

热风干燥对辣椒提取物的抗氧化活性及其代谢物组成的影响研究

王淑好¹, 胡作民², 林 欣², 付湘晋^{2,3*}, 郭薇丹²

(1. 湖南省产品质量检验研究院, 长沙 410007; 2. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 长沙 410004; 3. 湖南省调味料绿色制造工程技术研究中心, 长沙 410004)

摘 要: **目的** 解析热风干燥(40℃)对辣椒提取物抗氧化活性及其代谢物组成的影响。**方法** 以总还原力、自由基清除率为指标评价辣椒提取物的抗氧化活性, 并采用非靶代谢物组学技术分析辣椒代谢物组成及含量。**结果** 干燥辣椒的抗氧化活性强于新鲜辣椒; 共鉴定出 183 个代谢物, 其中 L-苹果酸是含量最高的代谢物, 新鲜辣椒与干燥辣椒中分别达(43838.68±16560.63) μg/g、(47095.13±18522.70) μg/g; 辣椒总氨基酸与总有机酸含量在干燥前后无显著变化, 糖及其衍生物含量显著减少, 维生素及其衍生物含量显著增加($P<0.05$); 辣椒在热风干燥中积累了大量氧化应激、高渗胁迫应激代谢物, 如 γ-氨基丁酸、焦谷氨酸、脯氨酸、L-半胱氨酸、L-苏阿糖、甘露醇等; 代谢通路富集分析发现, 碳水化合物类代谢和氨基酸类代谢在干燥过程中比较活跃; γ-氨基丁酸含量在热风干燥中从 400 mg/100 g 增加到 600 mg/100 g。**结论** 辣椒在热风干燥过程中发生明显的氧化应激、高渗胁迫应激代谢, 抗氧化活性物质类代谢物累积可能是干燥辣椒的抗氧化活性增强的原因, 辣椒能富集高含量 γ-氨基丁酸是本研究的一个新发现。本研究可为干辣椒品质形成机制研究提供参考。

关键词: 辣椒; 热风干燥; 抗氧化活性; 代谢物组成; 代谢通路富集分析

Study on the effects of hot air drying on the antioxidant activity and metabolite composition of *Capsicum annuum* L. extract

WANG Shu-Hao¹, HU Zuo-Min², LIN Xin², FU Xiang-Jin^{2,3*}, GUO Wei-Dan²

(1. Hunan Provincial Institute of Product and Goods Quality Inspection, Changsha 410007, China; 2. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 3. Hunan Province Seasonings Green Manufacturing Engineering Technology Research Center, Changsha 410004, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the effects of hot air drying (40℃) on the antioxidant activity quality and metabolite composition of *Capsicum annuum* L. extract. **Methods** The antioxidant activity of *Capsicum annuum* L. extract was evaluated by using total reducing power and free radical clearance rate as indicators. The composition and content of metabolites in *Capsicum annuum* L. was analyzed by using non-target metabolomics technology. **Results** Dried *Capsicum annuum* L. had stronger antioxidant activity than fresh *Capsicum annuum* L.; a total of 183 metabolites were identified, among which L-malic acid was the highest metabolite. Fresh *Capsicum annuum* L. and dried *Capsicum annuum* L. reached (43838.68±16560.63) μg/g and (47095.13±18522.70) μg/g,

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2022NK2032)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of Hunan Province (2022NK2032)

*通信作者: 付湘晋, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为食品加工与食品代谢组学。E-mail: drxfu@163.com

*Corresponding author: FU Xiang-Jin, Professor, School of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, No.498 Shaoshan South Road, Tianxin District, Changsha 410004, China. E-mail: drxfu@163.com

respectively; after drying, there were no significant changes in the total content of amino acid and organic acid, sugar and its derivatives content decreased significantly, vitamin and its derivatives content increased significantly ($P < 0.05$). During hot air drying, *Capsicum annuum* L. accumulated a lot of oxidative stress and hypertonic stress metabolites, such as γ -aminobutyric acid, pyroglutamate, proline, *L*-cysteine, *L*-threose, mannitol, and etc. Metabolic pathway enrichment analysis revealed that carbohydrate metabolism and amino acid metabolism were more active during the drying process. The content of γ -aminobutyric acid increased from 400 mg/100 g to 600 mg/100 g during hot air drying. **Conclusion** The *Capsicum annuum* L. undergoes significant oxidative stress and hypertonic stress metabolism during hot air drying process. The accumulation of antioxidant metabolites may be the reason for the enhanced antioxidant activity of dried *Capsicum annuum* L.. The *Capsicum annuum* L. can accumulate high concentrations of γ -aminobutyric acid is a new discovery in this study. This research can provide reference for the study of the quality formation mechanism of dried *Capsicum annuum* L..

KEY WORDS: *Capsicum annuum* L.; hot air drying; antioxidant activity; metabolite composition; metabolic pathway enrichment analysis

0 引言

辣椒, 一般作为调味蔬菜或单独成菜, 或是用作食品工业的着色剂^[1], 一些水果椒也可以用于鲜食^[2]。辣椒中含有大量对人体有益的营养物质, 如氨基酸、抗坏血酸、类胡萝卜素、生育酚等^[3]。辣椒提取物具有较强的抗氧化活性^[4-5], 食用辣椒对人体健康有一定积极的影响, 如预防心血管疾病^[6]、消炎镇痛^[7]、预防肥胖^[8]、消除疲劳^[9]等, 而这些生物活性的共同基础是抗氧化活性^[10]。

鲜辣椒水分含量高, 易发生腐烂^[11]。干燥是辣椒常见贮藏加工手段^[12], 其中热风干燥由于易操作、设备成本低^[13], 在工业化加工中使用最广泛^[14]。辣椒热风干燥的工艺优化、干燥对品质的影响等已有大量研究报道^[15-19]。一般认为, 在热风干燥加工中, 维生素、单糖、氨基酸、多酚等还原性物质会发生氧化、降解, 导致食品营养价值、功能活性下降^[20-21]。当前有关辣椒成分的研究中, 关注的物质主要是抗坏血酸、氨基酸、糖等少数几种代谢物。但辣椒中的代谢物数量可达数千种, 所以仅分析少数几种成分不能全面解析干燥过程中辣椒品质变化、形成机制。

