

# 食品工业科技

SCIENCE AND TECHNOLOGY OF FOOD INDUSTRY

- 荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
- 瑞典开放存取期刊目录 DOAJ
- 美国《化学文摘》CA
- 英国《食品科技文摘》FSTA
- 日本科学技术振兴机构数据库JST
- 世界期刊影响力指数(WJCI)报告
- 食品科学与工程领域高质量科技期刊分级目录第一方阵T1
- 北大核心期刊
- 中国精品科技期刊
- 中国科技核心期刊CSTPCD
- 中国核心学术期刊RCCSE
- 中国农林核心期刊A
- 中国生物医学Sino Med

半月刊 ISSN 1002-0306 CN 11-1759/TS

邮发代号: 2-399

## 不同热处理方法对元宝枫叶与花中酚类成分及抗氧化活性的影响

杨灵光, 刘欣欣, 邓 闯, 尹培培

### Impact of Phenolic Constituents and Antioxidant Activities of *Acer truncatum* Leaves and Flowers upon Different Thermal Treatments

YANG Lingguang, LIU Xinxin, DENG Chuang, and YIN Peipei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030260>

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨灵光, 刘欣欣, 邓闯, 等. 不同热处理方法对元宝枫叶与花中酚类成分及抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 42–52. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030260

YANG Lingguang, LIU Xinxin, DENG Chuang, et al. Impact of Phenolic Constituents and Antioxidant Activities of *Acer truncatum* Leaves and Flowers upon Different Thermal Treatments[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 42–52. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030260

· 研究与探讨 ·

# 不同热处理方法对元宝枫叶与花中酚类成分及抗氧化活性的影响

杨灵光\*, 刘欣欣, 邓 闯, 尹培培  
(宜春学院化学与生物工程学院, 江西宜春 336000)

**摘要:**为进一步推进元宝枫叶与元宝枫花在食品领域的开发应用,本研究以蒸汽、微波、烘烤为加热手段,并分别设置三组时间梯度对元宝枫叶与花处理前后样品中的总酚及主要单体酚类化合物含量进行检测,测定其抗氧化活性变化,并对其成分与活性进行主成分及相关性分析。结果显示,烘烤处理使得元宝枫叶总酚含量显著提升 ( $P<0.05$ ),由  $75.80\pm 3.54$  mg GAE/g 显著提升至  $82.55\pm 2.54\sim 87.78\pm 1.53$  mg GAE/g,而花与叶经其他处理前后样品的总酚含量均未产生显著性变化。元宝枫叶酚类单体中,没食子酸、没食子酸乙酯、1,2,3,4,6-五-O-烯丙基- $\beta$ -D-葡萄糖在内的没食子酸类物质含量在三种热处理方法中均有不同程度上升,15 min 烘烤样品中 1,2,3,4,6-五-O-烯丙基- $\beta$ -D-葡萄糖含量相较于未处理叶提升 1.88 倍,但长时间的微波或烘烤处理反而导致其含量增加幅度有所降低。上述没食子酸类物质含量变化趋势在元宝枫花中同样存在,但变化幅度较为平缓。抗氧化活性结果显示,氧自由基吸收能力 (ORAC) 值在多数处理后的叶与花中均有显著提升,在处理后的叶与花中最高提升 1.49 与 1.21 倍。主成分与相关性分析显示,没食子酸类衍生物与总酚含量变化显著相关,而在叶与花中不同酚类单体对于整体抗氧化活性具有不同程度的贡献。综上所述,热处理方式与加热时间对于元宝枫叶与花中的酚类组成及抗氧化能力具有不同影响,因此选择合适的热处理条件对于其生物活性及商品价值的提升尤为重要,其中 FM10 (10 min 微波处理) 对于元宝枫叶与花的抗氧化活性都达到提升的效果。上述研究为元宝枫叶与花在食品领域的加工处理与深入开发提供了理论基础。

**关键词:**元宝枫叶,元宝枫花,热处理,酚类成分,抗氧化活性,主成分与相关性分析

中图分类号:TS201.2

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2024)04-0042-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030260



本文网刊:

## Impact of Phenolic Constituents and Antioxidant Activities of *Acer truncatum* Leaves and Flowers upon Different Thermal Treatments

YANG Lingguang\*, LIU Xinxin, DENG Chuang, YIN Peipei

(College of Chemical and Biological Engineering, Yichun University, Yichun 336000, China)

**Abstract:** In order to promote the development and application of *Acer truncatum* leaves and flowers in the food area, in this study, the dynamic changes of their phenolic composition and antioxidant activity were investigated under steam, microwave, and baking treatments, meanwhile, three time periods were further selected to determine the contents of total phenols and major phenolic compounds, together with the variations of antioxidant abilities of samples before and after the three treatments, and those data were finally analyzed through principal components and correlation analyses. The results showed that baking significantly increased the total phenol content from  $75.80\pm 3.54$  mg GAE/g to  $82.55\pm 2.54\sim 87.78\pm 1.53$  mg GAE/g in *Acer truncatum* leaves ( $P<0.05$ ), while there was no significant difference of the total phenol content among untreated leaves and flowers and those samples under other treatments. Among phenolic compounds in leaves,

收稿日期: 2023-03-27

基金项目: 江西省自然科学基金青年项目 (20224BAB215006); 江西省教育厅科学技术研究青年项目 (GJJ211644, GJJ2201743); 大学生创新创业项目 (X202310417007, X202310417002)。

作者简介/通信作者\*: 杨灵光 (1992-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 植物次生代谢与蛋白质结构生物学, E-mail: yanglingguangxdjqz@163.com。

gallates including gallic acid, ethyl gallate, and 1,2,3,4,6-penta-O-galloyl- $\beta$ -D-glucose increased in varying degrees under all three treatments, and 1,2,3,4,6-penta-O-galloyl- $\beta$ -D-glucose increased 1.88-fold under 15 min baking. Nevertheless, prolong microwave or baking treatment led to the reduction of increasing rate of gallates content. The above change pattern of gallates also existed in flowers, but in a relatively gentle mode. The result of antioxidant assays demonstrated that the oxygen radical absorbance capacity values significantly increased in *Acer truncatum* leaves and flowers after most treatments, and the highest increase in leaves and flowers were 1.49 and 1.21 times, respectively. Principal components and correlation analysis revealed that the variation of the gallates was significantly correlated with the change of the total phenol content, and different phenolic compounds in leaves and flowers had different degrees of contribution to the overall antioxidant activity. The above results indicated that thermal treatment method and time period all significantly affected the phenolic composition and antioxidant activities of *Acer truncatum* leaves and flowers ( $P < 0.05$ ). Therefore, a proper selection of treatment condition was vital for the improvement of their biological activity and commodity value. Among which, FM10 (microwave treatment for 10 min) led to the enhancement of antioxidant activity of both leaves and flowers. Above all, the present research provided a theoretical basis for the processing and further study of *Acer truncatum* leaves and flowers as food resources.

**Key words:** *Acer truncatum* leaves; *Acer truncatum* flowers; thermal treatment; phenolic constituents; antioxidant activity; principle component and correlation analysis

元宝枫(*Acer truncatum* Bunge)属无患子科槭属落叶乔木,是我国重要的乡土树种。作为多功能资源植物,元宝枫集观赏、生态、工业<sup>[1-2]</sup>、食用<sup>[3-4]</sup>、药用<sup>[5]</sup>等多种价值于一身,已在全国 20 多个省、市和地区人工种植,具有较高的经济价值及深入开发前景<sup>[6]</sup>。元宝枫叶被认为具有多种药理活性,是元宝枫最有开发价值的部位之一。其生物活性成分以酚类物质为主,其中黄酮类化合物和绿原酸最早被报道<sup>[7]</sup>,随后其酚类图谱进一步通过液相色谱-质谱联用(LC-MS)等技术进行表征<sup>[8]</sup>。药理活性方面,元宝枫叶提取物被报道具有抗氧化、抗肿瘤细胞生长、抑制脂肪酸合酶、抑菌、抗肥胖、抗糖尿病等多种生物活性<sup>[9]</sup>。团队前期工作初步优化了其酚类提取工艺<sup>[10]</sup>,明确了酚类组成<sup>[11]</sup>及季节性变化特征<sup>[12]</sup>。元宝枫叶与花具有食用属性,元宝枫叶茶(又名枫露茶)是我国食用历史悠久的珍贵茶饮之一<sup>[5,13]</sup>,元宝枫叶与花在民间也以蒸制等烹饪手段进行食用。

