

# 不同品种李子多酚组成及抗氧化活性

肖星凝<sup>1</sup>, 李苇舟<sup>1</sup>, 石芳<sup>1</sup>, 李谣<sup>1</sup>, 明建<sup>1,2,\*</sup>

(1.西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2.重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆 400715)

**摘要:** 为研究不同品种李子果皮、果肉多酚组成及抗氧化活性, 以9个不同品种的李子(芙蓉李、巫山李、玫瑰李、红布李、黑布李、西梅李、脆红李、江安李、青李)为原料, 提取游离酚和结合酚, 测定其1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力和抗氧化能力(oxygen radical absorbance capacity, ORAC)值, 并通过高效液相色谱分析其多酚组成。结果显示: 9种李子果皮总酚含量范围为111.52~775.88 mg GAE/100 g; 果肉总酚含量范围为120.65~301.91 mg GAE/100 g, 其中红布李果皮、果肉总酚含量均最高, 西梅李总酚含量均最低。在多酚组成上, 游离酚含量显著高于结合酚, 且多酚组分主要为酚酸(原儿茶酸、绿原酸、咖啡酸)。体外抗氧化结果显示: 9种李子果皮、果肉多酚均具有一定的抗氧化活性, DPPH自由基清除IC<sub>50</sub>值范围为4.38~46.46 μg/mL, ORAC值范围为0.24~210.50 μmol TE/g, 其中巫山李果肉游离酚对DPPH自由基的清除能力最强, 红布李果皮游离酚ORAC值最高。

**关键词:** 李子; 多酚; 抗氧化活性; 高效液相色谱

## Antioxidant Activity and Phenolic Contents of Peel and Pulp of Different Plum Varieties

XIAO Xingning<sup>1</sup>, LI Weizhou<sup>1</sup>, SHI Fang<sup>1</sup>, LI Yao<sup>1</sup>, MING Jian<sup>1,2,\*</sup>

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Engineering Research Center for Special Food, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** In order to investigate the phenolic components and *in vitro* antioxidant activity of the peel and pulp of different plum varieties, we chose nine plum varieties for the extraction of free and bound phenols from the peel and pulp. The 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging capacity and oxygen radical absorbance capacity (ORAC) of the extracts were determined, and the polyphenol composition was analyzed by high performance liquid chromatography (HPLC). The results showed that total phenolic contents in the peel of nine plum varieties were between 111.52 and 775.88 mg GAE/100 g, and between 120.65 and 301.91 mg GAE/100 g in the pulp. Among the varieties investigated, both the peel and pulp of red plum had the highest phenolic contents, and the lowest phenolic contents were detected in both tissues of prune. Free phenols were more abundant than bound ones in all the varieties, and the main phenolic compounds identified were phenolic acids (protocatechuic acid, chlorogenic acid and caffeic acid). *In vitro* antioxidant assays showed that the phenolic extracts from all nine plum varieties had some antioxidant activity with IC<sub>50</sub> values for scavenging of DPPH radical in the range of 4.38–46.46 μg/mL and ORAC values in the range of 0.24–210.50 μmol TE/g. Among these varieties, free phenols extracted from the pulp of Wushan plum possessed the lowest DPPH radical scavenging capacity and those extracted from the peel of red plum had the highest ORAC value.

**Key words:** plum; polyphenol; antioxidant activity; high performance liquid chromatography (HPLC)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715006

中图分类号: TS201.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2017)15-0031-07

引文格式:

肖星凝, 李苇舟, 石芳, 等. 不同品种李子多酚组成及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 31-37. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715006. <http://www.spkx.net.cn>

XIAO Xingning, LI Weizhou, SHI Fang, et al. Antioxidant activity and phenolic contents of peel and pulp of different plum varieties[J]. Food Science, 2017, 38(15): 31-37. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715006. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2017-01-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31471576); 重庆市特色食品工程技术研究中心能力提升项目(cstc2014pt-gc8001)

作者简介: 肖星凝(1996—), 女, 本科生, 研究方向为食品科学与工程. E-mail: 775367073@qq.com

\*通信作者: 明建(1972—), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品化学与营养. E-mail: mingjian1972@163.com