辣椒在热风干燥时, 一般不超过 50℃, 辣椒细胞并未立即死亡, 其代谢活动依然很活跃, 但会对细胞造成热、渗透胁迫^[22]。辣椒在热风干燥条件下的应激代谢决定了干辣椒的物质组成及产品品质。目前还未有从代谢物组成、代谢通路角度分析热风干燥对辣椒品质影响的研究, 而代谢物组学技术具有高通量的优点, 获得的信息更加丰富, 可更全面、准确反映样品成分组成及变化情况^[23-24]。因此, 本研究通过比较新鲜辣椒、热风干燥辣椒提取物的抗氧化活性, 并采用代谢物组学方法对热风干燥前后辣椒中的有机小分子代谢物进行全面比较分析, 以期为干辣椒品质形成机制研究提供新的思路及理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

辣椒: 购自当地市场, 为二荆条辣椒。

甲醇(色谱纯, 上海安谱科技股份有限公司); 氯仿、吡啶(色谱纯, 上海阿达玛斯试剂有限公司); 甲氯铵盐(分析纯, 东京化成工业株式会社); *L*-2-氯苯丙氨酸(纯度 $\geq 98\%$, 上海恒柏生物科技有限公司); N,O-双(三甲基硅基)三氟乙酰胺(含 1%三甲基氯硅烷)(美国 REGIS 科技公司); 饱和脂肪酸甲酯(德国 Dr. Ehrenstorfer 公司); 抗坏血酸、邻苯三酚、铁氰化钾(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

CP124C 精密电子天平(精度 0.01 mg, 奥豪斯上海有限公司); 7900B 气相色谱仪(美国 Agilent 公司); PEGASUS HT 质谱仪(美国 LECO 公司); Heraeus Fresco17 离心机(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); JXFSTPRP-24 研磨仪(上海净信科技有限公司); LNG-T98 真空干燥仪、101-2AB 电热鼓风干燥箱(太仓市华美生化仪器厂); LGJ-10 普通型冷冻干燥器(北京开元永盛冻干技术有限公司); KQ-300DB 超声提取仪(昆山市超声仪器有限公司); BlueStar B 分光光度计(北京莱伯泰科仪器股份有限公司); 色谱柱 DB-5MS (30 m $\times$ 250 μ m, 0.25 μ m, 美国 Folsom 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 辣椒样品制备

新鲜辣椒: 剪开果肉, 去籽, 收集果肉, 5000 r/min 打浆。

干燥辣椒制备: 取 10.00 g 样品放入称量好的容器中, 电热鼓风干燥箱 40℃热风干燥 1 h, 在干燥器中冷却 3 min, 称重。重复上述实验步骤, 恒重时停止干燥, 即制得热风干燥后的辣椒。干辣椒碾磨过 40 目筛。

根据 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》计算恒重标准与湿基含水量, 新鲜辣椒组的湿基含水量为 $87.18\% \pm 3.07\%$ 。干燥 7 h(湿基含水量为 $51.32\% \pm 0.76\%$)的辣椒为半干样品, 干燥 25 h(湿基含水量为 $18.21\% \pm 0.84\%$)的辣椒为全干样品。

1.3.2 辣椒提取物的抗氧化活性测定

参考王莹莹等^[25]的方法稍作改动。称取样品(干物质 1.00 g, 根据样品含水量进行计算), 加入 30 mL 75%甲醇水溶液, 超声提取 30 min (100 W, 40°C), 暗处静置 30 min。取上清液, 75%甲醇稀释至 100 mL 为待测液, 4°C 储存, 24 h 内测定。阳性对照为 0.1 g 抗坏血酸溶于 100 mL 75%甲醇水溶液^[26]。

(1) 还原能力的测定

采用铁氰化钾还原法^[27]测定还原能力。抗氧化剂能够将铁氰化钾还原, 亚铁氰化钾再与三氯化铁反应生成普鲁士蓝, 该物质在 700 nm 处有最大吸收峰。吸光值越大, 表明样品还原力越强。

(2) 超氧阴离子抑制活性的测定

采用抑制邻苯三酚自氧化法测定超氧阴离子抑制活性^[28]。

(3) 羟基自由基清除能力的测定

参考王箴言等^[29]的方法, 在波长 510 nm 的条件下测定吸光度。

1.3.3 辣椒代谢物组成的测定

将新鲜辣椒与热风干燥后的辣椒进行冷冻干燥, 分别制为新鲜组样本与热风干燥组样本。取样本(20 ± 1) mg 于 2 mL EP 管中, 加入 450 μ L 提取液(甲醇水体积比为 3:1), 再加入 10 μ L L-2-氯苯丙氨酸(1 mg/mL)作为内标, 涡旋 30 s。加入瓷珠, 45 Hz 研磨仪处理 4 min, 超声 5 min(冰水浴)。4°C、10180 $\times$ g 离心 15 min。移取 200 μ L 上清液于 1.5 mL EP 管中, 每个样本各取 30 μ L 混合成质控(quality control, QC)样本。在真空浓缩器中干燥提取物。向干燥后的代谢物加入

200 μ L 甲氧胺盐试剂(甲氧胺盐酸盐, 溶于吡啶 20 mg/mL), 混匀, 烘箱 80°C 孵育 30 min。每个样品中加入 200 μ L 三氟乙酰胺, 混合物 70°C 孵育 1.5 h。冷却至室温。随机顺序上样, 运用气相层析飞行时间式质谱仪(gas chromatography time-of-flight mass spectrometer, GC-TOF-MS)检测^[30]。

进样量: 1 μ L; 分流模式: 不分流; 隔垫吹扫流速: 3 mL/min; 载气: 氦气; 色谱柱: DB-5MS (30 m $\times$ 250 μ m, 0.25 μ m); 柱流速: 1 mL/min; 柱箱升温程序: 50°C 持续 1 min, 以 10°C/s 的速度升到 310°C, 持续 8 min; 前进样口温度: 280°C; 传输线温度: 280°C; 离子源温度: 250°C; 电离电压: -70 eV; 质量范围: m/z : 50~500; 扫描速率: 12.5 光谱/s; 溶剂延迟时间: 6.03 min。