加工处理是延长食品保质期与提升食品口感品质的常用方法,也是茶类饮品生产中的必需过程。热处理是一种重要的加工方式,它可以将食物转化为可食用状态同时能够破坏植物中不可溶的结合态酚类的共价键从而达到释放天然抗氧化物的效果<sup>[14]</sup>。截止至今,大量关于热处理对于茄子<sup>[15]</sup>、巴西黑莓<sup>[16]</sup>、蓝莓<sup>[17]</sup>、苹果<sup>[18]</sup>等食品原料中酚类成分或抗氧化活性影响的研究已经得到开展,研究结果显示不同种类热处理对于不同食品基质中的酚类组成及抗氧化活性具有不同影响。作者前期针对元宝枫叶与花酚类提取物在长时间高温环境中的降解机制进行研究,为其提取物作为抗氧化剂的工业化制备提供了参考<sup>[11]</sup>。但目前元宝枫叶与花在食品应用相关热处理方面的研究尚不深入。

过长时间的高温处理并不符合食品生产的要求与实际流程,且热处理过程中活性成分与植物基质中复杂环境发生的相互作用未能得到描述。由此,亟需

对叶与花进行短时间内不同热处理方法的影响研究。综上所述,元宝枫叶与花作为具有独特风味与生物活性的食品及代用茶原料,其加工过程中涉及的短时间加热过程对于叶与花中生物活性成分的影响尚不明确。由此,本研究将探究包括蒸制、微波、烘烤在内的热处理对于元宝枫叶与花中酚类组成以及抗氧化能力的影响,从而为元宝枫叶与花作为食品的加工处理与深度开发提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

元宝枫叶与花于 4 月 20 日采集自北京市海淀区八家郊野公园(GPS 坐标, 40°00'57.21N, 116°19'43.36E)中具有相近树龄及生长环境的元宝枫树,植株由北京林业大学刘忠华副教授鉴定为元宝枫。采样时间是元宝枫的花期,同时也是元宝枫叶的最佳采收时间之一<sup>[16]</sup>。样品带回实验室简单清理后冻干并研磨为粉末于 -80 °C 保存;没食子酸(gallic acid)、没食子酸乙酯(ethyl gallate)、1,2,3,4,6-五-O-烯丙基- $\beta$ -D-葡萄糖(1,2,3,4,6-penta-O-galloyl- $\beta$ -D-glucose)、新绿原酸(neochlorogenic acid)、山奈酚-3-O-鼠李糖苷(kaempferol-3-O-rhamnoside)、槲皮素-3-O-阿拉伯吡喃糖苷(querctin-3-O-arabinopyranoside)、槲皮素-3-O-半乳糖苷(querctin-3-O-galactoside)、槲皮素-3-O-葡萄糖苷(querctin-3-O-glucoside)、槲皮素-3-O-鼠李糖苷(querctin-3-O-rhamnoside)、杨梅素-3-O-鼠李糖苷(myricetin-3-O-rhamnoside)等标准品 色谱级,中国国家食品药品监督管理局;福林酚、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、6-羟基-2,5,7,8-四甲基苯并二氢吡喃-2-羧酸(Trolox)、乙腈(色谱级)和甲酸(色谱级) 美国西格玛奥德里奇(Sigma-Aldrich)公司;其它试剂 购自上海源叶生物科技有限公司或天津市大茂化学试剂

剂厂等。

高效液相色谱仪(由两台 LC-20AT VP 色谱泵、SPDM20A 紫外分光光度检测器、SIL-20AC TH 自动进样器、CTO-10AS VP 恒温箱构成) 日本岛津公司; Tecan Infinite 200 多功能酶标仪 瑞士帝肯公司; KQ 300DE 型超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司。

## 1.2 实验方法

1.2.1 样品热处理方法 取元宝枫叶与花样品, 分别以蒸制、微波及烘烤的方式进行短时间热处理以模拟食品热加工过程, 详细参数如下:

蒸制处理方法<sup>[19]</sup>: 以 2100 W 将容器中水煮沸, 后将元宝枫样品干粉以薄层形式平铺并置放于沸腾后的蒸锅中, 以 1000 W 分别蒸制 5、15、30 min, 蒸制后样品粉末重新冷冻干燥用于后续实验。

微波处理方法<sup>[20]</sup>: 将元宝枫样品干粉以薄层形式平铺于容器, 以 2450 MHz, 1200 watts 分别微波 2、5、10 min, 微波后样品粉末重新冷冻干燥用于后续实验。

烘烤处理方法<sup>[21]</sup>: 将元宝枫样品干粉以薄层形式平铺于容器, 置于 180 °C 预热后的鼓风烘箱分别放置 5、15、30 min, 烘烤后样品粉末重新冷冻干燥用于后续实验。

1.2.2 酚类物质提取 热处理后元宝枫叶与花干粉中酚类成分提取以前期优化的超声波辅助乙醇提取法进行<sup>[10]</sup>。提取重复三次, 最终将三次提取所得上清液定容后用于后续检测。

1.2.3 总酚含量测定 总酚的测定采用优化后的福林酚法<sup>[22]</sup>。将 40  $\mu$ L 25% 的福林酚试剂加入 96 孔板, 随后分别加入 20  $\mu$ L 的标准品(10~400 mg/L 没食子酸,  $R^2=0.999$ )、不同浓度样品及空白溶液。混匀后加入 140  $\mu$ L 700 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液, 再次混匀后 40 °C 避光孵育 30 min, 使用多功能酶标仪在 765 nm 波长下测定吸光度, 以没食子酸浓度为横坐标(x), 吸光度值(OD)为纵坐标(y), 建立标准曲线。根据标准曲线读出被测样品溶液中没食子酸含量, 结果表示为没食子酸当量, 表达为 mg GAE/g d.w.。

### 1.2.4 抗氧化活性测定

1.2.4.1 DPPH·清除能力测定 DPPH·清除实验参照 Brand-Williams 等<sup>[23]</sup>的方法并稍加修改。10  $\mu$ L 标准品(0~400 mg/L Trolox,  $R^2=0.998$ )、样品和空白溶液分别加入 96 孔板, 随后加入 40  $\mu$ L 浓度 1 mmol/L 的 DPPH 溶液与 190  $\mu$ L 甲醇溶液, 混匀后室温避光孵育 30 min。随后以酶标仪在 517 nm 处测定吸光度。自由基清除活性  $\text{RSA}(\%)=(A_0-A_S)/A_0 \times 100$ ,  $A_0$ : 空白溶液吸光度值,  $A_S$ : 样品溶液吸光度值, 以 Trolox 浓度为横坐标(x), 自由基清除率(RSA)为纵坐标(y), 建立标准曲线。根据标准曲线读出被测样品溶液中 Trolox 浓度, 结果表示为 Trolox 当量

( $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g d.w.}$ )。

1.2.4.2 ABTS<sup>+</sup>清除能力测定 ABTS<sup>+</sup>清除实验参照文献 [24] 报道方法, 并稍作修改。将 7 mmol/L 的 ABTS 水溶液与 2.4 mmol/L 的  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  水溶液等量混合, 于室温条件下, 避光孵育 12~16 h。随后, 以甲醇溶液将上述储液稀释到波长 734 nm 处吸光度为  $0.70 \pm 0.02$  范围内, 即得 ABTS 工作液。将 5  $\mu$ L 的标准品(0~800 mg/L Trolox,  $R^2=0.999$ )、样品或空白溶液分别加到 96 孔板中, 然后各加入 200  $\mu$ L ABTS 工作液。在 30 °C 的黑暗条件下孵育 5 min 后, 随后以酶标仪于 734 nm 处测定其吸光度。自由基清除活性  $\text{RSA}(\%)=(A_0-A_S)/A_0 \times 100$ ,  $A_0$ : 空白溶液吸光度值,  $A_S$ : 样品溶液吸光度值, 以 Trolox 浓度为横坐标(x), 自由基清除率(RSA)为纵坐标(y), 建立标准曲线。根据标准曲线读出被测样品溶液中 Trolox 浓度, 结果表示为 Trolox 当量( $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g d.w.}$ )。

1.2.4.3 氧自由基吸收能力(ORAC)测定 ORAC 实验参照 Ou 等<sup>[25]</sup>, 实验所需试剂均用 75 mmol/L 的磷酸盐缓冲液(pH7.4)进行溶解, 实验全程避光。将 25  $\mu$ L 标准品(Trolox 5~50  $\mu\text{mol/L}$ ,  $R^2=0.995$ )、样品和空白溶液分别加入 96 孔板, 加入 75  $\mu$ L 的荧光素(0.20  $\mu\text{mol/L}$ ), 混匀后 37 °C 孵育 15 min。随后, 分别加入 100  $\mu$ L 37 °C 预热 AAPH 溶液, 放入 37 °C 预热的多功能酶标仪中测定, 激发光为 530 nm, 发射光为 485 nm。每 1.5 min 记录一次数据, 共记录 75 min。标准品和样品的净面积为标准品溶液或样品溶液的曲线下面积减去空白溶液的曲线下面积。以 Trolox 浓度为横坐标(x), 曲线下面积(AUC)为纵坐标(y), 绘制标准曲线, 根据标准曲线读出被测样品溶液中 Trolox 浓度, 结果表示为 Trolox 当量( $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g d.w.}$ )。

