 20  | 20  | 0.8 | 60  | 90    | 58.1 |
| 54                                                         | 10  | 10  | 20  | 1.2 | 50  | 150   | 54.1 |

以馒头的感官评价得分为响应值,对 6 种影响因素进行模型拟合,得到多元二次回归方程模型: $Y=81.13-6.344A-4.82B-6.41C+3.47D+5.72E+2.64F-0.28AB-0.344AC-3.98AD-1.58AE+0.47AF-1.38BC+4.81BD+0.61BE-1.26BF+0.52CD-1.26CE-0.27CF+2.69DE+0.71DF+0.49EF-7.87A^2-12.30B^2-10.13C^2-7.46D^2-12.43E^2-7.48F^2$ 。方差分析显示, $F=7.57$ 、 $P<0.05$ ,模型显著。由 Design-Expert 8.0.6 软件分析,得到复合谷物馒头的最佳配比条件为: A: 10.34%、B: 11.41%、C: 9.97%、E: 0.96%、D: 51.81%、F: 85.94 min。感官评分预

测值为 80.02,将实际操作的限制性考虑在内,最优配比修正为: A: 10.5%、B: 11.5%、C: 10.0%、D: 1.0%、E: 52.0%、发酵时间 F: 86.0 min,在此条件下重复实验 3 次,由同一评定小组进行评分,得到感官评价评分平均得分为 80.6,相比于预测值,相对偏差为 0.49%,模型可靠,且比纯小麦粉馒头的感官评价平均得分高出 3.40%。此时,复合谷物馒头的黄酮含量为 1.20 mg/g、多酚含量为 61.26 mg/g,分别比纯小麦粉馒头的黄酮和多酚含量提高了 9.10%和 16.46%; DPPH·清除率平均值为 58.83%,ABTS<sup>+</sup>·清除率平均值为 51.58%,还原力平均值为 10.67 mg/g,分别比纯小麦粉馒头的 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>·清除率和还原力提高了 22.05%、15.39%和 10.00%。

2.4 储藏时间对馒头抗氧化性的影响

复合谷物馒头在冷藏条件下储藏 10 d,随储藏时间的增加,多酚含量从初始的 41.63 mg/g 降低到 10 d 的 40.74 mg/g;总黄酮含量从初始的 2.05 mg/g 降低到 10 d 的 1.95 mg/g,多酚和总黄酮含量有所下降,但无显著性差异( $P>0.05$ ),但是复合谷物馒头的多酚含量明显高于其黄酮含量( $P>0.05$ )。另外,随储藏时间增加,馒头中的 ABTS<sup>+</sup>·、DPPH·清除率和 FRAP 均呈现下降趋势( $P<0.05$ ),ABTS<sup>+</sup>·清除率从初始的 83.64%降至第 10 d 的 77.68%,DPPH·清除率和 FRAP 分别从初始的 71.84%和 23.84%降低到第 10 d 的 40.51%和 15.51%,其中储藏 1 d 馒头的 ABTS<sup>+</sup>·、DPPH·清除率和 FRAP 显著低于刚制备的馒头( $P<0.05$ ),说明储藏时间对馒头的 ABTS<sup>+</sup>·、DPPH·清除率和 FRAP 的影响显著。有报道称 ABTS<sup>+</sup>·、DPPH·清除率和 FRAP 还原力的强弱与食物中多酚、总黄酮的含量呈正相关<sup>[29-30]</sup>,复合谷物馒头的多酚、总黄酮含量在储藏期间的下降无显著差异,可复合谷物馒头的 ABTS<sup>+</sup>·、DPPH·清除率和 FRAP 却显著降低,其原因可能与储藏过程中馒头中的内部结构变化有关,譬如淀粉在储藏期间老化,蛋白质与其他分子之间的相互作用有关,其影响机制需要进一步研究。

3 结论与讨论

通过在小麦粉中加入适当的藜麦全谷物粉、高粱粉和小米粉可以有效提高所制备的馒头的多酚和总黄酮含量,并能显著地提升了馒头的 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>·清除率和 FRAP,因而,利用藜麦全谷物粉、高粱粉和小米粉代替部分小麦粉不仅可以有效提升馒头的营养品质,如增加馒头制品赖氨酸和膳食纤维的含量,为新疆地区消费者提供高营养品质的主食,同时,为中老年消费者提供因不能过多摄入水果等含糖分高的高抗氧化活性的食物,以对抗体内自由基伤害。

