

关东, 陈丹, 崔梦迪, 等. 不同加热温度和处理方式对灰枣活性成分和抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 113-121. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010233

GUAN Dong, CHEN Dan, CUI Mengdi, et al. Effect of Different Heating Temperatures and Treatment Methods on the Active Compounds and Antioxidant Activities of *Ziziphus Jujuba* cv. Huizao[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 113-121. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010233

· 研究与探讨 ·

不同加热温度和处理方式对灰枣活性成分和抗氧化活性的影响

关 东, 陈 丹, 崔梦迪, 黄爱云, 康淑芳, 李 梅*, 徐怀德*
(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要:为比较不同加热温度和处理方式对灰枣活性成分和抗氧化活性影响, 分别对 60 ℃ 热风干燥、80 ℃ 巴氏杀菌、110~140 ℃ 烘烤、100 ℃ 隔水蒸制及 100 ℃ 煮制灰枣的总酚、总黄酮、总原花青素、单体酚、三萜酸含量和抗氧化活性进行测定。结果表明, 灰枣经 60 ℃ 热风干燥、80 ℃ 巴氏杀菌、100 ℃ 隔水蒸制和 100 ℃ 煮制后, 其活性成分含量和抗氧化活性下降。110~140 ℃ 烘烤灰枣活性成分含量随温度升高呈现上升趋势, 经 140 ℃ 烘烤后, 其总酚、总黄酮、总原花青素和总三萜酸含量分别达到 341.3、473.8、659.3 和 560.4 mg UAE/100 g m_d。烘烤处理增强了灰枣的抗氧化活性, 经 130 ℃ 烘烤灰枣 DPPH·清除能力为 62.97 mmol TE/100 g m_d, ABTS⁺·清除能力为 47.96 mmol TE/100 g m_d。经 130 和 140 ℃ 烘烤后, 灰枣中活性成分含量较高, 抗氧化活性较强, 因此烘烤也是较为合适的灰枣加工方式。

关键词:灰枣, 热处理, 热风干燥, 烘烤, 活性成分, 抗氧化活性

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)20-0113-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010233

本文网刊:



Effect of Different Heating Temperatures and Treatment Methods on the Active Compounds and Antioxidant Activities of *Ziziphus Jujuba* cv. Huizao

GUAN Dong, CHEN Dan, CUI Mengdi, HUANG Aiyun, KANG Shufang, LI Mei*, XU Huaide*

(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Five heat treatment methods including hot-air drying at 60 ℃, pasteurization at 80 ℃, four kinds of baking (110~140 ℃), steaming at 100 ℃ and boiling at 100 ℃ were used to treat *Ziziphus jujuba* cv. Huizao. The effect of different heating temperatures and heat treatment methods on total phenol content, total flavonoid content, total procyanidin content, phenolic compounds content, triterpenic acids content and antioxidant capacities of jujube were analyzed. The results showed that the active compound contents and antioxidant activities of jujube decreased after hot-air drying at 60 ℃, pasteurization at 80 ℃, steaming at 100 ℃ and boiling at 100 ℃. And the active compound contents in baked jujube at 110~140 ℃ showed an upward trend with the increasing of temperature. After baking at 140 ℃, the contents of total phenol, total flavonoid, total procyanidin and total triterpenic acids reached 341.3, 473.8, 659.3 and 560.4 mg UAE/100 g m_d. Baking treatment enhanced the antioxidant activities of jujube. After baking at 130 ℃, the DPPH· scavenging capacity of jujube reached 62.97 mmol TE/100 g m_d, and the ABTS⁺· scavenging capacity reached 47.96 mmol TE/100 g m_d. After baking at 130 and 140 ℃, the contents of active compound in jujube were higher than other groups and the antioxidant activities were stronger than other groups, so baking would be a suitable heat treatment methods for *Ziziphus jujuba* cv.

收稿日期: 2022-01-25

基金项目: 陕西省农业产业化发展项目: 核桃、红枣加工关键技术转化应用 (陕农计财 [2020]44 号); 陕西省重点研发计划 (2019NY-108)。

作者简介: 关东 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工与贮藏, E-mail: 17733827659@163.com。

* 通信作者: 李梅 (1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬加工与贮藏, E-mail: plum.p@163.com。

徐怀德 (1964-), 男, 本科, 教授, 研究方向: 饮料加工、果品蔬菜贮藏与加工、天然产物提取, E-mail: xuhuaide@aliyun.com。

Huizao processing.

Key words: *Ziziphus jujuba* cv. Huizao; heat treatment; hot-air drying; baking; active compound; antioxidant capacity

我国是红枣主产国,主要以干制枣销售和食用。灰枣(*Ziziphus jujuba* cv. Huizao)是干制红枣的主要品种之一,原产于河南新郑,上世纪引种至新疆后已成为新疆红枣的主栽品种,新疆成为我国灰枣的主产地^[1]。灰枣肉质细腻、香气浓郁、可食率高^[2],富含碳水化合物、脂肪、抗坏血酸、氨基酸和环磷酸腺苷^[3-4],还含有大量酚类化合物^[5]和钙、铁、钾等元素^[6],具有抗氧化、抗肿瘤、抗癫痫、抗失眠和神经保护作用等功效^[7],有很高的食用和药用价值。

红枣的干制温度通常为 60 ℃ 左右,但干制红枣食用时也常采用烘烤、蒸制及煮制加工等二次加工方式,如将干制红枣加入蛋糕配方烘烤制成枣糕,或将干制红枣研磨后冲泡的枣茶。红枣作为原料、馅料在烘烤类月饼、糕点等食品中大量应用。红枣经烘烤后香气浓郁,具有特色的烘烤风味^[8]。吕珊等^[9]采用 GC-MS-O 技术对 80~160 ℃ 烘干婆枣的香气成分和色泽变化进行分析鉴定,对研究枣香气的形成途径,香气的优化、富集和强化及焦香风味大枣香精的研发提供了科学依据。Song 等^[10]采用 GC-MS、MOS 电子鼻和闪光电子鼻技术对热泵干燥、红外干燥、真空干燥、真空冷冻干燥和瞬时压降干燥处理后骏枣的挥发性成分进行测定,确定骏枣的主要香气成分为酸类物质。此外,红枣经干制后煮制冲泡的枣茶产品富含多种营养成分、具有浓郁香气,深受消费者的喜爱。

灰枣在干制后食用,因此目前的研究多针对不同干燥方式后灰枣营养成分、活性成分和抗氧化活性进行对比,王浩等^[11]分别对 80 ℃ 热风干燥、80 ℃ 真空干燥、真空微波干燥和真空冷冻干燥处理的灰枣片进行感官评价及多酚、黄酮、氨基酸态氮、总酸、还原糖和总糖含量测定。张明等^[1]采用微波-热风联合干燥技术对灰枣进行干燥处理,以褐变度为指标确定最适联合干燥工艺。但目前关于不同加热温度和处理方式处理后灰枣活性成分含量及抗氧化活性变化的报道较少。

考虑灰枣加工可能采用的不同加热方式,比较不同加热温度和处理方式对灰枣主要活性成分和抗氧化活性的影响具有研究意义。本文以灰枣为原料,采用热风干燥、巴氏杀菌、烘烤、蒸制和煮制五种热处理方式,比较不同加热温度和处理方式对灰枣主要成分和抗氧化活性的影响,以期对相关食品的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

