DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251015006
引用格式: 秦泽慧, 陈灵敏, 周雪. 烘焙处理对黄秋葵籽黄酮类成分转化及抗氧化活性的影响与机制研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 110–120.
QIN ZH, CHEN LM, ZHOU X. Effects and mechanism of roasting on flavonoid transformation and antioxidant activity in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 110–120. (in Chinese with English abstract).

烘焙处理对黄秋葵籽黄酮类成分转化及抗氧化活性的影响与机制研究

秦泽慧*, 陈灵敏, 周 雪
(厦门医学院药学院, 厦门市中药生物工程重点实验室, 厦门 361023)

摘 要: 目的 探究烘焙处理对黄秋葵籽中黄酮类成分的转化规律及其对抗氧化活性的影响, 阐明其物质基础与作用机制。**方法** 采用 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除法评价烘焙前后黄秋葵籽的抗氧化活性[以半数清除率(half-maximal inhibitory concentration, IC_{50})值表示]; 利用紫外可见分光光度法测定总黄酮含量; 基于超高效液相-串联质谱(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)技术, 定量分析槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷及槲皮素 3 种关键黄酮成分的含量变化。**结果** 与烘焙前相比, 黄秋葵籽经烘焙处理后呈现显著的成分转化与活性提升: DPPH 自由基清除能力大幅增强, IC_{50} 值显著降低, 活性约为生品的 9 倍(P<0.01); 总黄酮平均含量显著提升 346.3% (P<0.01); 成分分析显示, 槲皮素-3-O-龙胆二糖苷与异槲皮苷含量分别下降 39.1% (P<0.01)与 48.9% (P<0.01), 而槲皮素含量则显著增加 60.0% (P<0.01)。**结论** 烘焙处理能诱导黄秋葵籽中槲皮素糖苷(槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷)发生糖苷键断裂, 定向转化为其苷元形式——槲皮素。该结构转化导致具有更强自由基清除能力的游离羟基暴露, 是黄秋葵籽抗氧化活性显著增强的主要物质基础与关键机制。此发现可为黄秋葵籽的高值精深加工与功能性产品开发提供理论依据。

关键词: 烘焙处理; 黄秋葵籽; 抗氧化活性; 槲皮素; 成分转化

Effects and mechanism of roasting on flavonoid transformation and antioxidant activity in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds

QIN Ze-Hui*, CHEN Ling-Min, ZHOU Xue
(*School of Pharmacy*, *Xiamen Medical College*, *Xiamen Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Bioengineering*, *Xiamen* 361023, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the transformation rule of flavonoids in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds induced by roasting and its impact on antioxidant activity, elucidate the underlying material basis and

收稿日期: 2025-10-15
基金项目: 厦门市自然科学基金项目(3502Z202472031)
第一作者/*通信作者: 秦泽慧(1986—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为中药新制剂、新剂型研究及中药功能性食品开发。E-mail: qinzehui1986@163.com

mechanism of action. **Methods** The antioxidant activity of *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds before and after roasting was evaluated using the 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay, expressed as the half-maximal inhibitory concentration (IC_{50}). The total flavonoid content was determined by ultraviolet-visible spectrophotometry. The content changes of 3 kinds of key flavonoid compounds—quercetin-3-O-gentiobioside, isoquercitrin and quercetin—were quantitatively analyzed using ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS). **Results** Compared with unroasted samples, roasted *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds exhibited significant component transformation and enhanced activity: The DPPH radical scavenging capacity was substantially increased, with the IC_{50} value significantly decreased, indicating approximately 9-fold higher activity than the raw product (P<0.01). The total flavonoid average content was significantly increased by 346.3% (P<0.01). Component analysis revealed that the content of quercetin-3-O-gentiobioside and isoquercitrin decreased by 39.1% (P<0.01) and 48.9% (P<0.01), respectively, while the quercetin content significantly increased by 60.0% (P<0.01). **Conclusion** Roasting can induce the cleavage of glycosidic bonds in quercetin glycosides (quercetin-3-O-gentiobioside and isoquercitrin) in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds, directing their conversion into the aglycone form—quercetin. This structural transformation leads to the exposure of free hydroxyl groups with stronger free radical scavenging capacity, which is the primary material basis and key mechanism for the significant enhancement of the antioxidant activity in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds. This discovery provides a theoretical foundation for the deep processing and development of functional products from *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds.

KEY WORDS: roasting; *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds; antioxidant activity; quercetin; component transformation

0　引　言

黄秋葵[*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench]是锦葵科秋葵属一年生草本植物, 也是一种具有保健功能和药用价值的健康蔬菜, 国外称之为“绿色人参”“植物伟哥”等[1–2]。黄秋葵籽为黄秋葵的成熟种子, 其提取物含有丰富的总黄酮、多酚、蛋白质等营养成分, 具有抗氧化[3–4]、抗疲劳[5]、抗菌[6]、抗癌[7]、降血糖血脂[8]、提高机体免疫力[9]、改善小鼠焦虑及焦虑-抑郁[10]等药理活性, 其中抗氧化作用的开发利用正受到广泛关注[3–4,11]。近年来, 研究表明黄秋葵籽中含有丰富的黄酮类化合物(如槲皮素及其衍生物)、多糖、蛋白质、不饱和脂肪酸等活性成分, 其中黄酮类成分因其显著的抗氧化、抗炎和抗癌活性而备受关注[12–13]。槲皮素及其糖苷衍生物(如槲皮素-3-O-龙胆二糖苷和异槲皮苷)已被证实具有显著的抗氧化、抗炎、抗肿瘤和降血糖作用[14–16], 其中槲皮素因其强大的自由基清除能力和金属离子螯合作用, 被认为是黄酮类成分中抗氧化活性最强的化合物之一[17–19]。

烘焙作为一种常见的食品加工方式, 已被证实能够显著影响植物原料中活性成分的含量和结构。例如, 研究表明烘焙可以提高咖啡豆中多酚类成分的抗氧化活性[20], 同时促进茶叶中黄酮类成分的转化[21]。然而, 烘焙对黄秋葵籽中黄酮类成分的影响及其机制尚未得到系统研究。尽管已有研究表明黄秋葵籽具有显著的抗氧化活性, 但其活性成分的具体归属以及烘焙对其影响机制尚不明确。因此, 本研究旨在系统探讨烘焙对黄秋葵籽中黄酮类成分的影响, 揭示其抗氧化活性变化的物质基础, 为黄秋葵籽的功能性食品开发提供理论依据。

实验组前期研究发现黄秋葵籽的抗氧化作用经烘焙后增强, 查阅文献后发现可能与黄酮类化合物密切相关[22–23], 尤其是槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素[24–26]等。本研究采用 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除法测定烘焙前后黄秋葵籽的 DPPH 自由基半数清除浓度(half-maximal inhibitory concentration, IC_{50})来比较其抗氧化活性变化, 建立紫外可见分光光度法和超高效液相-串联质谱(ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)法测定烘焙前后黄秋葵籽的总黄酮和槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素(以下简称 3 种活性物质)的含量, 比较烘焙前后总黄酮和 3 种活性物质的含量变化, 以此来探讨烘焙对黄秋葵籽中黄酮类成分的影响以及与抗氧化作用之间的关联性, 推测黄秋葵籽中抗氧化作用的可能指标性成分, 以为后续将其加工成功能性食品、保健品以及新药等系列开发奠定基础。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

分别从春满园种业、寿光问天种业、潍坊香克斯农业科技有限公司购买干燥成熟黄秋葵种子, 所有样品均经厦门医学院中药教研室向云亚老师鉴定为锦葵科秋葵属咖啡

黄葵[*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench]的种子, 凭证标本均存于厦门医学院中药精加工综合实验室, 干燥处密封保存。