所制备的藜麦全谷物馒头在冷藏条件下保存 10 d,其黄酮含量、多酚含量测定值有所降低,但没有显著统计学差异,但是储藏过程中馒头中 ABTS<sup>+</sup>·、DPPH·清除率和 FRA 随储藏时间增加而减弱,说明复合谷物馒头还需要解决储藏过

程如何保持其较高的抗氧化能力,如果成功解决此问题将对复合谷物馒头的产业化有巨大的推动作用。

## 参考文献

- [1] 林金雪娇,李爽,范志红. 杂粮饭与慢性疾病预防的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(3): 81–85.  
LIN JXJ, LI S, FAN ZH. Research progress on mixed whole meals and chronic disease prevention [J]. Food Nutr China, 2020, 26(3): 81–85.
- [2] 孙睿,艾买提·巴热提. 新疆特色粮的储藏保鲜工艺研究[J]. 中国食品工业, 2021, 18: 122–124.  
SUN R, AIMAITI BRT. Research on the storage and preservation technology of Xinjiang characteristic Naan [J]. China Food Ind, 2021, 18: 122–124.
- [3] COŞKUNE Y, ERCAN R, KARABABA E, *et al.* Physical and chemical properties of chufa (*Cyperus esculentus* L.) tubers grown in the (Çukurova region Turkey) [J]. J Sci Food Agric, 2002, 82(82): 625–631.
- [4] 任向楠,杨月欣. 膳食营养与免疫力研究进展[J]. 预防医学, 2020, 32(8): 795–799.  
REN XN, YANG YX. Progress in the study of dietary nutrition and immunity [J]. Prev Med, 2020, 32(8): 795–799.
- [5] VILCACUNDO R, HERNÁNDEZ-LEDESMA B. Nutritional and biological value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. Curr Opin Food Sci, 2017, 14: 1–6.
- [6] AYSILI MT, YILMAZ MT, CEBI N, *et al.* Physicochemical, rheological, molecular, thermal and sensory evaluation of newly developed complementary infant (6–24 months old) foods prepared with quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) flour [J]. Food Chem, 2020, 315: 126208.
- [7] RUALES J, DE GRIJALVA Y, LOPEZ-JARAMILLO P, *et al.* The nutritional quality of infant food from quinoa and its effect on the plasma level of insulin-like growth factor-1 (IGF-1) in undernourished children [J]. Int J Food Sci Nutr, 2002, 53: 143–154.
- [8] AYYASH M, JOHNSON SK, LIU SQ, *et al.* *In vitro* investigation of bioactivities of solid-state fermented lupin, quinoa and wheat using *Lactobacillus* spp [J]. Food Chem, 2019, 275: 50–58.
- [9] UJIROGHENE OJ, LIU L, ZHANG SW, *et al.*  $\alpha$ -glucosidase and ACE dual inhibitory protein hydrolysates and peptide fractions of sprouted quinoa yoghurt beverages inoculated with *Lactobacillus casei* [J]. Food Chem, 2019, 299: 124985.
- [10] HAN Y, CHI J, ZHANG M, *et al.* Changes in saponins, phenolics and antioxidant activity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during milling process [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 114: 108381.
- [11] DALEPRONE JB, FREITAS VS, PACHECO AP, *et al.* Anti-atherogenic and anti-angiogenic activities of polyphenols from propolis [J]. J Nutr Biochem, 2012, 23(6): 557–566.
- [12] MERONE L, MCDERMOTT R. Nutritional anti-inflammatories in the treatment and prevention of type 2 diabetes mellitus and the metabolic syndrome [J]. Diabet Res Clin Pract, 2017, 127: 238–253.
- [13] DEL BC, MARTINI D, PORRINI M, *et al.* Berries and oxidative stress markers: An overview of human intervention studies [J]. Food Funct, 2015, 6(9): 2890–2917.
- [14] JOSEPH SV, EDIRISINGHE I, BURTON-FREEMAN BM. Fruit polyphenols: A review of anti-inflammatory effects in humans [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2015, 23: 419–444.
- [15] ALMEIDA RB, PEREIRA AC, CORTES SF, *et al.* Vascular effects of flavonoids [J]. Curr Med Chem, 2016, 23: 87–102.