灰枣(含水率 22%) 购于陕西省咸阳市杨陵区好又多超市,产地新疆若羌;甲醇、乙酸、硫酸、高氯

酸、福林-酚试剂 分析纯,成都科隆化学品有限公司;碳酸钠、氢氧化钠、六水合氯化铝、过硫酸钾、无水乙酸钠、磷酸二氢钾 分析纯,广东光华科技股份有限公司;1,1-二苯基-2-苦肟基(DPPH)、2,2'-联氮-双 3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS)、2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ)、6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸(Trolox)、没食子酸、芦丁、阿魏酸、对香豆酸、绿原酸、槲皮素、儿茶素、表儿茶素、白桦脂酸、熊果酸、齐墩果酸 标准品,北京索莱宝科技有限公司。

米家电烤箱 小米科技有限责任公司;DHG-9070A 型电热恒温鼓风干燥箱 上海精宏实验设备有限公司;FD-5 型真空冷冻干燥机 美国西蒙公司;UV-1780 型紫外-可见分光光度计、LC-2030 Plus 型高效液相色谱仪 日本岛津公司。

1.2 实验方法

1.2.1 灰枣的热处理 选取颜色均匀、质地饱满、大小相似的灰枣,分别采用热风干燥、巴氏杀菌、烘烤、蒸制和煮制处理,得到各热处理灰枣样品,以未热处理的灰枣作为对照。具体热处理条件如下:

热风干燥:60 ℃ 下干燥,至灰枣含水率达到 10%±2%;巴氏杀菌:80 ℃ 下杀菌 20 min;烘烤:110、120、130、140 ℃ 烘烤灰枣 20 min;蒸制:100 ℃ 隔水蒸灰枣 20 min;煮制:100 ℃ 煮灰枣 20 min。

1.2.2 活性成分提取液的制备 各灰枣样品经 -80 ℃ 预冻 12 h 后,使用真空冷冻干燥机于 -50 ℃ 冻干,粉碎后过 50 目筛。准确称取 1.0 g 各样品,分别加入 50 mL 80% 甲醇溶液,室温下以 360 W 超声处理 30 min,提取液经 10000 g 离心 20 min,取上清液于 4 ℃ 冰箱条件下保存,用于后续指标的测定。

1.2.3 总酚含量测定 参考蒲云峰等^[12]方法并做修改,将 200 μL 各提取液与 0.20 mL 福林-酚试剂混合,静置 5 min 后加入 0.6 mL 饱和 Na₂CO₃ 溶液,去离子水定容至 10 mL,黑暗中放置 1 h,于 760 nm 处测定溶液吸光值,标准曲线 $Y=1.5442X+0.1057$ ($R^2=0.9986$),计算总酚含量,结果以没食子酸计(mg GAE/100 g m_d)。

1.2.4 总黄酮含量测定 参考 Xie 等^[13]方法并做修改,将 0.5 mL 各提取液与 0.5 mL 5% NaNO₂ 溶液、1 mL 10% AlCl₃ 溶液和 2 mL 1 mol/L NaOH 溶液混合,于 510 nm 处测定溶液吸光值,标准曲线 $Y=0.942X+0.0749$ ($R^2=0.9975$),计算总黄酮含量,结果以芦丁当量计(mg RE/100 g m_d)。

1.2.5 总原花青素含量测定 参考 Kou 等^[14]方法,将 0.5 mL 各提取液与 2.5 mL 30% 硫酸-乙酸溶液和等量 1% 香草醛-乙酸溶液混合,于 30 ℃ 水浴加热 15 min,于 500 nm 处测定溶液吸光值,标准曲线

$Y=7.8606X+0.0951(R^2=0.9994)$, 计算总原花青素含量, 结果以儿茶素当量计($\text{mg CE}/100 \text{ g m}_d$)。

1.2.6 单体酚含量测定 参考刘杰超等^[15]方法并做修改, 将 50 mL 各提取液经旋转蒸发仪减压蒸干后, 以色谱级甲醇溶解并定容至 10 mL, 过 0.45 μm 滤膜后用于高效液相色谱 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) 分析。使用外标法通过峰保留时间定性分析、通过峰面积结合标准曲线定量分析 HPLC 结果, 结果以 $\text{mg}/\text{kg m}_d$ 计。标准曲线: 阿魏酸 $Y=5\times 10^7X+859.2(R^2=0.9992)$; 对香豆酸 $Y=6\times 10^7X+339.3(R^2=0.9998)$; 绿原酸 $Y=3\times 10^8X-9461.6(R^2=0.9997)$; 没食子酸 $Y=2\times 10^7X+428.6(R^2=0.9995)$; 槲皮素: $Y=4\times 10^8X-12638(R^2=0.9997)$; 芦丁 $Y=2\times 10^7X+2721.1(R^2=0.9996)$; 儿茶素 $Y=3\times 10^6X-498.8(R^2=0.9994)$; 表儿茶素 $Y=2\times 10^6X+516.2(R^2=0.9998)$ 。

HPLC 条件参考 Morais 等^[16]的方法并做修改: 色谱柱 Waters C_{18} , 流动相 A 为 1% 甲酸溶液, 流动相 B 为乙腈, 流速 1 mL/min, 时间程序: 0~5 min, 5% B; 5~25 min, 12% B; 25~40 min, 30% B; 40~50 min, 45% B; 50~60 min, 5% B。柱温 30 $^{\circ}\text{C}$, 检测波长 280 nm, 进样量 10 μL 。

1.2.7 总三萜酸含量测定 总三萜酸含量测定方法参考 Kou 等^[14]。将 0.5 mL 各提取液与 1 mL 高氯酸和 0.2 mL 5% 香草醛-乙酸溶液混合, 于 60 $^{\circ}\text{C}$ 水浴加热 10 min, 冷却至室温后加入 5 mL 乙酸, 室温静置 15 min, 于 548 nm 处测定溶液吸光值, 标准曲线 $Y=0.717X+0.0376(R^2=0.9995)$, 计算总三萜酸含量, 结果以熊果酸当量计($\text{mg UAE}/100 \text{ g m}_d$)。

1.2.8 三萜酸单体含量测定 三萜酸单体含量采用 HPLC 法测定, 参考高娅等^[17]并做修改, 将 50 mL 各提取液经旋转蒸发仪减压蒸干后, 以超纯水溶解并定容至 10 mL, 过 0.45 μm 滤膜后用于 HPLC 分析。使用外标法通过峰保留时间峰保留时间定性分析、通过峰面积结合标准曲线定量分析 HPLC 结果, 结果以 $\text{mg}/\text{kg m}_d$ 计。标准曲线: 白桦脂酸 $Y=5\times 10^6X+6599.6(R^2=0.9992)$; 熊果酸 $Y=9\times 10^6X+303.72(R^2=0.9996)$; 齐墩果酸 $Y=1\times 10^7X+5958.9(R^2=0.9994)$ 。

HPLC 条件: 色谱柱 Waters C_{18} , 流动相为甲醇-0.2% 磷酸溶液 (90:10, V/V), 流速 0.6 mL/min, 柱温 30 $^{\circ}\text{C}$, 检测波长 210 nm, 进样量 10 μL 。