槲皮素-3-O-龙胆二糖苷对照品(CAS 号: 7431-83-6, 批号 wkq22062413, 纯度≥98%)、异槲皮苷对照品(CAS 号: 7431-83-6482-35-9, 批号 wkq22081711, 纯度≥98%)、槲皮素对照品(CAS 号: 117-39-5, 批号 wkq22051613, 纯度≥98%)(四川省维克奇生物科技有限公司); DPPH(批号: 1898-66-4, 纯度 98%, 上海源叶生物有限公司); 甲醇(色谱纯/分析纯)、乙腈、甲酸(色谱纯)、95%乙醇、九水合硝酸铝[$Al(NO_3)_3$•$9H_2O$](分析纯)(西陇科学股份有限公司); 维生素 C (vitamin C, VC, 批号: 1140552011, 规格: 500 g, 石药集团维生药业有限公司)。

1.2 仪器与设备

CBR-101 咖啡烘焙机(韩国 Genesis 公司); FW100 高速粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司); SH10 超声波清洗机(致微厦门仪器有限公司); MultiskmgO 全波长酶标仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); UV-1800 紫外可见分光光度计、LCMS-8050 三重四极杆液质联用仪(配置 Nexera X2 超高效液相色谱系统, 包括 SPD-M20A 检测器、SIL-30AC 自动进样器、LC-30AD 输液泵)(岛津仪器有限公司); ME204/02 电子天平(精度 0.1 mg)、XPE105 微量天平(精度 0.01 mg)[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; 四号筛(上虞市银河测试仪器厂); CS120FNX 超高速低温离心机(株式会社日立制作所); VORTEX GENIUS 3 涡旋混合器(德国 IKA 公司); ACQUITY UPLC BEH C_{18} 色谱柱(2.1 nm×100 nm, 1.7 μm)(美国 Waters 公司)。

1.3 实验方法

为保证各项分析结果的准确性与方法学最优性, 本研究的样品前处理根据测定目标的不同进行了针对性设计: 总抗氧化能力测定采用 79%乙醇超声提取, 以最大化提取广谱活性成分; 总黄酮含量测定遵循 $Al(NO_3)_3$ 比色法要求, 采用 60%乙醇超声提取以平衡提取效率与显色特异性; 而针对槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷及槲皮素的 UPLC-MS/MS 定量分析, 则采用 70%甲醇低温涡旋提取, 旨在确保目标物稳定提取, 并最大限度地降低质谱分析的基质干扰。所有分析均基于同批均质样品, 差异化处理旨在获得各项指标在各自分析体系下的最优数据, 为后续的综合关联分析奠定可靠基础。

1.3.1 黄秋葵籽烘焙工艺的选择

以 DPPH 自由基清除能力(IC_{50})为指标, 通过单因素考察黄秋葵籽的烘焙温度(210、220、230、240、250 ℃)和烘焙时间(10、15、20、25、30 min)。

1.3.2 DPPH 自由基清除能力测定

使用 79%乙醇 25 mL 超声(450 W) 20 min 分别制备黄秋葵籽生品与烘焙品的提取液, 并逐级稀释为 6 个质量浓度, 生品质量浓度依次是 20.000、10.000、5.000、2.500、1.250、0.625 mg/mL; 烘焙品质量浓度依次是: 5.00000、2.50000、1.25000、0.62500、0.31250、0.15635 mg/mL。以 VC 为对照品, 配制 0.04 mg/mL DPPH 溶液(避光, 现配现用)。

于 96 孔板中依次设置: 样品组: 100 μL 样品液(或 VC 溶液)+100 μL DPPH 溶液; 空白组: 100 μL 样品液(或 VC 溶液)+100 μL 79%乙醇; 对照组: 100 μL DPPH 溶液+100 μL 79%乙醇。

每组设 3 个复孔, 混匀后避光反应 30 min, 于 517 nm 测定吸光度(A)。按公式(1)计算 DPPH 自由基清除率, 并通过 SPSS 27.0 拟合 IC_{50} 值, 以评价抗氧化活性(IC_{50} 越低, 活性越强)。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(IC_{50})=\left(1-\frac{A_{样品}-A_{空白}}{A_{对照}}\right)\times 100\% \quad (1)$$

式中: $A_{样品}$为样品组溶液测得吸光度; $A_{空白}$为空白组样品溶液测得吸光度; $A_{对照}$为对照组溶液测得吸光度。

1.3.3 总黄酮的含量测定

样品经 $Al(NO_3)_3$ 显色后[27], 以槲皮素为对照品, 使用紫外可见分光光度计对黄秋葵籽进行烘焙前后的总黄酮含量测定。

(1)总黄酮含量测定样品溶液的制备

取黄秋葵籽生品、烘焙品粉末各约 0.5 g, 精密称定, 分别置于具塞锥形瓶中, 精密加入 60%乙醇 25 mL, 超声提取 20 min 后, 过滤至 25 mL 容量瓶中, 加 60%乙醇稀释至刻度线, 即得。

(2)总黄酮含量测定对照品溶液的制备

取槲皮素适量, 精密称定, 加 60%乙醇定容, 得 0.202 mg/mL 槲皮素对照品溶液。

(3)显色剂的制备

称取约相当于 $Al(NO_3)_3$ 10 g 的 $Al(NO_3)_3$ •$9H_2O$ 17.61 g, 精密称定, 纯化水定容至 100 mL, 即得 10% $Al(NO_3)_3$ 显色剂溶液。全程避光处理, 现配现用。

(4)检测波长的选择

精密量取上述配制好的槲皮素对照品溶液 1.0 mL、生品溶液 2.0 mL、烘焙品溶液 1.0 mL, 分别置于 25 mL 容量瓶中, 加入 10% $Al(NO_3)_3$ 溶液 4 mL, 加 60%乙醇稀释至刻度线, 摇匀, 放置 10 min。以试剂空白为参比, 在 240~500 nm 范围进行扫描。

(5)总黄酮含量测定方法学考察

①总黄酮含量测定线性关系

精密吸取槲皮素对照品溶液 0.25、0.50、1.00、1.50、2.00 mL, 分别置于 25 mL 容量瓶中, 加入 10% $Al(NO_3)_3$ 溶液 4 mL, 加 60%乙醇稀释至刻度线, 摇匀, 放置 10 min。以试剂空白为参比, 照紫外-可见分光光度法, 在检测波长处测定吸光度。以质量浓度为横坐标(X, mg/mL), 吸光度为纵坐标(Y)建立回归方程。

②总黄酮含量测定精密度试验

精密量取同一批号黄秋葵籽烘焙品溶液 1 mL, 按上述方法显色, 连续测定 6 次吸光度值, 计算相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)值。

③总黄酮含量测定稳定性试验

精密量取同一批号黄秋葵籽烘焙品溶液 1 mL, 按上述方法显色, 于显色 10 min 后开始计时, 分别在 0、10、30、60、90、120 min 时测定吸光度, 计算 RSD 值。

④总黄酮含量测定重复性试验

依照 1.3.3 总黄酮含量测定项下样品溶液的制备, 制备同一批号黄秋葵籽烘焙品溶液, 精密量取 1 mL, 按上述方法显色并测定吸光度, 平行操作 6 份, 计算 RSD 值。

⑤总黄酮含量测定加样回收率试验

取已知总黄酮含量的黄秋葵籽烘焙品粉末约 0.25 g, 精密称定, 按样品中总黄酮含量的 100%加入槲皮素对照品, 平行 6 份。按上述 1.3.3 中样品溶液的制备方法制备显色后测定吸光度, 计算加样回收率和 RSD 值。