李子 (*Prunus salicina* Lindl.)，蔷薇科李属植物，别名嘉庆子、布霖、玉皇李、山李子，是中国栽培最早的水果之一。新鲜李子果肉营养丰富，富含多种氨基酸、维生素及矿物质<sup>[1-2]</sup>，具有治疗消化系统疾病<sup>[3]</sup>、心血管疾病<sup>[4]</sup>、增强免疫<sup>[5]</sup>、美容等多种生理活性。除此之外，李子还含有大量抗氧化物质，具有很强的抗氧化活性，这其中的抗氧化物质主要为酚类化合物及其衍生物。它们在植物界的种类达6 500种以上，主要分布于植物的皮、根、茎、叶、果中，如果蔬、谷物等<sup>[6-7]</sup>，且主要存在于植物的皮、渣部位，如苹果皮<sup>[8]</sup>、葡萄皮渣<sup>[9]</sup>及柑橘籽和皮中<sup>[10]</sup>等。de Beer等<sup>[11]</sup>研究就发现，李子皮中也富含黄酮醇、黄烷-3-醇、酚酸和花青素等酚类化合物。陈冠林等<sup>[12]</sup>研究了33种水果多酚含量及抗氧化活性，发现三华李多酚含量最高，对1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 自由基、2,2'-联氮-二 (3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸) 二铵盐自由基 (2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate) radical, ABTS<sup>+</sup>·) 清除能力最强，且Fe<sup>3+</sup>还原能力也最强。刘冬等<sup>[13]</sup>研究发现，25种中国传统水果中，李子的总酚含量最高且其抗Caco-2细胞增殖的活性最强，具有良好的抗增殖活性。

目前对李子的研究主要集中在加工工艺方面<sup>[14-15]</sup>，对其抗氧化活性的研究也很少。本实验选用9个不同品种的李子 (芙蓉李、巫山李、玫瑰李、红布李、黑布李、西梅李、脆红李、江安李、青李) 为原料，分别对其果肉果皮中游离酚和结合酚的含量、组成及抗氧化性进行了系统研究，以期为李子的综合开发利用提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

选用市售不同产地李子共9种，具体的品种与产地见表1，均购自重庆北碚永辉超市。

表1 9种李子种类及产地  
Table 1 Geographic origins and varieties of plums

品种	芙蓉李	巫山李	玫瑰李	红布李	黑布李	西梅李	脆红李	江安李	青李
产地	福建永泰	重庆巫山	四川成都	四川成都	四川成都	四川成都	四川成都	四川宜宾	重庆北碚

荧光素钠盐 (fluorescein sodium, FL)、福林-酚试剂 (Folin-Ciocalteu)、水溶性VE (Trolox)、DPPH (均为分析纯) 美国Sigma公司；2,2'-偶氮二异丁基脒盐酸盐 (2,2'-azobis[2-methylpropionamidine] dihydrochloride, ABAP, 分析纯) 日本Wako化学试剂公司；甲醇、原儿茶酸、绿原酸、咖啡酸、荭草素、香草醛、芦丁、白藜芦醇 (均为色谱纯) 成都普瑞法科技有限公司；丙酮、抗坏血酸、乙酸乙酯、磷酸氢二

钾、碳酸钠、磷酸二氢钾、氢氧化钠、浓盐酸、正己烷 (均为分析纯) 成都科龙化工试剂厂。

### 1.2 仪器与设备

XHF-D均质机 宁波新芝生物科技股份有限公司；HW-7FCS制冰机 日本三洋公司；RE-52AA旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂；HH-6数显恒温水浴锅 金坛市富华仪器有限公司；1-15PK高速离心机 美国Sigma公司；722分光光度计 上海精科科学仪器厂；LC-20A高效液相色谱 (high performance liquid chromatography, HPLC) 仪 日本岛津公司；868型pH计 美国Orion公司；Spectra Max M2多功能酶标仪 美国Molecular公司；96孔板黑色培养板 美国Corning公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 原料预处理

9种李子采购回实验室后，挑选出无腐烂、无伤害，完整的果实，将其洗净、沥干、去核，果皮与果肉分离，置于-40℃冰箱内冻藏，备用。

#### 1.3.2 李子多酚的提取

##### 1.3.2.1 游离酚的提取

参照Adom等<sup>[16]</sup>的方法，根据实验室条件稍作修改。准确称取25 g样品于100 mL离心管中，加入50 mL 80%冷冻丙酮溶液，冰浴均质 (第1次2 min、第2次1 min、第3次0.6 min，每次间隔2 min) 后，于3 500×g离心10 min，取上清液。残渣重复提取两次，合并上清液，抽滤后于45℃旋转蒸干，用超纯水定容至25 mL。过0.45 μm有机滤膜后贮于-40℃条件下保存备用。