1.2.5 高效液相色谱(HPLC)测定 10 种主要酚类单体含量 色谱条件: 色谱柱为 Dikma Diamonsil  $\text{C}_{18}$  (5  $\mu\text{m}$ , 250 $\times$ 4.6 mm i.d.)反相色谱柱, 柱温箱温度设为 30 °C, 流速 1.0 mL/min, 单次进样量为 10  $\mu$ L, 流动相 A 为含有 0.4% 甲酸的水溶液, 流动相 B 为乙腈。紫外检测器波长设定为 280 nm, 梯度洗脱条件见表 1。

表 1 元宝枫叶与花中的单体酚类化合物 HPLC 梯度洗脱条件

Table 1 Gradient elution conditions for phenolic compounds of *Acer truncatum* leaves and flowers

时间	流动相A	流动相B
0~10 min	90%	10%
10~12 min	90%~86%	10%~14%
12~40 min	86%	14%
40~80 min	86%~80%	14%~20%
80~120 min	80%~77%	20%~23%

标准品溶液制备: 为了检测元宝枫叶与花内酚类单体物质的变化规律, 包括没食子酸、没食子酸乙

酯、1,2,3,4,6-五-O-烯丙基- $\beta$ -D-葡萄糖、新绿原酸、山奈酚-3-O-鼠李糖苷、槲皮素-3-O-阿拉伯吡喃糖苷、槲皮素-3-O-半乳糖苷、槲皮素-3-O-葡萄糖苷、槲皮素-3-O-鼠李糖苷、以及杨梅素-3-O-鼠李糖苷在内的 10 种标准品混标储备液由 66% 乙醇配制并进行线性检测。混标溶液由上述相同 HPLC 条件检测。由此高效液相法测得 10 种酚类单体含量之和为液相法测定所得总酚含量(TPLC)。

### 1.3 数据处理

主成分分析(PCA)及聚类分析使用 SIMCA 软件(版本 14.0)进行。本文涉及数据以平均值 $\pm$ 标准差(SD)表示,统计学重复至少为 3 次。使用 SPSS 软件(版本 22.0)单因素方差分析(one-way ANOVA)中的 Tukey's HSD 检验确认统计学是否存在显著差异, $P < 0.05$  被设定为存在显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同热处理后总酚含量的变化

首先对热处理后元宝枫叶与花的总酚含量分别进行测定,以观测热处理对福林酚法测得总酚含量(TPFC)的影响。如图 1A 所示,未处理元宝枫叶的 TPFC 为  $75.80 \pm 3.54$  mg GAE/g, 而蒸制及微波处理并未导致其含量产生显著性变化( $P > 0.05$ )。但三个烘烤时间处理均使得元宝枫叶的 TPFC 相较于未处理组显著提高( $82.55 \pm 2.54 \sim 87.78 \pm 1.53$  mg GAE/g) ( $P < 0.05$ ), 其中 LB30 的 TPFC 含量最高, 为 L0 的

1.16 倍。而未处理元宝枫花样品的 TPFC 为  $90.11 \pm 1.84$  mg GAE/g, 其中各样品组之间总酚含量均未产生显著性变化( $P > 0.05$ )。以液相色谱法测定得到各酚类单体含量, 求和得到液相法总酚含量(TPLC), 并与 TPFC 进行比较探究其所占份额。总体而言, TPLC 构成了 TPFC 含量的主体部分, 在未处理及任一处理组别中均占比 84% 以上(图 1B)。从整体含量上来看, 30 min 蒸制、微波以及烘烤处理均造成元宝枫叶中 TPLC 含量显著增加(图 1C) ( $P < 0.05$ )。而在元宝枫花中, FS10、FB5 中 TPLC 含量显著提高, 而 FM10 中 TPLC 显著降低(图 1D) ( $P < 0.05$ )。蒸制、微波和烘烤三种热处理都存在加剧破坏细胞壁从而利于酚类物质的释放的能力, 并在高温下分子运动加快, 从而形成更多游离的酚类化合物<sup>[26]</sup>。

### 2.2 不同热处理后酚类单体化合物的变化

纵使总酚含量近似, 热处理仍可能导致不同酚类单体化合物含量产生变化从而改变其酚类组成。由此, 对前期工作筛选得到的元宝枫叶与花中共同存在的 10 种高表达酚类单体化合物进行测定(表 2), 以观察主要酚类单体受热处理影响的变化趋势<sup>[11]</sup>。如表 2 所示, 标准曲线在检测范围内均具有较高的线性相关性( $R^2 > 0.998$ )。

如图 2 所示, 未处理元宝枫叶中黄酮醇类化合物含量最高, 其中的杨梅素-3-O-鼠李糖苷、槲皮素-3-O-鼠李糖苷、山奈酚-3-O-鼠李糖苷含量分别达到

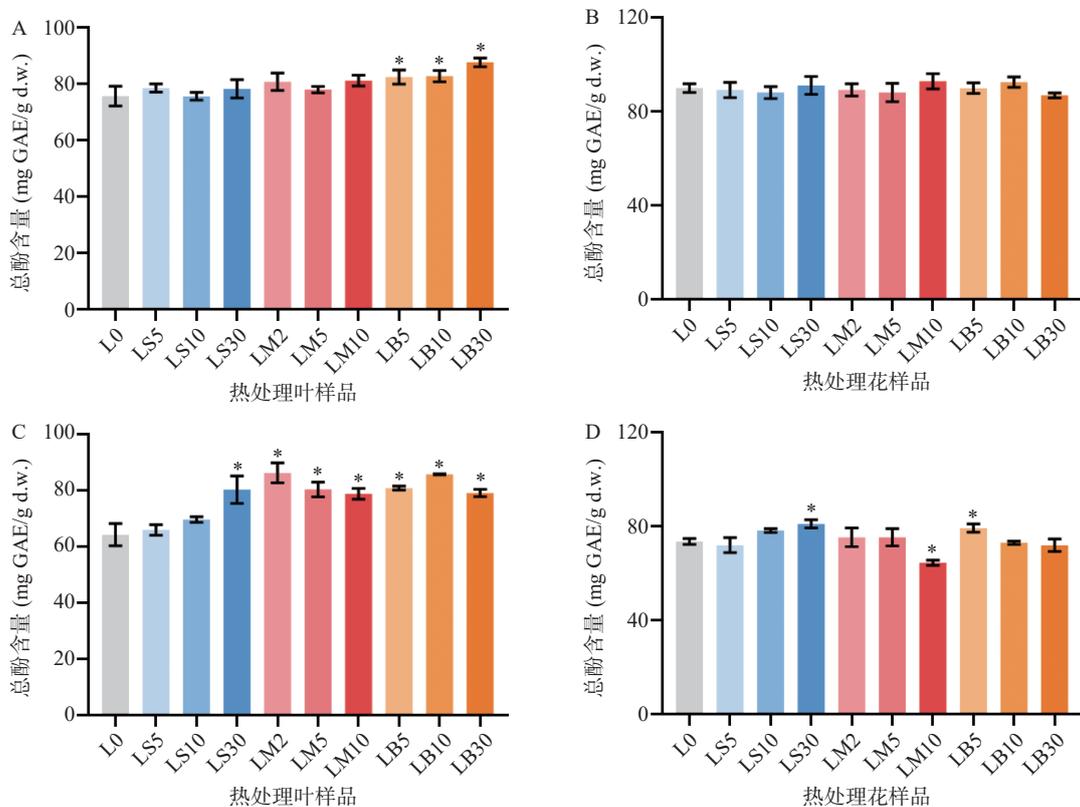


图 1 不同热处理条件下元宝枫叶(A、C)、花(B、D)的总酚含量变化

Fig.1 Variation of total phenolic contents of *Acer truncatum* leaves (A, C) and flowers (B, D) upon different thermal treatments

注: L: 元宝枫叶; F: 元宝枫花; S: 蒸制; M: 微波; B: 烘烤; 字母后数字为加热时间(min); 图 A、图 B 中总酚含量以福林酚法测得(TPFC); 图 C、图 D 中总酚含量为液相法测定 10 种酚类单体含量之和(TPLC); \*与未处理组之间存在显著性差异,  $P < 0.05$ 。

