八种水果多酚的定量分析与抗氧化活性研究

赵谋明[1,2,3]，董红竹[1,2]，林恋竹[1,2]

（1.华南理工大学食品科学与工程学院，广东广州 510640）（2.广东省食品绿色加工与营养调控工程研究技术中心，广东广州 511458）（3.北京工商大学，北京食品营养与人类健康高精尖创新中心，北京 100048）

摘要：本文对比研究了 8 种水果的果皮、果肉、果汁及全果中维生素 C 与总酚含量，采用高效液相色谱法测定其多酚种类及含量，并评价其抗氧化活性。8 种水果 Vc 含量从高到低，依次为：番石榴>脐橙>菠萝=木瓜>青苹果=皇冠梨=金桔=芒果；总酚含量最高的水果为芒果；从 8 种水果中共鉴定出 16 种多酚类化合物，以绿原酸、儿茶素、表儿茶素、芦丁、杨梅酮和根皮苷含量较高。根据 8 种水果全果中多酚物质种类与含量，分为 4 类：（1）脐橙；（2）芒果；（3）金桔；（4）青苹果、皇冠梨、番石榴、菠萝和木瓜；DPPH 自由基清除能力从强到弱，依次为芒果>番石榴>青苹果>皇冠梨=金桔=脐橙=菠萝=木瓜；氧自由基吸收能力从强到弱，依次为脐橙>番石榴>皇冠梨=芒果>青苹果=金桔=菠萝=木瓜。本研究可为水果精深加工及功能性食品开发提供理论指导。

关键词：水果；总酚；DPPH 自由基清除能力；氧自由基吸收能力；高效液相

文章篇号：1673-9078(2017)10-225-236 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.10.032

Comparative Study on the Phenolic Profiles of Eight Fruits and Their Antioxidant Activities

ZHAO Mou-ming[1,2,3], DONG Hong-zhu[1,2], LIN Lian-zhu[1,2]

(1.College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)
(2.Guangdong Food Green Processing and Nutrition Regulation Technologies Research Centre, Guangzhou 511458, China)
(3.Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health, Beijing Technology & Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The content of vitamin C and total phenolic content in peel, flesh, whole fruit and fruit juice of eight fruits were determined in this study. Phenolic profiles of eight fruits were determined by high performance liquid chromatography (HPLC), and their antioxidant activities were evaluated. The results showed that the content of vitamin C in eight fruits were in the order of guava > navel orange > pineapple = papaya > green apple = crown pear = kumquat = mango. Mango had the highest total phenolic content. Sixteen phenolic compounds were identified from eight fruits, and the content of chlorogenic acid, catechins, epicatechin, rutin, myricetin and phloridzin were higher. Eight fruits were divided into four categories in terms of the phenolic profiles: (1) navel orange; (2) mango; (3) kumquat; (4) green apple, crown pear, guava, pineapple and papaya. DPPH radical scavenging activities of the eight fruits were in a descending order as follows: mango > guava > green apple > crown pear = kumquat = navel orange = pineapple = papaya. Oxygen radical absorbance capacities decreased in the order of navel orange > guava > crown pear = mango > green apple = kumquat = pineapple = papaya. This study could provide the theoretical guidance for the development of fruit deep processing industry and functional food.

Key words: fruit; phenolics; DPPH radical scavenging activity; oxygen radical absorption capacity; HPLC

衰老是生理功能逐渐下降的过程，伴随着退行性疾病和死亡的风险，是人体正常的生理现象。衰老是一个复杂的过程，影响的因素很多。随着科学技术的发展，人们对衰老过程的认识逐渐的加深，并提出了更多新的理论，其中自由基老化理论是衰老的分子基础的研究最多的学说之一[1]。

抗氧化剂是极其重要的物质，具有保护机体免受自由基诱导的氧化应激反应，起到保护机体、延缓衰老的功效[2]。水果中所含有的维生素 C 和多酚等物质，具有较强的抗氧化活性，对延缓衰老以及预防、治疗退行性疾病具有重要的作用[3,4]。在现代水果产业链中，大部分的水果采用鲜果销售的方式进行出售，但水果的贮藏期短、易腐烂、销售期短和价格低等特性，

收稿日期：2017-03-02

基金项目：国家自然科学基金项目（31501424）；广东省科技计划项目（2011A020102001）

作者简介：赵谋明（1964-），男，教授，博导，主要从事蛋白质化学与工程、食品生物技术方面的研究

大大降低了水果的经济效益[5]。

常见的水果，例如浆果类：葡萄和蓝莓，均被研究证明是多酚含量高，抗氧化活性好的水果，以他们为主开发的饮料和果酒受到国内外人民的欢迎[6]。关于苹果和梨中活性成分分离鉴定以及功效评价的研究较多[7]，其精深加工产品也多，然而，对于亚热水果包括番石榴、金桔、芒果、脐橙、菠萝和木瓜的活性成分及功效评价不多，精深加工产品不多，还未引起重视，因此，本文对比研究了这些核果类水果各部位的成分与抗氧化活性，以期为亚热水果为主开发的功能性食品开发提供理论支持。

本文对比研究 8 种水果（青苹果、皇冠梨、番石榴、金桔、脐橙、芒果、菠萝和木瓜）的果皮、果肉、果汁及全果中的维生素 C 与总酚含量，采用高效液相色谱法测定其多酚种类及含量，DPPH 自由基清除能力、氧自由基吸收能力评价其抗氧化活性，为水果的精深加工提供了一定的理论基础。

1 材料和方法

1.1 材料和试剂

无损伤、无虫眼、完整的新鲜水果青苹果、皇冠梨、番石榴、金桔、脐橙、芒果、菠萝和木瓜均购买于广州市南沙区天汇百货超市；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）、6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸（Trolox）、偶氮二异丁脒盐酸盐（AAPH）、荧光素钠、2,6-二氯靛、原儿茶酸、儿茶素、绿原酸、香草酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、*p*-香豆酸、阿魏酸、芥子酸、芦丁、杨梅酮、根皮苷、槲皮素、山柰酚和桔皮素（纯度>98%）购于 Sigma 公司；三氟乙酸、甲醇购于 Merck 公司；其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器

UV-754 分光光度计：上海分析仪器总厂；Waters 2695 高效液相色谱仪：美国 Waters 公司；CR22N 高速冷冻离心机：日本日立公司；旋转蒸发仪：上海亚荣生化仪器厂；循环水式真空泵：巩义市予华仪器有限公司；组织破碎机：深圳市彩阳贸易有限公司。

1.3 水果的处理方法

1.3.1 果皮、果肉和全果的醇提液的制备方法

取同一批水果部位（250 g，果皮、果肉或全果），切丁后，立即浸泡于 1000 mL 无水乙醇中，经组织破碎机打浆后，60 ℃水浴提取 2 h，抽滤，取滤液，减压浓缩，用 50%乙醇定容至 100 mL。4 ℃冷藏备用。

1.3.2 果汁的制备方法

取同一批水果（250 g）切成小丁，立即使用组织破碎机匀浆榨汁，取汁液 95 ℃灭酶 20 s，200 目滤布过滤后，抽滤，取滤液，滤液 4 ℃冷藏备用。

1.4 维生素 C 的测定方法

采用国标 2,6-二氯靛酚法测定水果中维生素 C 的含量[8]。

1.5 总酚含量的测定

采用福林酚法测定样品溶液中的总酚含量[9]。取 200 μL 待测样品溶液于 15 mL 刻度试管中，加入蒸馏水至 6 mL，混匀后加入 0.5 mL 福林酚试剂，混匀，在 1~8 min 内加入 20%的碳酸钠溶液（*m*/*m*），加入蒸馏水至 10 mL，摇匀，40 ℃水浴 2 h 后迅速冷却至室温，760 nm 处测定其吸光度值。以没食子酸为标准品，绘制标准曲线，计算样品中总酚含量。

1.6 水果多酚的定量测定方法

采用高效液相色谱法定量测定水果中多酚类物质含量。色谱柱：XBridge C18 色谱柱；流动相：A 为甲醇，B 为 0.1%三氟乙酸溶液；柱温：30 ℃；梯度洗脱程序：溶剂 A 在 0~5 min 内由 0 上升到 10%，在 5~25 min 内由 10%上升至 25%，在 25~40 min 内由 25%上升至 50%，在 40~65 min 内由 50%上升至 100%，维持 5 min 后返回初始状态。流速：1.0 mL/min；检测波长：254 nm，280 nm，360 nm；进样量：10 μL。以原儿茶酸、儿茶素、绿原酸、香草酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、*p*-香豆酸、阿魏酸、芥子酸、芦丁、杨梅酮、根皮苷、槲皮素、山柰酚和桔皮素为标准品，绘制标准曲线，计算样品中各种多酚类化合物含量。