(6)样品总黄酮的含量测定

精密量取生品溶液 2 mL、烘焙品溶液 1 mL, 分别置于 25 mL 容量瓶中, 显色后测定吸光度, 根据线性回归方程计算生品、烘焙品中总黄酮含量。每个样品平行 3 份。计算公式(2)~(3)如下。

$$Y_{烘}=\frac{C_{烘}\times V\times N}{W_{烘}} \tag{2}$$

$$Y_{生}=\frac{C_{生}\times V\times N\times 2}{W_{生}} \tag{3}$$

式中: $Y_{烘}$、$Y_{生}$分别为烘焙品和生品中总黄酮含量, mg/g; $C_{烘}$、$C_{生}$分别为烘焙品和生品测定液中总黄酮质量浓度, mg/mL; V 为定容体积, mL; N 为稀释倍数; $W_{烘}$、$W_{生}$分别为 烘焙品和生品的取样量, g。

1.3.4　烘焙前后黄秋葵籽 3 种活性物质含量的测定

(1)活性物质含量测定对照品溶液的制备

取槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素各约 1 mg, 精密称定, 分别置于 10 mL 容量瓶中, 加 70%甲醇稀释至刻度线, 得单一对照品母液(质量浓度分别为 0.107、0.106、0.103 mg/mL)。

(2)活性物质含量测定样品溶液的制备

分别精密称取黄秋葵籽生品及烘焙品粉末各约 1 g, 加入 70%甲醇 5.0 mL, 再次精密称重后, 置于 4 ℃冰箱中静置过夜, 期间涡旋振荡 6 次。取出样品, 补足减失的重量。以 10000 r/min 离心 10 min, 取上清液经 0.22 μm 微孔滤膜过滤, 即得[28]。

(3)色谱-质谱条件

①色谱条件

采用色谱柱 ACQUITY UPLC BEH C_{18} (2.1 nm×100 nm, 1.7 μm), 流动相 0.1%甲酸(A)-乙腈(B), 梯度洗脱(0~5.0 min, 20%~60% B; 5.0~6.0 min, 维持 60% B; 6.1~8.0 min, 20% B); 体积流量 0.4 mL/min; 柱温 40 ℃; 进样体积 0.2 μL。

②质谱条件

电喷雾离子源(electro spray ionization, ESI), 多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM), 负离子模式; 雾化气流量 2.0 L/min; 加热气流量 10 L/min; 接口温度 300 ℃; 脱溶剂管温度 250 ℃; 加热块温度 400 ℃; 干燥气流量 10.0 L/min。

(4)活性物质含量测定方法学考察

①活性物质含量测定线性关系

精密吸取 1.3.4(1)项下槲皮素-3-O-龙胆二糖苷对照品溶液 0.1、0.2、0.4、0.8、1.2、1.6 mL, 分别置于 10 mL 容量瓶中, 再精密吸取异槲皮苷对照品溶液和槲皮素对照品溶液各 0.05、0.10、0.20、0.30、0.40、0.50 mL 置于上述对应容量瓶中, 加 70%甲醇稀释至刻度线, 摇匀, 即得混合对照品溶液。在 1.3.4(3)条件下进行测定。以对照品质量浓度为横坐标(X, μg/mL), 峰面积为纵坐标(Y), 并使用($1/C^2$)作为加权因子进行加权法运算, 最后进行线性回归分析, 计算回归方程和相关系数。

②活性物质含量测定精密度试验

取同一批次黄秋葵籽烘焙品粉末约 1 g, 精密称定。按 1.3.4(2)项下方法制备样品溶液, 在 1.3.4(3)条件下连续 6 次进样并测定, 记录槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素的峰面积, 并计算 RSD 值。

③活性物质含量测定稳定性实验

取同一批次黄秋葵籽烘焙品粉末约 1 g, 精密称定, 按 1.3.4(2)项下方法制备样品溶液, 于制备好后的 0、2、4、6、8、12、24 h 按照 1.3.4(3)条件下进样测定, 记录槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素的峰面积, 并计算 RSD 值。

④活性物质含量测定重复性试验

取同一批次黄秋葵籽烘焙品粉末约 1 g, 精密称定, 按 1.3.4(2)项下方法制备样品溶液, 在 1.3.4(3)条件下进样测定, 平行操作 6 份, 计算槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素含量和 RSD 值。

⑤活性物质含量测定加样回收率试验

取已知各成分含量的黄秋葵籽烘焙品粉末约 0.5 g, 精密称定, 按样品中槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素含量的 100%加入对照品, 平行 6 份, 按 1.3.4(2)项下方法制备, 在 1.3.4(3)条件下进样测定, 计算槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素的平均加样回收率及 RSD 值。

(5)活性物质含量测定

取黄秋葵籽生品、烘焙品粉末各约 1.0 g, 精密称定。按 1.3.4(2)项下方法制备样品溶液, 在 1.3.4(3)条件下进样测定, 计算每份样品溶液中槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲

皮苷、槲皮素含量。每个样品平行 3 份。

1.4 数据处理

抗氧化活性和含量测定的结果采用平均值±标准偏差表示，应用 SPSS 27.0 软件，采用独立样本 *t* 检验进行统计分析，通过 Levene 检验判断方差齐性；若两组数据方差不齐，使用校正后的 *t*'检验；若方差齐，则使用 *t* 检验。

2 结果与分析

2.1 黄秋葵籽烘焙工艺的确定

通过对不同烘焙时间和温度下黄秋葵籽的 DPPH 自由基清除率进行比较分析发现(图 1)，其抗氧化活性随温度升高呈现先上升后下降的趋势，并在 240 ℃、烘焙 15 min 时达到峰值。然而，在此条件下处理的样品产生了明显的焦糊气味。为兼顾产品风味与后续开发的可行性，本研究最终选择 240 ℃烘焙 10 min 作为后续研究的工艺条件，以期在保留高抗氧化活性的同时，确保产品的感官接受度。

2.2 烘焙前后黄秋葵籽抗氧化活性比较结果

通过计算烘焙前后黄秋葵籽清除率，生品和烘焙品的醇提取液均能消除 DPPH 自由基，其中烘焙品的 IC_{50} 明显低于生品，具体结果见表 1。结果可知，4 批黄秋葵籽中，生品的 IC_{50} 范围是 12.47~21.93 mg/mL，烘焙品 IC_{50} 范围是 1.72~1.97 mg/mL，明显低于生品，存在显著统计学差异(P<0.01)，平均抗氧化活性提高倍数为生品的 9 倍，说明黄秋葵籽经烘焙后其抗氧化活性得到了显著增强。

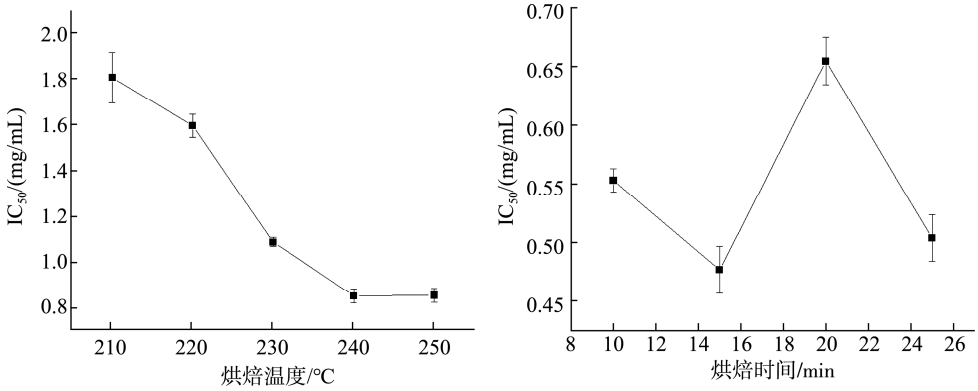


图 1 不同烘焙温度和烘焙时间的黄秋葵籽的 IC_{50} 测定值(n=3)