15.95±1.39、10.98±1.07、10.78±1.16 mg/g。没食子酸类物质中,1,2,3,4,6-五-O-烯丙基-β-d-葡萄糖与没食子酸乙酯含量分别达到 11.3±0.57 与 7.37±0.61 mg/g,而新绿原酸含量为 3.01±0.11 mg/g。包括没食子酸、没食子酸乙酯、1,2,3,4,6-五-O-烯丙基-β-d-葡萄糖在内的没食子酸类物质含量在三种热处理方法中均有不同程度上升。具体来说,没食子酸类化合物含量随着蒸制时间增长而进一步提升(图 2A 中酚类单体 1~3),而较长时间的微波或烘烤处理反而导致其含量增加幅度有所降低(图 2B、图 2C 中酚类单体

表 2 元宝枫叶与花中 10 种主要酚类单体高效液相色谱测定中的回归方程、模型决定系数和检测范围

Table 2 Regression equations, determination coefficients and linear ranges of the ten major phenolics from *Acer truncatum* leaves and flowers

酚类单体	回归方程	R <sup>2</sup>	检测范围 (mg/mL)
没食子酸	y=3×10 <sup>7</sup> x-133926	0.999	0.043~0.172
没食子酸乙酯	y=3×10 <sup>7</sup> x-33353	0.999	0.010~0.040
1,2,3,4,6-五-O-烯丙基-β-d-葡萄糖	y=2×10 <sup>7</sup> x-50259	0.999	0.004~0.017
新绿原酸	y=2×10 <sup>7</sup> x-39036	0.998	0.008~0.033
山奈酚-3-O-鼠李糖苷	y=2×10 <sup>7</sup> x-35659	0.999	0.006~0.027
槲皮素-3-O-阿拉伯吡喃糖苷	y=8×10 <sup>6</sup> x-2171	0.999	0.003~0.013
槲皮素-3-O-半乳糖苷	y=1×10 <sup>7</sup> x-11301	0.999	0.005~0.020
槲皮素-3-O-葡萄糖苷	y=2×10 <sup>7</sup> x-50852	0.999	0.006~0.023
槲皮素-3-O-鼠李糖苷	y=1×10 <sup>7</sup> x-96683	0.999	0.024~0.096
杨梅素-3-O-鼠李糖苷	y=1×10 <sup>7</sup> x-67256	0.999	0.014~0.057

注: y指代色谱峰面积, x指代单体样品浓度(mg/mL)。

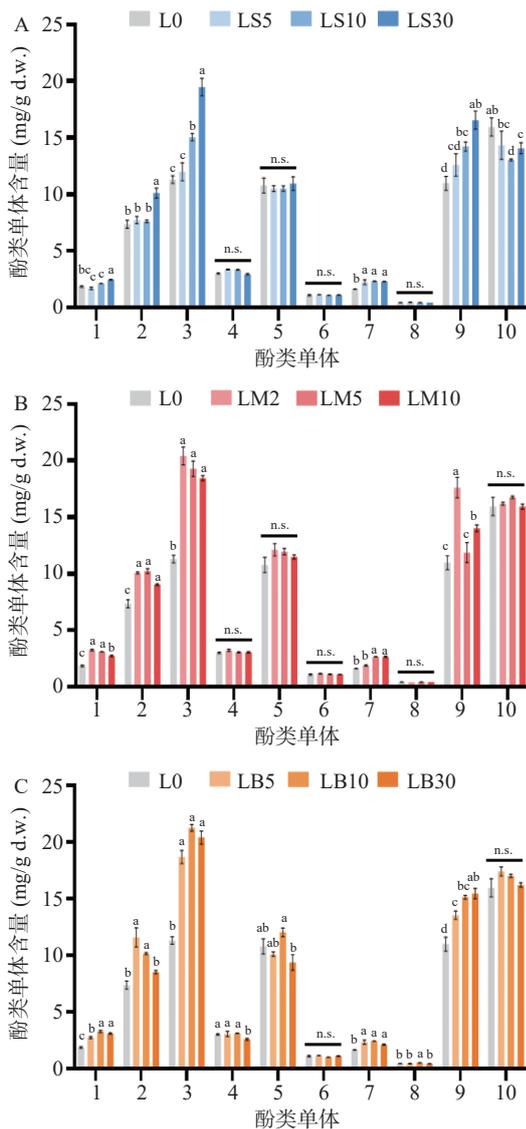


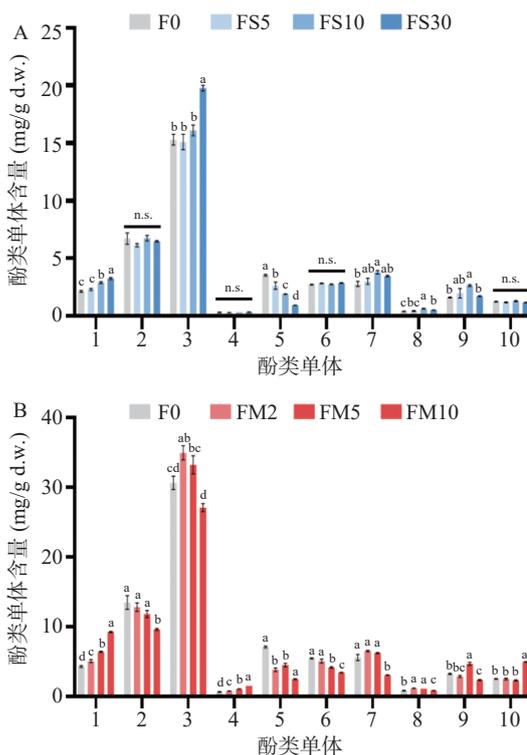
图 2 元宝枫叶单体酚类在蒸制(A)、微波(B)、烘烤(C)下的含量变化

Fig.2 Variation of phenolic compounds of *Acer truncatum* leaves upon steam (A), microwave (B), and baking (C) treatments

注: L: 元宝枫叶; S: 蒸制; M: 微波; B: 烘烤; 字母后数字为加热时间(min); 同一单体上标字母不同表明存在显著性差异, P<0.05; n.s.: 不存在显著差异; 编号与分类单体对应关系如下: 没食子酸(1)、没食子酸乙酯(2)、1,2,3,4,6-五-O-烯丙基-β-d-葡萄糖(3)、新绿原酸(4)、山奈酚-3-O-鼠李糖苷(5)、槲皮素-3-O-阿拉伯吡喃糖苷(6)、槲皮素-3-O-半乳糖苷(7)、槲皮素-3-O-葡萄糖苷(8)、槲皮素-3-O-鼠李糖苷(9)、杨梅素-3-O-鼠李糖苷(10); 图 3 同。

1~3)。新绿原酸除在 LB30 中含量显著性下降外 (P<0.05), 其余加热组与未处理样品均无明显变化(图 2 中酚类单体 4)。黄酮醇类化合物变化趋势较为复杂, 其中山奈酚-3-O-鼠李糖苷、槲皮素-3-O-阿拉伯吡喃糖苷、槲皮素-3-O-葡萄糖苷、杨梅素-3-O-鼠李糖苷含量不变或稍有下降(图 2 中酚类单体 5、6、8、10), 而槲皮素-3-O-半乳糖苷与槲皮素-3-O-鼠李糖苷含量显著上升(图 2 中酚类单体 7、9)(P<0.05)。

如图 3 所示, 在未处理元宝枫花中没食子酸类物质含量最高, 其中 1,2,3,4,6-五-O-烯丙基-β-d-葡萄糖与没食子酸乙酯含量分别达到 30.62±1.63 与 13.46±1.71 mg/g。黄酮醇类含量次之, 其中山奈酚-3-O-鼠李糖苷与槲皮素-3-O-半乳糖苷最高, 分别为



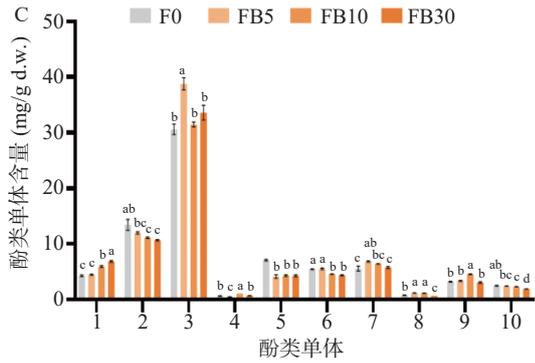


图 3 元宝枫花单体酚类在蒸制(A)、微波(B)、烘烤(C)下的含量变化

Fig.3 Variation of phenolic compounds of *Acer truncatum* flowers upon steam (A), microwave (B), and baking (C) treatments

