



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：不同品种梨不同部位多酚含量分析及抗氧化活性研究
作者：兰培利，张倩倩，杨娜，赵紫璇，姜瑜倩，汤尧
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20250063
收稿日期：2025-03-27
网络首发日期：2026-07-09
引用格式：兰培利，张倩倩，杨娜，赵紫璇，姜瑜倩，汤尧. 不同品种梨不同部位多酚含量分析及抗氧化活性研究[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250063>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



不同品种梨不同部位多酚含量分析及抗氧化活性研究

兰培利, 张倩倩, 杨 娜, 赵紫璇, 姜瑜倩, 汤 尧

(天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

摘 要: 采用高效液相色谱-串联质谱法 (HPLC-MS/MS) 对不同品种梨的果皮、带皮果肉、果肉及核肉 4 个部位的多酚类物质进行定性及定量分析和抗氧化能力分析对比, 并进一步对其抗氧化能力进行分析。结果表明: 共检测到 32 种多酚物质, 展现了梨的优秀理化性质。南果梨各部位总酚含量均高于其他品种梨, 而南果梨和天津皇冠梨的果皮总黄酮含量, 显著高于其他品种 ($P < 0.05$)。果皮的抗氧化能力高于果肉和核肉, 与总酚含量呈正相关。这表明梨的果皮作为加工副产物具有高值化利用潜力, 可为功能性食品开发提供天然多酚来源。

关键词: 梨; 液相色谱-串联质谱法; 多酚; 黄酮; 抗氧化活性

中图分类号: TS255.3 **文献标志码:** A

Analysis of Polyphenol Content and Antioxidant Activity in Different Parts of Pear Varieties

LAN Peili, ZHANG Qianqian, YANG Na, ZHAO Zixuan, JIANG Yuqian, TANG Yao

(College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: High-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS) was employed to qualitatively and quantitatively analyze the polyphenolic compounds and compare their antioxidant capacities in four parts of different pear varieties: peel, flesh with peel, flesh, and core flesh. Their antioxidant capacities were further analyzed. The results indicated that a total of 32 polyphenolic compounds were detected, demonstrating the excellent physicochemical properties of pears. The total phenolic content in all parts of the Nanguo pear was higher than that in other pear varieties. Moreover, the total flavonoid content in the peel of both Nanguo pear and Tianjin Huangguan pear was significantly higher than that in other varieties ($P < 0.05$). The antioxidant capacity of the peel was higher than that of the flesh and core flesh and showed a positive correlation with total phenolic content. This suggests that pear peel, as a processing by-product, holds potential for high-value utilization and can serve as a natural source of polyphenols for the development of functional foods.

Key words: oriental pears; LC-MS/MS; dietary polyphenols; flavonoids; antioxidant activity

膳食多酚因具有广泛的生物活性而备受关注。膳食多酚摄入有助于改善抗氧化应激、调控炎症因子、保护心血管以及缓解代谢综合征等机制, 对人体健康表现出显著的积极作用^[1-3]。这是由于多酚分子结构中多个酚羟基连接于芳香环上, 并常以糖苷、酯或聚

合物等形式存在。这种独特的结构赋予多酚显著的抗氧化活性, 主要通过直接清除自由基、抑制自由基链式反应以及螯合促氧化金属离子等多种机制发挥作用^[4]。

作为膳食多酚的重要天然来源, 水果在人类营养

收稿日期: 2025-03-27; 修回日期: 2025-06-06

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32101954)。

作者简介: 兰培利(2001—), 天津人, 硕士研究生; ; 通信作者: 汤 尧, 教授, tangyao886@hotmail.com

健康中占据关键地位。梨(*Pyrus* spp.)作为我国特色优势果树资源,其栽培规模及年产量稳居苹果(*Malus domestica*)与柑橘(*Citrus reticulata*)之后,位列第三大水果品类^[4]。梨的果实因其独特的薄壁组织形态特征(脆嫩多汁性)而广受消费者青睐,其不仅能够提供碳水化合物、抗坏血酸、矿质元素及膳食纤维等基础营养素,还含有丰富的多酚类生物活性物质(包括羟基肉桂酸衍生物、黄烷-3-醇及花青苷等)^[5]。从不同品种梨中提取的生物活性化合物对各种人类具有保护作用^[6]。因此,深入研究梨的生物活性化合物,尤其是多酚,对于推动梨果资源的健康应用具有重要意义。