1.2.9 抗氧化活性测定

1.2.9.1 DPPH·清除活性测定 参考 He 等^[18]方法, 将 0.1 mL 各提取液与 3 mL 0.1 mmol/L DPPH-甲醇溶液混合, 混合溶液避光反应 60 min 后, 于 517 nm 处测定溶液吸光值, 标准曲线 $Y=0.5485X+0.0468(R^2=0.9962)$, 结果以 Trolox 当量计($\text{mmol TE}/100 \text{ g m}_d$)。

1.2.9.2 ABTS $^+$ 清除活性测定 参考 Ozgen 等^[19]方法, 将 10 mL 7 mmol/L ABTS $^+$ 溶液与等量 2.45 mmol/L

过硫酸钾溶液混合, 混合溶液于室温下避光反应 16 h, 直到达到稳定氧化状态。使用 80% 乙醇溶液稀释 ABTS $^+$ 溶液, 至溶液于 734 nm 处吸光值为 0.700 ± 0.01 。将 50 μL 各提取液与 3 mL ABTS $^+$ 溶液混合, 反应 10 min 后, 于 734 nm 处测定溶液吸光值, 标准曲线 $Y=1.7796X+0.0535(R^2=0.9988)$, 结果以 Trolox 当量计($\text{mmol TE}/100 \text{ g m}_d$)。

1.2.9.3 Fe^{3+} 还原能力 (Ferric ion reducing antioxidant power, FRAP) 测定 参考 Gao 等^[20]方法, 将 0.3 mol/L 乙酸缓冲液 (pH3.6)、20 mmol/L FeCl_3 溶液和 10 mmol/L TPTZ 溶液以体积比 10:1:1 混合后, 混合溶液 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴加热 30 min, 得到反应试剂。将 2.5 mL 各提取液与 1.5 mL 反应试剂混合, 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴加热 30 min, 于 593 nm 处测定溶液吸光值, 标准曲线 $Y=25.553X+0.1046(R^2=0.9992)$, 结果以 Trolox 当量计($\text{mmol TE}/100 \text{ g m}_d$)。

1.3 数据处理

每组实验重复三次, 结果以平均值 $\pm$ 标准偏差表示, 使用 SPSS 18 软件进行方差分析和显著性分析, $P<0.05$ 表示差异性显著。

2 结果与分析

2.1 不同加热温度和处理方式对灰枣总酚含量的影响

酚类物质具有抗氧化活性, 总酚含量是评价枣果质量的重要指标之一。由图 1 可知, 对照组总酚含量为 261.8 mg GAE/100 g m_d 。热风干燥后灰枣总酚含量为 206.08 mg GAE/100 g m_d , 出现下降的原因可能是较长的干燥时间导致了多酚的损耗^[21]。灰枣经巴氏杀菌、蒸制和煮制后, 其总酚含量降低, 原因是酚类化合物溶出后随水分流失。经 120~140 $^{\circ}\text{C}$ 烘烤后, 灰枣总酚含量与对照相比分别增加 12.8%、10.3% 和 30.4%, 经 140 $^{\circ}\text{C}$ 烘烤处理灰枣总酚含量达到最高 (341.3 mg GAE/100 g m_d)。烘烤灰枣的总酚含量显著 ($P<0.05$) 高于热风干燥处理组, 原因主要是烘烤时间短于干燥时间, 减少了酚类化合物与多酚

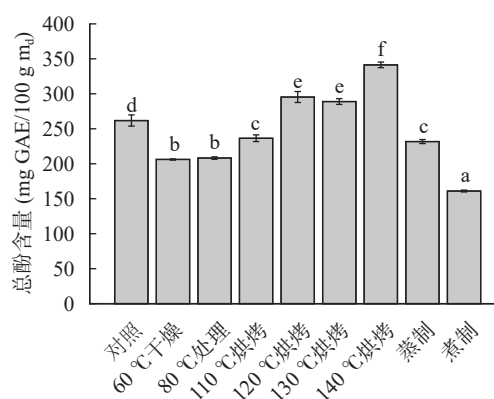


图 1 不同加热温度和处理方式对灰枣总酚含量影响

Fig.1 Effects of different heating temperatures and treatment methods on total phenol content of *Ziziphus jujuba* cv. Huizao
注: 图中标注的不同小写字母表示差异性显著 ($P<0.05$); 图 2~图 5 同。

氧化酶和氧气的接触时间。当烘烤温度高于 120 ℃ 时, 与对照组相比, 灰枣总酚含量显著升高($P<0.05$), 这是由于热诱导作用导致细胞壁和细胞破裂, 加热过程的软化效应提高了酚类物质的提取率, 热处理促进酚类的水解并将其从食品基质中释放出来^[22]。综上所述, 灰枣经热风干燥、巴氏杀菌、蒸制和煮制后总酚含量显著降低($P<0.05$), 120~140 ℃ 烘烤处理后, 灰枣总酚含量显著升高($P<0.05$), 因此烘烤是一种较为合适的灰枣热处理方式。

2.2 不同加热温度和处理方式对灰枣总黄酮含量的影响

总黄酮含量是水果的重要特征, 因其具有抗氧化、抗炎和抗癌活性, 能对人类健康产生积极影响。由图 2 可知, 对照组灰枣总黄酮含量为 362.3 mg RE/100 g m_d , 灰枣经 140 ℃ 烘烤处理后总黄酮含量达到最高(473.8 mg RE/100 g m_d)。灰枣经烘烤后, 随着温度升高, 其总酚、总黄酮含量升高, 原因可能是热处理使得灰枣中化合物发生反应产生酚类化合物, 同时促进了多酚类大分子化合物的分解^[11]。此外, 热处理使得灰枣中多酚氧化酶失活, 阻止酚类物质参与褐变反应, 有利于酚类化合物的保留^[23]。蒸制、煮制灰枣总酚和总黄酮含量降低, 这与多酚类、黄酮类化合物的溶解以及加热和压力条件下形成酚类-蛋白质复合物有关^[24]。综上所述, 总黄酮含量的测定结果与总酚测定结果相似, 140 ℃ 烘烤处理灰枣总黄酮含量最高, 烘烤是一种较为合适的灰枣热处理方式。

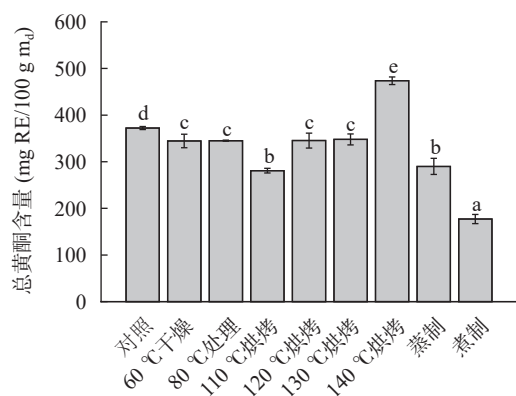


图 2 不同加热温度和处理方式对灰枣总黄酮含量影响
Fig.2 Effects of different heating temperatures and treatment methods on total flavonoid content of *Ziziphus jujuba* cv. Huizao

2.3 不同加热温度和处理方式对灰枣总原花青素含量的影响

原花青素是一类由黄烷-3-醇结构缩合形成的物质, 根据聚合度的不同可以分为单体、低聚和高聚原花青素, 其中主要为二聚体, 食源性原花青素可以在日常生活中被人们所摄取, 具有抗氧化活性和降血糖等生物活性^[25]。由图 3 可知, 对照组灰枣总原花青素含量为 294.4 mg CE/100 g m_d 。经热风干燥、巴氏杀菌、110 ℃ 烘烤、120 ℃ 烘烤、蒸制及煮制处理后, 灰枣总原花青素含量无显著变化($P>0.05$)。经