1.4 数据处理

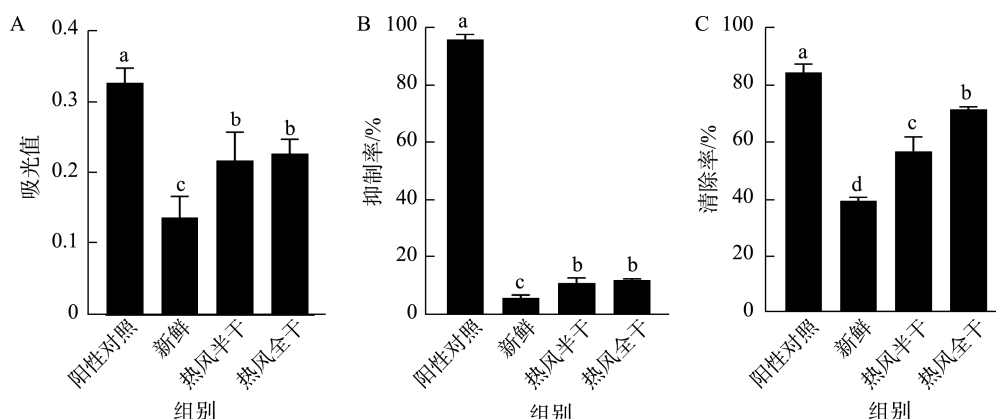
采用 ChromaTOF 软件(V 4.3x, LECO)对质谱数据进行峰提取、基线矫正、解卷积、峰积分、峰对齐等分析^[31]。对物质定性工作中, 使用 LECO-Fiehn Rtx5 数据库, 包括质谱匹配及保留时间指数匹配。最后将 QC 样本中检出率 50% 以下或相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)>30%的峰去除^[32]。

代谢物含量采用内标法定量, 表示为 μ g/g(代谢物质量/辣椒质量), 结果以平均值 $\pm$ 标准偏差表示。采用 Excel 2016 进行数据预处理。各组间的比较采用 SPSS 22.0 进行独立样本 t 检验, 当 $P < 0.05$ 时认为差异显著。采用 Origin 2021 和 GraphPad Prim 8 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 辣椒干燥后的抗氧化活性变化

总还原力、自由基清除力是评价抗氧化活性最常用的指标^[27]。辣椒提取物的总还原力、超氧阴离子清除活性以及羟基自由基清除力如图 1 所示。其中辣椒提取物具有较强的羟基自由基清除活性(图 1C), 这可能是因为辣椒在干



注: A. 还原能力; B. 超氧阴离子清除力; C. 羟基自由基清除力; 阳性对照为 0.1% 抗坏血酸; 不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 1 热风干燥对辣椒提取物抗氧化活性的影响($n=6$)

Fig.1 Effects of hot air drying on the antioxidant activity of *Capsicum annuum* L. extract ($n=6$)

燥过程中累积了大量还原性代谢物。辣椒的羟基自由基清除率在干燥过程中显著增加($P<0.05$), 鲜辣椒、半干辣椒、全干辣椒分别是 39.2%、56.1%、70.5%, 与曹珍珍^[21]的研究结论相符。

2.2 辣椒代谢物的组成特点

通过 GC-TOF-MS 检测共检出 506 个峰, 鉴定出 183 种代谢物。新鲜辣椒与全干辣椒含有的相同物质共计 167 种, 新鲜辣椒中特有 7 种代谢物: 2-脱氧葡萄糖、5,6-二甲基苯并咪唑、异柠檬酸、亚油酸甲酯、马来酰亚胺、薄荷酮、柚皮素。热风全干辣椒中特有 9 种代谢物: 2-脱氧赤藓糖醇、2-羟基-3-异丙基丁二酸、对羟基苯乙腈、*D*-赤藓糖内酯、二羟基丙酮、胍基琥珀酸、新橙皮苷、托品酸、酵母甾醇(图 2)。

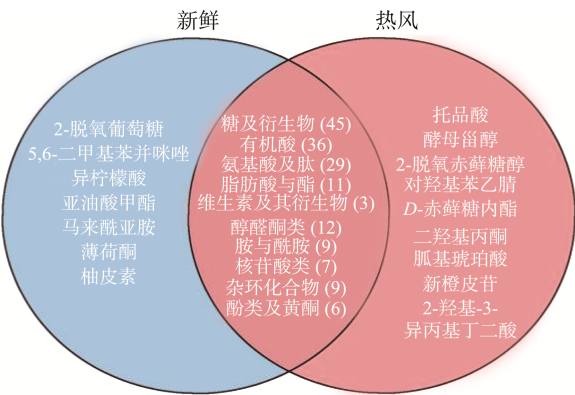
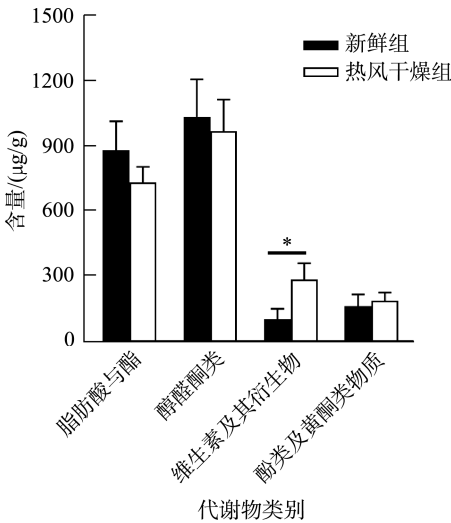
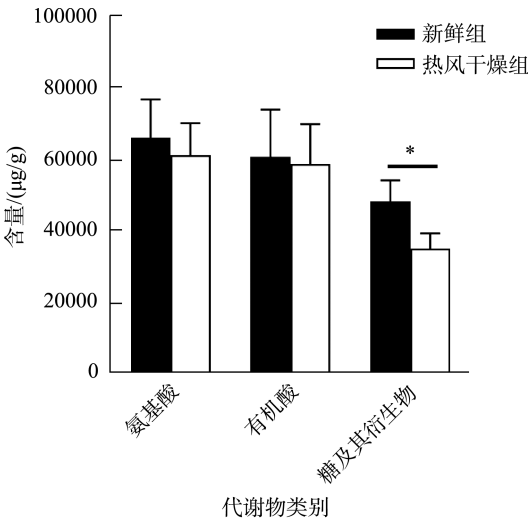