Fig.1 IC_{50} values of *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds at different roasting temperatures and roasting times (n=3)

表 1 黄秋葵籽生品、烘焙品 IC_{50} 均值(n=3)

Table 1 Average IC_{50} values of raw and roasted *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds (n=3)

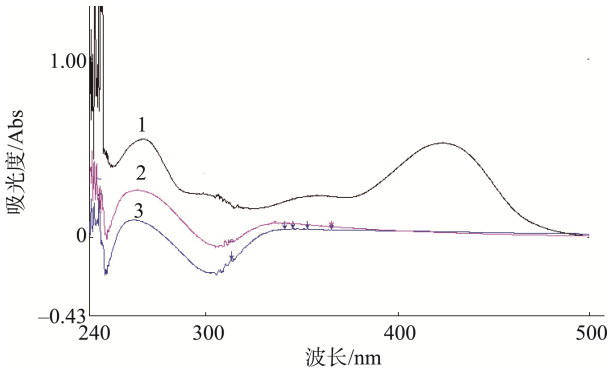
样品批号	样品组别	IC_{50}/(mg/mL)	生品 IC_{50}/烘焙品 IC_{50}
01	生品	16.85±1.56	9.49
	烘焙品	1.78±0.09**	
02	生品	21.93±1.24	11.15
	烘焙品	1.97±0.12**	
03	生品	12.47±0.94	7.04
	烘焙品	1.77±0.11**	
04	生品	14.56±1.24	8.49
	烘焙品	1.72±0.18**	

注: **表示与同批号的生品进行比较存在显著差异(P<0.01)，表 3、6 同。

2.3 烘焙前后黄秋葵籽总黄酮含量比较结果

2.3.1 检测波长的选择结果

本研究采用 $Al(NO_3)_3$ 显色法，以试剂空白为参比，对槲皮素对照品溶液、烘焙品溶液、生品溶液在 240~500 nm 范围内进行波长扫描。结果表明三者均在 268 nm 附近都有最大吸收，见图 2，因此选择 268 nm 作为测定波长。



注: 1. 槲皮素对照品溶液; 2. 烘焙品溶液; 3. 生品溶液。

图 2 总黄酮含量测定的紫外扫描图(240~500 nm)

Fig.2 Ultraviolet scanning image for determination of total flavonoid content (240–500 nm)

2.3.2 总黄酮含量测定方法学考察结果

(1)总黄酮含量测定线性关系结果

以槲皮素对照，建立的标准曲线为 Y=68.266X+0.0099 (r=0.9999)，且在 0.002~0.016 mg/mL 范围内线性关系良好。

(2)总黄酮含量测定精密度试验结果

将烘焙品溶液显色后连续测得的 6 次吸光度值代入回归方程，计算精密度试验的 RSD 值为 0.05%，说明仪器

的精密度良好。

(3)总黄酮含量测定稳定性试验结果

将烘焙品溶液显色后在 0、10、30、60、90、120 min 时测得吸光度值代入回归方程，计算稳定性试验的 RSD 值为 0.50%，说明样品显色后在 2 h 内稳定。

(4)总黄酮含量测定重复性试验结果

将 6 份烘焙品溶液显色后所测得的吸光度值代入回归方程，计算重复性试验的 RSD 值为 1.80%，说明该方法重复性良好。

(5)总黄酮含量测定加样回收率试验结果

将 6 份加样回收样品溶液显色后所测得的吸光度值代入回归方程，计算平均加样回收率为 98.10%，RSD 值为 0.55%，说明该方法回收率良好，具体见表 2。

2.3.3　总黄酮含量测定结果

对烘焙前后黄秋葵籽醇提取液进行吸光度测定，所得数值代入回归方程，计算生品和烘焙品的总黄酮含量，结果见表 3。从表 3 可知，4 批黄秋葵籽生品总黄酮含量范围是 1.50~1.84 mg/g，烘焙品总黄酮含量范围是 5.52~8.10 mg/g，

表 2　总黄酮含量测定的加样回收试验结果(n=6)

Table 2　Results of sample addition recovery test for total flavonoids content determination (n=6)

称样量/g	样品含量/mg	加入量/mg	测得量/mg	回收率/%	平均回收率/%	RSD/%
0.2501	2.0042	1.98	3.9313	98.67	98.10	0.55
0.2502	2.0050	1.97	3.8947	97.98		
0.2505	2.0074	2.00	3.9387	98.28		
0.2502	2.0050	2.00	3.9112	97.66		
0.2504	2.0066	2.01	3.9057	97.24		
0.2504	2.0066	1.98	3.9368	98.75		

烘焙品的总黄酮含量明显高于生品，且存在显著统计学差异(P<0.01)，平均含量提高百分率为 346.3%，说明黄秋葵籽经烘焙后其总黄酮含量显著升高。

表 3　黄秋葵籽生品、烘焙品的总黄酮含量(n=3)

Table 3　Total flavonoids content of raw and roasted *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds (n=3)

样品批号	样品组别	总黄酮平均含量/(mg/g)	含量提高百分率/%
01	生品	1.65±0.03	-
	烘焙品	8.10±0.11**	389.5
02	生品	1.50±0.04	-
	烘焙品	8.01±0.22**	435.0
03	生品	1.84±0.04	-
	烘焙品	5.52±0.13**	199.5
04	生品	1.54±0.03	-
	烘焙品	7.12±0.13**	361.5

注：含量提高百分率/%=(烘焙品总黄酮平均含量–生品总黄酮平均含量)/生品总黄酮平均含量×100%。-表示无此项，表 6 同。

2.4　烘焙前后黄秋葵籽 3 种活性物质含量比较结果

2.4.1　质谱参数的优化

采用 ESI 负离子扫描模式。先对每种对照品溶液进行一级全扫描，确定准分子离子峰([M-H]$^-$)作为母离子，再对各选定的母离子进行产物离子扫描，选择丰度较高且特征性强的碎片离子作为子离子，用于建立 MRM 离子对，结果见图 3~8。

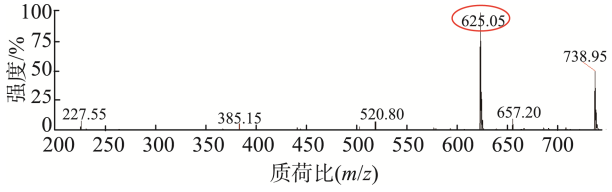


图 3　槲皮素-3-O-龙胆二糖苷的一级质谱图
([M-H]$^-$=m/z 625.05)
Fig.3　Mass spectrum of quercetin-3-O-gentianoside
([M-H]$^-$=m/z 625.05)

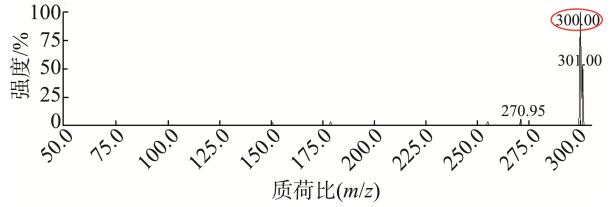


图 4　槲皮素-3-O-龙胆二糖苷的二级质谱图
(m/z 625.05→m/z 300.00)
Fig.4　Secondary mass spectrum of quercetin-3-O-gentianoside
(m/z 625.05→m/z 300.00)