近年来,国内外学者对梨多酚的研究已取得一些进展。Zhao等^[7]采用有机溶剂-超声波联用技术系统研究梨中的多酚(以绿原酸、黄酮类及酚酸为主),发现绿原酸含量与抗氧化能力呈显著剂量依赖性正相关,且果皮中多酚含量分布密度与抗氧化活性均高于果肉。Sun等^[8]系统性定性与定量分析10个品种梨的疏果幼果中的多酚(以绿原酸、槲皮素苷及酚酸衍生物为主)和三萜类化合物(如熊果酸、齐墩果酸),揭示了品种间多酚总量差异可达5倍以上。然而,现有研究仍存在一定的局限性,特别是在国内主栽的东方梨品种方面。部分研究可能侧重于特定品种或少数组织部位(如仅果皮或果肉),缺乏对同一梨果不同组织部位(如果皮、带皮果肉、果肉及核肉)多酚的全面、系统性比较分析。同时,部分研究方法仅限于总酚/总黄酮的测定,未能对具体的单个多酚化合物进行全面的高分辨定性鉴定和精准定量。此外,将多酚的精准定性定量与多途径抗氧化活性评价相结合的研究,对于深入理解梨中活性成分的分布规律及其功能潜力仍有不足,尤其对于我国丰富多样不同品种的梨中多酚的组成特征和不同组织部位的分布规律,以及抗氧化活性的全面评估,仍需更深入的研究。

本研究采用高效液相色谱-串联质谱技术(HPLC-MS/MS),对6个国内主栽东方梨品种的果皮、带皮果肉、中心区果肉、近核果肉这4个典型组织部位进行定性和定量分析,并结合抗氧化进行综合评价,揭示不同品种及不同组织部位间多酚的组成特征、含量分布规律及抗氧化活性差异,为梨果资源的精细化利用,特别是副产物如果皮和核肉的高值化利用、功能性食品开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料

以6个我国主栽品种梨(*Pyrus* spp.)为试材,均选自中国核心商品化产区,包括:2种黄冠梨(*Pyrus bretschneideri* 'Huangguan'),分别选自天津产区及河北省赵县;雪花梨(*Pyrus bretschneideri* Rehd.),选自河北省石家庄市;库尔勒香梨(*Pyrus sinkiangensis* Yü),选自新疆库尔勒市;南果梨(*Pyrus ussuriensis* Maxim),选自辽宁省鞍山市;秋月梨(*Pyrus pyrifolia* Nakai),选自山东省莱阳市;砀山酥梨(*Pyrus bretschneideri* Rehd.),选自安徽省宿州市。所有果实均于成熟期(7—9月)采收。样品经严格筛选,挑选成熟度一致、大小均一、无机械损伤、无病虫害、无成熟度异常的果实备用,每种样品30个。

1.1.2 试剂与仪器

甲酸,天津大茂化学试剂厂;甲醇、乙腈、熊果苷、原花青素B1、原儿茶醛、隐绿原酸、新绿原酸、绿原酸、原儿茶酸、表儿茶素、丁香酸、表没食子儿茶素、阿魏酸、芥子酸、槲皮素、芦丁、金丝桃苷、D-山梨醇、没食子酸、咖啡酸、对香豆酸、漆黄素,上海麦克林生化科技有限公司;福林酚,上海创赛科技有限公司;L-抗坏血酸、6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸(Trolox)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,3,5-氯化三苯基四氮唑(TPTZ)、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS),上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

ES-J220S/N型电子分析天平,天津市德安特传感技术有限公司;SB-4200DT型超声波清洗机,宁波新芝生物科技股份有限公司;Synergy HTX型多功能酶标仪,美国伯腾(BioTek)仪器有限公司;DL-3021HR型医用离心机,安徽中科都菱商用电器股份有限公司;SI-0246型多功能涡旋混合器,美国科学工业(Scientific Industries)公司;FD-1A-50+型真空冷冻干燥机,上海叶拓科技有限公司;ZenoTOF™ 7600型高效液相色谱-串联质谱仪,美国AB Sciex公司。

1.2 方法

1.2.1 样品制备

梨果清洗和去核后,按果皮、带皮果肉、果肉、核肉顺序切分(厚度8 mm),分装后-80℃冷冻12 h。将冷冻后的样品转移至真空冷冻干燥机中,持续干燥

至质量恒定(质量变化率<0.5%,约48 h)。将样品置于研钵中充分研磨,过80目筛,梨粉密封保存在干燥器中,备用。

1.2.2 多酚的提取

采用超声波提取法提取样品中的酚类物质^[9]。2 g梨粉加到10 mL 70%甲醇溶液中混匀,240 W超声20 min,8000g离心10 min,收集上清液,向残渣中再次添加10 mL 70%甲醇溶液,相同条件进行二次超声提取及离心,共提取3次,合并3次提取液,2~4℃避光保存。

1.2.3 总酚含量(TPC)的测定

采用Folin-酚法^[10]测定梨中的总酚含量。将25 μL提取液与125 μL 0.2 mol/L Folin-酚溶液混合,10 min后加入125 μL 7.5% Na₂CO₃溶液,避光反应2 h,测定765 nm波长处的吸光度。每个样品设3个重复。用10 mL甲醇溶解0.01 g没食子酸(GAE)的7.8125~500 μg/mL溶液作为参考标准绘制标准曲线,TPC最终表示(mg/g)为每克样品(以干质量计)的每毫克没食子酸当量。回归方程为 $y=0.0088x+0.1167$, $R^2=0.9984$ 。