7.09±0.25 与 5.58±0.76 mg/g, 而新绿原酸含量仅为 0.64±0.08 mg/g。元宝枫花样品中没食子酸与

1,2,3,4,6-五-O-烯丙基-β-d-葡萄糖含量同样整体呈上升趋势, 但没食子酸乙酯含量几乎不变或反而有所下降(图 3 中酚类单体 1~3)。元宝枫花和叶中没食子酸含量的增加可能是由于加热过程中单宁酸或其它成分发生水解导致<sup>[27]</sup>。而微波热处理则显著提高了元宝枫花中的新绿原酸含量( $P<0.05$ ), 且提高幅度与时间长度呈正相关(图 3B 中酚类单体 4)。花中多数黄酮醇单体含量呈下降趋势, 仅有部分单体在特定处理时间下含量显著上升( $P<0.05$ ), 如 FS10、FM5、FB10 中的槲皮素-3-O-鼠李糖苷(图 3 中酚类单体 9)。从整体趋势上来看, 元宝枫花内单体酚类变化趋势相较于元宝枫叶相对平缓。

### 2.3 不同热处理前后抗氧化活性的变化

自由基导致的氧化应激是细胞内的重要事件, 与包括癌症、心血管疾病、帕金森病和自身免疫性疾

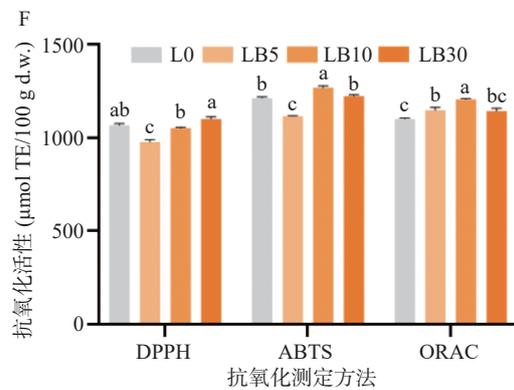
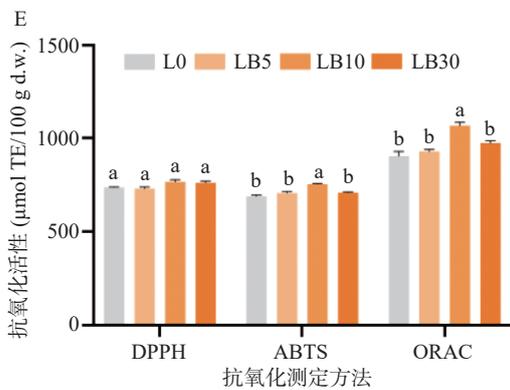
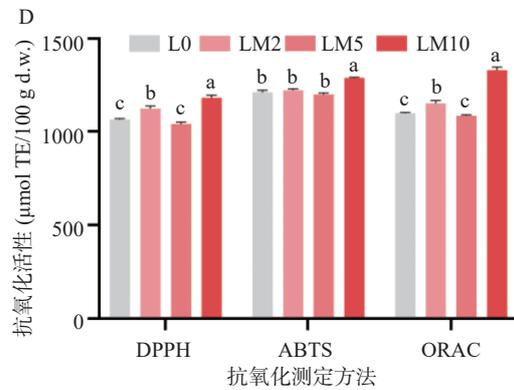
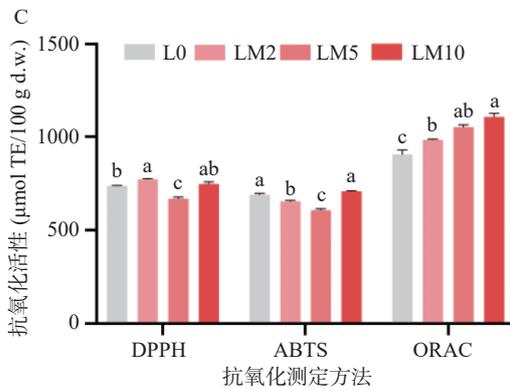
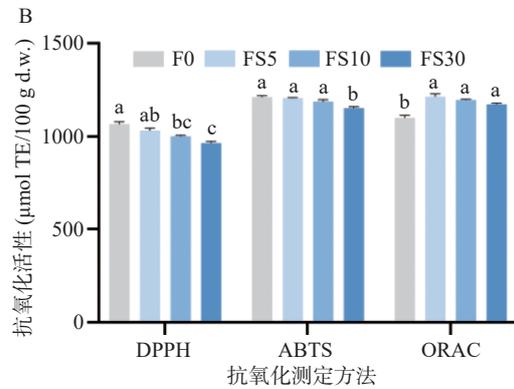
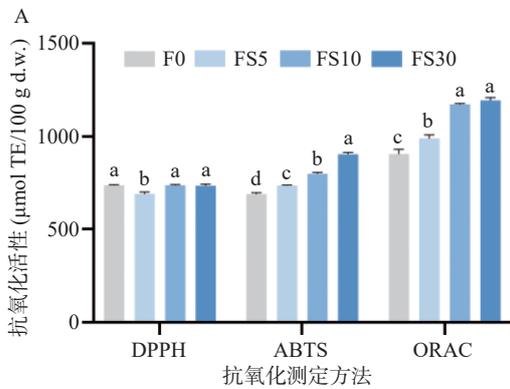


图 4 不同热处理条件下元宝枫叶(A, C, E)与花(B, D, F)的抗氧化活性变化

Fig.4 Variation of antioxidant capacities of *Acer truncatum* leaves (A, C, E) and flowers (B, D, F) upon different thermal treatments  
注: L: 元宝枫叶; F: 元宝枫花; S: 蒸制; M: 微波; B: 烘烤; 字母后数字为加热时间(min); 相同柱上方不同上标字母表明存在显著性差异,  $P<0.05$ 。

病在内的多种退行性疾病密切相关,因此抗氧化剂在预防及干预上述疾病过程中具有重要意义<sup>[28]</sup>。抗氧化活性是酚类及黄酮类化合物的特征活性之一,为了对不同处理下元宝枫叶与花的抗氧化能力进行综合评价,以三种不同的检测方法对各热处理组样品进行测定。

如图4所示,未处理元宝枫叶与花在 DPPH、ABTS、ORAC 三组评价体系下分别具有接近的 Trolox 当量,具体数值为  $690.18 \pm 14.21 \sim 800.94 \pm 44.52 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g d.w.}$  与  $1065.55 \pm 22.67 \sim 1211.06 \pm 13.20 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g d.w.}$ 。DPPH 法测定结果显示叶与花的 DPPH 法测定结果变化趋势近似,蒸制与烘烤导致叶与花的 DPPH 值整体不变或下降(图 4A~图 4B,图 4E~图 4F),但微波法整体导致 DPPH 值呈不依赖于处理时间的交错上升(图 4C、图 4D)。然而 ABTS 值的变化趋势在叶与花中并不一致,蒸制热处理导致叶的 ABTS 值呈时间依赖性显著上升(图 4A),但花中的 ABTS 值不变或显著性下降(图 4B)。与之相反,微波导致叶中 ABTS 值不变或下降(图 4C),而 FM10 中 ABTS 值显著提高(图 4D)( $P < 0.05$ )。ORAC 法测定结果显示,三种热处理方法均造成了处理后样品 ORAC 值的显著上升。值得注意的是,过长时间的烘烤处理(30 min)导致元宝枫叶与花中 ORAC 值上升幅度相较于 10 min 烘烤处理显著下降,表明抗氧化活性物质存在复杂的变化(图 4E、图 4F)。

### 2.4 总酚和主要单体酚类含量的主成分及聚类分析

以总酚及单体含量为观测值对不同热处理组进行主成分分析(PCA)以及聚类分析(HCA),以检验样品之间差异情况并直观评价样品分类合理性。基于元宝枫叶与花模型汇总拥有最高贡献率的两个主成分建立投影,分别得到对应散点图(图 5A、图 6A)、载荷图(图 5B、图 6B),并对各组数据进行聚类分析(图 7)。如图 5A 所示,基于其总体与单体酚类成分差异,元宝枫叶在不同处理之间存在较好区分。与此同时,在相同处理的不同时长上,不同处理组间同样存在区分。如蒸制处理中,由 L0 到 LS5 与 LS10,样品点分布由第 2 象限移至第 3 象限,而由 LS10 到 LS30,样品点移动至趋近原点中心。图 5B 所示载荷图中各数据点距离原点中心的距离表明各单体酚类及总酚含量对于组间差异影响程度贡献大小。其中 LB15 与槲皮素-3-O-半乳糖苷、山奈酚-3-O-鼠李糖苷同属于第 4 象限,显示槲皮素-3-O-半乳糖苷、山奈酚-3-O-鼠李糖苷在 LB15 中含量较高并贡献于其与其他组样品的区分。而 LB30 与杨梅素-3-O-鼠李糖苷及 TPFC 同处于第二象限,显示杨梅素-3-O-鼠李糖苷含量变化所导致的总酚含量变化可能贡献于 LB30 的区分度。