图 2 韦恩图
Fig.2 Venn diagram

将其进行物质分类, 发现辣椒的主要代谢物为糖及其衍生物、有机酸、氨基酸及肽, 其中糖及其衍生物共计 45 种, 有机酸共计 36 种, 氨基酸及肽共计 29 种。对主要的代谢物总量进行统计, 如图 3 所示。由图 3 可知, 辣椒代谢物中, 氨基酸的含量最高, 干燥前与干燥后分别是 (66400 ± 10680) $\mu\text{g/g}$ 和 (61450 ± 8920) $\mu\text{g/g}$ 。热风干燥后辣椒中糖及其衍生物显著降低($P<0.05$), 维生素及其衍生物显著增加($P<0.05$)。

含量较多的代谢物数据如表 1 所示。其中新鲜辣椒中有 24 种代谢物含量超过 1 mg/g, 热风干燥辣椒中有 19 种, 且这 19 种在新鲜组中含量也超过 1 mg/g。含量较高的糖及衍生物包括肌醇、葡萄糖内酯、半乳糖; 含量较高的酸是 *L*-苹果酸、磷酸, 其中 *L*-苹果酸也是所有检测到的代谢物中含量最高的, 新鲜辣椒与干燥辣椒中分别达 (43838.68 ± 16560.63) $\mu\text{g/g}$ 、 (47095.13 ± 18522.70) $\mu\text{g/g}$ 。*L*-苹果酸作为三羧酸循环的中间产物, 其积累可能反映了辣椒中大量的线粒体活动, 有利于产生大量还原剂或为合成氨基酸提供碳骨架^[33]。氨基酸类代谢物中, 焦谷氨酸、脯氨酸、天冬酰胺的含量最高。其中, 脯氨酸是最常见的环

境胁迫相关代谢物。焦谷氨酸是谷氨酸与脯氨酸合成的重要前体^[34], 所以焦谷氨酸与鲜味及环境胁迫相关。天冬酰胺也具有鲜味, 辣椒中焦谷氨酸、天冬酰胺含量较高, 可以部分解释辣椒的鲜味。缬氨酸、苯丙氨酸是必需氨基酸, 热风干燥对它们的含量没有显著影响。



注: *代表差异显著($P<0.05$)。

图 3 代谢物类别及含量($n=6$)

Fig.3 Category and content of metabolite ($n=6$)

高含量物质中, 丙氨酸显著增加($P<0.05$), 葡萄糖酸内酯、葡萄糖醛酸、奎尼酸的含量极显著降低($P<0.01$), GABA 含量极显著增加($P<0.01$)。辣椒中 GABA 的含量较高, 是本研究的一个新发现。新鲜辣椒 GABA 含量高达 400 mg/100 g(干基), 干燥辣椒中 GABA 含量高达 600 mg/100 g(干基)。GABA 是食品中公认的功能活性物质之一, 具有降血压、缓解紧张等活性^[35], 可以减轻活性氧对植物体的损伤, 提高植物体中保护酶的活性^[36]。另外, GABA 是植物适应水分胁迫的重要调控因子, 可以诱导一些对抗水分胁迫的物质积累,

增强三羧酸循环、调节渗透压、清除自由基等,起到对抗水分胁迫的作用^[37]。已有大量研究以富集食品中 GABA 含量为目的,如通过发芽法富集糙米 GABA,富集量达到 189.58 mg/100 g^[38]。可见,辣椒中 GABA 含量明显高于发芽糙米,可作为富 GABA 食品进一步研究开发。

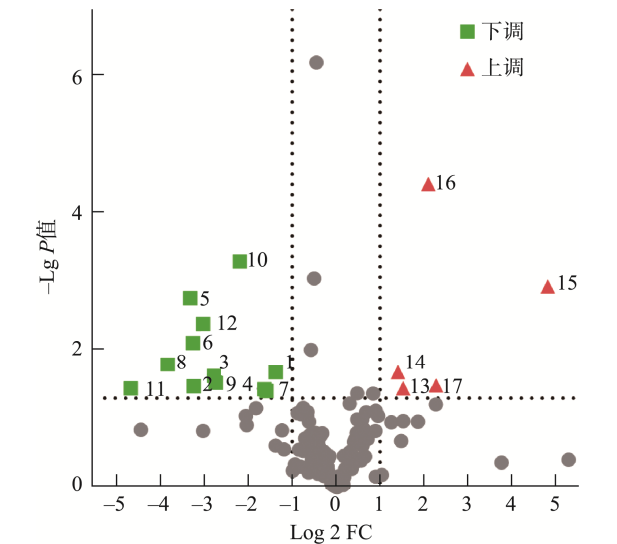
表 1 含量较多的代谢物(n=6)			
Table 1 Metabolites with high content (n=6)			
物质种类	物质名称	新鲜辣椒中含量 /(μg/g)	热风干燥后含量 /(μg/g)
糖及其衍生物	肌醇	17260.63±6154.21	16354.72±1562.74
	葡萄糖酸内酯**	10422.85±299.67	1091.60±241.00
	半乳糖	8979.05±2683.12	9394.28±2935.01
	松三糖	2863.07±671.72	2152.05±810.52
	葡萄糖-1-磷酸	1812.68±365.80	1199.57±271.04
	甘露醇	1085.63±456.05	617.05±260.55
	葡萄糖醛酸**	1031.78±269.63	127.03±40.07
有机酸	L-苹果酸	43838.68±16560.63	47095.13±18522.70
	磷酸	9324.75±2899.70	7400.20±3059.57
	奎尼酸**	2850.40±236.54	626.05±114.73
	GABA**	4020.90±268.02	6084.98±391.11
	3-羟基丙酸	2737.22±903.88	1928.73±446.50
氨基酸	焦谷氨酸	29391.73±3227.72	23849.65±3444.03
	脯氨酸	17427.17±5621.72	13531.80±1676.95
	天冬酰胺	14868.82±3233.85	14850.43±1687.93
	丝氨酸	3897.65±718.50	3228.23±547.21
	天冬氨酸	2388.25±405.55	2519.73±233.35
	缬氨酸	2097.93±945.87	2122.30±19.00
	丙氨酸*	1341.17±627.17	3868.97±1269.02
	苯丙氨酸	1257.00±371.26	950.40±82.29
	谷氨酰胺	1215.72±670.92	888.82±212.74
	L-别苏氨酸	1039.40±251.07	1054.73±228.37
其他	2-羟基吡啶	1816.97±710.33	1398.73±511.51
	乙醇胺	1538.52±283.00	1912.60±357.64