130 和 140 ℃ 烘烤处理后, 灰枣总原花青素含量与对照相比显著升高($P<0.05$), 总原花青素含量分别达到 652.1 和 659.3 mg CE/100 g m_d , 这可能是由于热处理过程中伴随着原花青素的解聚作用及其向基本结构的转化, 使得热处理灰枣中原花青素二聚体、三聚体、四聚体的含量升高^[26]。测定结果表明 130 和 140 ℃ 烘烤处理后灰枣总原花青素含量最高, 是较为合适的热处理方式。

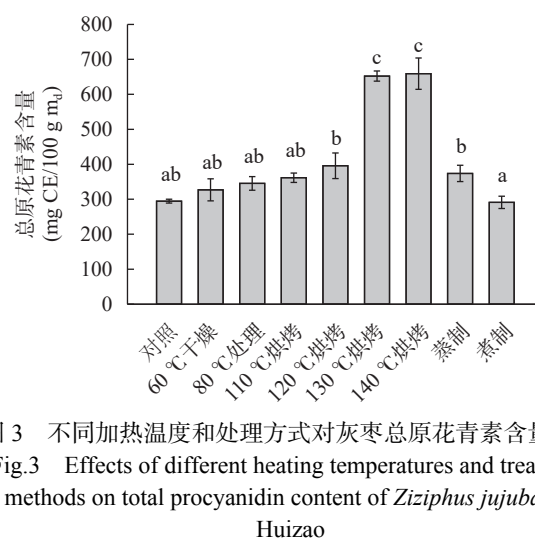


图 3 不同加热温度和处理方式对灰枣总原花青素含量影响
Fig.3 Effects of different heating temperatures and treatment methods on total procyanidin content of *Ziziphus jujuba* cv. Huizao

2.4 不同加热温度和处理方式对灰枣单体酚含量的影响

选择酚类化合物含量较高的热处理方法对人体健康具有重要意义。实验比较了对照组及不同加热温度和处理方式灰枣的八种单体酚含量, 由表 1 可知, 灰枣中含有的主要单体酚包括阿魏酸、芦丁、没食子酸、儿茶素、表儿茶素, 这与前人的研究^[14,27]结果相同。

对照组阿魏酸含量为 4.02 mg/kg m_d , 热风干燥后含量升高至 5.83 mg/kg m_d , 经过巴氏杀菌、蒸制和煮制的灰枣阿魏酸含量分别下降 45.8%、10.0% 和 48.0%, 这可能与酚类化合物随水分的流失有关。灰枣经烘烤后, 其阿魏酸含量随烘烤温度升高而降低, 110~140 ℃ 烘烤后含量分别降低 37.1%、65.7%、70.0% 和 75.4%, 表明 110 ℃ 或更高的烘烤温度导致阿魏酸极大损耗。对照组对香豆酸含量为 1.82 mg/kg m_d , 经过热风干燥、巴氏杀菌、烘烤、蒸制和煮制后含量均显著降低($P<0.05$), 经 130 ℃ 烘烤和煮制后对香豆酸含量最低, 仅为 0.74 和 0.75 mg/kg m_d 。在煮制灰枣未检测出对香豆酸。对照组绿原酸含量为 0.80 mg/kg m_d , 热风干燥后其含量显著增加($P<0.05$)至 0.90 mg/kg m_d , 巴氏杀菌后显著增加($P<0.05$)至 0.88 mg/kg m_d 。经 110~140 ℃ 烘烤后, 绿原酸含量分别为 0.70、0.87、0.87、0.90 mg/kg m_d , 当烘烤温度高于 120 ℃ 后含量无显著变化($P>0.05$)。经蒸制、煮制后, 绿原酸含量降低, 为 0.64 和 0.52 mg/kg m_d 。对照组没食子酸含量为 6.42 mg/kg m_d , 热风干燥后含

表 1 不同加热温度和处理方式对灰枣单体酚含量变化影响

Table 1 Effects of different heating temperatures and treatment methods on content of phenolic compounds of *Ziziphus jujuba* cv. Huizao

热处理方式	单体酚含量(mg/kg m _d)							
	阿魏酸	对香豆酸	绿原酸	没食子酸	槲皮素	芦丁	儿茶素	表儿茶素
对照	4.02±0.045 ^d	1.82±0.060 ^d	0.80±0.005 ^d	6.42±0.191 ^b	0.63±0.002 ^b	32.20±0.851 ^d	14.15±4.023 ^{cd}	6.11±0.418 ^{cd}
60 ℃干燥	5.83±0.009 ^e	1.57±0.100 ^c	0.90±0.026 ^c	5.77±0.121 ^b	0.72±0.017 ^{cd}	43.95±3.823 ^e	14.94±0.372 ^d	4.25±0.755 ^{abc}
80 ℃处理	2.18±0.076 ^{cd}	1.49±0.152 ^c	0.88±0.004 ^e	6.51±0.209 ^b	0.63±0.016 ^b	27.45±3.096 ^c	13.55±0.137 ^{cd}	2.17±0.634 ^a
110 ℃烘烤	2.53±0.070 ^{abc}	0.80±0.125 ^a	0.70±0.025 ^c	6.44±0.181 ^b	0.52±0.012 ^a	26.25±1.358 ^c	9.61±0.217 ^b	6.35±0.323 ^{cd}
120 ℃烘烤	1.38±0.072 ^a	1.22±0.013 ^b	0.87±0.041 ^e	9.68±0.332 ^c	0.62±0.018 ^b	21.67±2.468 ^b	10.93±0.130 ^{bc}	9.66±0.713 ^e
130 ℃烘烤	1.21±0.118 ^a	0.74±0.097 ^a	0.87±0.042 ^e	15.89±3.346 ^d	0.68±0.005 ^{cd}	14.07±0.293 ^a	21.27±0.060 ^e	7.33±0.215 ^{de}
140 ℃烘烤	0.99±0.102 ^a	0.87±0.063 ^a	0.90±0.007 ^c	19.46±0.623 ^c	0.78±0.014 ^d	11.50±1.043 ^a	25.62±3.764 ^f	3.36±0.023 ^{ab}
蒸制	3.81±0.060 ^{cd}	0.75±0.073 ^a	0.64±0.011 ^b	3.98±0.699 ^b	0.69±0.008 ^{bc}	20.44±0.757 ^b	9.23±1.363 ^b	5.27±1.120 ^{bc}
煮制	2.09±0.036 ^{ab}	ND	0.52±0.014 ^a	0.65±0.106 ^a	0.54±0.061 ^a	12.38±0.107 ^a	5.23±0.326 ^a	2.58±0.200 ^a

注:表中同一列数据标注的不同小写字母表示差异性显著($P<0.05$),“ND”表示未检出;表2同。

量为 5.77 mg/kg m_d,巴氏杀菌后含量为 6.51 mg/kg m_d。经 110~140 ℃ 烘烤后,没食子酸含量分别为 6.44、9.68、15.89 和 19.46 mg/kg m_d,没食子酸含量呈现随烘烤温度升高而升高的变化趋势。