##### 1.3.2.2 结合酚的提取

收集游离酚提取后的残渣，加入20 mL 2 mol/L NaOH溶液，避光搅拌消化1.5 h，再用浓盐酸调至pH 2左右。加入正己烷20 mL，搅拌10 min后离心，除去脂肪层，重复去脂两次。加入20 mL乙酸乙酯并充分搅拌提取10 min，3 500×g离心后取上清液，重复提取5次，合并上清液，抽滤后于45℃旋转蒸干，用超纯水定容至10 mL。过0.45 μm有机滤膜后贮于-40℃备用。

#### 1.3.3 多酚含量测定

##### 1.3.3.1 没食子酸标准曲线制作

参考文献<sup>[17]</sup>的方法，称取25 mg没食子酸，加入适量去离子水充分溶解，定容至25 mL，得到1 mg/mL的没食子酸溶液。取5 mL 1 mg/mL的没食子酸溶液，用去离子水定容至50 mL容量瓶中，即得0.1 mg/mL的没食子酸溶液，然后配成0、20、40、60、80、100、150、200、300、400 μg/mL的没食子酸标准液。取200 μL标准液加入试管中，再依次加入800 μL去离子水、200 μL福林-酚试剂，振摇试管使样品充分混合，避光保存6 min，再加入2 mL 7% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液和1.6 mL去离子水，在避光条件

下放置90 min后于760 nm波长处测定吸光度。以多酚质量浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制标准曲线,得到回归方程为 $y=0.0043x+0.0168$  ( $R^2=0.9983$ )。根据该回归方程计算待检样品中酚类物质的含量。

### 1.3.3.2 李子果皮、果肉多酚含量测定

采用福林-酚法,取200  $\mu\text{L}$ 提取液(可作适当稀释)并用去离子水补至1 mL,后续操作同标准曲线的制备。结果以每100 g样品中所含的没食子酸当量(mg GAE/100 g)表示,以鲜质量计。每个样品做3组平行,结果表示为 $\bar{x}\pm s$ 。

### 1.3.4 李子多酚抗氧化活性测定

#### 1.3.4.1 DPPH自由基清除率测定

参考Alvarez<sup>[18]</sup>、Vaher<sup>[19]</sup>等的方法,取1 mL不同质量浓度的样液和5 mL 0.1 mmol/L的DPPH溶液加入到10 mL的试管中,以VC作为对照,混合均匀后在室温条件下避光反应30 min,然后于517 nm波长处测定吸光度 $A_i$ ,以纯水做试剂空白,测定空白样吸光度 $A_j$ 。按式(1)计算样品的DPPH自由基清除率。

$$\text{DPPH自由基清除率}/\% = (1 - \frac{A_i}{A_j}) \times 100 \quad (1)$$

#### 1.3.4.2 抗氧化能力指数值测定

参考Alvarez<sup>[18]</sup>、Vaher<sup>[19]</sup>等的方法,分别精确吸取20  $\mu\text{L}$ 磷酸盐缓冲液(空白液)、Trolox标准液(6.25  $\mu\text{mol/L}$ )和不同质量浓度的样品液,一式3份点样到96孔黑色底部透明的酶标板。在37  $^{\circ}\text{C}$ 温育10 min,设置酶标仪参数。加入200  $\mu\text{L}$  0.96  $\mu\text{mol/L}$ 的荧光工作液,再在37  $^{\circ}\text{C}$ 温育至少20 min并间歇摇动,等酶标板温度达到37  $^{\circ}\text{C}$ 后,迅速加入新鲜配制的119 mmol/L ABAP工作液20  $\mu\text{L}$ ,于激发波长485 nm、入射波长520 nm条件下立即读数,每4.5 min进行一次读数,共检测2.5 h。根据测定值计算抗氧化能力(oxygen radical absorbance capacity, ORAC)值,按式(2)计算荧光衰减曲线下的面积(area under the curve, AUC)、按式(3)计算ORAC值。