注: *代表不同组间差异显著($P<0.05$); **代表不同组间差异极显著($P<0.01$); γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)。

2.3 差异代谢物识别

对新鲜组与干燥组各代谢物含量进行独立样本 t 检验,选取 P 小于 0.05 并且差异倍数(fold change, FC)大于 2 的为组间差异代谢物(图 4)。识别差异代谢物 23 种,差异代谢物含量变化见图 5。有 5 种物质的含量在热风干燥后

显著上升,分别是 L -半胱氨酸、丙氨酸、 L -苏阿糖、甘露醇、尿苷;有 12 种物质在热风干燥后显著下降,分别是 2-酮丁酸、3-羟基- L -脯氨酸、3-羟基缬氨酸、5-羟基吡啶-3-



注: 1. 2-酮丁酸; 2. 3-羟基- L -脯氨酸; 3. 3-羟基缬氨酸; 4. 5-羟基吡啶-3-乙酸; 5. 乌头酸; 6. 葡萄糖酸内酯; 7. 葡萄糖-6-磷酸; 8. 异丙基- β -D-硫代半乳糖苷; 9. 乙胺乙酸; 10. 奎尼酸; 11. 蔗糖; 12. 葡萄糖醛酸; 13. 丙氨酸; 14. L -半胱氨酸; 15. L -苏阿糖; 16. 甘露醇; 17. 尿苷。

图 4 热风干燥后辣椒提取物中差异代谢物火山图
Fig.4 Volcanic map of differential metabolites of *Capsicum annuum* L. extract after hot air drying

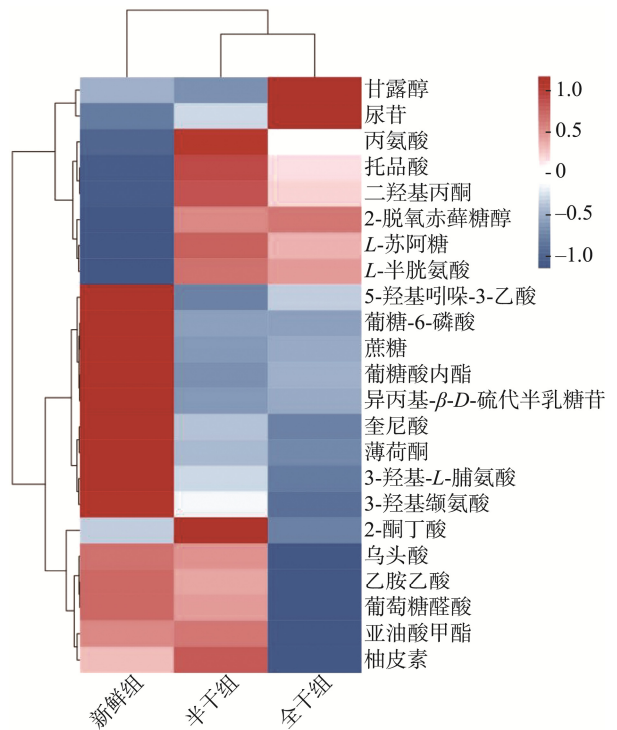


图 5 差异代谢物的含量变化
Fig.5 Changes in the content of differential metabolites

乙酸、乌头酸、葡萄糖酸内酯、葡萄糖醛酸、葡萄糖-6-磷酸、异丙基- β -D-硫代半乳糖苷、乙胺乙酸、奎尼酸、蔗糖。差异代谢物主要是糖及其衍生物类、有机酸类、氨基酸类，它们不仅是辣椒的主要代谢物(图 3、表 1)，同样也是植物在热胁迫下最多的应激代谢物^[39]。

积累糖、多元醇和氨基酸等碳代谢物，可有效地调节细胞渗透压，提高细胞膜的稳定性，是植物应对干旱胁迫、盐胁迫以及热胁迫等逆境环境的一种有效策略^[40]。糖类差异代谢物中葡萄糖酸内酯、蔗糖、L-苏阿糖、甘露醇变化幅度较大。其中葡萄糖酸内酯是戊糖磷酸化途径的中间产物，可能是植物抗逆过程中需要加快戊糖磷酸化途径供能及生成还原型辅酶 II (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, NADPH)，引起葡萄糖酸内酯含量的下降。在谷胱甘肽以氧化还原对的形式参与活性氧的脱毒过程中，NADPH 的足量供应是必需的^[41]。蔗糖呈下降趋势，这可能是由于辣椒在胁迫下的蔗糖代谢速率提高^[42]。L-苏阿糖的增加，可提高细胞渗透压。甘露醇、2-脱氧赤藓糖醇含量增加，也可提高细胞渗透压，还可保护细胞应对氧化损伤^[43]。

有机酸类差异代谢物有奎尼酸、2-酮丁酸、乌头酸，它们在干燥中含量均降低，其中奎尼酸降低最明显。芦苇 45℃烘干后也出现奎尼酸显著减少的现象。奎尼酸可以转化为木质素聚合物，加强植物体的机械强度，增强组织中的水分运输，从而有利于抵御高渗胁迫^[44]。奎尼酸是莽草酸代谢途径中的重要代谢物，在热胁迫下，植物莽草酸代谢途径被激活，这可能也是奎尼酸含量下降的原因^[45]。

2-酮丁酸是苏氨酸向异亮氨酸转化的中间产物；辣椒在干燥过程中出现了干旱胁迫，导致苏氨酸脱水酶上调，苏氨酸向异亮氨酸的转化速率加快，导致 2-酮丁酸含量下降^[46]。乌头酸是三羧酸循环的中间产物，其含量下降可能是三羧酸循环加快导致，因为植物三羧酸循环代谢途径在胁迫环境下会加快^[34]。