如图 6A 所示,除 FM10 外,不同处理下的元宝

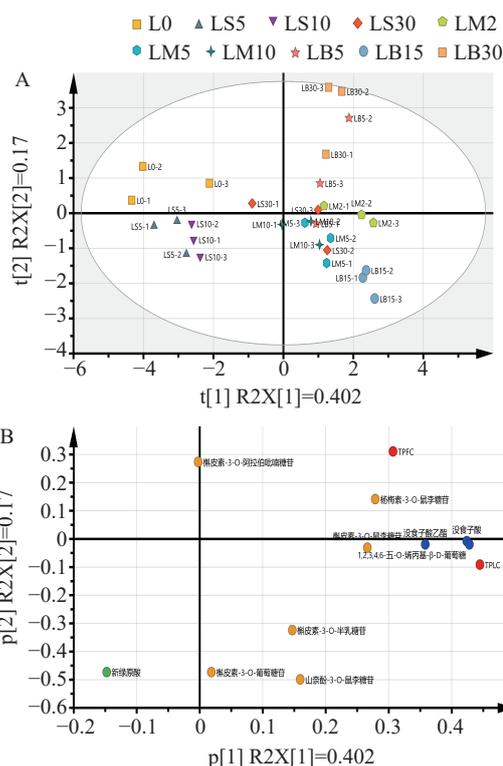


图 5 不同热处理条件下元宝枫叶主成分分析得分图(A)与载荷图(B)

Fig.5 Scoring (A) and loading (B) plot of principle components analysis on the variation of *Acer truncatum* leaves upon different thermal treatments

注:L:元宝枫叶;S:蒸制;M:微波;B:烘烤;字母后数字为加热时间(min),图6~图7同。

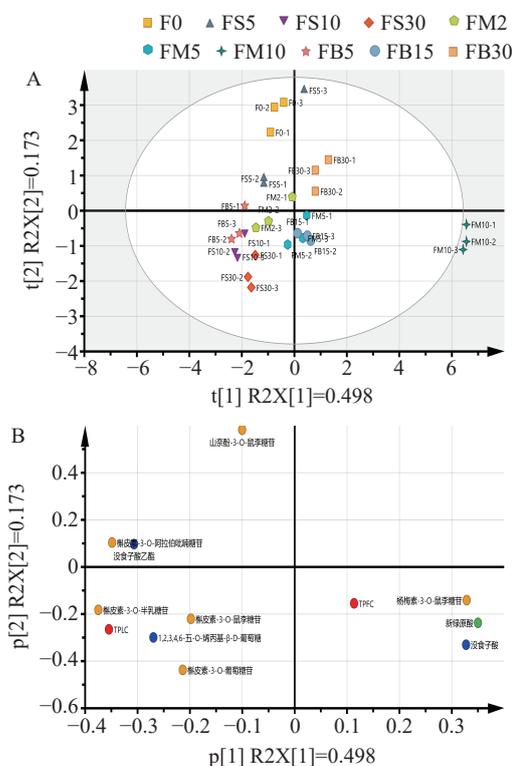


图 6 不同热处理条件下元宝枫花主成分分析得分图(A)与载荷图(B)

Fig.6 Scoring (A) and loading (B) plot principle components analysis on the variation of *Acer truncatum* flowers upon different thermal treatments

枫花样品间存在交叉较多, 这符合花中酚类成分在不同处理下含量变化较少的前期结果。如图 6B 所示, FM10 与其中含量较高的没食子酸、新绿原酸、杨梅素-3-O-鼠李糖苷一同被归属于第 4 象限。

样品聚类分析(HCA)结果如图 7 所示, 具有接近分类距离样品被归为一类。元宝枫叶聚类结果如图 7A 所示, L0 与 LS5、LS10 聚类为第 I 大类, 而剩余样品聚类为第 II 大类。第 II 聚类中 LB30 组与其它组具有明显的分类距离从而被单独归为一小类。上述结果显示短时间蒸制处理对于元宝枫叶内酚类成分及抗氧化活性改变较小, 而长时间烘烤处理造成独特的转变。如图 7B 所示, FM10 单独聚为第 I 大类, 而剩余样品组成的第 II 大类可进一步被划分为三小类。具体来说, F0 为第一小类, FB15、FB30、FM5 为第二小类, FM2、FB5 与蒸制样品为第三小类。上述结果说明长时间微波处理造成元宝枫花中酚类成分转变幅度最大。

### 2.5 不同热处理前后总酚、单体酚类化合物含量及抗氧化活性水平的相关性分析

对测定所得的总酚、单体酚类化合物含量, 以及抗氧化活性水平在各组热处理之间的相关性进行分析。结果如图 8A 所示, 元宝枫叶中福林酚法测得总酚(TPFC)与没食子酸与 1,2,3,4,6-五-O-烯丙基-β-d-葡萄糖呈显著正相关( $P<0.05$ ), 而液相色谱法测得总酚(TPLC)与包括没食子酸、没食子酸乙酯, 以及 1,2,3,4,6-五-O-烯丙基-β-d-葡萄糖在内的没食子酸类物质呈极显著正相关( $P<0.01$ ), 表明没食子酸类物质是元宝枫叶中酚类的重要组成。除此之外, 槲皮素-3-O-鼠李糖苷与 DPPH 值显著正相关, 而槲皮素-3-O-半乳糖苷与 ORAC 值显著正相关( $P<0.05$ ), 说明槲皮素类物质对于抗氧化活性起主要贡献。如图 8B 所示, 上述含量与水平在元宝枫花中主要分为两大类。其中, 新绿原酸与 DPPH、ABTS 两种抗氧化水平呈显著正相关, 而杨梅素-3-O-鼠李糖苷与

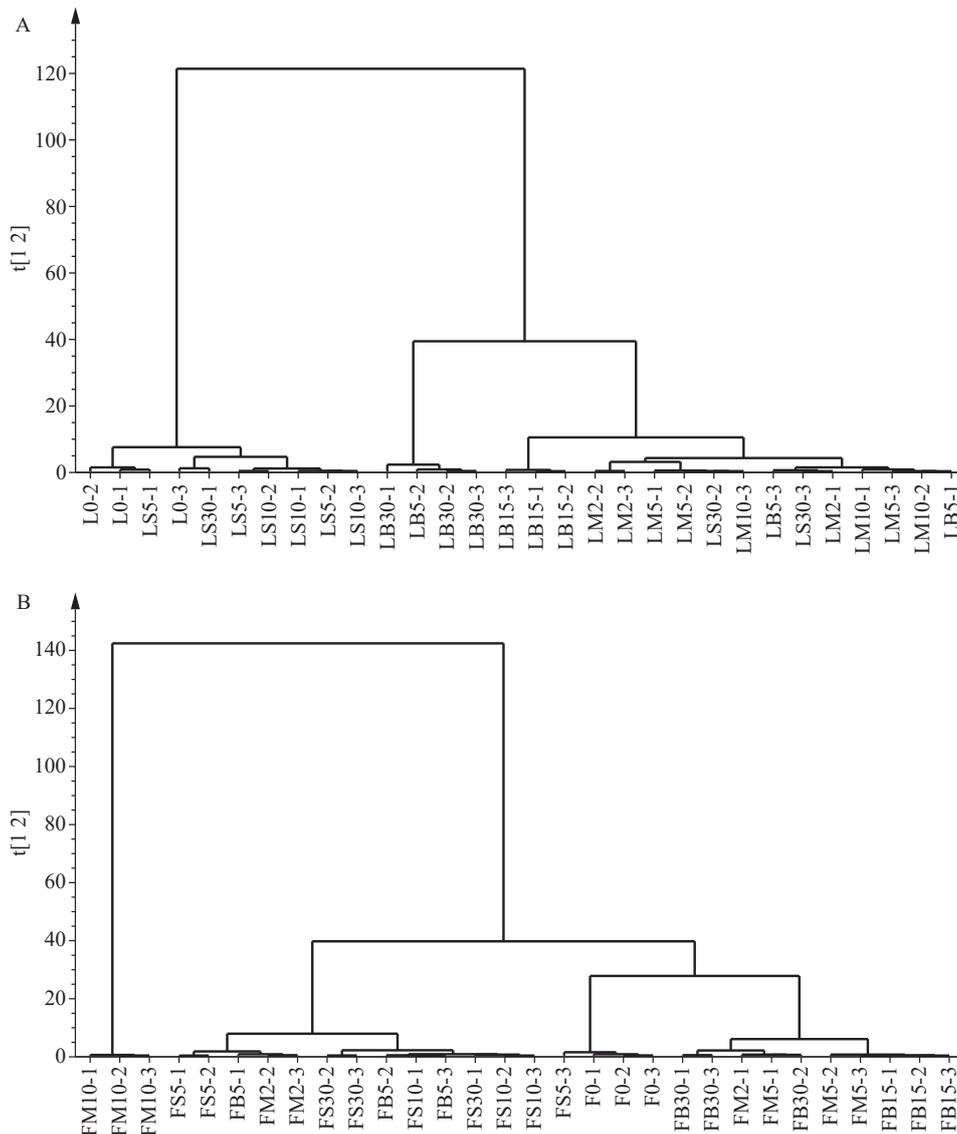


图 7 不同热处理条件下元宝枫叶(A)与花(B)主成分分析的聚类分析图

Fig.7 Hierarchical clustering plot of principle components analysis on the variation of *Acer truncatum* leaves (A) and flowers (B) upon different thermal treatments