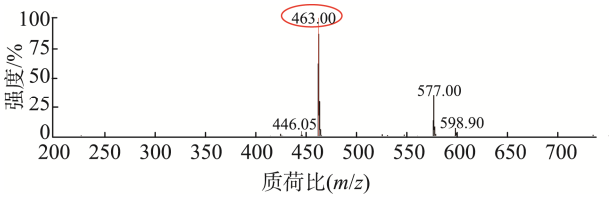


图 5　异槲皮苷的的一级质谱图([M-H]$^-$=m/z 463.00)
Fig.5　Mass spectrum of isoquercitrin
([M-H]$^-$=m/z 463.00)

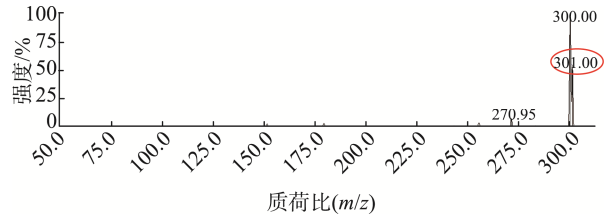


图 6 异槲皮苷的二级质谱图(*m/z* 463.00→*m/z* 301.00)

Fig.6 Secondary mass spectrum of isoquercitrin (*m/z* 463.00→*m/z* 301.00)

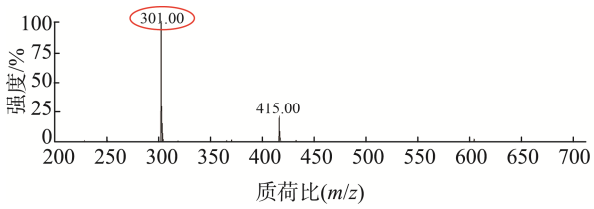


图 7 槲皮素的一级质谱图([M-H]⁻=*m/z* 301.00)

Fig.7 Mass spectrum of quercetin ([M-H]⁻=*m/z* 301.00)

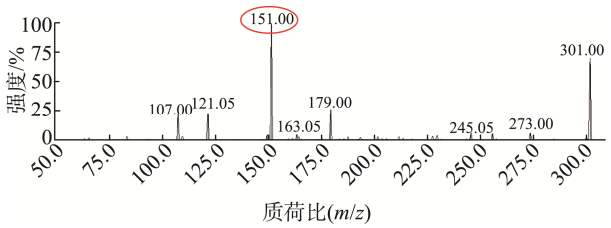


图 8 槲皮素的二级质谱图(*m/z* 301.00→*m/z* 151.00)

Fig.8 Secondary mass spectrum of quercetin (*m/z* 301.00→*m/z* 151.00)

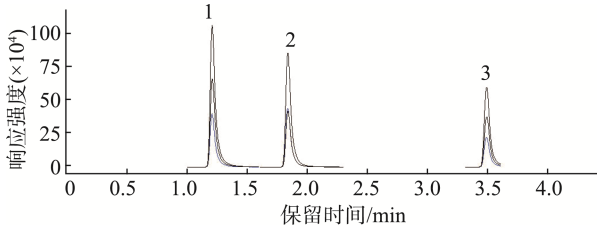
在上述基础上优化碰撞能量等参数，选择并确定用于定性、定量的离子对。最终得到 3 种活性物质的最佳质谱参数，由表 4 可知，经优化后，各化合物均获得了高响应的特征离子对。其中，槲皮素-3-O-龙胆二糖苷与异槲皮苷均产生丰度最高的特征子离子 *m/z* 300 和丰度次高的 *m/z* 301，这与其共享槲皮素母核的结构特征相符，为了避免定量过程中相互干扰，最终选择 *m/z* 300 作为槲皮素-3-O-龙胆二糖苷的定量子离子，选择 *m/z* 301 作为异槲皮苷的定量子离子，确保定量的灵敏度；而槲皮素则选择 *m/z* 151 作为定量离子。此外，每种化合物均设定了一对定性离子，以确保定性的准确性。

表 4 3 种活性物质质谱参数

Table 4 Mass spectrometry parameters of 3 kinds of active substances

成分	保留时间/min	母核	定量离子(*m/z*)	定性离子(*m/z*)	第一四级杆入口电压/V	碰撞能量/eV	第三四极杆入口电压/V
槲皮素-3-O-龙胆二糖苷	1.170	625	300	301	24.0	40.0	29.0
异槲皮苷	1.752	463	301	271	11.0	22.0	14.0
槲皮素	3.447	301	151	179	23.0	22.0	27.0

确定最佳质谱参数后，进行 MRM，混合对照品、生品、烘焙品的 MRM 色谱图见图 9~11。



注: 1. 槲皮素-3-O-龙胆二糖苷; 2. 异槲皮苷; 3. 槲皮素, 图 10~11 同。

图 9 混合对照品 MRM 色谱图

Fig.9 MRM chromatogram of mixed reference substance

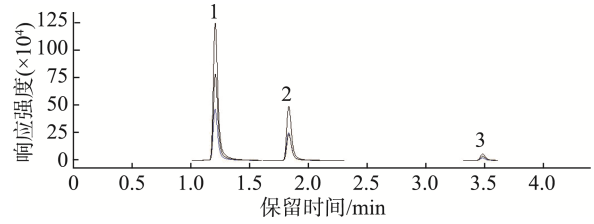


图 10 黄秋葵籽生品 MRM 色谱图

Fig.10 MRM chromatogram of raw *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds

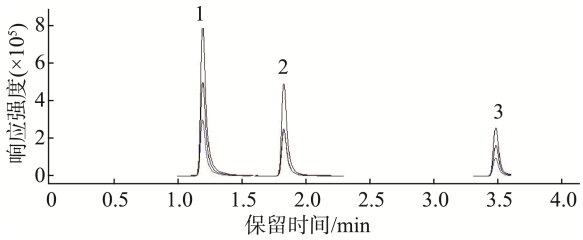


图 11 黄秋葵籽烘焙品 MRM 色谱图

Fig.11 MRM chromatogram of roasted *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds

2.4.2 活性物质含量测定方法学考察结果

(1)活性物质含量测定线性关系结果

以槲皮素-3-O-龙胆二糖苷为对照，建立的标准曲线分别为：*Y*=236347*X*+32298 (*r*=0.9996)，线性范围 1.05~16.8 μg/mL；以异槲皮苷为对照，建立的标准曲线为：*Y*=458368*X*+9564.6 (*r*=0.9997)，线性范围 0.485~4.85 μg/mL；以槲皮素为对照，建立的标准曲线为：*Y*=441747*X*–267044 (*r*=0.9946)，线性范围 0.52~5.2 μg/mL。

(2)活性物质含量测定精密度试验结果

将样品溶液连续进样测定 6 次，计算槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素的峰面积的 RSDs 值分别为 0.62%、0.65%、0.83%，说明仪器的精密度良好。

(3)活性物质含量测定稳定性试验结果

在样品溶液制备好后的 0、2、4、6、8、12、24 h 进

样测定, 计算槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素峰面积的 RSDs 值分别为 1.35%、2.34%、2.97%, 说明样品溶液在 24 h 内稳定性良好。

(4)活性物质含量测定重复性试验结果

将 6 份平行样品测得的峰面积代入回归方程, 计算槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素含量的 RSDs 值分别为 1.20%、2.23%、3.04%, 说明该方法重复性良好。