$$\text{AUC} = (0.5 \times \frac{f_1}{f_1} + \frac{f_2}{f_1} + \frac{f_3}{f_1} \cdots + \frac{f_i}{f_1} + \cdots + \frac{f_{30}}{f_1} + 0.5 \times \frac{f_{30}}{f_1}) \times t \quad (2)$$

$$\text{ORAC值} = \frac{\text{AUC}_{\text{样品}} - \text{AUC}_{\text{ABAP}}}{\text{AUC}_{\text{Trolox}} - \text{AUC}_{\text{ABAP}}} \times \frac{\rho_{\text{Trolox}}}{\rho_{\text{样品}}} \quad (3)$$

式中: $f_i$ 为第1次荧光读数; $f_i$ 为第*i*次荧光读数; $t$ 为间隔测定时间; $\rho_{\text{Trolox}}$ 为Trolox质量浓度/(mg/mL); $\rho_{\text{样品}}$ 为样品质量浓度/(mg/mL)。最终的ORAC值表示为 $\mu\text{mol TE/g}$ 。

### 1.3.5 李子多酚组分鉴定

标准溶液的制备:准确称取原儿茶酸、绿原酸、咖啡酸、香草醛、荭草素、芦丁、白藜芦醇标准品各5.0 mg,用色谱级甲醇溶解并定容至5 mL,配制成1 mg/mL标准贮备液,然后稀释成不同质量浓度的标准溶液,经0.45  $\mu\text{m}$ 有机滤膜过滤,备用。

样品溶液的制备:将李子多酚提取液适当的稀释后,取1 mL,经0.45  $\mu\text{m}$ 有机膜过滤,备用。

色谱条件:色谱柱:Thermo BDS C<sub>18</sub>(250 mm $\times$ 4.6 mm, 5  $\mu\text{m}$ );流动相条件:A相0.1%甲酸,B相100%乙腈;流速:0.7 mL/min;进样量:20  $\mu\text{L}$ ;柱温:40  $^{\circ}\text{C}$ ;检测器:LC-20A二极管阵列检测器(diode array detector, DAD),检测波长280 nm。梯度洗脱程序:0~5 min, B为10%;5~50 min, B为10%~40%;50~55 min, B为40%~90%;55~62 min, B为90%;62~65 min, B为90%~10%;65~75 min, B为10%。

以原儿茶酸、绿原酸、咖啡酸、香草醛、荭草素、芦丁、白藜芦醇标准品质量浓度为横坐标( $x$ ),色谱峰面积为纵坐标( $Y$ ),绘制标准曲线。

### 1.4 数据处理

每组实验至少重复3次,结果表示为 $\bar{x}\pm s$ ,数据采用Excel 2007软件进行统计分析,并用SPSS 21.0软件进行处理。采用ANOVA进行Turkey多重比较( $P<0.05$ ),并用皮尔逊系数分析相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同品种李子果皮、果肉多酚含量

表2 9种李子游离酚、结合酚与总酚含量  
Table 2 Contents of free, bound and total phenolics in nine plum varieties