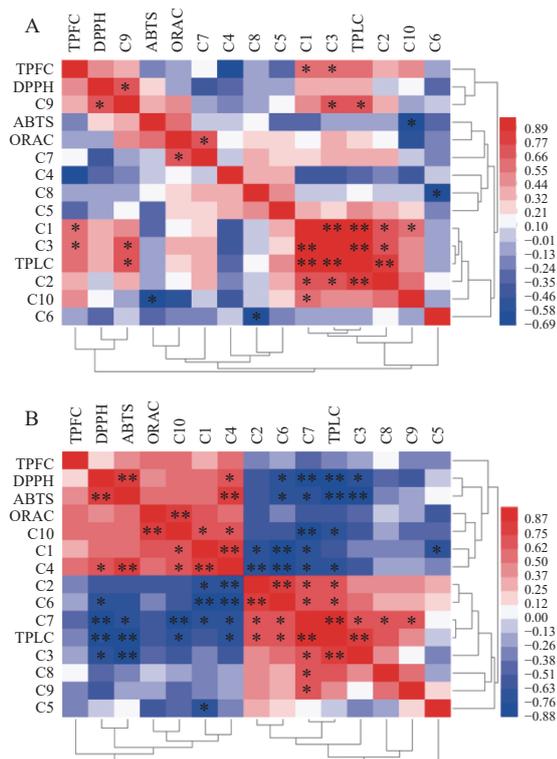


图8 不同热处理条件下元宝枫叶(A)与花(B)酚类成分及抗氧化活性之间相关性热图

Fig.8 Correlation heat map of phenolic constitutions and antioxidant levels of *Acer truncatum* leaves (A) and flowers (B) among different thermal treatments

注: \*:  $0.01 < P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; 编号与酚类单体对应关系如下: 没食子酸(C1)、没食子酸乙酯(C2)、1,2,3,4,6-五-O-烯丙基- $\beta$ -D-葡萄糖(C3)、新绿原酸(C4)、山奈酚-3-O-鼠李糖苷(C5)、槲皮素-3-O-阿拉伯吡喃糖苷(C6)、槲皮素-3-O-半乳糖苷(C7)、槲皮素-3-O-葡萄糖苷(C8)、槲皮素-3-O-鼠李糖苷(C9)、杨梅素-3-O-鼠李糖苷(C10)。

ORAC 水平显著正相关( $P < 0.05$ ), 反应上述两种单体化合物在元宝枫花的抗氧化活性变化中起主导作用。而槲皮素-3-O-阿拉伯吡喃糖苷、槲皮素-3-O-半乳糖苷、1,2,3,4,6-五-O-烯丙基- $\beta$ -D-葡萄糖、以及 TPLC 含量与 DPPH、ABTS 两种抗氧化水平呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 说明上述成分在元宝枫花的热处理过程中可能是主要的降解成分, 所生成的其他物质具有更高的抗氧化能力。

### 3 讨论

本文对元宝枫花与叶进行多种短时间处理以模拟食品生产过程中的热加工手段, 从而表征其对样品中酚类成分及抗氧化活性的影响。研究结果显示, 元宝枫叶与花在多数热处理下总酚含量未产生显著性变化。即使总酚含量相同, 后续研究发现元宝枫叶与花中酚类组成及抗氧化活性变化并不相同。Rodriguez-Mateos 等<sup>[17]</sup> 探究了烹饪、发酵和烘烤对于野生蓝莓中酚类成分的影响, 结果同样显示总体酚类含量不变而多种单体成分含量具有显著差异。

虽然前期工作表明元宝枫叶与花中具有相近的单体酚类组成<sup>[11]</sup>, 但本文发现在相同热处理中叶与花

酚类含量变化呈现不同的规律, 没食子酸类化合物在三组元宝枫叶热处理样品中均显著升高, 而元宝枫花中酚类单体变化趋势整体相较于叶更为平缓。叶与花中抗氧化活性成分的差异化改变可能与叶与花的基质组成与结构不同有关。滕红梅等<sup>[29]</sup> 通过解剖叶片发现, 元宝枫叶细胞整体呈长柱形, 排列紧密, 且具有海绵组织及 2~3 层栅栏薄壁组织, 从结构层面印证了元宝枫叶对于热处理反应较不敏感的原因。

据研究报道, 热处理可导致存在于食品基质中的高分子量聚合物产生降解, 从而释放构成聚合物的低分子量亚基, 并且这些低分子量化合物常具有较高的生物活性及吸收效率<sup>[30-31]</sup>。本研究中, 元宝枫叶与花内没食子酸类化合物含量在热处理后均有较大幅度的提升。没食子酸及其衍生物作为水解单宁的基本构成单元, 经不断聚合形成没食子单宁, 在槭树中广泛存在<sup>[32]</sup>。由此, 本文中新生成的没食子酸类化合物推测为由没食子单宁在加热环境中经水解产生, 上述没食子酸水解过程在 Lu 等<sup>[33]</sup>、Munteanu 等<sup>[34]</sup> 和 Kim 等<sup>[35]</sup> 的研究中均有报道。

不同处理对于抗氧化水平造成不同影响, ORAC 水平在多数元宝枫叶与花热处理后显著提高。ORAC 法测定一段时间内抗氧化剂对于过氧自由基胁迫的实时动态保护能力, 相较于 DPPH 与 ABTS 法单一时间点清除率的计算模式而言能够更全面与准确描述抗氧化活性<sup>[34]</sup>。Zhang 等<sup>[15]</sup> 测定了紫茄在热处理过程中的酚类及抗氧化活性变化, 结果显示其中没食子酸含量在多种处理中均有提升, 但 DPPH 与 ABTS 法测定的抗氧化活性却均呈下降趋势, 本研究结果与其一致。

主成分及相关性分析显示, 没食子酸类衍生物含量的变化与 TPFC 及 TPLC 含量变化显著相关, 再次说明高温导致的没食子酸单宁类物质的降解生成了以没食子酸、没食子酸乙酯, 以及 1,2,3,4,6-五-O-烯丙基- $\beta$ -D-葡萄糖为代表的小分子衍生物<sup>[35-36]</sup>。整体而言, 在叶与花中不同酚类单体对于整体抗氧化活性具有差异化贡献。

### 4 结论

本研究对元宝枫花与叶进行多种短时间热处理以模拟食品热加工手段, 从而表征样品中酚类成分及抗氧化活性的动态变化。结果显示, 不同热处理方法造成的影响之间差异明显。此外, 元宝枫叶与花的总酚含量变化不大, 而其中酚类单体成分变化显著。于此同时, 以 ORAC 水平为代表的抗氧化能力在多数元宝枫叶与花热处理后显著提高。综上所述, 热处理方式与加热时间对于元宝枫叶与花中的酚类组成及抗氧化能力具有不同影响, 因此选择合适的热处理条件对于其生物活性及商品价值的提升尤为重要。作为食品资源而言, 元宝枫叶在热处理过程中的酚类组成改变及抗氧化活性提成表现优于元宝枫花, 本研究为元宝枫叶与花在食品领域的加工处理与深入开发