(5)活性物质含量测定加样回收率试验结果

将用于加样回收率的 6 份样品溶液测得的峰面积代入回归方程, 计算槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素的加样回收率, 结果见表 5, 槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素平均加样回收率分别为 108.44%、108.85%、96.85%, RSDs 均小于 3.0%, 表明该方法的回收率良好。

2.4.3　活性物质含量测定结果

将烘焙前后黄秋葵籽中 3 种成分测得的峰面积, 代入回归方程中, 可计算出 4 批黄秋葵籽生品、烘焙品中的槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素含量, 具体结果见表 6。

从表 6 可知, 槲皮素-3-O-龙胆二糖苷在生品中含量在 6.05~56.39 μg/g, 在烘焙品中含量在 5.29~23.44 μg/g; 异槲皮苷在生品中含量在 7.22~19.22 μg/g, 在烘焙品中含量

表 5　槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素的加样回收率试验(*n*=6)

Table 5　Recovery test of quercetin-3-O-gentianoside, isoquercitrin and quercetin by sample addition (*n*=6)

测定成分	样品含量/μg	加入量/μg	测得量/μg	回收率/%	平均回收率/%	RSDs/%
槲皮素-3-O-龙胆二糖苷	18.22	18.90	39.52	106.45	108.44	0.92
	18.22	18.90	40.08	107.99		
	18.22	18.90	40.40	108.84		
	18.22	18.90	40.35	108.70		
	18.22	18.90	40.61	109.40		
	18.22	18.90	40.57	109.29		
异槲皮苷	3.69	3.70	7.94	107.48	108.85	0.95
	3.69	3.70	8.14	110.14		
	3.69	3.70	8.15	110.24		
	3.69	3.70	7.97	107.95		
	3.69	3.70	8.01	108.48		
	3.69	3.70	8.04	108.82		
槲皮素	1.46	1.45	2.86	98.17	96.85	2.77
	1.46	1.45	2.92	100.20		
	1.46	1.45	2.74	94.25		
	1.46	1.45	2.81	96.31		
	1.46	1.45	2.90	99.40		
	1.46	1.45	2.70	92.75		

表 6　烘焙前后黄秋葵籽中 3 种活性物质含量(*n*=3)

Table 6　Content of 3 kinds of active substances in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench seeds before and after roasting (*n*=3)

样品批号	样品名称	槲皮素-3-O-龙胆二糖苷		异槲皮苷		槲皮素	
		含量/(μg/g)	含量变化/%	含量/(μg/g)	含量变化/%	含量/(μg/g)	含量变化/%
01	生品	28.39±0.09	-	7.22±0.10	-	3.32±0.01	-
	烘焙品	19.96±0.07**	–29.7	4.40±0.02**	–38.6	5.18±0.11**	+56.0
02	生品	56.39±0.23	-	19.22±0.07	-	7.17±0.27	-
	烘焙品	23.44±0.01**	–58.4	7.13±0.01**	–62.9	9.11±0.01**	+27.1
03	生品	29.10±0.03	-	7.28±0.03	-	3.41±0.10	-
	烘焙品	12.93±0.04**	–55.6	2.02±0.34**	–72.3	6.46±0.09**	+89.5
04	生品	6.05±0.12	-	7.87±0.04	-	2.52±0.01	-
	烘焙品	5.29±0.05**	–12.6	6.17±0.01	–21.7	4.22±0.01**	+67.4

注: 含量变化/%=(生品含量–烘焙品含量)/生品含量×100%。

在 2.02~7.13 μg/g; 槲皮素在生品中含量在 2.52~7.17 μg/g, 在烘焙品中含量在 4.22~9.11 μg/g。与生品相比, 烘焙品中槲皮素-3-O-龙胆二糖苷含量平均下降 39.1%、异槲皮苷含量平均下降 48.9%, 与生品相比存在显著统计学差异(P<0.01); 但烘焙品中槲皮素的含量平均上升 60.0%, 与生品相比同样存在显著统计学差异(P<0.01), 说明经烘焙后黄秋葵籽中的槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷出现了含量降低, 而槲皮素含量上升的情况。

3 讨论与结论

研究结果表明, 烘焙(240 ℃处理 10min)能显著增强黄秋葵籽的抗氧化活性, 其本质可能是黄酮类成分发生结构重构的结果。

3.1 抗氧化活性增强与黄酮成分转化的量效与构效关系

本研究观察到烘焙后总黄酮含量上升与 DPPH 自由基清除能力增强出现了协同但并未呈现线性增长的现象。说明烘焙后抗氧化活性的提升可能不能简单地归因于总黄酮“量”的增加, 更关键在于黄酮类成分“质”的转变。UPLC-MS/MS 数据揭示了一个明确的转化路径: 槲皮素-3-O-龙胆二糖苷和异槲皮苷(槲皮素糖苷)的含量急剧下降, 而与之对应的苷元——槲皮素的含量则大幅上升。从构效关系看, 这一转化至关重要。槲皮素分子中的邻苯二酚式 B 环和 3',4'-二羟基结构是其强效自由基清除活性的关键位点, 当槲皮素与糖基结合形成糖苷后, 这些活性羟基被遮蔽, 导致其抗氧化能力通常弱于苷元形式[29–32]。而槲皮素-3-O-龙胆二糖苷、异槲皮苷、槲皮素的熔点分别为 205~207、206~236、314~317 ℃[33–34], 在高温(240 ℃)条件下受热糖链断裂, 可分解转化为槲皮素。因此, 本研究中槲皮素的大量生成, 从分子结构上直接解释了黄秋葵籽抗氧化活性增强的原因, 从侧面也证实了烘焙温度选择 240 ℃的合理性。

3.2 热转化路径的探讨与普遍性意义

本研究推测槲皮素糖苷在高温下通过糖苷键断裂生成槲皮素, 是导致上述成分变化的主要路径。这一热转化现象体现了植物次级代谢产物在热加工中的一种普遍规律。例如, 在绿茶烘焙中, 表没食子儿茶素没食子酸酯会发生差向异构化与降解; 在咖啡烘焙中, 绿原酸会发生异构化与分解[35–36]。尽管具体路径因化合物结构而异, 但其核心都是热能在驱动分子结构向更稳定或活性更高的形式转变。本研究在黄秋葵籽体系中较为清晰地揭示了这一以槲皮素类成分为核心的热转化过程, 对后续产品的采收、加工等环节具有较大参考意义。

3.3 与同类研究的对比分析与机制交叉验证

本研究揭示的“槲皮素糖苷热转化-槲皮素富集-抗氧化活性增强”路径, 在不同植物原料的热加工研究中存在广泛的机制呼应。例如, 苦荞粉经过热蒸汽处理, 当温度超过 220 ℃时出现芦丁含量下降, 槲皮素含量明显上升, 并伴随着抗氧化活性的显著增强[37]。在洋葱的烹饪过程中, 也已证实槲皮素二葡萄糖苷会降解转化为槲皮素苷元[38]。这些跨物种的证据共同表明, “热诱导糖苷键断裂, 释放高活性苷元”是提升植物材料抗氧化性能的一条具有普遍性的路径。

值得注意的是, 本研究观察到总黄酮含量上升幅度(346.3%)远超 3 种目标槲皮素类成分的净变化量。这提示烘焙过程除了热加工除导致已知成分转化外, 还可能通过以下途径影响总黄酮测定结果: (1)释放结合态黄酮类物质: 高温可能破坏细胞壁结构或黄酮与基质的结合, 使原本无法提取的结合态黄酮转变为游离态[39]; (2)美拉德反应产物的干扰: 一些具有还原性的美拉德反应中间体可能会影响 IC_{50} 的测定值[39]。因此, 本研究中总黄酮的巨幅提升, 可能是“槲皮素苷元真实增加”“结合态黄酮释放”与“美拉德反应产物干扰”共同作用的结果。这亦解释了为何抗氧化活性的提升倍数(9 倍)与总黄酮的提升倍数不完全呈线性关系, 提示在评价热加工产品时, 需结合特定活性成分分析与体外活性验证, 而非单纯依赖总黄酮含量。