品种	果皮多酚含量			果肉多酚含量		
	游离酚	结合酚	总酚	游离酚	结合酚	总酚
芙蓉李	361.00 $\pm$ 6.17 <sup>a</sup>	22.43 $\pm$ 0.78 <sup>cd</sup>	383.43 $\pm$ 5.58 <sup>c</sup>	147.05 $\pm$ 3.74 <sup>d</sup>	6.73 $\pm$ 0.13 <sup>e</sup>	153.78 $\pm$ 3.84 <sup>c</sup>
巫山李	140.30 $\pm$ 4.97 <sup>f</sup>	4.74 $\pm$ 0.28 <sup>e</sup>	145.04 $\pm$ 4.69 <sup>f</sup>	113.93 $\pm$ 0.59 <sup>f</sup>	7.90 $\pm$ 0.22 <sup>d</sup>	121.83 $\pm$ 0.39 <sup>e</sup>
玫瑰李	651.60 $\pm$ 15.40 <sup>b</sup>	34.89 $\pm$ 0.94 <sup>d</sup>	686.49 $\pm$ 14.55 <sup>b</sup>	191.26 $\pm$ 1.56 <sup>b</sup>	11.11 $\pm$ 0.23 <sup>b</sup>	202.37 $\pm$ 1.70 <sup>b</sup>
红布李	760.08 $\pm$ 11.84 <sup>a</sup>	15.80 $\pm$ 0.13 <sup>f</sup>	775.88 $\pm$ 11.87 <sup>a</sup>	291.83 $\pm$ 2.17 <sup>a</sup>	10.08 $\pm$ 0.25 <sup>c</sup>	301.91 $\pm$ 2.01 <sup>a</sup>
黑布李	371.86 $\pm$ 16.19 <sup>e</sup>	14.14 $\pm$ 0.15 <sup>f</sup>	386.00 $\pm$ 16.12 <sup>e</sup>	140.61 $\pm$ 2.65 <sup>de</sup>	7.04 $\pm$ 0.02 <sup>e</sup>	147.65 $\pm$ 2.65 <sup>cd</sup>
西梅李	93.39 $\pm$ 4.57 <sup>g</sup>	18.13 $\pm$ 0.47 <sup>e</sup>	111.52 $\pm$ 4.67 <sup>g</sup>	112.70 $\pm$ 1.96 <sup>e</sup>	7.94 $\pm$ 0.35 <sup>d</sup>	120.65 $\pm$ 2.10 <sup>e</sup>
脆红李	275.38 $\pm$ 4.12 <sup>d</sup>	24.11 $\pm$ 1.46 <sup>bc</sup>	299.50 $\pm$ 5.56 <sup>d</sup>	137.25 $\pm$ 1.03 <sup>e</sup>	4.30 $\pm$ 0.24 <sup>f</sup>	141.55 $\pm$ 1.13 <sup>d</sup>
江安李	99.04 $\pm$ 6.32 <sup>g</sup>	25.58 $\pm$ 0.59 <sup>b</sup>	124.62 $\pm$ 6.16 <sup>g</sup>	178.43 $\pm$ 5.20 <sup>c</sup>	19.76 $\pm$ 0.67 <sup>a</sup>	198.19 $\pm$ 5.51 <sup>b</sup>
青李	217.54 $\pm$ 2.36 <sup>e</sup>	21.08 $\pm$ 0.32 <sup>d</sup>	238.61 $\pm$ 2.66 <sup>e</sup>	140.97 $\pm$ 0.51 <sup>de</sup>	1.13 $\pm$ 0.04 <sup>f</sup>	142.10 $\pm$ 0.50 <sup>d</sup>

注:同列肩标小写字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

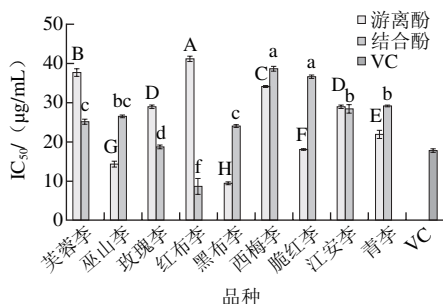
由表2可知,9个不同品种李子果皮总酚含量范围为111.52~775.88 mg GAE/100 g,游离酚含量范围为93.39~760.08 mg GAE/100 g,结合酚含量范围为4.74~34.89 mg GAE/100 g。9个不同品种李子果肉的总酚含量范围为120.65~301.91 mg GAE/100 g,游离酚含量范围为112.70~291.83 mg GAE/100 g,结合酚含量范围为1.13~19.76 mg GAE/100 g。李子果皮多酚含量普遍高于果肉多酚,且游离态是李子果皮、果肉多酚的主要存在形式,游离酚含量占总酚



的90%以上, 约为结合酚的25倍。9种李子中, 红布李的果皮、果肉总酚含量最高, 显著高于其他品种 ( $P<0.05$ ), 其次为玫瑰李, 西梅李总酚含量最低; 对于游离酚而言, 红布李含量最高, 西梅李最低; 对于结合酚而言, 玫瑰李果皮、江安李果肉含量最高, 巫山李果皮、青李果肉最低。与其他水果相比, 李子总酚含量整体较高, 高于树莓 ( $(239\pm10)$  mg GAE/100 g)、草莓 ( $(235\pm6)$  mg GAE/100 g)、红葡萄 ( $(161\pm7)$  mg GAE/100 g), 但是低于石榴 ( $(338\pm14)$  mg GAE/100 g)、蔓越莓 ( $(287\pm5)$  mg GAE/100 g)、蓝莓 ( $(285\pm9)$  mg GAE/100 g) [20]。