1.7 DPPH 自由基清除能力的测定

取 2 mL 样品溶液于试管中，加入 2 mL 0.2 mM DPPH 自由基溶液，振荡混匀，室温避光反应 30 min 后，在 517 nm 处测定其吸光度值，记为 A_i。用 2 mL 无水乙醇代替 2 mL 样液，作为对照，记吸光度值为 $A_{对照}$；用 2 mL 无水乙醇代替 2 mL 0.2 mM DPPH 自由基溶液，作为空白，记吸光度值为 $A_{空白}$。

DPPH 自由基清除率(%)=[1-(A_i-$A_{空白}$)/$A_{对照}$]×100%

以 Trolox 为标准品，绘制标准曲线，计算样品的 Trolox 当量 DPPH 自由基清除能力[10]。

1.8 氧自由基吸收能力（ORAC）的测定方法

配制 pH 7.4、75 mM 磷酸盐缓冲溶液。用 75 mM 磷酸盐缓冲溶液配制 39.9 μM 荧光素钠储备液，4 ℃避光保存。实验时荧光素钠储备液用 pH 7.4、75 mM 磷酸盐缓冲溶液稀释至 0.159 μM 荧光素钠使用液，AAPH 用 pH 7.4、75 mM 磷酸盐缓冲溶液配制成 38.25 mM，现配现用。在 96 孔板中分别加入 25 μL 待测样品溶液（或 75 mM 磷酸盐缓冲溶液作为空白对照）和 75 μL 荧光素钠使用液，37 ℃保温 10 min。加入 100 μL AAPH 启动反应，在 37 ℃下以激发波长 485 nm，发射波长 530 nm 开始计时反应并读数（f_0），每分钟读一次数（f_0、f_1、…、f_{120}），共读 121 次数（共计反应 120 min），将每次读数连成曲线。反应体系的最终体积为 200 μL。每个样品设置 3 个复孔。以 Trolox 作为标准品。AUC 表示曲线下的面积。

$$AUC=0.5(f_0+f_n)+(f_1+f_2+f_3+\ldots\ldots+f_{n-1})$$

$$Net\ AUC=AUC_{样品}-AUC_{空白}$$

Trolox 浓度与其 Net AUC 成正比，绘制标准曲线。计算样品的 Trolox 当量氧自由基吸收能力[11]。

1.9 统计分析

所有数据分析均一式三份进行显著性分析，使用 IBM SPSS Statistics V21.0 软件的 ANOVA 分析方法中的 Duncan 进行统计分析，数值采用平均值±SD 表示，显著性水平为 0.05，并对样品进行聚类分析。

2 结果与讨论

2.1 维生素 C（Vc）含量

8 种水果的果皮、果肉、全果和果汁中的 Vc 含量如表 1 所示，番石榴果皮的 Vc 含量最高，脐橙果皮次之，青苹果和皇冠梨的果皮中的 Vc 含量最低；脐橙果肉的 Vc 含量最高，番石榴果肉次之，青苹果果肉中的 Vc 含量最低；脐橙全果的 Vc 含量最高，番石榴全果次之，青苹果全果中的 Vc 含量最低；番石榴果汁的 Vc 含量最高，脐橙果汁次之，皇冠梨果汁中的 Vc 含量最低。通过聚类分析（图 1 中 a 和 b），将 8 种水果的果皮、果肉和全果按 Vc 含量从高到低分为 4 类：（1）番石榴，（2）脐橙，（3）菠萝和木瓜，（4）青苹果、皇冠梨、金桔和芒果；将 8 种水果的果汁按 Vc 含量从高到低分为 4 类：（1）番石榴，（2）金桔、脐橙、菠萝和木瓜，（3）芒果，（4）青苹果和皇冠梨。Vanzani 等人[12]研究发现苹果全果的 Vc 含量为 0.04~0.46 mmol/kg，与本文的测定值一致。Acg 等人[13]研究发现梨全果的 Vc 含量为 55~84 mg/kg，果皮的 Vc 含量为 116~228 mg/kg，果肉的 Vc 含量为 28~53 mg/kg，本文所选用的皇冠梨的梨果肉的 V_C 含量高于其测定值，果皮的 Vc 含量低于其测定值。Ara 等人[14]研究发现番石榴果汁的 Vc 含量为 577.6 mg/L，略高于本文测定值。Ramful 等人[15]研究发现柑橘果汁的 Vc 含量范围为 166~677 mg/L。Rapisarda 等人[16]研究发现橙汁的 Vc 含量为 417.0~690.7 mg/L，略高于本文测定值。Liu[17]等人研究发现芒果全果的 Vc 含量为 32~238 mg/kg，与本文的测定结果一致。Hong 等人[18]研究发现菠萝果肉的 Vc 含量为 285~289 mg/kg，略低于本文测定结果。Vinci 等人[19]研究发现菠萝全果的 Vc 含量为 306 mg/kg，橙子全果的 Vc 含量为 498 mg/kg，与本文的测定值一致。Wall[20]研究发现木瓜全果的 Vc 含量为 453~556 mg/kg，高于本文的测定值。

表 1 8 种水果的果皮、果肉、全果和果汁中的维生素 C 含量

Table 1 The content of vitamin C in peel, flesh, whole fruit and fruit juice of eight fruits

水果种类	Vc 含量			
	果皮/(mg/kg)	果肉/(mg/kg)	全果/(mg/kg)	果汁/(mg/L)
青苹果	64.56±1.07^{a}	22.63±0.44^{a}	28.62±0.01^{a}	52.93±0.88^{b}
皇冠梨	67.42±2.20^{a}	64.61±0.44^{b}	65.13±0.44^{b}	32.32±1.92^{a}
番石榴	758.17±1.32^{g}	258.19±1.10^{f}	323.28±1.54^{g}	491.60±1.32^{h}
金桔	284.01±3.70^{c}	146.01±0.93^{d}	179.65±1.02^{d}	285.16±3.80^{e}
脐橙	460.42±1.32^{f}	398.92±0.66^{h}	419.81±0.44^{h}	322.31±3.67^{g}
芒果	261.80±1.44^{b}	92.20±1.10^{c}	110.94±0.44^{c}	120.23±1.66^{c}
菠萝	348.32±2.20^{e}	301.41±0.01^{g}	309.73±1.10^{f}	294.03±2.45^{f}
木瓜	298.61±0.01^{d}	223.83±1.10^{e}	230.49±0.66^{e}	273.36±1.26^{d}

注：^{a,b,c,d,e,f,g,h} 表示不同样品之间相比具有显著性差异（$p<0.05$）。

2.2 总酚含量

表 2 8 种水果的果皮、果肉、全果和果汁的总酚含量

Table 2 The content of total phenolic in peel, flesh, whole fruit and fruit juice of eight fruits

水果种类	总酚含量			
	果皮(mg gallic acid equiv/kg)	果肉(mg gallic acid equiv/kg)	全果(mg gallic acid equiv/kg)	果汁(mg gallic acid equiv/L)
青苹果	2507.47±16.07^{f}	728.11±16.78^{d}	797.21±4.87^{d}	1579.23±52.80^{c}
皇冠梨	1126.80±50.97^{c}	214.97±5.15^{a}	340.53±16.55^{a}	167.82±6.73^{a}
番石榴	2085.20±102.75^{e}	1289.17±24.25^{e}	1164.69±21.44^{g}	3643.34±423.32^{f}
金桔	884.69±13.82^{b}	726.79±10.48^{d}	749.40±4.88^{c}	2341.79±13.77^{d}
脐橙	1574.93±149.20^{d}	749.76±12.55^{d}	1119.23±16.34^{f}	3325.61±0.00^{e}
芒果	4188.99±99.76^{g}	311.52±9.77^{b}	960.11±6.15^{e}	2388.80±99.30^{d}
菠萝	793.67±12.07^{b}	384.48±3.90^{c}	422.80±14.51^{b}	751.69±8.01^{b}
木瓜	459.07±8.60^{a}	216.27±17.02^{a}	331.01±24.41^{a}	1392.10±18.12^{c}