1.2.4 总黄酮(TFC)含量的测定

总黄酮的测定参考Tang等^[11]的方法并作适当修改,采用AlCl₃-NaOH-NaNO₂法测定梨TFC含量。将25 μL样品提取液与25 μL 10% NaNO₂溶液(0.5 g NaNO₂,4.5 g蒸馏水)混合搅拌6 min,加入20 μL 5% AlCl₃溶液(0.25 g AlCl₃·6H₂O,4.75 g蒸馏水)反应5 min,再加入30 μL 1 mol/L NaOH溶液(0.2 g NaOH,4.8 g蒸馏水)静置15 min,测定510 nm处吸光度。每份样品设3次平行。用10 mL甲醇溶解0.01 g芦丁的62.5~500 μg/mL溶液作为参考标准绘制标准曲线,TFC最终表示(mg/g)为每克干重样品的每毫克芦丁当量。回归方程为 $y=0.0009x+0.0319$, $R^2=0.9991$ 。

1.2.5 主要酚类定性定量分析

采用HPLC-MS/MS法参考文献[12]并稍作改进。色谱条件:Shim-pack GIST C18-AQ HP色谱柱(150 mm×2.1 mm,1.9 μm;日本岛津公司);流动相A为含0.1%甲酸的水溶液,流动相B为含0.1%甲酸的乙腈溶液;柱温40℃;流量0.2 mL/min。梯度洗脱程序如下:0~3 min,5%~25% B;3~6 min,25% B;6~9 min,25%~37% B;9~13 min,37% B;13~18 min,37%~54% B;18~22 min,54% B;22~26 min,54%~95% B;26~29 min,95% B;29~29.1 min,95%~5% B;29.1~35 min,5% B。

采用ZenoTOF™ 7600高分辨质谱系统配备电喷雾离子源(ESI),在负离子模式下采集数据。

分别称取新绿原酸、绿原酸、隐绿原酸、咖啡酸、没食子酸、熊果苷、原儿茶酸、丁香酸、芦丁、槲皮素、原花青素B1、D-山梨醇、金丝桃苷、芥子酸、阿魏酸、表没食子儿茶素、对香豆酸、表儿茶素、原儿茶醛、漆黄素,用色谱甲醇超声溶解后定容,配制成0.100 mg/mL混合标准品母液,经逐级稀释制备10个浓度梯度的标准溶液,用于建立标准曲线。

1.2.6 抗氧化活性检测

(1) DPPH自由基清除法

根据Zhang等^[13]DPPH自由基清除活性测定方法进行适当修改。0.0138 g DPPH置于100 mL甲醇中,制备成0.35 mmol/L DPPH溶液。将200 μL DPPH溶液添加到25 μL样品提取液中,室温避光放置4 h后,测定517 nm处吸光度($A_{\text{测定}}$),平行测定3次。0.0025 g Trolox标准品溶于10 mL甲醇中,配制成1000 μmol/L母液,将母液依次稀释为500、250、125、62.5 μmol/L标准品溶液,以其代替样品溶液与DPPH溶液反应,测定吸光度($A_{\text{空白}}$),绘制标准曲线,按照式(1)计算DPPH自由基清除率(R_{DPPH})。DPPH自由基清除活性(mmol/kg)表示为每千克样品(以干质量计)的每毫摩尔Trolox当量。

$$R_{\text{DPPH}} = \frac{A_{\text{空白}} - A_{\text{测定}}}{A_{\text{空白}}} \times 100\% \quad (1)$$

(2) 铁离子还原能力(FRAP)

根据Tang等^[14]的测定方法并略作修改。0.346 g醋酸钠加至200 mL容量瓶中,加入3.2 mL冰醋酸,用蒸馏水定容,制备300 mmol/L醋酸-醋酸钠缓冲溶液。向烧杯中加入0.03 mL浓盐酸与9.97 mL蒸馏水,充分混匀,配制40 mmol/L盐酸溶液。称取0.054 g FeCl₃·6H₂O置于烧杯中,加入10 mL蒸馏水,配制20 mmol/L FeCl₃·6H₂O溶液。称取0.078 g TPTZ药品置于25 mL容量瓶中,用配制好的40 mmol/L盐酸溶液定容,即得10 mmol/L TPTZ溶液。取上述配制的醋酸-醋酸钠缓冲溶液10 mL、TPTZ溶液1 mL、FeCl₃·6H₂O溶液1 mL充分混合,为TPTZ工作液。