对照组槲皮素含量为 0.63 mg/kg m_d,热风干燥后其含量显著升高($P<0.05$)至 0.72 mg/kg m_d,原因可能是热处理促进了果皮中细胞的破裂和酚类化合物的释放^[22]。经 110~140 ℃ 烘烤后,槲皮素含量升高,含量分别为 0.52、0.62、0.68 和 0.78 mg/kg m_d。经蒸制、煮制后,槲皮素含量分别为 0.69 和 0.54 mg/kg m_d。对照组芦丁含量为 32.20 mg/kg m_d,经巴氏杀菌、烘烤、蒸制和煮制后含量均显著降低($P<0.05$),经 110~140 ℃ 烘烤后,芦丁含量分别为 26.25、21.67、14.07 和 11.50 mg/kg m_d,呈现随烘烤温度升高而降低的变化趋势,芦丁含量在烘烤后显著降低($P<0.05$),原因是高温烘烤导致酚类物质的损耗。对照组儿茶素含量为 14.15 mg/kg m_d,经热风干燥和巴氏杀菌后含量无显著性差异($P>0.05$)。经 110~140 ℃ 烘烤后,儿茶素含量分别为 9.61、10.93、21.27 和 25.62 mg/kg m_d,儿茶素含量呈现随烘烤温度升高而升高的变化趋势。灰枣经蒸制、煮制后,儿茶素含量分别减少 34.8% 和 63.0%。对照组表儿茶素含量为 6.11 mg/kg m_d。灰枣在经过热风干燥、巴氏杀菌、蒸制和煮制后,表儿茶素含量分别为 4.25、2.17、5.27 和 2.58 mg/kg m_d。经 110~140 ℃ 烘烤后,表儿茶素含量分别为 6.35、9.66、7.33 和 3.36 mg/kg m_d,随着烘烤温度升高,表儿茶素含量呈现先升高后降低的变化趋势。

不同加热温度和处理方式对酚类化合物含量存在影响。热风干燥后灰枣阿魏酸、绿原酸、槲皮素和芦丁含量升高,对香豆酸、没食子酸和表儿茶素含量降低,儿茶素含量无显著变化($P>0.05$)。没食子酸和表儿茶素的含量变化与前人报道^[28] 相同。Gao 等^[19] 研究指出,红枣经热风干燥后阿魏酸和芦丁含量降低,经过自然晒干的红枣阿魏酸含量升高,这与本研究的阿魏酸测定结果出现不同。巴氏杀菌后灰枣阿

魏酸、对香豆酸、芦丁和表儿茶素含量降低,绿原酸含量升高,没食子酸、槲皮素和儿茶素含量无显著变化($P>0.05$)。灰枣经烘烤后,阿魏酸、对香豆酸和芦丁含量降低,绿原酸、没食子酸、槲皮素、儿茶素和表儿茶素含量升高,含量升高的原因可能是促进了其他酚类物质的转化^[27]。蒸制灰枣除阿魏酸和槲皮素含量无显著变化($P>0.05$)外,其他各单体酚含量均降低。煮制导致各单体酚含量均降低。各热处理组中香豆酸含量均下降,在煮制灰枣中未检出。酚类化合物主要以结合形式存在,与细胞壁结构相连,热处理有利于部分结合酚类化合物的释放^[29]。

2.5 不同加热温度和处理方式对灰枣总三萜酸含量的影响

三萜酸类物质具有抗氧化、抗菌消炎、保护肝脏和抑制恶性肿瘤细胞生长等功效^[17],由图 4 可知,对照组灰枣总三萜酸含量为 450.9 mg UAE/100 g m_d。灰枣经 60 ℃ 热风干燥后总三萜酸含量达到最高,达到 611.3 mg UAE/100 g m_d,经巴氏杀菌、烘烤和蒸制后的灰枣总三萜酸含量同样显著升高($P<0.05$),这在一定温度范围内与灰枣中其他物质结合的三萜酸在酶的作用下发生解离有关^[30]。经 110~140 ℃ 烘烤后,灰枣总三萜酸含量与对照相比分别增加了 6.3%、14.6%、24.3% 和 18.6%,经 130 ℃ 烘烤处理灰枣总三萜酸含量为 560.4 mg UAE/100 g m_d。经 140 ℃ 烘烤后三萜酸含量降低,原因可能是过高的加热温度破坏相关酶的结构并使其失活^[29]。三萜类物质在煮制过程中因溶于热水发生流失,因此煮制灰枣总三萜酸含量显著低于($P<0.05$)对照组及其它热处理组。综上所述,热风干燥、巴氏杀菌、烘烤和蒸制处理均能够促进结合三萜酸的解离和总三萜酸含量的升高,烘烤灰枣中 130 ℃ 处理总三萜酸含量最高。

2.6 不同加热温度和处理方式对灰枣三萜酸单体含量的影响

枣中所含三萜酸化合物主要为白桦脂酸、熊果

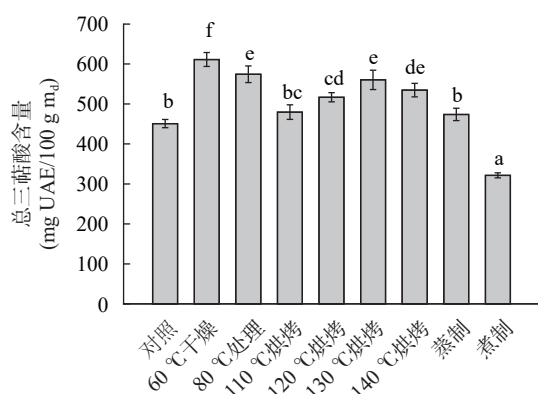


图4 不同加热温度和处理方式对灰枣总三萜酸含量影响

Fig.4 Effects of different heating temperatures and treatment methods on total triterpenic acid content of *Ziziphus jujuba* cv. Huizao

酸和齐墩果酸,且其中以白桦脂酸含量较高^[31]。不同加热温度和处理方式灰枣中三种三萜酸单体含量如表2所示。对照组白桦脂酸含量为251.65 mg/kg m_d ,熊果酸含量为48.39 mg/kg m_d ,齐墩果酸含量为3.11 mg/kg m_d 。与对照组相比,灰枣经热风干燥、巴氏杀菌、烘烤和蒸制后,三种三萜酸单体含量均显著升高($P<0.05$),其中经60 °C热风干燥后白桦脂酸和熊果酸含量达到最高,分别为534.39和83.59 mg/kg m_d 。煮制灰枣三萜酸单体含量均显著降低($P<0.05$)。烘烤灰枣中三种三萜酸单体含量随温度升高呈现先增加后降低的变化趋势,130 °C烘烤灰枣白桦脂酸含量为465.66 mg/kg m_d ,熊果酸含量为79.41 mg/kg m_d ,齐墩果酸含量为5.19 mg/kg m_d 。不同加热温度和处理方式对各三萜酸单体含量的影响与总三萜酸测定结果呈现相同变化的趋势。

表2 不同加热温度和处理方式对灰枣三萜酸单体含量影响
Table 2 Effects of different heating temperatures and treatment methods on triterpenic acids contents of *Ziziphus jujuba* cv. Huizao