3.4 研究局限性及与先前工作的异同

相较于前人研究更多侧重报道烘焙对黄秋葵总酚、黄酮含量影响的研究[40–41], 本研究在此基础上通过精准定量, 揭示了特定活性成分(槲皮素及其糖苷)的动态转化规律, 从而将成分变化与功能提升的关联从宏观层面进展到具体分子层面, 在机制探讨深度上有所推进。

然而, 亦存在局限性。首先, 虽然观测到了黄秋葵籽成分在烘焙过程中的转化现象, 但对其反应动力学及是否伴随美拉德反应、焦糖化反应等产生新的抗氧化物质以及是否还有其他物质的参与尚未可知。其次, 体外 DPPH 法主要评估的是自由基清除能力, 烘焙产物在更复杂的生物体系(如细胞模型或体内)中的抗氧化效能有待进一步验证。

3.5 应用前景

研究中发现烘焙黄秋葵籽会产生类似咖啡的香气, 结合其特有的抗氧化、缓解疲劳、提高免疫力等功效亦符合现代社会人们对大健康的追求, 可将其精准定位开发为新型功能性饮品(如“秋葵咖啡”、袋泡茶等), 满足市场对天然、健康饮品的需求。该应用对生长速度快, 年产率高但果实极易老化的黄秋葵来说, 也是一条高附加值转化途径, 符合农产品精深加工与大健康产业融合发展的趋势。

3.6 后续研究方向建议

(1)机制深化: 可采用同位素示踪等技术, 精确阐明槲皮素糖苷转化的动力学与催化机制; (2)功效拓展: 利用

细胞和动物模型, 综合评价黄秋葵籽烘焙产物的体内生理活性, 重点关注抗氧化、抗疲劳、抗炎等; (3)工艺优化: 基于关键活性物质(如槲皮素)含量优化烘焙工艺, 揭示“温度-时间-成分-活性”之间的关系, 可为后续黄秋葵籽产品的开发实现工业化生产提供支持。

参考文献

[1] 闫旭宇, 李娟, 李玲. 响应面优化超声辅助提取黄秋葵嫩果黄酮工艺及其清除羟自由基能力[J]. 中国调味品, 2021, 46(10): 164–168.
YAN XY, LI J, LI L. Optimization of ultrasonic-assisted extraction process of flavonoids from tender okra fruit by response surface method and their hydroxyl radical scavenging ability [J]. China Condiment, 2021, 46(10): 164–168.

[2] 钱文文, 辛宝, 杨燕. 黄秋葵的营养保健功能及开发应用前景[J]. 现代中医药, 2016, 36(5): 112–115.
QIAN WW, XIN B, YANG Y. The nutritional and health benefits of okra and its development and application prospects [J]. Modern Chinese Medicine, 2016, 36(5): 112–115.

[3] 李双芳, 夏琳, 刘雨辰, 等. 复合酶法提取黄秋葵籽油的工艺优化及抗氧化性能研究[J]. 阜阳师范大学学报(自然科学版), 2023, 40(4): 33–41.
LI SF, XIA L, LIU YC, *et al*. Process optimization and antioxidant property study on the extraction of okra seed oil by complex enzymatic method [J]. Journal of Fuyang Normal University (Natural Science), 2023, 40(4): 33–41.

[4] 谭亮, 杲秀珍, 云忠祥, 等. 黄秋葵抗氧化活性研究[J]. 中成药, 2023, 45(3): 829–835.
TAN L, GAO XZ, YUN ZX, *et al*. Study of antioxidant activity of *Abelmoschus esculentus* [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2023, 45(3): 829–835.

[5] 詹晓东, 梁益军. 黄秋葵多糖对耐力训练小鼠自由基代谢和糖代谢影响的研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(1): 105–110.
ZHAN XD, LIANG YJ. Effect of okra polysaccharide on free radical metabolism and glycometabolism in endurance training mice [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2022, 37(1): 105–110.

[6] 陈晓琪, 李瑶晨, 李璐瑶, 等. 黄秋葵中黄酮类化合物提取方法优化及总黄酮抑菌效果研究[J]. 核农学报, 2022, 36(3): 669–679.
CHEN XQ, LI YC, LI LY, *et al*. Optimization by response surface methodology of flavonoids extraction and the antibacterial activities of the total flavonoids from okra (*Abelmoschus esculentus* L.) [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(3): 669–679.

[7] 李朦. 黄秋葵提取物调控 TLR4/NF-κB/NLRP3 信号通路影响宫颈癌生物学行为的研究[D]. 南京: 中国医科大学, 2022.
LI M. Study on the biological behavior of cervical cancer by regulating TLR4/NF-κB/NLRP3 signaling pathway by okra extract [D]. Nanjing: China Pharmaceutical University, 2022.

[8] 张艳军, 李靖, 张玉领, 等. 黄秋葵多糖对糖尿病大鼠糖脂代谢和肾脏损伤的改善作用[J]. 现代食品科技, 2021, 37(3): 46–52.
ZHANG YJ, LI J, ZHANG YL, *et al*. Okra polysaccharides improve glucose and lipid metabolism and kidney damage in diabetic rats [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(3): 46–52.

[9] 胡日查. 黄秋葵多糖分离、纯化及其免疫调节活性研究[D]. 海口: 海南大学, 2015.
HU RC. Extraction, purification and the immunomodulatory activities of okra polysaccharides [D]. Haikou: Hainan University, 2015.

[10] 叶帆. 慢性束缚应激诱导的小鼠焦虑和焦虑—抑郁模型及黄秋葵种子的调控作用[D]. 北京: 北京协和医学院, 2023.
YE F. Chronic restraint stress induced anxiety and anxiety-depression mice models and the regulation effect of okra seeds [D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2023.

[11] 汪瑞敏, 杨娜, 李博岩, 等. 不同乳酸菌发酵的黄秋葵汁液在模拟体外消化过程中总多酚及抗氧化活性的变化[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(21): 13–21.
WANG RM, YANG N, LI BY, *et al*. Changes in polyphenol contents and antioxidant activity in okra fermented by different lactic acid bacteria during simulated digestion *in vitro* [J]. Food Research and Development, 2021, 42(21): 13–21.

[12] ZHANG LM, LI XY, BI B, *et al*. Progress in the isolation, purification, structural characteristics and biological functions of polysaccharides from okra [*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench]: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 312: 144184.

[13] PANCHE AN, DIWAN AD, CHANDRA SR. Flavonoids: An overview [J]. Journal of Nutritional Science, 2016, 5: e47.

[14] DABEEK WM, MARRA MV. Dietary quercetin and kaempferol: Bioavailability and potential cardiovascular-related bioactivity in humans [J]. Nutrients, 2019, 11(10): 2288.

[15] REYES-FARIAS M, CARRASCO-POZO C. The anti-cancer effect of quercetin: Molecular implications in cancer metabolism [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(13): 3177.

[16] XIA F, LI C, ZHAO N, *et al*. Rapid determination of active compounds and antioxidant activity of okra seeds using fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy [J]. Molecules, 2018, 23(3): 550.

[17] RAMZAN N, BUTT H, AZEEM M. *et al*. Therapeutic applications of quercetin-metallic complexes: A review [J]. Biometals, 2025(38): 1027–1048.