将300 μL TPTZ溶液添加到10 μL样品提取液中,室温避光放置2 h,测定593 nm处吸光度,平行测定3次。0.0176 g L-抗坏血酸标准品溶于100 mL甲醇中,配制成1000 μmol/L母液,将母液依次稀释为750、500、250、125、62.5 μmol/L标准品溶液,以其代替样品溶液与TPTZ工作液反应,绘制标准曲

线。FRAP 最终表示 ($\mu\text{mol/g}$) 为每克样品 (以干质量计) 的每微摩尔 L-抗坏血酸当量。

(3) ABTS 自由基清除率

参考 Zhang 等^[15]的方法并略作修改。0.0384 g ABTS 置于烧杯中, 加入 10 mL 超纯水, 配制 7 mmol/L ABTS 溶液。0.19 g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 溶于 5 mL 蒸馏水中, 得到 140 mmol/L $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 溶液。再分别称取 3.4923 g K_2HPO_4 与 0.6737 g KH_2PO_4 固体置于 250 mL 容量瓶中, 并用蒸馏水定容, 制备 10 mmol/L 磷酸钾缓冲液 ($\text{pH}=7.4$)。取 88 μL $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 溶液与 5 mL ABTS 溶液混匀, 室内避光放置 12 h, 即得到 ABTS 自由基储备液。向 ABTS 自由基储备液中添加磷酸钾缓冲液, 使其在 734 nm 处的吸光度为 0.70 ± 0.02 , 以此作为 ABTS 工作液。将 100 μL ABTS 工作液添加到 100 μL 样品提取液中, 在酶标板上混合反应 1 min, 测定 734 nm 处吸光度, 重复 3 次。配制 25~125 g/mL L-抗坏血酸标准溶液, 按照上述样品检测方法, 将 100 μL 标准品溶液加到酶标板中, 随后加入 100 μL ABTS 溶液, 在酶标板上混合反应 1 min, 测定 734 nm 处吸光度, 获得标准曲线, 按照式 (2) 计算 ABTS 自由基清除率。L-抗坏血酸当量表示梨提取液的 ABTS 自由基清除能力。ABTS 最终表示 ($\mu\text{mol/g}$) 为每克样品 (以干质量计) 的每微摩尔 L-抗坏血酸当量。

$$R_{\text{ABTS}} = \frac{A_{\text{空白}} - (A_{\text{测定}} - A_{\text{对照}})}{A_{\text{空白}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $A_{\text{空白}}$ 为不加工工作液的样品溶液测定的吸光度

值, $A_{\text{测定}}$ 为测定样品的吸光度值, $A_{\text{对照}}$ 为对照组样品测定的吸光度值。

1.3 数据处理

所有数据重复平行测定 3 次, 结果以“平均值 $\pm$ 标准差”表示。采用 IBM SPSS Statistics 21.0 统计软件对数据进行方差分析, 并进行 Duncan's 多重比较。 $P < 0.05$ 表示差异显著, 大写字母 A—F 表示不同品种梨相同部位的差异显著性, 小写字母 a—d 表示同一品种梨不同部位间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 总酚含量

酚类物质作为植物中主要活性成分, 在调节人体健康方面发挥积极作用。不同品种梨不同组织部位的总酚含量如图 1 所示。由图 1 可知, 6 种梨中各部位总酚含量最高的是南果梨, 其含量范围为 $(3.46 \pm 0.49) \sim (12.54 \pm 1.00) \text{ mg/g}$, 这表明南果梨各部分酚类物质含量较为丰富。随着果皮向果核部位递进, 总酚含量逐渐递减, 而其他品种梨中这种变化趋势不明显, 例如香梨、秋月梨、雪花梨等果肉和核肉部位的 TPC 含量无显著性差异。这可能是由于样品品种、生长地域、生物学等多种因素的影响, 导致不同品种梨中酚类化合物的种类和含量存在较大差异^[6]。南果梨的总酚含量较其他品种高, 这与 Li 等^[16]对 8 种梨的研究结果相似。

香梨的果皮与带皮果肉部分的 TPC 相对较高, 仅次于南果梨。然而, 香梨果肉与核肉的 TPC 则相对较低。这与作菲等^[17]研究发现库尔勒香梨果皮的总黄酮、总酚含量显著高于果肉和心外果肉的结果相似。各品种中果皮部位的总酚含量均高于其他部位, 其中南果梨果皮中总酚含量最高, 其次是香梨和皇冠梨, 均显著高于其他品种。此外, 李丽梅等^[18]研究表明, 梨果心酚类物质含量高于果皮和果肉, 这可能是因为该研究果心取样部位为果核, 而本研究中取样部位为近果核部位的果肉。在本研究中, 雪花梨核肉的 TPC 较高, 仅次于南果梨, 但是雪花梨果皮的 TPC 在所有品种中最低。不同梨品种及不同组织部位间 TPC 的显著差异可能与产地环境、形态及酚类化合物的存在形式相关^[16], 需进一步研究阐明其内在机制及对酚类物质分布的影响。