注：^{a,b,c,d,e,f,g}表示不同样品之间相比具有显著性差异（p<0.05）。

8 种水果的果皮、果肉、全果和果汁的总酚含量如表 2 所示。总的看来，总酚含量最高的是果皮，其次是果肉。芒果果皮的总酚含量最高，青苹果次之，木瓜果皮的总酚含量最低。番石榴果肉的总酚含量最高，青苹果、金桔和脐橙的果肉次之，皇冠梨和木瓜的果肉的总酚含量最低。番石榴全果的总酚含量最高，脐橙全果次之，皇冠梨和木瓜的全果的总酚含量最低。番石榴果汁的总酚含量最高，脐橙果汁次之，皇冠梨果汁的总酚含量最低。由于总酚的测定方法基于福林酚法，属于一类氧化还原反应，Vc是极强的抗氧化剂，Vc的存在使得总酚测定结果偏高，番石榴Vc含量最高，该方法尤其对番石榴总酚含量有较大影响，因此，该方法所测得总酚含量仅作为初略判断水果多酚含量的方法。通过聚类分析（图 1 中c和d），将 8 种水果的果皮、果肉和全果按总酚含量从高到低分为 4 类，（1）芒果，（2）番石榴，（3）青苹果、金桔和脐橙，（4）皇冠梨、菠萝和木瓜；将 8 种水果果汁按总酚含量从高到低分为 4 类，（1）番石榴和脐橙，（2）金桔和芒果，（3）青苹果和木瓜，（4）皇冠梨和菠萝。Marinova 等人[21]研究发现青苹果全果的总酚含量为 1181 mg/kg，果肉的总酚含量为 975 mg/kg，略高于本文测定值。Acg等人[13]研究发现梨全果的酚类物质含量为 272~407 mg/kg，果皮的总酚含量范围为 1235~2005 mg/kg，果肉的总酚含量范围为 28~81 mg/kg，并且酚类化合物对梨的抗氧化能力的贡献远远大于维生素 C，本文所选用的皇冠梨的果肉的总酚含量高于其测定值，果皮的总酚含量略低于其测定值。Alothman等人[22]研究发现番石榴全果的总酚含量为 1230~1910 mg/kg，菠萝全果的总酚含量为 347~547 mg/kg，与本文的测定相符。Ramful等人[15]研究发现柑橘的总酚含量为 406.3~1694 mg/kg。Lou等人[23]研究发现金桔皮中总酚含量范围为 5510~13620 mg/kg干物质。Rababah 等人[24]研究发现橙子全果的总酚含量为 1224.24 mg/kg，与本文测定值一致。Paolo等人[16]发现橙汁的总酚含量范围为 361.4~1147.2 mg/L，低于本文测定值。Özkan等人[25]研究发现土耳其木瓜全果的总酚含量在 410~650 mg/kg之间，略高于本文测定值，芒果全果的总酚含量约 710 mg/kg，略低于本文测定值。Liu 等人[17]研究发现芒果全果的总酚含量范围为 222.7~1397.1 mg/kg，与本文的测定值相符。

2.3 8 种水果酚类物质的分离鉴定及含量测定

8 种水果的果皮、果肉、全果和果汁的酚类组成和含量如表 3 和表 4 所示。总的看来，多酚类化合物含量最高的是果皮，其次是果肉。果汁中的多酚种类和含量相较于全果较少，其中金桔和青苹果的果汁中多酚种类较多，儿茶素、绿原酸、芦丁、杨梅酮和根皮苷的含量较多。

从青苹果中共鉴定出 16 种多酚类化合物，分别是原儿茶酸、儿茶素、绿原酸、香草酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、*p*-香豆酸、阿魏酸、芥子酸、芦丁、杨梅酮、根皮苷、槲皮素、山柰酚和桔皮素。青苹果果皮富含儿茶素、绿原酸、表儿茶素、芦丁和根皮苷，果肉富含儿茶素、绿原酸和表儿茶素，全果富含儿茶素、绿原酸和表儿茶素，果汁富含绿原酸。青苹果绿原酸、儿茶素和表儿茶素的含量在 8 种水果中最高，其果皮中绿原酸、儿茶素和表儿茶素含量高于果肉。Karaman 等人[26]测得不同苹果果肉中儿茶素含量为

8.1~63.6 mg/kg，绿原酸含量为 17.1~103.6 mg/kg，表儿茶素的含量为 4.2~56.3 mg/kg，咖啡酸的含量为 0~9.2 mg/kg，根皮苷含量为 0~3.2 mg/kg，儿茶素、绿原酸、表儿茶素和根皮苷的含量低于本文测定值，咖啡酸的含量与本文相符。不同苹果果皮中儿茶素含量为 42.2~160.2 mg/kg，绿原酸含量为 0~81.2 mg/kg，表儿茶素含量为 24.2~130.1 mg/kg，根皮苷含量为 23.7~159.0 mg/kg，槲皮素含量为 99.2~886.5 mg/kg，儿茶素、绿原酸、表儿茶素和根皮苷的含量低于本文测定值，槲皮素含量高于本文测定值。

从皇冠梨中共鉴定出 11 种多酚类化合物，分别是儿茶素、绿原酸、丁香酸、表儿茶素、阿魏酸、芥子酸、芦丁、杨梅酮、根皮苷、槲皮素和桔皮素。在皇冠梨果皮中富含绿原酸、儿茶素、表儿茶素和芦丁，果肉中富含绿原酸，全果中富含绿原酸和儿茶素，果汁中富含绿原酸和根皮苷。在皇冠梨果皮中表儿茶素和绿原酸的含量高于果肉。Acg 等人[13]发现梨中大多数的酚类物质位于果皮中，与果肉相比，果皮中绿原酸含量更高，并且其抗氧化能力与绿原酸的含量有关。

从番石榴中共鉴定出 14 种多酚类化合物，分别是原儿茶酸、儿茶素、绿原酸、香草酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、阿魏酸、芥子酸、芦丁、杨梅酮、根皮苷、槲皮素和山柰酚。在番石榴果皮中儿茶素、芦丁、杨梅酮和槲皮素含量较多，果肉中儿茶素含量较多，全果中儿茶素含量较多，果汁中儿茶素和芦丁含量较多。番石榴的酚类物质含量在 8 种水果中最低，但其 Vc 含量最高，是一种高营养价值的水果。曹增梅[27]研究发现番石榴中含有绿原酸、没食子酸、咖啡酸、原儿茶酸、阿魏酸、山奈素和根皮苷等 7 种多酚类物质。邝高波[28]研究发现番石榴中含有没食子酸、原儿茶酸、儿茶素、绿原酸、山柰酚和槲皮素等酚类物质。其中没食子酸含量为 69.4~529.74 mg/kg，原儿茶酸含量为 1.56~12.35 mg/kg，儿茶素含量为 23.99~2191.49 mg/kg，绿原酸含量为 0~25.27 mg/kg，山柰酚含量为 0.25~1.27 mg/kg，槲皮素含量为 0~32.38 mg/kg，其中原儿茶酸、儿茶素、绿原酸和槲皮素的含量与本文的测定值相符。

从金桔中共鉴定出 15 种多酚类化合物，分别是原儿茶酸、儿茶素、绿原酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、*p*-香豆酸、阿魏酸、芥子酸、芦丁、杨梅酮、根皮苷、槲皮素、山柰酚和桔皮素。在金桔果皮中富含芦丁、根皮苷、绿原酸和表儿茶素，果肉中富含芦丁、根皮苷、绿原酸和儿茶素，全果中富含芦丁、根皮苷、绿原酸和儿茶素，果汁中富含芦丁、根皮苷、绿原酸和儿茶素。金桔中芦丁和根皮苷、桔皮素的含量在 8 种水果中较高，且果皮中芦丁和表儿茶素含量稍高于果肉，果肉中根皮苷和儿茶素含量稍高于果皮。