差异氨基酸类代谢物中，L-半胱氨酸在干燥中含量增加。半胱氨酸是植物中所有含硫有机化合物的重要前体物质，在植物抗逆中起到重要作用^[35]。L-半胱氨酸是典型的抗氧化活性物质，也是干燥辣椒抗氧化活性增强(图 1)的原因之一。

2.4 差异代谢物京都基因和基因组百科全书富集分析

将筛选出的差异代谢物进行京都基因和基因组百科全书(Kyoto encyclopedia of genes and genomes, KEGG)代谢通路富集分析，富集到 23 个代谢通路，如图 6 所示。共富集到 7 条差异显著的代谢通路($P<0.05$)：淀粉和蔗糖代谢，新霉素、卡那霉素和庆大霉素生物合成，半乳糖代谢，甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢，半胱氨酸和蛋氨酸代谢，氨基酰-tRNA 生物合成，硫胺素代谢。其中注释到氨基酸类和碳水化合物类代谢通路达 6 条，进一步说明碳水化合物类和氨基酸类代谢是辣椒在 40℃热风干燥中积极响应的代谢通路，与植物细胞在逆境下通过积累氨基酸类和碳水化合物类代谢通路抵御胁迫的理论认识一致^[39]。

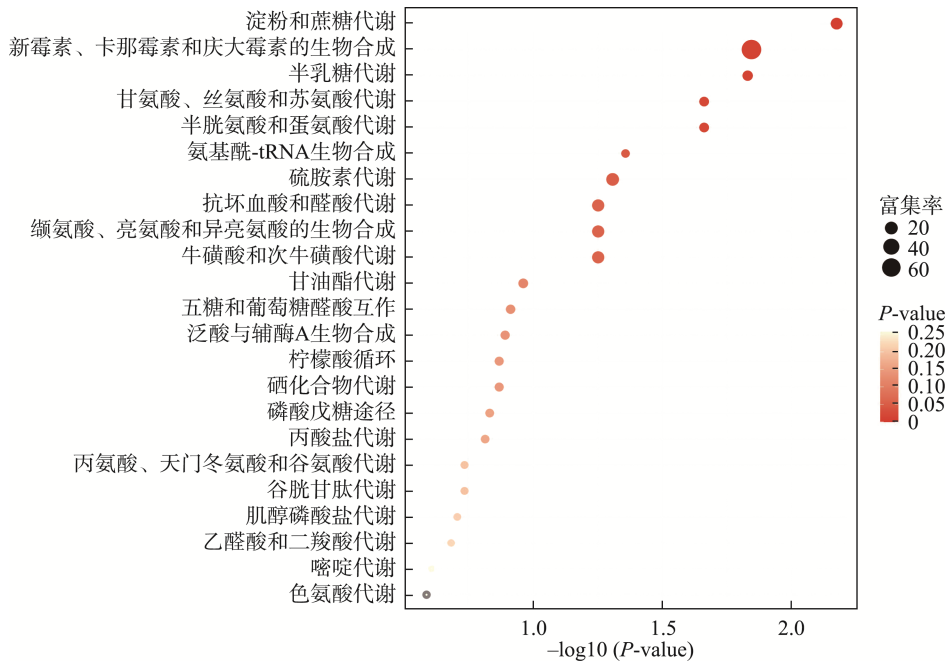


图 6 代谢通路富集分析
Fig.6 Enrichment analysis of the metabolic pathways

3 结 论

本研究分析了干燥对辣椒抗氧化活性的影响, 并通过非靶向代谢组学分析, 从分子水平上探讨了干燥过程中辣椒中主要代谢物物的变化规律, 为干辣椒品质形成机制的研究提供了参考。干燥辣椒的抗氧化活性强于新鲜辣椒。抗氧化活性物质类代谢物累积可能是干燥辣椒的抗氧化活性增强的原因。辣椒在热风干燥过程中, 氨基酸类和碳水化合物类代谢活跃, 积累焦谷氨酸、脯氨酸、天冬酰胺等大量氧化应激代谢物, 及 *L*-苏阿糖、甘露醇、2-脱氧赤藓糖醇等高渗透应激代谢物, 表明辣椒在热风干燥过程中发生水分胁迫、氧化胁迫; 并且新发现辣椒在干燥过程中可富集 GABA。但这些代谢物含量的变化对辣椒其他品质的影响还需进一步研究。如何干预代谢通路, 调控干辣椒品质, 也有进一步研究的价值。