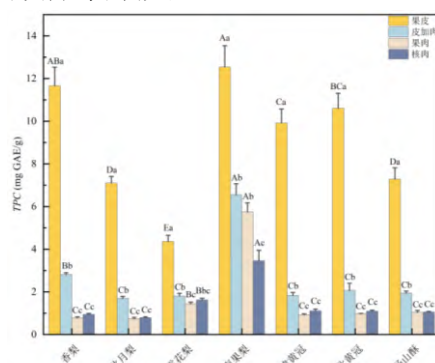


图 1 不同品种梨不同组织部位的总酚含量

Fig. 1 Total phenolic content in different tissue parts of different pear varieties

2.2 总黄酮含量

黄酮是人类饮食中来源最广含量最丰富的一类

多酚化合物,具有良好的金属离子螯合和抗氧化特性,可以有效清除体内的自由基,有利于人体健康^[18]。不同品种梨不同组织部位的总黄酮含量如图2所示。各品种间芦丁当量(RE)含量差异显著,其中南果梨各组织部位TFC呈现显著优势,含量高达(7.01 ± 0.71)~(19.88 ± 0.65) mg/g,体现出该品种在果皮、果肉及核肉中黄酮类物质的富集特性。此外,南果梨核肉TFC(7.59 mg/g)显著高于其余品种核肉,此分布模式与其他品种黄酮类物质的组织积累规律存在显著差异,可能与品种特异性次生代谢调控机制有关。

在带皮果肉部位,天津黄冠梨的TFC最高,显著优于其他品种;其单独果皮部位TFC与南果梨并列首位。然而,天津黄冠梨果肉与核肉TFC值分别为(7.01 ± 0.20) mg/g和(0.99 ± 0.24) mg/g,呈现明显的组织间代谢梯度。砀山酥梨在带皮果肉部位TFC及核肉TFC均保持次优水平,但其果肉部位TFC值显著低于果皮部位,揭示黄酮类物质在果实不同组织中的异质性分布特征。

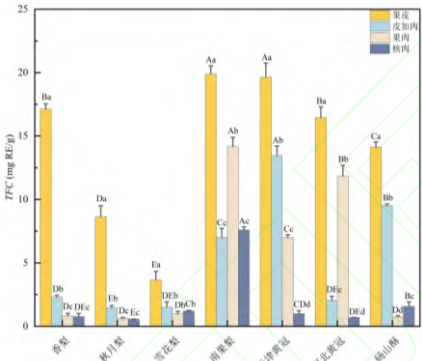


图2 不同品种梨不同组织部位的总黄酮含量

Fig. 2 Total flavonoid contents in different tissue positions of different pear varieties

2.3 主要酚类的定性定量

不同品种梨不同组织部位的主要酚类组成分析见表1,共检测到32种多酚化合物,其中含量较高的依次为熊果苷、隐绿原酸、原花青素B1和阿魏酸。

表1 不同品种梨不同组织部位的主要酚类组成分析

Tab. 1 Main polyphenol components of different tissue positions of different pear varieties				
序号	保留时间/min	m/z [M-H]	分子式	化合物鉴定
1	1.91	191.0564	C ₇ H ₁₂ O ₆	奎宁酸
2	2.21	191.0215	C ₆ H ₈ O ₇	柠檬酸
3	4.01	271.0842	C ₁₂ H ₁₆ O ₇	熊果苷
4	4.62	137.0239	C ₇ H ₆ O ₃	对羟基苯甲酸

5	4.99	153.0557	C ₆ H ₁₀ O ₃	羟基酪醇
6	5.11	197.0460	C ₉ H ₁₀ O ₅	丁香酸
7	5.27	353.0880	C ₁₆ H ₁₈ O ₉	新绿原酸
8	5.38	305.0670	C ₁₅ H ₁₄ O ₇	表没食子儿茶素
9	5.55	153.0200	C ₇ H ₆ O ₄	原儿茶酸
10	5.59	181.0718	C ₆ H ₁₄ O ₆	D-山梨醇
11	5.78	353.0880	C ₁₆ H ₁₈ O ₉	隐绿原酸
12	5.97	577.1362	C ₃₀ H ₂₆ O ₁₂	原花青素 B1
13	6.24	353.0890	C ₁₆ H ₁₈ O ₉	绿原酸
14	6.31	289.0813	C ₁₅ H ₁₄ O ₆	表儿茶素
15	6.32	289.0743	C ₁₅ H ₁₄ O ₆	儿茶素
16	6.37	137.0240	C ₇ H ₆ O ₃	原儿茶醛
17	6.73	179.0360	C ₉ H ₈ O ₄	咖啡酸
18	7.22	609.1479	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	芦丁
19	7.23	593.1509	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₅	山奈酚-3-O-芸香糖苷
20	7.61	577.1351	C ₃₀ H ₂₆ O ₁₂	原花青素 B2
21	8.13	447.0898	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₁	木犀草苷
22	8.19	463.0880	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₂	金丝桃苷
23	8.52	163.0410	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	对香豆酸
24	9.07	623.1593	C ₂₈ H ₃₂ O ₁₆	异鼠李素-3-O-新橙皮苷
25	9.31	193.0510	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	阿魏酸
26	9.67	435.1000	C ₂₁ H ₂₄ O ₁₀	根皮苷
27	10.02	285.0410	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	漆黄素
28	10.04	271.0568	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	柚皮素
29	10.69	463.0857	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₂	槲皮素
30	10.87	223.0620	C ₁₁ H ₁₂ O ₅	芥子酸
31	15.91	169.0150	C ₇ H ₆ O ₅	没食子酸
32	17.53	285.0488	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	山奈酚