从脐橙中共鉴定出 15 种多酚类化合物，分别是原儿茶酸、儿茶素、绿原酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、*p*-香豆酸、阿魏酸、芥子酸、芦丁、杨梅酮、根皮苷、槲皮素、山柰酚和桔皮素。在脐橙果皮中富含儿茶素、绿原酸、丁香酸、阿魏酸、芦丁和根皮苷，果肉中富含儿茶素、表儿茶素、芦丁和槲皮素，全果中富含儿茶素、绿原酸、丁香酸、阿魏酸、芦丁、根皮苷和槲皮素，果汁中富含芦丁和杨梅酮。脐橙中儿茶素、绿原酸、丁香酸、表儿茶素、阿魏酸、芦丁、根皮苷、槲皮素、山柰酚和桔皮素的含量在 8 种水果中较高，且果皮中儿茶素、绿原酸、丁香酸、阿魏酸、芦丁、根皮苷、山柰酚和桔皮素的含量比果肉中高，果肉中表儿茶素和槲皮素的含量比果皮中高。蒲玲玲等人[29]研究发现橙皮中原儿茶酸、香草酸、对羟基苯甲酸和咖啡酸的含量低于橙肉，其余酚酸含量均高于橙肉，这与本实验的结果略有不同，在本实验所选用的脐橙中只有表儿茶素和槲皮素在果肉中的含量高于果皮，其余酚酸含量均低于果皮。

从芒果中共鉴定出 13 种多酚类化合物，分别是原儿茶酸、儿茶素、绿原酸、香草酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、阿魏酸、芥子酸、芦丁、杨梅酮、根皮苷和槲皮素。在芒果果皮中富含芦丁、杨梅酮、根皮苷、原儿茶酸、儿茶素和绿原酸，果肉中富含原儿茶酸，全果中富含芦丁、杨梅酮和原儿茶酸，果汁中富含原儿茶酸、绿原酸、芦丁和根皮苷。芒果中原儿茶酸、儿茶素、香草酸、阿魏酸、芥子酸、芦丁、杨梅酮和根皮苷的含量在在 8 种水果中较高，且这 13 种酚类化合物均是果皮中含量要高于果肉，香草酸在果肉中未检出。国内外对芒果中多酚类物质的研究比较少，Schieber 等人[30]研究发现芒果果肉中含有原儿茶酸、芒果苷、香豆酸、咖啡酸、没食子酸和没食子酸单宁等，其中没食子酸是主要酚酸化合物，含量为 6.9 mg/kg，与本文的测定结果不同，在本文中芦丁、杨梅酮和原儿茶酸是芒果全果中主要的酚类化合物。

从菠萝中共鉴定出 15 种多酚类化合物，分别是原儿茶酸、儿茶素、绿原酸、香草酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、*p*-香豆酸、阿魏酸、芥子酸、芦丁、杨梅酮、根皮苷、槲皮素和山柰酚。在菠萝果皮中丁香酸、香豆酸和芦丁的含量较多，果肉中丁香酸和芦丁的含量较高，全果中丁香酸和芦丁的含量较高，果汁中绿原酸、丁香酸和芦丁的含量较高。菠萝中丁香酸、*p*-香豆酸和山柰酚的含量在 8 种水果中较高，但其他酚类化合物的含量远低于其他水果。沈佩仪[31]研究发现

菠萝皮中主要含有没食子酸、儿茶素、表儿茶素和阿魏酸，含量分别为 317.6 mg/kg、585.1 mg/kg、500.0 mg/kg 和 195.0 mg/kg，均高于本文的测定值，而在本文中，未检出表儿茶素。

从木瓜中共鉴定出 12 种多酚类化合物，分别是原儿茶酸、儿茶素、绿原酸、咖啡酸、丁香酸、表儿茶素、阿魏酸、芥子酸、芦丁、杨梅酮、根皮苷和山柰酚。在木瓜果皮中儿茶素和芦丁的含量较高，果肉中儿茶素的含量较高，全果中芦丁的含量较高，果汁中芦丁和根皮苷的含量较高。木瓜中山柰酚的含量在 8 种水果中较高，但其他酚类化合物的含量远低于其他水果。Kelebek 等人[32]研究发现木瓜果实中含有原儿茶酸含量为 91.1~105.7 mg/kg，绿原酸含量为 123.6~148.9 mg/kg，咖啡酸含量为 79.9~87.8 mg/kg，芦丁含量为 17.1~50.7 mg/kg，阿魏酸含量为 111.4~351.8 mg/kg，其中原儿茶酸、绿原酸、咖啡酸和绿原酸的含量高于本文测定值，芦丁含量与本文测定结果相符。Rivera-Pastrana 等人[33]发现木瓜果皮中含有丰富的阿魏酸、咖啡酸和芦丁的酚类化合物。

通过聚类分析（图 1 中 e、f、g 和 h），将 8 种水果按果皮中多酚类物质种类与含量分为 4 类：（1）芒果，（2）脐橙，（3）青苹果，（4）皇冠梨、番石榴、金桔、菠萝和木瓜；按果肉中多酚类物质种类与含量分为 4 类：（1）脐橙，（2）金桔，（3）青苹果，（4）皇冠梨、番石榴、芒果、菠萝和木瓜；按全果中多酚物质种类与含量分为 4 类：（1）脐橙，（2）芒果，（3）金桔，（4）青苹果、皇冠梨、番石榴、菠萝和木瓜；按果汁中多酚类物质种类与含量分为 4 类：（1）金桔，（2）青苹果，（3）菠萝，（4）皇冠梨、番石榴、脐橙、芒果和木瓜。经聚类分析可看出，脐橙和芒果的酚类物质含量较高，皇冠梨和番石榴的酚类物质含量较低，脐橙和金桔的酚类物质组成相似，但脐橙中酚类物质含量较高于金桔。在果汁中，金桔和青苹果的酚类物质种类最多，皇冠梨和番石榴的酚类物质种类最少。

表 3 8 种水果的果皮、果肉、全果中的酚类组成和含量

Table 3 The phenolic profiles in peel, flesh and whole fruit of eight fruits

	酚类/(mg/kg)	原儿茶酸	儿茶素	绿原酸	香草酸	咖啡酸	丁香酸
青苹果	果皮	7.99±0.04^{a}	678.22±1.16^{h}	252.64±1.41^{g}	50.31±0.56^{d}	18.06±0.08^{c}	ND
	果肉	0.40±0.07^{a}	156.97±0.56^{g}	305.38±0.38^{k}	1.32±0.12^{ab}	7.69±0.32^{e}	1.70±0.24^{bc}
	全果	3.20±0.22^{b}	164.69±1.68^{i}	271.39±2.89^{j}	14.89±0.77^{e}	10.57±0.41^{d}	ND
皇冠梨	果皮	ND	62.44±0.87^{e}	283.71±1.80^{h}	ND	ND	4.68±0.36^{a}
	果肉	ND	38.87±1.15^{g}	112.92±1.95^{h}	ND	ND	ND
	全果	ND	51.95±1.28^{f}	142.89±0.49^{h}	ND	ND	ND
番石榴	果皮	ND	55.95±1.39^{h}	ND	ND	ND	6.88±0.73^{a}
	果肉	5.98±0.19^{b}	40.32±2.24^{g}	10.04±0.15^{c}	6.79±0.46^{b}	5.28±0.47^{b}	5.96±0.29^{b}
	全果	5.22±0.30^{a}	47.62±1.07^{e}	9.34±0.63^{b}	5.47±0.55^{a}	4.76±0.50^{a}	9.29±0.67^{b}
金桔	果皮	ND	17.45±1.32^{bc}	47.15±1.13^{f}	ND	17.53±0.60^{bc}	20.16±0.35^{cd}
	果肉	5.83±0.26^{a}	41.35±2.31^{g}	40.72±1.56^{g}	ND	5.89±0.13^{a}	12.70±1.23^{de}
	全果	4.69±0.44^{a}	35.53±1.31^{j}	43.42±2.36^{k}	ND	12.79±0.90^{ef}	18.15±1.00^{h}
脐橙	果皮	10.03±0.27^{a}	334.47±1.91^{n}	126.19±1.38^{k}	ND	12.39±0.43^{b}	118.08±2.13^{j}
	果肉	7.19±0.33^{b}	148.27±2.23^{i}	42.30±0.92^{f}	ND	4.82±0.25^{a}	39.96±1.17^{e}
	全果	7.77±0.41^{b}	276.08±5.34^{m}	64.78±0.66^{g}	ND	6.80±0.93^{ab}	74.60±1.07^{h}
芒果	果皮	72.21±0.81^{e}	142.65±0.87^{g}	94.48±0.79^{f}	60.82±1.39^{de}	13.93±0.53^{a}	36.53±0.83^{b}
	果肉	60.51±0.56^{k}	7.81±0.48^{d}	21.81±0.77^{h}	ND	4.91±0.16^{b}	10.28±0.35^{f}
	全果	63.08±0.56^{i}	44.46±0.70^{h}	35.52±1.07^{g}	25.99±0.51^{e}	6.61±0.18^{b}	16.64±0.70^{d}
菠萝	果皮	8.20±0.18^{b}	26.76±0.51^{f}	31.14±0.92^{g}	ND	12.17±0.87^{c}	66.18±1.00^{k}
	果肉	6.73±0.06^{b}	15.07±0.04^{d}	16.90±0.31^{e}	5.07±0.04^{a}	5.89±0.10^{ab}	56.23±1.26^{g}
	全果	7.21±0.13^{c}	18.53±0.36^{g}	18.26±0.55^{g}	3.82±0.35^{a}	6.45±0.38^{b}	56.86±0.67^{i}
木瓜	果皮	22.19±0.14^{d}	61.42±0.22^{g}	ND	ND	10.35±0.11^{c}	9.23±0.19^{b}
	果肉	3.65±0.01^{a}	28.02±0.05^{e}	10.59±0.27^{c}	ND	3.90±0.02^{a}	4.84±0.15^{b}
	全果	5.17±0.02^{c}	31.57±0.27^{h}	10.58±0.27^{e}	ND	4.43±0.11^{b}	7.68±0.26^{d}