热处理方式	白桦脂酸含量 (mg/kg m_d)	熊果酸含量 (mg/kg m_d)	齐墩果酸含量 (mg/kg m_d)
对照	251.65±6.15 ^b	48.39±1.66 ^b	3.11±0.07 ^c
60 °C干燥	534.39±3.42 ^h	83.59±0.24 ^e	4.16±0.11 ^d
80 °C处理	464.10±3.92 ^f	71.21±0.56 ^d	4.02±0.12 ^d
110 °C烘烤	350.60±6.38 ^c	64.18±1.77 ^c	4.11±0.28 ^d
120 °C烘烤	445.86±3.88 ^d	74.00±1.57 ^{de}	4.54±0.05 ^e
130 °C烘烤	465.66±1.89 ^{ef}	79.41±2.12 ^f	5.19±0.09 ^f
140 °C烘烤	449.83±7.06 ^{de}	76.58±4.52 ^{ef}	4.09±0.15 ^d
蒸制	443.93±3.80 ^e	62.02±3.23 ^c	2.42±0.09 ^b
煮制	136.25±1.76 ^a	37.95±3.37 ^a	1.70±0.05 ^a

2.7 不同加热温度和处理方式对灰枣抗氧化活性的影响

由图5A可知,对照组 DPPH·清除活性为53.40 mmol TE/100 g m_d 。130 °C烘烤处理后灰枣 DPPH·清除活性最强,达到62.97 mmol TE/100 g m_d ,经130 °C烘烤处理灰枣的 DPPH·清除活性最强,原因

是灰枣经130 °C烘烤后酚类、黄酮和原花青素含量较高。热风干燥、巴氏杀菌、蒸制和煮制灰枣 DPPH·清除活性显著下降($P<0.05$),煮制灰枣 DPPH·清除活性最低(25.76 mmol TE/100 g m_d),主要原因为灰枣酚类和黄酮类物质保留率的降低导致。

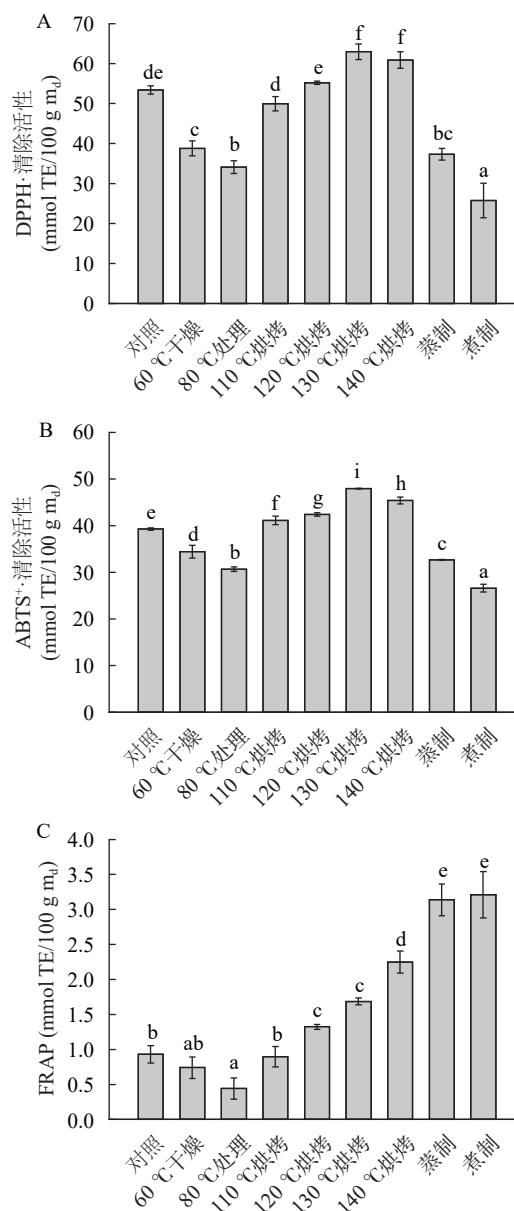


图5 不同加热温度和处理方式对灰枣抗氧化活性影响

Fig.5 Effects of different heating temperatures and treatment methods on antioxidant activities of *Ziziphus jujuba* cv. Huizao

由图5B可知,对照组 ABTS·清除活性为39.28 mmol TE/100 g m_d 。灰枣经烘烤处理后 ABTS·清除活性增强,经130 °C烘烤处理后灰枣 ABTS·清除活性最强,达到47.96 mmol TE/100 g m_d ,这同样与其较高的酚类、黄酮和原花青素含量有关。热风干燥、巴氏杀菌、蒸制和煮制灰枣 ABTS·清除活性显著下降($P<0.05$),煮制灰枣 ABTS·清除活性最低(26.60 mmol TE/100 g m_d),这与酚类和黄酮类物质的较高的降解率有关。

由图5C可知,对照组 Fe^{3+} 还原能力为0.93 mmol

TE/100g m_d。灰枣经热风干燥和 110 ℃ 烘烤后 Fe³⁺还原能力与对照相比无显著变化($P>0.05$), 经 120~140 ℃ 烘烤处理后 Fe³⁺还原能力增强, 其中经 140 ℃ 烘烤处理后灰枣 Fe³⁺还原能力最强, 达到 2.25 mmol TE/100 g m_d。巴氏杀菌后灰枣 Fe³⁺还原能力最低, 仅为 0.44 mmol TE/100g m_d。Fe³⁺还原能力测定结果与 DPPH·和 ABTS⁺清除活性测定结果不同, 原因可能是不同抗氧化活性测定方法原理不同。

烘烤灰枣具有较强的抗氧化活性同样与美拉德反应生成具有抗氧化活性的中间产物有关, 美拉德反应的末期阶段, 多羰基不饱和化合物进行裂解反应和缩合聚合反应, 产物进一步经过缩合聚合反应形成复杂的类黑精物质, 其中低分子量类黑精化合物具有较强的自由基清除活性^[32], 原因是其具有负电荷性质, 使其能够螯合过渡金属^[33]。综上所述, 热风干燥、巴氏杀菌、烘烤、蒸制和煮制各热处理方式均对灰枣抗氧化活性具有显著影响($P<0.05$), 烘烤处理均能够提升灰枣的抗氧化活性。经 130 ℃ 烘烤处理的灰枣具有较强的抗氧化活性。与对照相比, 煮制灰枣的 DPPH·和 ABTS⁺清除活性显著降低($P<0.05$), 但 Fe³⁺还原能力显著升高($P<0.05$)。灰枣经过干燥、巴氏杀菌、蒸制和煮制灰枣 DPPH·和 ABTS⁺清除活性显著降低($P<0.05$), 测定结果与总酚、总黄酮含量的变化趋势相同。

2.8 灰枣活性成分含量和抗氧化活性之间相关性分析

由表 3 可知, 灰枣中原花青素含量与 DPPH·和 ABTS⁺清除活性之间均具有显著相关性(DPPH· $R^2=0.725$, $P<0.05$; ABTS⁺· $R^2=0.760$, $P<0.05$), 这与 Min 等^[34]的研究结果相同, 原花青素是一种高效的天然抗氧化剂。多酚具有抗氧化活性, 相关性分析结