参考文献

- [1] 杜奋澄, 许杰纯, 杨雨欣, 等. 辣椒果实类胡萝卜素的提取与测定方法研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(5): 41–48.
DU FC, XU JC, YANG YX, *et al.* Study on the extraction and determination method of carotenoids from chili pepper fruits [J]. Chin Agric Sci Bull, 2019, 35(5): 41–48
- [2] 李孟娟, 程宏, 吴睿, 等. 辣椒主要营养成分的测定与分析[J]. 农业与技术, 2023, 43(14): 18–20.
LI MJ, CHENG H, WU R, *et al.* Determination and separation of main nutritional components of pepper [J]. Agric Technol, 2023, 43(14): 18–20.
- [3] 王蜜蜜, 胡能兵, 庞丹丹, 等. 辣椒主要营养成分比较[J]. 安徽科技学院学报, 2019, 33(6): 38–42.
WANG MM, HU NB, PANG DD, *et al.* Comparison of main nutritional quality of pepper [J]. J Anhui Sci Technol Univ, 2019, 33(6): 38–42.
- [4] 吕俊丽, 李莅萍, 王国泽. 红辣椒乙醇提取物的抗氧化活性及其生物有效性研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(8): 119–125.
LV JL, LI LP, WANG GZ. Study on antioxidant activity and bioavailability of ethanol extract from red pepper [J]. Chin Food Addit, 2023, 34(8): 119–125.
- [5] XU SC, CHENG X, WU LY, *et al.* Capsaicin induces mitochondrial dysfunction and apoptosis in anaplastic thyroid carcinoma cells via TRPV1-mediated mitochondrial calcium overload [J]. Cell Signal, 2020, 75(1): 109733.
- [6] 陈夏宁, 黄菊青, 谢正露. 辣椒素的生物活性及应用研究进展[J]. 畜牧与兽医, 2022, 54(7): 133–139.
CHEN XN, HUANG JQ, XIE ZL. Research progress on biological activity and application of capsaicin [J]. Anim Husb Vet Med, 2022, 54(7): 133–139.
- [7] 郭超男, 年国芳, 徐建宗, 等. 25 种新疆主栽辣椒品种品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(12): 4051–4058.
GUO CN, NIAN GF, XU JZ, *et al.* Quality analysis of 25 kinds of main pepper varieties planted in Xinjiang [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(12): 4051–4058.
- [8] 蒋能, 汤春丽, 吴慧娟, 等. 辣椒素药理活性及其药物代谢动力学的研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2022, 34(9): 1597–1606.
JIANG N, TANG CL, WU HX, *et al.* Research progress on pharmacological activity and pharmacokinetics of capsaicin [J]. Nat Prod Res Dev, 2022, 34(9): 1597–1606.
- [9] ZHANG D, SUN X, BATTINO M, *et al.* A comparative overview on chili pepper (*Capsicum genus*) and Sichuan pepper (*Zanthoxylum genus*): From pungent spices to pharma-foods [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 117: 148–162.
- [10] 黎智华, 王恬. 辣椒红素的生物利用度、生理功能及机制研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 259–266.
LI ZH, WANG T. Research progress on bioavailability, physiological function and mechanism of capsanthin [J]. Food Sci, 2020, 41(11): 259–266.
- [11] 李丽, 辛明, 李昌宝, 等. 不同清洗方式对青椒保鲜效果的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(6): 13–16.
LI L, XIN M, LI CB, *et al.* Effect of different cleaning methods on the preservation of green pepper [J]. Food Ind, 2019, 40(6): 13–16.
- [12] 张建新. 辣椒保鲜效果的影响因素研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.
ZHANG JX. Study on the influencing factors of pepper fresh-keeping effect [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2023.
- [13] 谢瑞, 孙乐明. 辣椒干燥研究发展现状[J]. 当代农机, 2023, (1): 71–72.
XIE R, SUN LM. Current status of research and development on pepper drying [J]. Contemp Farm Mach, 2023, (1): 71–72.
- [14] 徐嘉悦, 王兴波, 彭思嘉, 等. 新疆辣椒戈壁滩自然干制过程监测及技术规程探究[J]. 中国食品学报, 2023. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.08.028
XU JY, WANG XB, PENG SJ, *et al.* Study on the monitoring and technical regulations of natural drying process of chili gobi beach in Xinjiang [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2023. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.08.028
- [15] 齐立军, 王苗, 栗永刚, 等. 不同干燥方式对鲜辣椒组分的影响研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(7): 158–164.
QI LJ, WANG M, LI YG, *et al.* Study on the effects of different drying methods on the components of fresh peppers [J]. Chin Food Addit, 2022, 33(7): 158–164.
- [16] 宋新斌, 潘树林, 吴双, 等. 白辣椒热泵干燥特性及工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2023. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033249
SONG XB, PAN SL, WU S, *et al.* Heat pump drying characteristics and process optimization of white pepper [J]. Food Ferment Ind, 2023. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033249
- [17] 袁婷婷, 李学琼, 陈厚荣. 基于几何加权法的辣椒热风干燥品质工艺优化[J]. 农产品加工, 2018, (17): 22–28.
YUAN TT, LI XQ, CHEN HR. Optimization of hot air drying quality of pepper based on geometric weighting method [J]. Farm Prod Process, 2018, (17): 22–28.
- [18] 田玉肖, 罗静红, 宋占锋, 等. 热风烘干温度对线椒和朝天椒干制品质的对比分析[J]. 中国调味品, 2023, 48(3): 90–94.
TIAN YX, LUO JH, SONG ZF, *et al.* Comparative analysis of hot air drying temperature on the drying quality of line pepper and sky pepper [J]. China Cond, 2023, 48(3): 90–94.
- [19] 张付杰, 陶欢, 易俊洁, 等. 辣椒微波热风耦合干燥模型及品质研究[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(6): 45–53.
ZHANG FJ, TAO H, YI JJ, *et al.* Study on microwave-hot air coupled drying model and quality of chili pepper [J]. Packag Food Mach, 2022, 40(6): 45–53.
- [20] 詹丽青. 不同干燥方式对辣椒产品品质的影响[J]. 特种经济动植物, 2022, 25(10): 28–30.
ZHAN LQ. Effects of different drying methods on the quality of pepper products [J]. Spec Econ Anim Plant, 2022, 25(10): 28–30.
- [21] 曹珍珍. 辣椒干燥动力学及生物活性评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
CAO ZZ. Study on drying kinetics and biological activity evaluation of pepper [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [22] 康三江, 宋娟, 张海燕, 等. 3 种干燥方式对红辣椒品质和抗氧化活性