转下页

接上页

	酚类/(mg/kg)	表儿茶素	*p*-香豆酸	阿魏酸	芥子酸	芦丁
青苹果	果皮	747.98±7.98^{i}	17.77±0.47^{c}	10.37±0.46^{ab}	13.97±0.22^{b}	76.30±1.72^{e}
	果肉	130.11±2.04^{i}	0.99±0.06^{ab}	2.78±0.85^{c}	6.40±0.16^{d}	21.46±0.09^{g}
	全果	159.54±1.99^{h}	1.47±0.22^{ab}	4.02±0.20^{b}	8.71±0.56^{cd}	27.55±0.41^{f}
皇冠梨	果皮	109.03±1.46^{g}	ND	ND	7.95±0.61^{b}	90.98±1.35^{f}
	果肉	1.43±0.22^{ab}	ND	3.88±0.28^{c}	2.67±0.31^{bc}	16.07±0.24^{f}
	全果	10.01±0.20^{c}	ND	3.87±0.69^{b}	2.72±0.45^{b}	21.84±0.83^{e}
番石榴	果皮	19.96±0.55^{d}	ND	9.43±1.03^{b}	6.89±0.89^{a}	50.88±1.79^{g}
	果肉	12.00±0.51^{d}	ND	3.21±0.37^{a}	3.21±0.42^{a}	18.42±2.05^{f}
	全果	13.89±0.76^{c}	ND	3.79±0.87^{a}	3.78±0.37^{a}	20.58±2.73^{d}
金桔	果皮	67.80±1.12^{g}	ND	17.24±0.21^{b}	19.47±0.56^{bc}	326.90±3.82^{i}
	果肉	25.68±1.04^{f}	4.24±0.08^{a}	8.54±0.39^{b}	9.04±0.35^{bc}	252.70±2.11^{h}
	全果	27.42±0.85^{i}	ND	9.27±0.23b^{c}	13.65±0.50^{f}	276.26±2.05^{m}
脐橙	果皮	32.49±0.97^{d}	29.78±0.50^{c}	86.69±1.18^{i}	46.20±0.61^{f}	264.38±2.38^{l}
	果肉	150.60±3.18^{j}	3.48±0.24^{a}	10.99±0.69^{c}	9.33±0.61^{c}	135.06±2.18^{h}
	全果	118.44±1.28^{k}	4.54±0.21^{a}	61.21±1.17^{f}	14.71±0.17^{d}	149.20±1.97^{l}
芒果	果皮	8.38±0.51^{a}	ND	57.44±0.45^{cd}	55.88±0.40^{cd}	2266.02±29.60^{j}
	果肉	1.46±0.29^{a}	ND	6.61±0.62^{c}	22.93±0.60^{i}	25.20±0.73^{j}
	全果	3.39±0.25^{a}	ND	18.26±0.34^{d}	30.47±1.09^{f}	261.86±2.52^{k}
菠萝	果皮	ND	76.33±1.01^{l}	13.58±0.40^{d}	6.24±0.22^{a}	78.04±0.87^{m}
	果肉	15.11±0.13^{d}	8.14±0.08^{c}	6.31±0.12^{ab}	ND	40.33±1.17^{f}
	全果	12.88±0.49^{e}	12.65±0.80^{e}	11.28±0.42^{d}	ND	48.98±0.65^{h}
木瓜	果皮	18.57±0.75^{d}	ND	10.27±0.14^{c}	5.71±0.06^{a}	73.68±0.88^{h}
	果肉	ND	ND	3.66±0.12^{a}	ND	ND
	全果	ND	ND	5.37±0.05^{c}	0.02±0.00^{a}	25.22±1.03^{g}

	酚类/(mg/kg)	杨梅酮	根皮苷	槲皮素	山柰酚	桔皮素
青苹果	果皮	47.11±0.31^{d}	204.13±0.66^{f}	21.11±0.51^{c}	ND	9.83±0.28^{a}
	果肉	10.82±1.01^{f}	28.54±0.67^{h}	6.85±0.28^{de}	ND	ND
	全果	16.37±0.02^{e}	54.47±0.98^{g}	6.87±0.50^{c}	ND	0.03±0.00^{a}
皇冠梨	果皮	44.55±0.26^{d}	20.07±0.91^{c}	19.72±0.44^{c}	ND	9.55±0.80^{b}
	果肉	10.40±0.41^{e}	7.39±0.46^{d}	0.98±0.06^{a}	ND	ND
	全果	13.67±0.57^{d}	72.80±1.43^{g}	2.90±0.54^{b}	ND	0.01±0.00^{a}
番石榴	果皮	48.82±1.05^{f}	ND	39.85±0.93^{e}	13.95±0.82^{c}	ND
	果肉	14.75±0.43^{e}	5.39±0.96^{b}	13.83±0.48^{e}	5.78±0.38^{b}	ND
	全果	15.57±2.05^{c}	5.13±0.31^{a}	13.88±0.59^{c}	5.83±0.45^{a}	ND
金桔	果皮	28.55±0.60^{e}	163.82±1.30^{h}	22.56±1.00^{d}	11.46±0.31^{a}	45.11±2.47^{f}
	果肉	14.23±0.22^{e}	265.99±2.51^{i}	10.95±0.10^{cd}	6.34±0.50^{a}	4.88±0.50^{a}
	全果	16.23±0.79^{g}	245.82±1.58^{l}	11.45±0.24^{de}	7.94±0.24^{b}	10.09±0.10^{cd}
脐橙	果皮	42.94±0.55^{e}	322.60±1.95^{m}	48.71±0.56^{g}	51.67±1.18^{h}	31.24±0.71^{cd}
	果肉	39.90±0.30^{e}	21.74±0.74^{d}	93.61±0.41^{g}	10.60±0.39^{c}	3.84±0.13^{a}
	全果	40.57±0.64^{e}	96.69±1.46^{j}	80.41±1.37^{i}	11.38±0.62^{c}	8.75±0.12^{bc}

转下页

接上页

芒果	果皮	638.68±3.59^{i}	243.76±2.13^{h}	43.24±1.56^{bc}	ND	ND
	果肉	14.06±0.25^{g}	8.78±0.40^{e}	9.01±0.45^{e}	ND	ND
	全果	75.84±1.06^{j}	34.35±0.72^{g}	9.16±0.27^{c}	ND	ND
菠萝	果皮	37.44±0.77^{i}	47.21±0.87^{j}	34.21±0.32^{h}	20.77±0.52^{e}	ND
	果肉	ND	ND	ND	5.61±0.35^{ab}	ND
	全果	14.02±0.09^{f}	4.54±0.28^{a}	12.87±0.13^{e}	6.21±0.03^{b}	ND
木瓜	果皮	33.79±0.79^{f}	25.20±0.31^{e}	ND	24.53±0.68^{e}	ND
	果肉	13.81±0.41^{d}	ND	ND	10.64±0.38^{c}	ND
	全果	13.92±0.22^{f}	10.31±0.15^{e}	ND	10.76±0.46^{e}	ND