- [16] LEFEVRE M, JONNALAGADDA S. Effect of whole grains on markers of subclinical inflammation [J]. Nutr Rev, 2012, 70(7): 387–396.
- [17] AMIOT MJ, RIVA C, VINET A. Effects of dietary polyphenols on metabolic syndrome features in humans: A systematic review [J]. Obes Rev, 2016, 17(7): 573–586.
- [18] MEGINA-REMÓN A, TRESSERRA-RIMBAU A, PONS A, *et al.* Effects of total dietary polyphenols on plasma nitric oxide and blood pressure in a high cardiovascular risk cohort. The PREDIMED randomized trial [J]. Nutr Metab Cardiovasc Dis, 2015, 25: 60–67.
- [19] ROSTAMI A, KHALILI M, HSGHIGHAT N, *et al.* High-cocoa polyphenol-rich chocolate improves blood pressure in patients with diabetes and hypertension [J]. ARYA Atheroscler, 2015, 11: 21–29.
- [20] YAMAGATA K, TAGAMI M, YAMORI Y. Dietary polyphenols regulate endothelial function and prevent cardiovascular disease [J]. Nutr, 2015, 31: 28–37.
- [21] KIM Y, KEOGH JB, CLIFTON PM. Polyphenols and glycemic control [J]. Nutr, 2016, 8(1): 1–27.
- [22] KHAN K, JOVANOVSKEI E, HO HVT, *et al.* The effect of viscous soluble fiber on blood pressure: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Nutr Metab Cardiovasc, 2018, 28(1): 3–13.
- [23] 吴立根,屈凌波,王岸娜,等. 加工方式对藜麦营养及生物活性影响的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(2): 10–14.  
WU LG, QU LB, WANG ANN, *et al.* Research progress on the effects of processing on nutritional and biological activity of quinoa [J]. Cere Oils, 2020, 33(2): 10–14.
- [24] 曹俊梅,哈力旦·依克热木,刘娜,等. 新疆主栽冬小麦品质特性与普通馒头感官评价的关系[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(5): 840–851.  
CAO JM, HALIDAN YKRM, LIU N, *et al.* Relationship between quality traits of leading Xinjiang winter wheat cultivar and sensory evaluation of ordinary [J]. Xinjiang Agric Sci, 2020, 57(5): 840–851.
- [25] ROBERTSON MD, BICKERTON AS, DENNIS AL, *et al.* Insulin-sensitizing effects of dietary resistant starch and effects on skeletal muscle and adipose tissue metabolism [J]. Am J Clin Nutr, 2005, 82(3): 559–567.
- [26] 刘艳香,关丽娜,孙莹,等. 易煮全谷物糙米加工技术研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(4): 139–147.  
LIU YX, GUAN LN, SUN Y, *et al.* Research progress on processing technologies of easy-to-cook wholegrain brown rice [J]. J Food Sci Technol, 2021, 39(4): 139–147.
- [27] WU LG, WANG AN, SHEN RL, *et al.* Effect of heating under pressure treatment on the antioxidant of quinoa [J]. Int J Food Eng, 2021, 17(10): 795–804.
- [28] CARCIOCHI RA, MANRIQUE GD, DIMITROV K. Optimization of antioxidant phenolic compounds extraction from quinoa (*Chenopodium quinoa*) seeds [J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(7): 4396–4404.
- [29] LIU L, ZHANG RF, DENG YY, *et al.* Fermentation and complex enzyme hydrolysis enhance total phenolics and antioxidant activity of aqueous solution from rice bran pretreated by steaming with  $\alpha$ -amylase [J]. Food Chem, 2016, 221: 636–643.
- [30] PRADEEP PM, SREERANA YN. Soluble and bound phenolics of two different millet genera and their milled fractions: Comparative evaluation of antioxidant properties and inhibitory effects on starch hydrolysing enzyme activities [J]. J Funct Foods, 2017, 35: 682–693.

(责任编辑: 郑丽 韩晓红)

## 作者简介



吴立根, 博士, 副教授, 主要研究方向为粮油食品营养加工与品质控制。  
E-mail: 1307487097@qq.com

王岸娜, 博士, 教授, 主要研究方向为食品生物大分子。  
E-mail: wanganna2017@126.com