- 的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(16): 43–52.
- KANG SJ, SONG J, ZHANG HY, *et al.* Effects of three drying methods on quality and antioxidant activity of red pepper [J]. Food Res Dev, 2021, 42(16): 43–52.
- [23] KLEVORN CM, DEAN LL. A metabolomics-based approach identifies changes in the small molecular weight compound composition of the peanut as a result of dry-roasting [J]. Food Chem, 2018, 240(2): 1193–1200.
- [24] WISHART DS. Emerging applications of metabolomics in drug discovery and precision medicine [J]. Nat Rev Drug Discov, 2016, 15(7): 473–484.
- [25] 王莹莹, 汪学德, 王东营, 等. 辣椒油脂挥发性成分分析及其抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(9): 20–24.
- WANG YY, WANG XD, WANG DY, *et al.* Analysis of volatile components and antioxidant activity of chili oleoresin [J]. China Cond, 2022, 47(9): 20–24.
- [26] 林欣, 詹森, 周湘人, 等. 油茶籽多酚提取物生物活性的研究[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(1): 108–115.
- LIN X, ZHAN M, ZHOU XR, *et al.* Study on the biological activity of polyphenol extracts from camellia seeds [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2023, 38(1): 108–115.
- [27] VIJAYALAKSHMI M, RUCKMANI K. Ferric reducing anti-oxidant power assay in plant extract [J]. Bangl J Pharmacol, 2016, 11(3): 570–572.
- [28] 何莉媛, 吴伟, 吴晓娟, 等. 米糠贮藏时间对米糠蛋白体外胃蛋白酶消化性质及其消化产物抗氧化性的影响[J]. 中国油脂, 2017, 42(11): 70–74.
- HE LY, WU W, WU XJ, *et al.* Effects of storage time of rice bran on pepsin digestibility of rice bran protein *in vitro* and antioxidant activity of its digestive products [J]. China Oils Fats, 2017, 42(11): 70–74.
- [29] 王箴言, 夏晴, 王玉, 等. 桦褐孔菌不同多糖组分的体内、外抗氧化活性[J]. 中国食品学报, 2021, 21(8): 152–158.
- WANG ZY, XIA Q, WANG Y, *et al.* Antioxidant activity of different polysaccharides from *Inonotus obliquus* *in vivo* and *in vitro* [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(8): 152–158.
- [30] GUO WD, ZHANG Y, LONG Z, *et al.* Study on the taste active compounds in Douchi using metabolomics method [J]. Food Chem, 2023, 30(412): 135343.
- [31] KIND T, WOHLGEMUTH G, LEE DY, *et al.* FiehnLib: Mass spectral and retention index libraries for metabolomics based on quadrupole and time-of-flight gas chromatography/mass spectrometry [J]. Anal Chem, 2009, 81(24): 10038–10048.
- [32] DUNN WB, BROADHURST D, BEGLEY P, *et al.* Procedures for large-scale metabolic profiling of serum and plasma using gas chromatography and liquid chromatography coupled to mass spectrometry [J]. Nat Prot, 2011, 6(7): 1060–1083.
- [33] CUI S, HUANG F, WANG J, *et al.* A proteomic analysis of cold stress responses in rice seedlings [J]. Proteomics, 2005, 5(12): 3162–3172.
- [34] 王小芳, 杨玲娟, 董晓宁, 等. 植物半胱氨酸合成及调控研究进展[J]. 植物生理学报, 2011, 47(1): 37–48.
- WANG XF, YANG LJ, DONG XN, *et al.* Research progress in plant cysteine synthesis and regulation [J]. Plant Physiol J, 2011, 47(1): 37–48.
- [35] 张宿. γ -氨基丁酸的生理作用及应用[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(18): 1–9.
- ZHANG S. γ -Physiological function and application of aminobutyric acid [J]. J Anhui Agric Sci, 2019, 47(18): 1–9.
- [36] SALAH A, ZHAN M, CAO C, *et al.* γ -Aminobutyric acid promotes chloroplast ultrastructure, antioxidant capacity, and growth of waterlogged maize seedlings [J]. Sci Rep UK, 2019, 9(1): 1–19.
- [37] 张海龙, 陈迎迎, 杨立新, 等. γ -氨基丁酸对植物生长发育和抗逆性的调节作用[J]. 植物生理学报, 2020, 56(4): 600–612.
- ZHANG HL, CHEN YY, YANG LX, *et al.* γ -Regulation of aminobutyric acid on plant growth, development and stress resistance [J]. Plant Physiol J, 2020, 56(4): 600–612.
- [38] 孙国祥, 张旭, 张成国, 等. 谷胱甘肽在动植物领域的应用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(8): 42–45.
- SUN GX, ZHANG X, ZHANG CG, *et al.* Research progress on the application of glutathione in animal and plant fields [J]. J Anhui Agric Sci, 2018, 46(8): 42–45.
- [39] DU H, WANG Z, YU W, *et al.* Differential metabolic responses of perennial grass *Cynodon transvaalensis*×*Cynodon dactylon* (C4) and *poa pratensis* (C3) to heat stress [J]. Physiol Plantarum, 2011, 141(3): 251–264.
- [40] HUANG T, JANDER G. Absciscic acid-regulated protein degradation causes osmotic stress-induced accumulation of branched-chain amino acids in *Arabidopsis thaliana* [J]. Planta, 2017, 246(4): 737–747.
- [41] 陈坤明, 宫海军, 王锁民. 植物谷胱甘肽代谢与环境胁迫[J]. 西北植物学报, 2004, (6): 1119–1130.
- CHEN KM, GONG HJ, WANG SM. Plant glutathione metabolism and environmental stress [J]. Acta Botan Boreal Occid Sin, 2004, (6): 1119–1130.
- [42] 武忠亮. 蔗糖酶在植物中的生理作用[J]. 兴义民族师范学院学报, 2010, (5): 122–124.
- WU ZL. Physiological function of sucrase in plants [J]. J Xingyi Norm Univ Nat, 2010, (5): 122–124.
- [43] BROWN PH, HU H. Phloem mobility of boron is species dependent: Evidence for phloem mobility in sorbitol-rich species [J]. Ann Bot London, 1996, 77(5): 497–506.
- [44] 潘苏峰, 吴捷, 李恺. 不同干燥方法对芦苇不同组织 GC/MS 代谢组学分析的影响[J]. 分析试验室, 2017, 36(6): 676–680.
- PAN SF, WU J, LI K. Effects of different drying methods on GC/MS metabonomic analysis of different tissues of *Phragmites australis* [J]. Chin J Anal Lab, 2017, 36(6): 676–680.
- [45] 辛邵南. 滩涂适生菊芋绿原酸合成途径相关基因响应高温与盐胁迫的机理分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- XIN SN. Analysis on the mechanism of genes related to chlorogenic acid synthesis pathway of Jerusalem artichoke suitable for growth in mudflat responding to high temperature and salt stress [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [46] 崔青青. CO₂ 加富和干旱胁迫下黄瓜叶片叶绿体蛋白质组学分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- CUI QQ. Analysis of the chloroplast proteome of cucumber leaves under elevated CO₂, concentration and drought stresses [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



王淑好, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品和食品相关产品品质控制研究。

E-mail: 568519751@qq.com



付湘晋, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为食品加工与食品代谢组学。

E-mail: drxjfu@163.com