注：^{a,b,c,d,e,f,g,h,I,j,k,l,m,n}表示不同样品之间相比具有显著性差异（p<0.05）；ND 表示未检出。

表 4 8 种水果的果汁中的酚类组成

Table 4 The phenolic profiles in fruit juice of eight fruits

酚类/(mg/L)	原儿茶酸	儿茶素	绿原酸	香草酸	咖啡酸	丁香酸	表儿茶素	*p*-香豆酸
青苹果	7.63±0.06^{c}	31.49±0.42^{h}	598.19±2.05^{j}	0.67±0.00^{a}	16.92±0.05^{e}	4.00±0.03^{b}	28.96±0.30^{g}	0.55±0.00^{a}
皇冠梨	ND	13.70±0.07^{a}	99.63±0.95^{c}	ND	ND	ND	ND	ND
番石榴	ND	23.24±0.24^{c}	ND	ND	ND	16.41±0.32^{b}	ND	ND
金桔	7.78±0.04^{b}	31.61±0.24^{i}	42.29±0.41^{j}	ND	20.30±0.41^{e}	24.61±0.42^{g}	54.81±0.50^{k}	ND
脐橙	7.44±0.11^{b}	39.21±0.83^{e}	39.03±0.21^{e}	ND	ND	31.45±0.40^{d}	ND	ND
芒果	50.00±0.69^{f}	17.64±0.40^{b}	40.22±0.88^{e}	ND	9.91±0.10^{a}	9.68±0.11^{a}	ND	ND
菠萝	7.66±0.36^{a}	ND	31.79±0.74^{f}	8.16±0.05^{ab}	12.39±0.37^{c}	36.85±0.43^{g}	ND	27.28±0.33^{e}
木瓜	7.91±0.22^{a}	24.49±0.84^{c}	ND	ND	ND	21.19±0.23^{b}	ND	ND

酚类/(mg/L)	阿魏酸	芥子酸	芦丁	杨梅酮	根皮苷	槲皮素	山柰酚	桔皮素
青苹果	13.29±0.17^{d}	12.23±0.08^{d}	53.59±0.68^{i}	25.84±0.55^{f}	32.55±0.36^{h}	ND	26.75±0.60^{f}	ND
皇冠梨	ND	ND	ND	ND	46.50±0.26^{b}	ND	ND	ND
番石榴	ND	6.09±0.05^{a}	40.55±0.44^{d}	ND	ND	ND	ND	ND
金桔	12.13±0.28^{d}	6.06±0.04^{a}	216.66±0.65^{m}	26.60±0.39^{h}	199.06±1.11^{l}	22.99±0.22^{f}	11.00±0.04^{c}	ND
脐橙	10.83±0.17^{c}	5.85±0.53^{a}	92.68±0.78^{g}	55.24±0.77^{f}	38.37±0.39^{e}	ND	ND	ND
芒果	9.40±0.15^{a}	22.90±0.39^{c}	53.38±0.57^{g}	36.20±0.59^{d}	52.70±0.50^{g}	22.90±0.65^{c}	ND	ND
菠萝	8.87±0.20^{b}	ND	56.08±0.70^{h}	ND	19.29±0.44^{d}	ND	ND	ND
木瓜	ND	ND	53.82±0.73^{f}	25.87±0.68^{d}	49.91±0.85^{e}	ND	26.10±0.66^{d}	ND

注：^{a,b,c,d,e,f,g,h,I,j,k,l,m}表示不同样品之间相比具有显著性差异（p<0.05）；ND 表示未检出。

2.4 DPPH 自由基清除能力

8 种水果的果皮、果肉、全果和果汁的 DPPH 自由基清除能力如表 5 所示。总的看来，以果皮的 DPPH 自由基清除能力最强，其次是果肉。芒果果皮的 DPPH 自由基清除能力最强，番石榴果皮次之，金桔果皮的 DPPH 自由基清除能力最弱。番石榴果肉的 DPPH 自由基清除能力最强，芒果果肉次之，皇冠梨和金桔的果肉的 DPPH 自由基清除能力最弱。芒果全果的 DPPH 自由基清除能力最高，番石榴全果次之，金桔全果的 DPPH 自由基清除能力最弱。番石榴果汁的 DPPH 自由基清除能力最强，青苹果次之，皇冠梨果汁的 DPPH 自由基清除能力最弱。

通过聚类分析（图 1 中 i 和 j），将 8 种水果的果皮、果肉和全果按 DPPH 自由基清除能力从强到弱分为 4 类：（1）芒果，（2）番石榴，（3）青苹果，（4）皇冠梨、金桔、脐橙、菠萝和木瓜；将 8 种水果果汁按 DPPH 自由基清除能力从强到弱分为 4 类：（1）番石榴，（2）青苹果，（3）金桔、脐橙、芒果、菠萝和木瓜，（4）皇冠梨。方敏等人[34]对比研究了 15 种水果的抗氧化活性研究，DPPH 自由基清除能力由强到弱为橙子>鸡蛋芒果>芦柑>胡柚>金钱桔>青蛇果>红玉苹果>水晶梨>香梨，与本文的测定结果比较相符，在本文中芒果、番石榴和青苹果的 DPPH 自由基清除能力较强，皇冠梨和金桔的 DPPH 自由基清除能力较弱。邝高波[28]通过对番石榴全果抗氧化活性的研究，

表 5 8 种水果的果皮、果肉、全果和果汁的 DPPH 自由基清除能力

Table 5 DPPH radical scavenging activities of peel, flesh, whole fruit and fruit juice of eight fruits

水果种类	DPPH 自由基清除能力			
	果皮(mM Trolox equiv/kg)	果肉(mM Trolox equiv/kg)	全果(mM Trolox equiv/kg)	果汁(mM Trolox equiv/L)
青苹果	33.51±0.21^{cd}	19.48±1.29^{d}	24.93±0.51^{e}	3.12±0.14^{f}
皇冠梨	36.24±0.27^{d}	7.03±0.22^{a}	11.04±0.58^{ab}	0.73±0.02^{a}
番石榴	144.91±6.55^{e}	76.23±2.00^{f}	74.35±5.07^{f}	8.54±0.32^{g}
金桔	11.05±0.18^{a}	8.41±0.17^{a}	8.23±0.42^{a}	1.29±0.02^{b}
脐橙	27.17±0.14^{b}	15.14±0.12^{c}	20.32±0.58^{d}	1.59±0.14^{cd}
芒果	436.82±6.02^{f}	23.41±1.29^{e}	88.38±3.30^{g}	1.37±0.04^{bc}
菠萝	28.10±0.86^{bc}	12.51±0.21^{b}	14.49±0.45^{bc}	1.76±0.08^{d}
木瓜	23.21±0.17^{b}	11.02±0.32^{b}	16.12±0.72^{c}	2.21±0.08^{e}

注：^{a,b,c,d,e,f,g}表示不同样品之间相比具有显著性差异（p<0.05）。

发现其对 DPPH 自由基具有良好的清除作用，与本文的研究结果一致。

2.5 氧自由基吸收能力（ORAC）

8 种水果的果皮、果肉、全果和果汁的氧自由基吸收能力如表 6 所示。总的看来，以果皮的氧自由基吸收能力最强，其次是果肉。芒果果皮的氧自由基吸收能力最强，皇冠梨和番石榴果皮次之，木瓜果皮的氧自由基吸收能力最弱。脐橙果肉的氧自由基吸收能力最强，番石榴果肉次之，木瓜果肉的氧自由基吸收能力最弱。脐橙全果的氧自由基吸收能力最强，番石榴全果次之，木瓜全果的氧自由基吸收能力最弱。番石榴果汁的氧自由基吸收能力最强，脐橙果汁次之，芒果和木瓜果汁的氧自由基吸收能力最弱。通过聚类分析（图 1 中 k 和 l），将 8 种水果果皮、果肉和全果按氧自由基吸收能力从强到弱分为 4 类：（1）脐橙，（2）番石榴，（3）皇冠梨和芒果，（4）青苹果、金桔、菠萝和木瓜；将 8 种水果果汁按氧自由基吸收能力从强到弱分为 4 类，（1）青苹果、番石榴和脐橙，（2）金桔，（3）菠萝，（4）皇冠梨、芒果和木瓜。许红星等人[35]对比研究了常见水果的抗氧化活性，氧自由基吸收能力从强到弱为橙子>芒果>菠萝>苹果>梨，与本文研究结果相符。Floegel 等人[36]研究发现氧自由基吸收能力从强到弱为苹果>梨>橙子>芒果，与本文的测定结果略有不同，在本文研究结果中脐橙具有较强的氧自由基吸收能力。同时，本文从水果的皮、肉、果和汁四个方面全面测定分析，更加直观且全面的比较了不同水果的抗氧化活性。