不同品种梨不同组织部位的酚类物质含量热图如图3所示。南果梨的酚类物质含量最高(10213.56 μg/g),其余依次为香梨(5886.11 μg/g)、雪花梨(4652.94 μg/g)、河北黄冠梨(4471.84 μg/g)、砀山酥梨(4033.20 μg/g)、天津黄冠梨(3748.06 μg/g)、秋月梨(3039.80 μg/g)。在4个部位中,所有品种的果皮中多酚类物质含量最高,其余依次为带皮果肉、核肉、果肉,可能原因是果皮中内质网丰富,有利于酚类化合物的合成,而果肉与其相反,且线粒体持续完整不能合成有机物^[19]。梨果肉检测出熊果苷、没食子酸、绿原酸、表儿茶素和芦丁等,其中,绿原酸和表儿茶素是果肉的主要酚类物质,与Tanrioven等^[20]的报道一致;熊果苷也是梨果肉中的主要酚类成分,与赵金伟等^[21]的报道一致。果皮中检出熊果苷、

绿原酸、表儿茶素、咖啡酸、儿茶素、香豆酸和芦丁,其中熊果苷和绿原酸是果皮的主要酚类物质,与周晓凤等^[22]研究的结果一致。此外,在本研究中,绿原酸的含量高于其他酚酸化合物。梨果实中主要的类黄酮为熊果苷,次生类黄酮类化合物为儿茶素,其次是槲皮素和表儿茶素。综合本研究结果,南果梨的总酚含量和总黄酮含量最高,并且在4个部位当中,果皮中的含量最高。

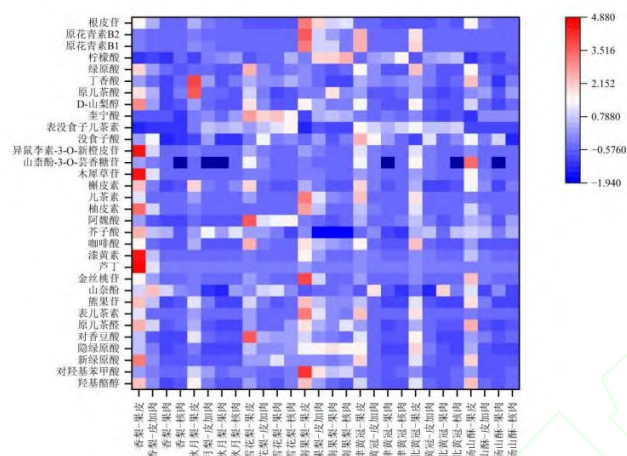


图3 不同品种梨不同组织部位的酚类物质含量热图

Fig. 3 Heatmap of phenolic compounds content in different tissue positions of different pear varieties

2.4 抗氧化活性检测

2.4.1 DPPH 自由基清除活性

不同品种梨不同组织部位的 DPPH 自由基清除活性如图4所示。由图4可知,南果梨各部位活性物质含量均显著高于其他品种,这与其总酚和总黄酮含量较高相关。此外,各品种梨的果皮 DPPH 自由基清除能力普遍高于带皮果肉、果肉及核肉,说明果皮的抗氧化能力高于果肉和核肉,这与李丽梅等^[18]的研究结果类似。河北黄冠、天津黄冠与南果梨果皮 DPPH 自由基清除能力均呈现较高水平,而雪花梨果皮 DPPH 自由基清除能力显著低于其他品种 ($P<0.05$)。南果梨果肉 DPPH 自由基清除能力显著高于其核肉 ($P<0.05$),而其余品种果肉与核肉间清除能力无显著差异。

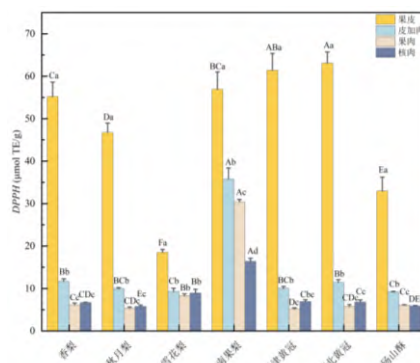


图4 不同品种梨不同组织部位的 DPPH 自由基清除活性

Fig. 4 DPPH radical scavenging activity in different tissue positions of different pear varieties