## 2.2 不同品种李子果皮、果肉多酚对DPPH自由基的清除能力比较

DPPH自由基是一种稳定的自由基[21], 当自由基清除剂加入到DPPH自由基溶液中时, 孤对电子被配对, 深紫色的DPPH自由基将被还原成黄色的DPPH-H非自由基形式, 其褪色程度与自由基清除剂的浓度呈相关, 且与所接受的电子数量呈定量关系, 因而可以通过吸光度的变化进行对多酚清除自由基能力的定量分析[22-23]。



大写字母不同表示游离酚差异显著 ( $P<0.05$ ); 小写字母不同表示结合酚差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

图1 9种李子果皮多酚对DPPH自由基清除率 ( $IC_{50}$ )

Fig. 1 DPPH radical scavenging capacity ( $IC_{50}$ ) of polyphenols in the peel of nine plum varieties

由图1可知, 不同品种李子果皮多酚对DPPH自由基的清除能力差异比较大。果皮游离酚 $IC_{50}$ 值变化范围为9.62~41.10  $\mu\text{g/mL}$ , 清除能力顺序为: 黑布李>巫山李>脆红李>青李。果皮结合酚 $IC_{50}$ 值变化范围为8.79~38.55  $\mu\text{g/mL}$ , 清除能力顺序为: 红布李>玫瑰李>黑布李>芙蓉李。整体而言, 对DPPH自由基清除能力最强的是红布李果皮结合酚, 其后是黑布李果皮游离酚、巫山李果皮游离酚, 这3种果皮多酚清除力均高于VC且显著高于其他品种李子果皮多酚 ( $P<0.05$ ), 而西梅李果皮结合酚对DPPH自由基的清除能力最差。

由图2可知, 不同品种李子果肉多酚对DPPH自由基的清除能力差异比较大。果肉游离酚 $IC_{50}$ 值变化范围为4.38~33.38  $\mu\text{g/mL}$ , 清除能力顺序为: 巫山李>黑

布李>江安李>玫瑰李。果肉结合酚 $IC_{50}$ 值变化范围为17.95~46.46  $\mu\text{g/mL}$ , 清除能力顺序为: 脆红李>青李>巫山李>红布李。整体而言, 对DPPH自由基清除能力最强的是巫山李果肉游离酚, 其后是黑布李果肉游离酚, 这2种果肉多酚清除力均高于VC且显著高于其他品种李子果肉多酚 ( $P<0.05$ ), 而芙蓉李肉结合酚对DPPH自由基的清除能力最差。

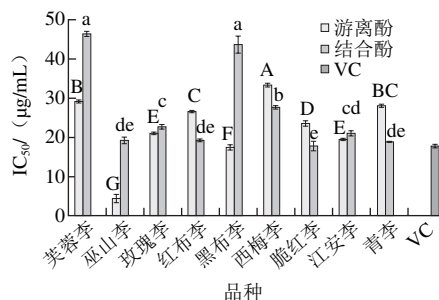


图2 9种李子果肉多酚类DPPH自由基清除率 ( $IC_{50}$ )

Fig. 2 DPPH radical scavenging capacity ( $IC_{50}$ ) of polyphenols in the pulp of nine plum varieties

综上所述可以看出, 虽然不同品种李子果皮、果肉多酚对DPPH自由基的清除能力并没有呈现出明显的规律, 但总的来说, 李子对DPPH自由基的清除能力表现不错, 杨荣华等[24]在对10种花色苷果蔬抗氧化活性的比较研究中也证实李子对DPPH自由基具有较高的抑制率。巫山李、黑布李整体表现出较好的自由基清除能力, 芙蓉李、西梅李自由基清除力较差。

## 2.3 不同品种李子果皮、果肉多酚ORAC值比较

ORAC法的原理是ABAP自由基破坏荧光素钠, 使荧光强度发生变化 (荧光强度变化大小可反映ABAP对其破坏程度), 而抗氧化剂可延缓ABAP引起的荧光变化, 其抑制程度反映了它对自由基的抗氧化能力[25], ORAC值越大, 表明抗氧化剂的抗氧化能力越强。通过ORAC值对9种李子果皮、果肉多酚的抗氧化活性进行评价, 结果见图3。