研究表明，水果具有较强的抗氧化性，能够抗衰老、预防退行性疾病等发生，这都归功于水果中含有的抗氧化物质，如酚类化合物、维生素 C、维生素 E 和类胡萝卜素等[37]。8 种水果果皮中的维生素 C 含量和多酚含量均比果肉中维生素 C 和多酚含量高，因此果皮的抗氧化活性比果肉强。脐橙和芒果的维生素 C 含量和多酚含量均较高，故脐橙和芒果的抗氧化活性较强。虽然番石榴的多酚种类和含量较低，但是其含有较高的维生素 C 含量，故其抗氧化活性也较强。

表 6 8 种水果的果皮、果肉、全果和果汁的氧自由基吸收能力

Table 6 Oxygen free radical absorptive capacities of peel, flesh, whole fruit and fruit juice of eight fruits

水果种类	氧自由基吸收能力			
	果皮(mmol Trolox equiv/kg)	果肉(mmol Trolox equiv/kg)	全果(mmol Trolox equiv/kg)	果汁(mmol Trolox equiv/L)
青苹果	135.52±9.98^{b}	96.64±2.89^{d}	105.98±6.18^{cd}	8.54±0.16^{e}
皇冠梨	273.27±7.51^{d}	45.73±7.22^{b}	73.99±5.66^{b}	3.00±0.27^{b}
番石榴	252.92±25.14^{d}	157.18±6.29^{e}	159.18±8.72^{e}	9.57±0.16^{f}
金桔	126.77±2.61^{b}	96.25±5.97^{d}	117.88±2.19^{d}	7.48±0.36^{d}
脐橙	186.91±22.81^{c}	300.89±18.82^{f}	203.93±10.52^{f}	8.80±0.07^{e}
芒果	317.68±24.26^{e}	44.10±8.34^{b}	94.54±5.90^{c}	2.51±0.03^{a}
菠萝	131.37±5.54^{b}	62.30±1.56^{c}	70.23±12.87^{b}	4.45±0.24^{c}
木瓜	53.33±2.07^{a}	15.79±0.51^{a}	19.68±3.10^{a}	2.63±0.09^{a}

注：^{a,b,c,d,e,f,g}表示不同样品之间相比具有显著性差异（p<0.05）。

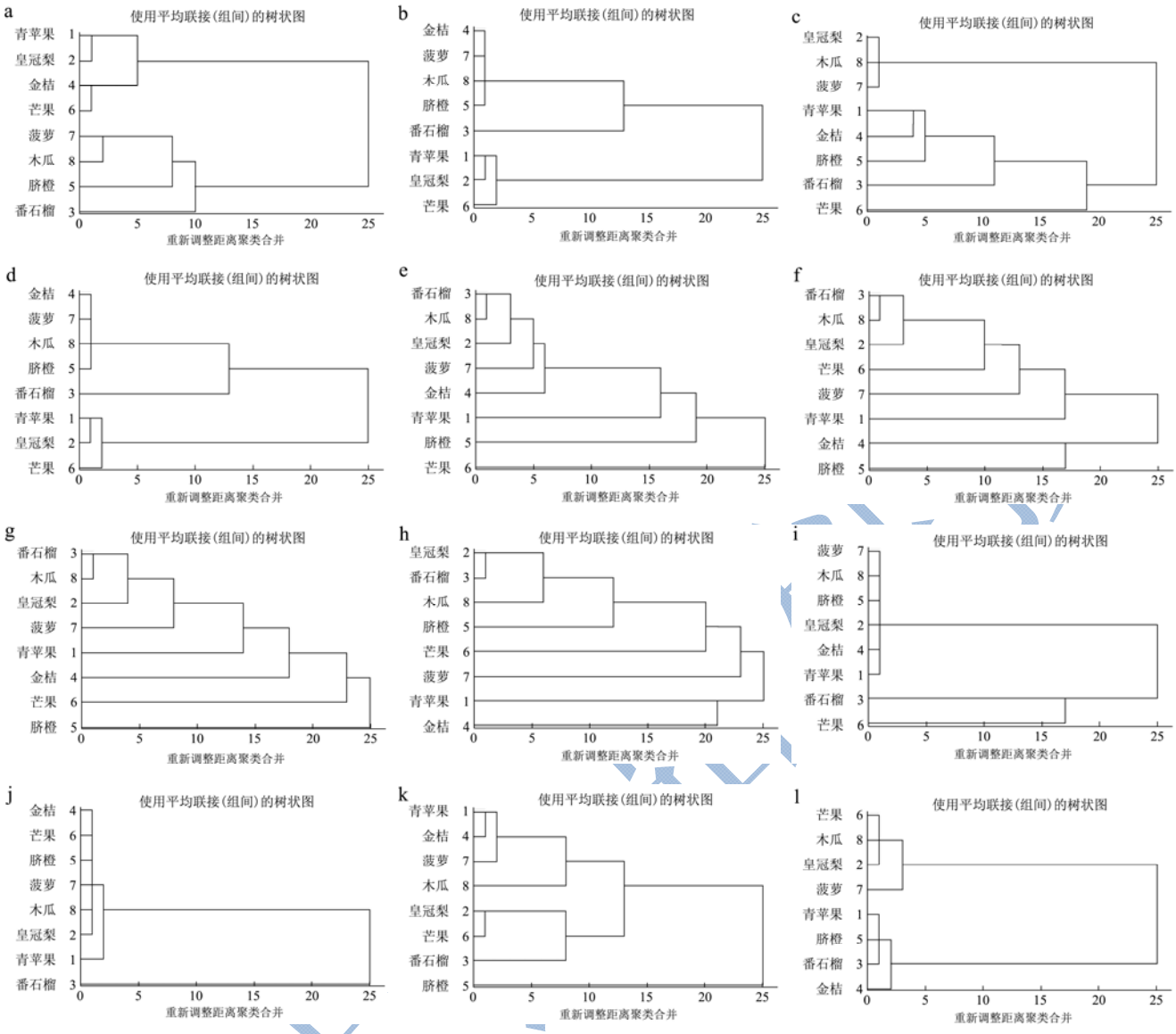


图 1 8 种水果各项指标的聚类分析树状图

Fig.1 The cluster analysis of each index of 8 fruits

注：a、c、i、k，8 种水果果皮、果肉和全果中的维生素 C 含量、多酚含量、DPPH 自由基清除能力、氧自由基吸收能力；b、d、j、l，8 种水果果汁的维生素 C 含量、多酚含量、DPPH 自由基清除能力、氧自由基吸收能力；e、f、g、h，8 种水果果皮、果肉、全果和果汁中酚类物质种类与含量

3 结论

上述结果表明，8 种水果中脐橙和番石榴的全果和果汁中 Vc 含量最高，芒果的全果和果汁中总酚含量最高，番石榴中 Vc 含量较高，Vc 的存在使得其总酚测定结果偏高；脐橙和芒果中酚类物质含量较高，脐橙和金桔的酚类物质组成相似，但脐橙中酚类物质含量较高于金桔；金桔汁和青苹果汁中酚类物质种类最多。总的看来，果皮的抗氧化活性比果肉强，芒果和番石榴全果的 DPPH 自由基清除能力最强，番石榴果汁的 DPPH 自由基清除能力最强；脐橙和番石榴全果的氧自由基吸收能力最强，脐橙、番石榴和苹果的果汁的氧自由基吸收能力最强。青苹果、番石榴、脐橙和芒果的抗氧化活性较强，具有较好的精深加工开发前景，且其果皮的抗氧化活性较强，具有较高的营养价值。本文研究结果可为该类水果的精深加工提供一定的理论基础。

参考文献

[1] Du C, Anderson A, Lortie M, et al. Oxidative damage and cellular defense mechanisms in sea urchin models of aging [J]. Free Radical Biology & Medicine, 2013, 63(14): 254-263

[2] Ghosal M, Chhetri P K, Ghosh M K, et al. Changes in antioxidant activity of *Cyphomandra betacea* (Cav.) Sendtn.