提供了理论基础。

### 参考文献

- [ 1 ] 王兰珍, 马希汉, 王姝清. 元宝枫研究进展[J]. 西北林学院学报, 1998, 13(1): 96–100. [ WANG L Z, MA X H, WANG S Q. Advances in the researches of *Acer truncatum* [J]. Journal of Northwest Forestry College, 1998, 13(1): 96–100. ]
- [ 2 ] FAN H, SUN L W, YANG L G, et al. Assessment of the bioactive phenolic composition of *Acer truncatum* seed coat as a byproduct of seed oil[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 118: 11–19.
- [ 3 ] 王性炎, 王姝清. 新资源食品—元宝枫籽油[J]. 中国油脂, 2011, 36(9): 56–59. [ WANG X Y, WANG S Q. New resource food—*Acer truncatum* seed oil[J]. *China Oils and Fats*, 2011, 36(9): 56–59. ]
- [ 4 ] MA Q Y, SUN T L, LI S S, et al. The *Acer truncatum* genome provides insights into nervonic acid biosynthesis[J]. *Plant Journal*, 2020, 104(3): 662–678.
- [ 5 ] GU R H, RYBALOV L, NEGRIN A, et al. Metabolic profiling of different parts of *Acer truncatum* from the Mongolian Plateau using UPLC-QTOF-MS with comparative bioactivity assays[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(5): 1585–1597.
- [ 6 ] 杨继平, 封加平, 陈圣林, 等. 关于元宝枫产业发展的调研报告[J]. 中国林业产业, 2021(5): 5–13. [ YANG J P, FENG J P, CHEN S L, et al. Research report on the development of *Acer truncatum* industry[J]. *China Forestry Industry*, 2021(5): 5–13. ]
- [ 7 ] 佟稀鑫, 许佳敏, 陈芳, 等. 元宝枫化学成分及产品应用现状研究进展[J]. 中国油脂, 2022, 47(2): 118–123. [ TONG Y X, XU J M, CHEN F, et al. Advance in chemical components and products application status of *Acer truncatum* Bunge[J]. *China Oils and Fats*, 2022, 47(2): 118–123. ]
- [ 8 ] ZHANG L, XU L, YE Y H, et al. Phytochemical profiles and screening of  $\alpha$ -glucosidase inhibitors of four *Acer* species leaves with ultra-filtration combined with UPLC-QTOF-MS/MS[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 129: 156–168.
- [ 9 ] FAN Y X, LIN F K, ZHANG R F, et al. *Acer truncatum* Bunge: A comprehensive review on ethnobotany, phytochemistry and pharmacology[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2022, 282: 114572.
- [ 10 ] YANG L G, YIN P P, FAN H, et al. Response surface methodology optimization of ultrasonic-assisted extraction of *Acer Truncatum* leaves for maximal phenolic yield and antioxidant activity[J]. *Molecules*, 2017, 22(2): 232–232 .
- [ 11 ] YANG L G, YIN P P, HO C T, et al. Effects of thermal treatments on 10 major phenolics and their antioxidant contributions in *Acer truncatum* leaves and flowers[J]. *Royal Society Open Science*, 2018, 5(6): 180364.
- [ 12 ] YANG L G, YIN P P, LI K, et al. Seasonal dynamics of constitutive levels of phenolic components lead to alterations of antioxidant capacities in *Acer truncatum* leaves[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2018, 11(1): 14–25.
- [ 13 ] 王向东, 段江莲, 李青萍. 速溶枫露茶工艺研究[J]. 食品科学, 2005(1): 275–278. [ WANG X D, DUAN J L, LI Q P. Study on processing technology on *Acer truncatum* bunge[J]. *Food Science*, 2005(1): 275–278. ]
- [ 14 ] SALAZAR-ORBEA G L, GARCIA-VILLALBA R, TOMAS-BARBERAN F A, et al. High-pressure processing vs. thermal treatment: Effect on the stability of polyphenols in strawberry and apple products[J]. *Foods*, 2021, 10(12): 2919.
- [ 15 ] ZHANG Y F, DENG Z Y, LI H Y, et al. Degradation kinetics of Anthocyanins from purple eggplant in a fortified food model system during microwave and frying treatments[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(42): 11817–11828.
- [ 16 ] LINHARES M F D, ALVES FILHO E G, SILVA L M A, et al. Thermal and non-thermal processing effect on acai juice composition[J]. *Food Research International*, 2020, 136: 109506.
- [ 17 ] RODRIGUEZ-MATEOS A, CIFUENTES-GOMEZ T, GEORGE T W, et al. Impact of cooking, proving, and baking on the (poly) phenol content of wild blueberry[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(18): 3979–3986.
- [ 18 ] YUSTE S, MACIA A, MOTILVA M J, et al. Thermal and non-thermal processing of red-fleshed apple: how are (poly) phenol composition and bioavailability affected[J]. *Food & Function*, 2020, 11(12): 10436–10447.
- [ 19 ] 苏可珍, 黎小椿, 聂辉, 等. 不同蒸制条件下荔浦芋的风味评价[J]. 食品工业, 2020, 41(10): 185–189. [ SU K Z, LI X C, NIE H, et al. Various flavor evaluation of Lipu Taro in different steamed conditions[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(10): 185–189. ]
- [ 20 ] 李信. 文冠果微波预处理压榨制油工艺技术研究及品质评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [ LI X. Study on the technology and quality evaluation of oil production by microwave pretreatment press of *Xanthoceras sorbifolia* [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Thesis, 2020. ]
- [ 21 ] ADELINA N M, WANG H, ZHANG L, et al. Evaluation of roasting conditions as an attempt to improve bioactive compounds and antioxidant activities of pine nut shell and skin[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, 13(2): 845–861.
- [ 22 ] SINGLETON V L, ORTHOFER R, LAMUELA-RAVENTOS R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent[J]. *Methods in Enzymology*, 1999, 299: 152–178.
- [ 23 ] BRAND-WILLIAMS W, CUVELIER M E, BERSET C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 1995, 28(1): 25–30.
- [ 24 ] RE R, PELLEGRINI N, PROTEGGENTE A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 1999, 26: 1231–1237.
- [ 25 ] OU B, HAMPSCH-WOODILL M, PRIOR R L. Development and validation of an improved oxygen radical absorbance capacity assay using fluorescein as the fluorescent probe[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(10): 4619–1626.
- [ 26 ] 余佳浩, 倪晓瑜, 黄秀彦, 等. 不同品种山药蒸制过程中淀粉消化率及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 52–60. [ YU J H, NI X Y, HUANG X Y, et al. Starch digestibility and antioxidant activity of different varieties of Yam during steaming[J]. *Food Science*, 2022, 43(15): 52–60. ]
- [ 27 ] 吴佳欣, 周波, 邓萌萌, 等. 加热时间对余甘子水煎液中没食子酸的影响[J]. 中成药, 2020, 42(3): 702–708. [ WU J X, ZHOU B, DENG M M, et al. Effects of heating time on gallic acid in the aqueous decoction of *Phyllanthusemblica* [J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2020, 42(3): 702–708. ]
- [ 28 ] FORMAN H J, ZHANG H. Targeting oxidative stress in disease: Promise and limitations of antioxidant therapy[J]. *Nature Re-*

- views *Drug Discovery*, 2021, 20(9): 689–709.
- [ 29 ] 滕红梅, 肖兵, 崔克勇, 等. 8种野生观赏树木叶的解剖结构及抗逆性比较[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(29): 3–6. [ TENG H M, XIAO B, CUI K Y, et al. Omparison of anatomical structure and stress resistance of leaves of eight kinds of wild ornamental trees[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(29): 3–6. ]
- [ 30 ] NIWA Y, KANO H, KASAMA T, et al. Activation of antioxidant activity in natural medicinal products by heating, brewing and lipophilization. A new drug delivery system[J]. *Drugs under Experimental and Clinical Research*, 1988, 14(5): 361–372.
- [ 31 ] SALLAM I E, ABDELWARETH A, ATTIA H, et al. Effect of gut microbiota biotransformation on dietary tannins and human health implications[J]. *Microorganisms*, 2021, 9(5): 965.
- [ 32 ] BI W, GAO Y, SHEN J, et al. Traditional uses, phytochemistry, and pharmacology of the genus *Acer* (maple): A review[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2016, 189: 31–60.
- [ 33 ] LU L L, LU X Y, MA N. Kinetics of non-catalyzed hydrolysis of tannin in high temperature liquid water[J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2008, 9(5): 401–406.
- [ 34 ] MUNTEANU I G, APETREI C. Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(7): 3380.
- [ 35 ] KIM T J, SILVA J L, KIM M K, et al. Enhanced antioxidant capacity and antimicrobial activity of tannic acid by thermal processing[J]. *Food Chemistry*, 2010, 118(3): 740–746.
- [ 36 ] KIM T J, SILVA J L, JUNG Y S. Enhanced functional properties of tannic acid after thermal hydrolysis[J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(1): 116–120.