果表明灰枣总酚、总黄酮含量与 DPPH·清除活性之间具有显著相关性(总酚 $R^2=0.924$, $P<0.01$; 总黄酮 $R^2=0.670$, $P<0.05$), 总酚含量同时与 ABTS⁺清除活性之间具有极显著相关性($R^2=0.894$, $P<0.01$), 这与前人的研究^[35-36]结果一致。与 DPPH·清除活性存在显著相关性的各单体酚包括没食子酸($R^2=0.849$, $P<0.01$)和儿茶素($R^2=0.721$, $P<0.05$); 与 ABTS⁺清除活性存在显著相关性的各单体酚包括没食子酸($R^2=0.855$, $P<0.01$)和儿茶素($R^2=0.712$, $P<0.05$)。三萜酸类物质同样具有抗氧化活性, 由相关性分析结果可知, 齐墩果酸含量与 DPPH·和 ABTS⁺清除活性均具有显著相关性(DPPH· $R^2=0.712$, $P<0.05$; ABTS⁺· $R^2=0.762$, $P<0.05$)。

3 结论

灰枣含有多酚、黄酮、原花青素和三萜酸等活性成分, 热风干燥、巴氏杀菌、蒸制导致灰枣多酚、黄酮、原花青素含量降低和三萜酸含量升高, 煮制导致灰枣多酚、黄酮、原花青素和三萜酸含量降低。灰枣经烘烤后, 其总酚、总黄酮、总原花青素和总三萜酸含量均升高, 经 140 ℃ 烘烤后总酚含量达到 341.3 mg GAE/100 g m_d、总黄酮含量达到 473.8 mg RE/100 g m_d, 130 ℃ 烘烤后总原花青素含量达到 652.1 mg CE/100g m_d, 总三萜酸含量达到 560.4 mg UAE/100 g m_d。在各热处理灰枣中共检测出八种酚类和三种三萜酸, 阿魏酸、芦丁、没食子酸、儿茶素、表儿茶素为主要单体酚, 白桦脂酸为主要三萜酸。热处理增强了灰枣的抗氧化活性, 经 130 ℃ 烘烤后灰枣 DPPH·清除活性为 62.97 mmol TE/100 g m_d, ABTS⁺清除活性为 47.96 mmol TE/100 g m_d。相关性分析结果表明灰枣总酚、总黄酮、总原花青素含量与 DPPH·清除活

表 3 灰枣活性成分含量和抗氧化活性之间皮尔逊相关系数

Table 3 Pearson's correlation coefficients among active compounds content and antioxidant activities of <i>Ziziphus jujuba</i> cv. Huizao																			
总酚	总黄酮	总原花青素	总三萜酸	阿魏酸	对香豆酸	绿原酸	槲皮素	芦丁	没食子酸	儿茶素	表儿茶素	白桦脂酸	熊果酸	齐墩果酸	DPPH	ABTS	FRAP		
总酚	1																		
总黄酮	0.793*	1																	
总原花青素	0.772*	0.599	1																
总三萜酸	0.384	0.701*	0.387	1															
阿魏酸	-0.483	-0.162	-0.608	0.145	1														
对香豆酸	-0.366	0.143	-0.633	0.132	0.522	1													
绿原酸	0.605	0.865**	0.459	0.885**	-0.052	0.390	1												
槲皮素	0.548	0.758*	0.590	0.609	0.102	-0.054	0.612	1											
芦丁	-0.325	0.072	-0.575	0.436	0.844**	0.745*	0.321	0.018	1										
没食子酸	0.898**	0.806**	0.935**	0.512	-0.552	-0.411	0.680*	0.626	-0.383	1									
儿茶素	0.762*	0.871**	0.843**	0.613	-0.280	-0.157	0.751*	0.775*	-0.158	0.925**	1								
表儿茶素	0.482	0.060	0.150	0.124	-0.150	-0.187	0.209	-0.119	0.012	0.223	-0.011	1							
白桦脂酸	0.049	0.254	0.356	0.676*	0.027	-0.235	0.444	0.555	0.073	0.275	0.310	-0.114	1						
熊果酸	0.337	0.479	0.561	0.814**	-0.113	-0.253	0.690*	0.563	0.088	0.566	0.562	0.091	0.896**	1					
齐墩果酸	0.598	0.618	0.576	0.808**	-0.270	-0.158	0.838**	0.308	0.137	0.704*	0.633	0.467	0.426	0.748*	1				
DPPH	0.924**	0.670*	0.725*	0.384	-0.408	-0.324	0.593	0.367	-0.204	0.849**	0.721*	0.623	-0.069	0.306	0.712*	1			
ABTS	0.894**	0.623	0.760*	0.418	-0.422	-0.434	0.579	0.344	-0.216	0.855**	0.712*	0.629	0.015	0.393	0.762*	0.988**	1		
FRAP	-0.073	-0.392	0.168	-0.625	-0.228	-0.670	-0.669*	0.071	-0.699*	-0.096	-0.187	-0.173	-0.023	-0.268	-0.634	-0.237	-0.231	1	

注: “*”表示相关性显著($P<0.05$); “**”表示相关性极显著($P<0.01$)。

性均具有显著相关性($P<0.05$),总酚含量与 ABTS^+ 清除活性具有极显著相关性($P<0.01$),没食子酸、儿茶素和齐墩果酸含量与 $\text{DPPH}\cdot$ 和 ABTS^+ 清除活性具有显著相关性($P<0.05$)。