fruits during maturation and senescence [J]. International Journal of Food Properties, 2011, 16(7): 1552-1564

[3] 徐静,郭长江,韦京豫,等.一次性灌胃不同水果汁对大鼠外周血抗氧化力影响的研究[J].中国食品学报,2007,7(1): 18-21
XU Jing, GUO Chang-jiang, WEI Jing-yu, et al. Studies on the effect of once administration different fruit juices by gavage on antioxidant capacity of rat peripheral blood [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2007, 7(1): 18-21

[4] 王福海,黄成华.水果有效成分抗氧化能力评价研究进展[J].广州化工,2014,42(15):39-41
WANG Fu-hai, HUANG Cheng-hua. Study progress of antioxidant evaluation of active ingredients from fruits [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(15): 39-41

[5] 李艳芳,徐匆,罗华建,等.岭南特色果酒的研究与应用[J].广东农业科学,2014,41(5):159-162
LI Yan-fang, XU Cong, LUO Hua-jian, et al. Research and application of Lingnan characteristic fruit wine [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(5): 159-162

[6] Seeram N P. Bioactive polyphenols from foods and dietary supplements: challenges and opportunities [J]. Acs Symposium, 2006, 925: 25-38

[7] Escarpa A, Gonzalez M C. Total extractable phenolic chromatographic index: an overview of the phenolic class contents from different sources of foods [J]. European Food Research and Technology, 2001, 212(4): 439-444

[8] GB 6195-1986,水果、蔬菜维生素 C 含量测定法 (2,6-二氯靛酚滴定法)[S]
GB 6159-1986, Determination of vitamin C in vegetables and fruits (2,6-dichloro-indophenol titration method) [S]

[9] Lin L, Zhao H, Dong Y, et al. Macroporous resin purification behavior of phenolics and rosmarinic acid from *Rabdosia serra* (MAXIM.) HARA leaf [J]. Food Chemistry, 2012, 130(2): 417-424

[10] Dudonné S, Vitrac X, Coutière P, et al. Comparative study of antioxidant properties and total phenolic content of 30 plant extracts of industrial interest using DPPH, ABTS, FRAP, SOD, and ORAC assays [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2009, 57(5): 1768-1774

[11] Hernándezledesma B, Amigo L, Recio I, et al. ACE-inhibitory and radical-scavenging activity of peptides derived from beta-lactoglobulin f(19-25). interactions with ascorbic acid [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2007, 55(9): 3392-3397

[12] Vanzani P, Rossetto M, Rigo A, et al. Major phytochemicals in apple cultivars: contribution to peroxyl radical trapping efficiency [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2005, 53(9): 3377-3382

[13] Acg S, Gillzquierdo A, Gil M I. Comparative study of six pear cultivars in terms of their phenolic and vitamin C contents and antioxidant capacity [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2003, 83(10): 995-1003

[14] Ara R, Saha B K, Motalab M, et al. Nutritional evaluation of fresh and processed fruit juices available in Dhaka City, Bangladesh [J]. Bangladesh Journal of Botany, 2016, 45(1): 187-192

[15] Ramful D, Tarnus E, Aruoma O I, et al. Polyphenol composition, vitamin C content and antioxidant capacity of *Mauritian citrus* fruit pulps [J]. Food Research International, 2011, 44(7): 2088-2099

[16] Rapisarda P, Tomaino A, Cascio R L, et al. Antioxidant effectiveness as influenced by phenolic content of fresh orange juices.[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1999, 47(11): 4718-4723

[17] Liu F X, Fu S F, Bi X F, et al. Physico-chemical and antioxidant properties of four mango (*Mangifera indica* L.) cultivars in China [J]. Food Chemistry, 2013, 138(1): 396-405

[18] Hong K, Xu H, Wang J, et al. Quality changes and internal browning developments of summer pineapple fruit during storage at different temperatures [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 151(151): 68-74

[19] Vinci G, Botrè F, Mele G. Ascorbic acid in exotic fruits: a liquid chromatographic investigation [J]. Food Chemistry, 1995, 53(2): 211-214

[20] Wall M M. Ascorbic acid, vitamin A, and mineral composition of banana (*Musa* sp.) and papaya (*Carica papaya*) cultivars grown in Hawaii [J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2006, 19(5): 434-445

[21] Marinova D, Ribarova F, Atanassova M. Total phenolics and flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables [J]. Journal of University Chemistry Technology & Metallurgy, 2005, 40(40): 255-260

[22] Alothman M, Rajeev B, Karim A A. Antioxidant capacity and phenolic content of selected tropical fruits from Malaysia, extracted with different solvents [J]. Food Chemistry, 2009, 115(3): 785-788

[23] Lou S N, Lai Y C, Hsu Y S, et al. Phenolic content, antioxidant activity and effective compounds of kumquat

extracted by different solvents [J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt A): 1-6

[24] Rababah T M, Al-Mahasneh M A, Kilani I, et al. Effect of jam processing and storage on total phenolics, antioxidant activity, and anthocyanins of different fruits [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(6): 1096-1102

[25] Özkan A, Gübbük H, Güneş E, et al. Antioxidant capacity of juice from different papaya (*Carica papaya* L.) cultivars grown under greenhouse conditions in Turkey [J]. Turkish Journal of Biology, 2011, 35(5): 619-625

[26] Karaman S, Tütem E, Başkan K S, et al. Comparison of antioxidant capacity and phenolic composition of peel and flesh of some apple varieties [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(4): 867-875

[27] 曹增梅.番石榴多酚的提取分离及保鲜应用研究[D].湛江:广东海洋大学,2013
CAO Zeng-mei. Studies on extraction, isolation and preservation application of guava polyphenols [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013

[28] 邝高波.番石榴多酚提取及抗氧化和抑菌活性研究[D].湛江:广东海洋大学,2014
KUANG Gao-bo. Study on extraction, antioxidant activity and antimicrobial activity of guava polyphenols [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2014

[29] 蒲玲玲,韦京豫,高蔚娜,等.江西脐橙酚酸及类黄酮物质的HPLC 分析[J].营养学报,2014,36(1):74-77
PU Ling-ling, WEI Jing-yu, GAO Wei-na, et al. HPLC analysis of phenolic acids and flavonoids in Jiangxi navel orange [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2014, 36(1): 74-77

[30] Schieber A, Ullrich W, Carle R. Characterization of polyphenols in mango puree concentrate by HPLC with diode array and mass spectrometric detection [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2000, 1(2): 161-166

[31] 沈佩仪.菠萝皮中多酚类物质的提取、纯化及抗氧化活性的研究[D].南昌:南昌大学,2012
SHEN Pei-yi. Studies on extraction, purification and antioxidant activity of polyphenols in pineapple skin [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012

[32] Kelebek H, Selli S, Gubbuk H, et al. Comparative evaluation of volatiles, phenolics, sugars, organic acids and antioxidant properties of Sel-42 and Tainung papaya varieties [J]. Food Chemistry, 2015, 173: 912-919

[33] Rivera-Pastrana D M, Yahia E M, González-Aguilar G A. Phenolic and carotenoid profiles of papaya fruit (*Carica papaya* L.) and their contents under low temperature storage [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(14): 2358-2365

[34] 方敏,王耀峰,宫智勇.15 种水果和 33 种蔬菜的抗氧化活性研究[J].食品科学,2008,29(10):97-100
FANG Min, WANG Yao-feng, GONG Zhi-yong. Study on antioxidant activities of fifty kinds and thirty-three kinds of vegetables [J]. Food Science, 2008, 29(10): 97-100

[35] 许红星,曹晖,刘方方.两种方法评价常见水果的抗氧化活性[J].扬州大学烹饪学报,2012,29(4):38-42
XU Hong-xing, CAO Hui, LIU Fang-fang. Two method evaluating the antioxidant activities of some common fruits [J]. Culinary Science Journal of Yangzhou University, 2012, 29(4): 38-42

[36] Floegel A, Kim D O, Chung S J, et al. Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods [J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2011, 24(7): 1043-1048

[37] 米书梅,阮征,温艳梅,等.几种常见果蔬抗氧化活性与多酚和维生素 C 的关系[J].食品工业科技,2013,34(1):133-136
MI Shu-mei, RUAN Zheng, WEN Yan-mei, et al. The determination of total polyphenols and vitamin C contents in several common vegetables and fruits and their antioxidant activity [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(1): 133-136