2.4.2 铁离子还原能力 (FRAP)

不同品种梨不同组织部位的 FRAP 抗氧化活性如图5所示。由图5可知,供试梨品种中,南果梨果肉与核肉的铁离子还原能力显著高于其他品种,雪花梨次之,其余品种抗氧化能力显著偏低。果皮分析显示,香梨与雪花梨果皮的铁离子还原能力显著高于其他品种果皮 ($P<0.05$),而其余品种果皮间无显著差异。另外,南果梨果皮、带皮果肉、果肉及核肉 FRAP 值均处于较高水平,但无显著性差异;与之相反,其他品种果皮与皮加肉的铁离子还原能力显著高于单一果肉或核肉。

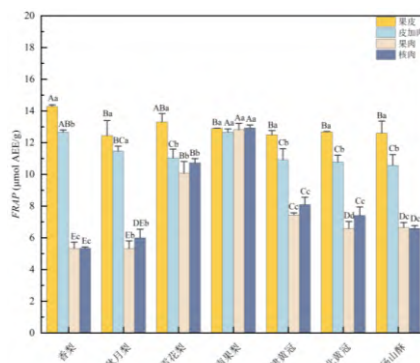


图5 不同品种梨不同组织部位的 FRAP 抗氧化活性

Fig. 5 FRAP assay of antioxidant activity in different tissue positions of different pear varieties

2.4.3 ABTS 自由基清除活性

不同品种梨不同组织部位的 ABTS 自由基清除活性如图6所示。南果梨、天津和河北皇冠梨、砀山梨、香梨的果皮 ABTS 自由基清除能力均处于较高水平,且南果梨带皮果肉、果肉及核肉 ABTS 清除能力均显著高于其他供试品种 ($P<0.05$)。与 DPPH 法测定结果一致,南果梨果肉 ABTS 清除能力显著高于其

核肉;与之不同,其他品种果肉与核肉间清除能力无显著差异。

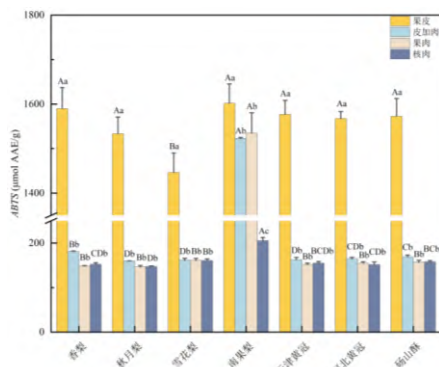


图6 不同品种梨不同组织部位的ABTS自由基清除活性

Fig. 6 ABTS radical scavenging activity in different tissue positions of different pear varieties

综合比较发现,在所有品种中,南果梨的抗氧化能力最强,雪花梨的抗氧化能力最弱,主要由梨的基因型和生长环境共同控制。此外,在4个不同部位中,果皮的抗氧化能力最强。这与杜国荣^[23]的研究结果类似,其研究发现猕猴桃的果皮抗氧化能力显著高于果肉。以上对DPPH自由基清除能力、铁离子还原能力和ABTS清除能力的测定结果表明,不同品种之间的抗氧化活性存在明显的差异,且抗氧化能力与其总酚含量和总黄酮含量呈现正相关关系。这与胡甲飞^[24]表述的多酚和类黄酮含量较高的苹果,其抗氧化能力显著高于其他品种的结果相似。但是,DPPH、FRAP和ABTS清除能力的评估结果之间也存在一定的差异,这可能是由于不同品种和组织部位的梨中抗氧化物质的种类和含量存在差异。此外,具有抗氧化活性的除了多酚类物质,还包括维生素类、生物碱、某些植物多糖和某些萜类化合物。

3 结 语

通过测定不同品种梨不同组织部位的总酚含量、总黄酮含量、酚类物质组成以及对DPPH、ABTS自由基清除能力、铁离子还原能力,明确不同梨品种之间酚类物质含量和抗氧化活性的差异。结果显示,南果梨的总酚含量、总黄酮含量和抗氧化活性最高,而雪花梨中这些物质含量最低。共检测到32种酚类化合物,明确熊果苷、隐绿原酸、原花青素B1和阿魏酸是梨中主要酚类化合物。此外,各品种中4个不同部位对比分析表明,梨果皮的抗氧化活性最高,这与酚类物质的含量呈显著正相关。本研究为梨果实精细

化利用,特别是梨果皮作为加工副产物的高值化利用提供了理论依据,有助于推动梨产业的资源化利用以及减少农业废弃物。

参考文献:

- [1] 刘宏.熊果苷抗肿瘤潜能的研究进展[J].广州化工,2023,51(11): 30-32.
- [2] An Ning, Zhou Shubin, Chen Xinwang, et al. High-yield production of β -arbutin by identifying and eliminating byproducts formation[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2023, 107(20): 6193-6204.
- [3] 刘晓婷,王鑫璇.熊果苷的药理作用及机制研究进展[J].食品与发酵工业,2022,48(2): 309-316.
- [4] 赵谋明,董红竹,林恋竹.八种水果多酚的定量分析与抗氧化活性研究[J].现代食品科技,2017,33(10): 225-236.
- [5] Hong S Y, Lansky E, Kang S S, et al. A review of pears (*Pyrus* spp.), ancient functional food for modern times[J]. BMC Complementary medicine and therapies, 2021, 21: 1-14.
- [6] Wang Zening, Barrow C J, R Dunshea F R, et al. A comparative investigation on phenolic composition, characterization and antioxidant potentials of five different Australian grown pear varieties[J]. Antioxidants, 2021, 10(2): 151.
- [7] ZHAO Y Q, SONG J Y, WANG Y X, et al. Antioxidant properties of pear polyphenols and their application in the development of functional foods[J]. Advances in food science and human nutrition, 2025, 7(1): 1-8.
- [8] Sun Liqiong, Tao Shutian, Zhang Shaoling, et al. Characterization and quantification of polyphenols and triterpenoids in thinned young fruits of ten pear varieties by UPLC-Q TRAP-MS/MS[J]. Molecules, 2019, 24(1): 159.
- [9] Li Xuejin, Luo Shenghu, Shen Jianduo, et al. Synergistic anti-browning effects of short-term high oxygen pre-stimulation and supercooled storage on fresh-cut potatoes by regulating polyphenol biosynthesis and membrane lipid oxidation[J]. Postharvest biology and technology, 2025, 219: 113257.
- [10] Sathya R, Rasane P, Singh A. Effect of herbal application on browning inhibition and physico-chemical quality of pear (*Pyrus communis*) slices[J]. South African journal of

- botany, 2024, 165: 505-516.
- [11] Tang Yao, Zhang Bing, Li Xihong, et al. Bound phenolics of quinoa seeds released by acid, alkaline, and enzymatic treatments and their antioxidant and α -glucosidase and pancreatic lipase inhibitory effects[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2016, 64(8): 1712-1719.
- [12] He Wenjia, Oskar L, Tian Ye, et al. Chemical composition of juices made from cultivars and breeding selections of European pear (*Pyrus communis* L.)[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2022, 70(16): 5137-5150.
- [13] Zhang Xiaoying, Yin Chengpeng, Hao Jiaqi, et al. Improving the biological activity, functional properties, and emulsion stability of soybean meal hydrolysate via covalent conjugation with polyphenol[J]. Food Chemistry, 2023, 422: 136255.
- [14] Tang Yao, Li Xihong, Zhang Bing, et al. Characterisation of phenolics, betanins and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. genotypes[J]. Food Chemistry, 2015, 166: 380-388.
- [15] Zhang Xiaoying, Ma Danhua, Yin Chengpeng, et al. The biological activity, functionality, and emulsion stability of soybean meal hydrolysate-proanthocyanidin conjugates[J]. Food chemistry, 2024, 432: 137159.
- [16] Li Xia, Zhang Junying, Gao Wenyuan, et al. Chemical composition and anti-inflammatory and antioxidant activities of eight pear cultivars[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2012, 60(35): 8738-8744.
- [17] 仵菲, 蒲云峰, 雷晓钰, 等. 库尔勒香梨果实发育过程中酚类物质及抗氧化活性研究[J]. 果树学报, 2022, 39(4): 574-583.
- [18] 李丽梅, 赵哲, 何近刚, 等. 不同品种梨果实酚类物质和抗氧化性能分析[J]. 食品科学, 2014, 35(17): 83-88.
- [19] 冯岚, 李湘钰, 吴翠云, 等. 梨果实酚类物质组成及含量差异研究[J]. 中国农业科技导报, 2025, 27(3): 153-161.
- [20] TANRIÖVEN D, EKŞİ A. Phenolic compounds in pear juice from different cultivars[J]. Food chemistry, 2004, 93(1): 89-93.
- [21] 赵金伟, 李范洙, 崔泰花, 等. 苹果梨生育期酚类物质的分析[J]. 食品工业科技, 2009, 30(9): 105-107.
- [22] 周晓凤, 李湘钰, 冯岚, 等. 梨果实酚类物质组成及含量差异研究[J]. 中国农业科技导报(中英文), 2025, 27(3): 153-161.
- [23] 杜国荣. 猕猴桃、柿和苹果果实的抗氧化能力及其抗氧化活性成分的分析[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2009.
- [24] 胡甲飞. 红肉苹果新品种‘满红’制醋适应性研究与品质分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.