综合结果表明,经130、140℃烘烤处理后,灰枣各活性成分含量较高,抗氧化活性较强,是较为合适的烘烤加工方式。

参考文献

- [1] 张明,马超,张博华,等.低褐变度灰枣片微波热风联合干燥工艺优化研究[J].中国果菜,2021,41(6):1-4. [ZHANG M, MA C, ZHANG B H, et al. Optimization of microwave hot-air combined drying process for gray jujube slices with low browning degree[J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(6): 1-4.]
- [2] 宋桦,王建中.不同产地灰枣感官及理化特性评价[J].现代食品科技,2021,37(7):148-154. [SONG H, WANG J Z. Evaluation of sensory and physico-chemical properties of grey jujube from different producing regions[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 148-154.]
- [3] 冀晓龙,侯春彦,刘延奇.不同杀菌和干燥方式对红枣中环核苷酸含量的影响[J].食品科技,2020,45(2):50-55. [JI X L, HOU C Y, LIU Y Q. Determination of cyclic-nucleotide in jujube by different sterilization and dry methods[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(2): 50-55.]
- [4] WANG Y F, TANG F, XIA J D, et al. A combination of marine yeast and food additive enhances preventive effects on postharvest decay of jujubes (*Zizyphus jujuba*) [J]. Food Chemistry, 2011, 125(3): 835-840.
- [5] ZHANG H, JIANG L, YE S, et al. Systematic evaluation of antioxidant capacities of the ethanolic extract of different tissues of jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.) from China [J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(6): 1461-1465.
- [6] LI J W, FAN L P, DING S D, et al. Nutritional composition of five cultivars of Chinese jujube [J]. Food Chemistry, 2007, 103(2): 454-460.
- [7] CHOI S H, AHN J B, KIM H J, et al. Changes in free amino acid, protein, and flavonoid content in jujube (*Zizyphus jujuba*) fruit during eight stages of growth and antioxidative and cancer cell inhibitory effects by extracts [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2012, 60(41): 10245-10255.
- [8] 赵楠.烘焙枣茶挥发性成分的全二维GC-MS分析及烘焙温度的影响[D].保定:河北农业大学,2018:7. [ZHAO N. Analysis of volatile components of baked jujube by comprehensive two dimensional GC-MS and effects of baking temperature[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018: 7.]
- [9] 吕珊,凌敏,董浩爽,等.烘干温度对大枣香气成分及理化指标的影响[J].食品科学,2017,38(2):139-145. [LÜ S, LING M, DONG H S, et al. Effect of drying temperature on the aroma components and physiochemical properties of jujube [J]. Food Science, 2017, 38(2): 139-145.]
- [10] SONG J X, CHEN Q Q, BI J F, et al. GC/MS coupled with MOS e-nose and flash GC e-nose for volatile characterization of Chinese jujubes as affected by different drying methods [J]. Food Chemistry, 2020, 331, 127201: 1-8.
- [11] 王浩,张明,王兆升,等.不同干燥方式对灰枣片感官及营养品质的影响[J].食品科技,2019,44(6):102-107. [WANG H, ZHANG M, WANG Z S, et al. Effects of different drying methods on sensory and nutritional quality of jujube slices [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(6): 102-107.]
- [12] 蒲云峰,丁甜,钟建军,等.新疆12种干果的营养品质及抗氧化分析[J].中国食品学报,2019,19(5):287-294. [PU Y F, DING T, ZHONG J J, et al. Analysis of nutrition quality and antioxidant capability of 12 species of dried fruits in Xinjiang [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(5): 287-294.]
- [13] XIE P J, YOU F, HUANG L X, et al. Comprehensive assessment of phenolic compounds and antioxidant performance in the developmental process of jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.) [J]. Journal of Functional Foods, 2017, 36: 233-242.
- [14] KOU X H, CHEN Q, LI X H, et al. Quantitative assessment of bioactive compounds and the antioxidant activity of 15 jujube cultivars [J]. Food Chemistry, 2015, 173: 1037-1044.
- [15] 刘杰超,张春岭,陈大磊,等.不同品种枣果实发育过程中多酚类物质、VC含量的变化及其抗氧化活性[J].食品科学,2015,36(17):94-98. [LIU J C, ZHANG C L, CHEN D L, et al. Changes in phenolics, vitamin C and antioxidant capacity during development of different cultivars of jujube fruits [J]. Food Science, 2015, 36(17): 94-98.]
- [16] MORAIS S G G, DA SILVA CAMPELO BORGES G, DOS SANTOS LIMA M, et al. Effects of probiotics on the content and bioaccessibility of phenolic compounds in red pitaya pulp [J]. Food Research International, 2019, 126, 108681: 1-8.
- [17] 高娅,杨洁,杨迎春,等.不同品种红枣中三萜酸及环核苷酸的测定[J].中成药,2012,34(10):1961-1965. [GAO Y, YANG J, YANG Y C, et al. Determination of triterpenoid and cyclic-nucleotide in different Jujubae Fructus cultivars [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2012, 34(10): 1961-1965.]
- [18] HE L, XU H G, LIU X, et al. Identification of phenolic compounds from pomegranate (*Punica granatum* L.) seed residues and investigation into their antioxidant capacities by HPLC-ABTS⁺ assay [J]. Food Research International, 2011, 44(5): 1161-1167.
- [19] OZGEN M, REESE R N, TULLIO A Z. Modified 2, 2-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid (ABTS) method to measure antioxidant capacity of selected small fruits and comparison to ferric reducing antioxidant power (FRAP) and 2, 2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) methods [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2006, 54(4): 1151-1157.
- [20] GAO Q H, WU C S, WANG M, et al. Effect of drying of jujubes (*Zizyphus jujuba* Mill.) on the contents of sugars, organic acids, alpha-tocopherol, beta-carotene, and phenolic compounds [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2012, 60(38): 9642-9648.
- [21] CHEN Q Q, BI J F, WU X Y, et al. Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 64(2): 759-766.
- [22] JUÁNIZ I, LUDWIG I A, HUARTE E, et al. Influence of

heat treatment on antioxidant capacity and (poly)phenolic compounds of selected vegetables[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197(15): 466–473.

[23] ALONGI M, VERARDO G, GORASSINI V, et al. Effect of pasteurization on *in vitro* α -lucosidase inhibitory activity of apple juice[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 98: 366–371.

[24] XU B J, CHANG S K C. Effect of soaking, boiling, and steaming on total phenolic content and antioxidant activities of cool season food legumes[J]. *Food Chemistry*, 2008, 110(1): 1–13.

[25] ZHANG H W, YANG Y M, MA C M, et al. Structures and antioxidant and intestinal disaccharidase inhibitory activities of A-type proanthocyanidins from peanut skin[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(37): 8814–8820.

[26] WOJDYŁO A, FIGIEL A, LEGUA P, et al. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method[J]. *Food Chemistry*, 2016, 207: 170–179.

[27] 刘启玲, 王庆卫, 崔胜文. 不同预处理方式对红枣热风-微波联合干燥品质特性及抗氧化活性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(24): 124–130. [LIU Q L, WANG Q W, CUI S W. Effects of different pretreatment methods on quality characteristics and antioxidant activity of jujube drying by combined hot-air-microwave drying[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(24): 124–130.]

[28] 王庆卫, 刘启玲, 崔胜文. 不同干燥方式对红枣营养品质及抗氧化活性的影响[J]. *食品工业*, 2020, 41(12): 218–222. [WANG Q W, LIU Q L, CUI S W. The effect of different drying methods on the nutritional quality and antioxidant activity of jujube[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(12): 218–222.]

[29] YAO Y, REN G X. Effect of thermal treatment on phenolic composition and antioxidant activities of two celery cultivars[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(1): 181–185.

[30] GUO S, DUAN J, ZHANG Y, et al. Contents changes of triterpenic acids, nucleosides, nucleobases, and saccharides in jujube (*Ziziphus jujuba*) fruit during the drying and steaming process[J]. *Molecules*, 2015, 20(12): 22329–22340.

[31] 蔡天娇, 王瑞珍, 魏君慧, 等. 白桦脂酸与红枣总三萜酸对小鼠酒精肝损伤的保护作用[J]. *食品科学*, 2018, 39(11): 191–195.

[CAI T J, WANG R Z, WEI J H, et al. Protective effects of betulinic acid and total triterpenic acids from red jujubes on alcoholic liver injury in mice[J]. *Food Science*, 2018, 39(11): 191–195.]

[32] 韩易, 赵燕, 徐明生, 等. 美拉德反应产物类黑精的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(9): 339–345. [HAN Y, ZHAO Y, XU M S, et al. Research progress on the melanoidins of Maillard reaction product[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(9): 339–345.]

[33] VERZELLONI E, TAGLIAZUCCHI D, CONTE A. From balsamic to healthy: Traditional balsamic vinegar melanoidins inhibit lipid peroxidation during simulated gastric digestion of meat[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48: 2097–2102.

[34] MIN B, GU L W, MCCLUNG A M, et al. Free and bound total phenolic concentrations, antioxidant capacities, and profiles of proanthocyanidins and anthocyanins in whole grain rice (*Oryza sativa* L.) of different bran colours[J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(3): 715–722.

[35] YANG J, LIU R H, HALIM L. Antioxidant and antiproliferative activities of common edible nut seeds[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42(1): 1–8.

[36] ITIDEL C, CHOKRI M, MOHAMED B, et al. Antioxidant activity, total phenolic and flavonoid content variation among Tunisian natural populations of *Rhus tripartita* (Ucria) Grande and *Rhus pentaphylla* Desf[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 51: 171–177.