[18] DAI C, ZHANG Q, SHEN L, *et al*. Quercetin attenuates quinocetone-induced cell apoptosis *in vitro* by activating the p38/Nrf2/HO-1 pathway and inhibiting the ROS/mitochondrial apoptotic pathway [J]. Antioxidants, 2022, 11(8): 1498.

[19] DEBNATH I, GHOSH S, JHA SK, *et al*. Mechanistic insights and therapeutic potential of quercetin in neuroprotection: A comprehensive review of pathways and clinical perspectives [J/OL]. BIO Integration, 1–31. [2025-08-18]. DOI: 10.15212/bioi-2025–0073

[20] LIANG N, KITTS DD. Antioxidant property of coffee components: Assessment of methods that define mechanisms of action [J]. Molecules, 2014, 19(11): 19180–19208.

[21] 陈郑亮. 不同烘焙方式对白茶口味与品质的影响[J]. 福建茶叶, 2025, 47(5): 23–25.
CHEN ZL. The impact of different roasting methods on the flavor and quality of white tea [J]. Tea in Fujian, 2025, 47(5): 23–25.

[22] PETROPOULOS S, FERNANDES Â, BARROS L, *et al*. The chemical composition, nutritional value and antimicrobial properties of *Abelmoschus esculentus* seeds [J]. Food Funct, 2017, 8(12): 4733–4743.

[23] 袁永雷, 王飞飞, 曲丽萍. HPLC-DPPH 快速发现重楼果壳总黄酮中抗氧化成分及其活性初步验证[J]. 中国药师, 2021, 24(8): 550–552.

YUAN YL, WANG FF, QU LP. Rapid determination and activity verification of antioxidant constituents in total flavonoids from fruit shell of *Paris polyphylla* by HPLC-DPPH [J]. Frontiers in Pharmaceutical Sciences, 2021, 24(8): 550–552.

[24] 唐云, 李国鹏, 殷启霖, 等. 不同产地黄秋葵中 5 种黄酮成分 HPLC 分析[J]. 中草药, 2020, 51(14): 3797–3801.
TANG Y, LI GP, YIN QL, *et al*. Content determination of five flavonoids in *Abelmoschus esculentus* from different habitats by HPLC [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(14): 3797–3801.

[25] 袁珂, 刘华亮, 廖海兵, 等. 黄秋葵的化学成分及其药效作用研究[C]. 杭州: 2013 全国中药与天然药物高峰论坛暨第十三届全国中药和天然药物学术研讨会, 2013.
YUAN K, LIU HL, LIAO HB, *et al*. Research on the chemical components and pharmacological effects of okra [C]. Hangzhou: The 2013 National Summit on Traditional Chinese Medicine and Natural Products and the 13th National Academic Conference on Traditional Chinese Medicine and Natural Products, 2013.

[26] 王亚茹, 袁满, 张丽, 等. 槲皮素抗氧化作用及相关机制研究进展[J]. 营养学报, 2022, 44(2): 204–208.
WANG YR, YUAN M, ZHANG L, *et al*. Research progress on antioxidant actions and related mechanisms of quercetin [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2022, 44(2): 204–208.

[27] 王晓华, 王超群. 地锦草中黄酮类化合物含量测定方法的研究[J]. 安徽化工, 2010, 36(2): 61–63.
WANG XH, WANG CQ. Research on quantitative determination of total flavonoids from *Euphorbia humifusa* [J]. Anhui Chemical Industry, 2010, 36(2): 61–63.

[28] 杨龙飞, 田伟, 郑倩, 等. 基于 UPLC/ESI-Q TRAP-MS/MS 技术分析酸枣仁中黄酮类化合物[J]. 特产研究, 2022, 44(3): 91–100.
YANG LF, TIAN W, ZHENG Q, *et al*. Analysis of the flavonoids in *Ziziphi spinosae* Semen using UPLC/ESI-Q TRAP-MS/MS [J]. Special Wild Economic Animal and Plant Research, 2022, 44(3): 91–100.

[29] BOOTS AW, HAENEN GRMM, BAST A. Health effects of quercetin: From antioxidant to nutraceutical [J]. European Journal of Pharmacology, 2008, 585(2-3): 325–337.

[30] 任红, 郑少杰, 张小利, 等. 基于不同抗氧化机制的黄酮类化合物构效关系研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(2): 384–388.
REN H, ZHENG SJ, ZHANG XL, *et al*. Research progress on the structure-activity relationship of flavonoid compounds based on different antioxidant mechanism [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(2): 384–388.

[31] RICE-EVANS CA, MILLER NJ, PAGANGA G. Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids [J]. Free Radical Biology and Medicine, 1996, 20(7): 933–956.

[32] HEIM KE, TAGLIAFERRO AR, BOBILYA DJ. Flavonoid antioxidants: Chemistry, metabolism and structure-activity relationships [J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2002, 13(10): 572–584.

[33] 李坤, 王明芳, 薛非非, 等. 荷叶炒炭过程中金丝桃苷、异槲皮苷与槲皮素含量变化规律研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2016, 18(1): 112–117.
LI K, WANG MF, XUE FF, *et al*. Study on content variations of hyperoside, isoquercitrin and quercetin in fried charcoal lotus leaf [J]. Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World Science and Technology, 2016, 18(1): 112–117.

[34] 董春永, 张学兰, 李慧芬. 炮制对荷叶中荷叶碱和槲皮素含量的影响[J]. 中成药, 2010, 32(6): 973–976.
DONG CY, ZHANG XL, LI HF. Effect of processing on the content of nuciferine and quercetin in *Nelumbo nucifera* Gaertn [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2010, 32(6): 973–976.

[35] LIANG NJ, KITTS DD. Role of chlorogenic acids in controlling oxidative and inflammatory stress conditions [J]. Nutrients, 2016, 8(1): 16.

[36] 罗发美, 谭文涵, 金红芳, 等.基于高效液相色谱法分析烘焙程度对咖啡中绿原酸含量的影响[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(4): 102–110.
LUO FM, TAN WH, JIN HF, *et al.* Influence of baking degree on the content of chlorogenic acid in coffee by high performance liquid chromatography [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(4): 102–110.

[37] 赵梦媛, 王香玉, 尚盼盼, 等. 过热蒸汽对苦荞粉中黄酮类物质及其抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 147–154.
ZHAO MY, WANG XY, SHANG PP, *et al*. Effects of superheated steam on flavonoids and antioxidant activity in *Tartary buckwheat* flour [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 147–154.

[38] SASCHA R, NADIA B, GREGOR D, *et al*. Thermal degradation of onion quercetin glucosides under roasting conditions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(4): 1568–1573.

[39] NICOLI MC, ANESE M, PARPINEL M. Influence of processing on the antioxidant properties of fruit and vegetables [J]. Trends in Food Science & Technology, 1999: 10(3): 94–100.

[40] 闫俞廷, 张国芹, 刘养冉, 等. 品种与生长期对黄秋葵果实中酚类物质及其抗氧化活性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2025, 56(4): 701–710.
YAN YT, ZHANG GQ, LIU YR, *et al*. Varieties and growth stages on phenolic compounds and antioxidant activity in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2025, 56(4): 701–710.

[41] 张泽生, 董晓朦, 王田心, 等. 黄秋葵中多酚和黄酮提取工艺的研究[J]. 中国食品添加剂, 2017(1): 91–99.
ZHANG ZS, DONG XM, WANG TX, *et al*. Study on extraction of polyphenols and flavonoids from okra [J]. China Food Additives, 2017(1): 91–99.

(责任编辑: 安香玉 冯东慧)