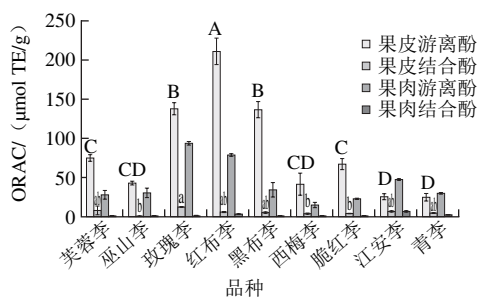


图3 9种李子多酚ORAC值

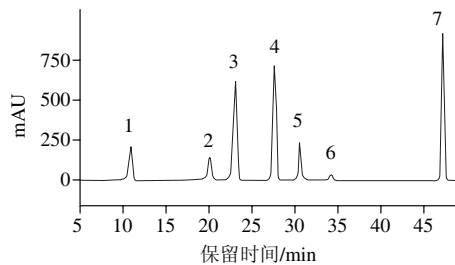
Fig. 3 ORAC values of polyphenols in nine plum varieties

从图3可以看出, 李子果皮游离酚ORAC值范围为25.19~210.50  $\mu\text{mol TE/g}$ , 顺序为: 红布李>玫瑰李>黑布李>芙蓉李; 李子果皮结合酚ORAC值范围为

1.45~12.62  $\mu\text{mol TE/g}$ , 顺序为: 玫瑰李>芙蓉李>江安李>红布李; 李子果肉游离酚ORAC值范围为14.79~93.60  $\mu\text{mol TE/g}$ , 顺序为: 玫瑰李>红布李>江安李>黑布李; 李子果肉结合酚ORAC值范围为0.24~7.17  $\mu\text{mol TE/g}$ , 顺序为: 江安李>红布李>青李>巫山李。整体而言, 李子果皮、果肉游离酚ORAC值高于结合酚。对于游离酚而言, 除了江安李、青李以外, 李子果皮ORAC值高于李子果肉; 对于结合酚而言, 除了巫山李、江安李以外, 李子果皮ORAC值高于果肉。9种李子中, 玫瑰李、红布李果皮与果肉游离酚ORAC值都比较高, 与常见的水果相比, 9个不同品种的李子的总ORAC值含量范围为60.74(西梅李)~299.06(红布李)  $\mu\text{mol TE/g}$ , 大多数品种的李子低于野蓝莓((96.21 $\pm$ 10.80)  $\mu\text{mol TE/g}$ )、蔓越莓((83.94 $\pm$ 14.05)  $\mu\text{mol TE/g}$ )、草莓((83.48 $\pm$ 8.88)  $\mu\text{mol TE/g}$ ), 但也有个别品种的李子ORAC值较大, 比如品种玫瑰李((245.06 $\pm$ 10.58)  $\mu\text{mol TE/g}$ )、红布李((299.06 $\pm$ 16.29)  $\mu\text{mol TE/g}$ ), 且远远高于猕猴桃((12.62 $\pm$ 1.32)  $\mu\text{mol TE/g}$ )、香蕉((5.65 $\pm$ 0.18)  $\mu\text{mol TE/g}$ )等水果的ORAC值<sup>[20]</sup>。

#### 2.4 李子多酚组分分析

根据预实验的结果发现, 李子多酚中存在7种含量较明显的单体酚, 根据同等条件下得到的混合标样HPLC图, 从而确定了这7种单体酚的种类名称。7种标准品HPLC图见图4, 各标准品的回归方程见表3。



1.原儿茶酸; 2.绿原酸; 3.咖啡酸; 4.香草醛; 5.荭草素; 6.芦丁; 7.白藜芦醇。

图4 多酚标准品HPLC图

Fig. 4 Chromatogram of polyphenol standard mixture

表3 7种标准品的回归方程

Table 3 Regression equations for seven standard substances

标准品	标准曲线	相关系数 ( $R^2$ )	保留时间/min
原儿茶酸	$Y=19\ 721x-12\ 404$	0.999 8	10.660
绿原酸	$Y=17\ 074x-86\ 442$	0.999 1	18.266
咖啡酸	$Y=36\ 572x+168\ 063.5$	1.000 0	22.631
香草醛	$Y=54\ 629x-68\ 118$	0.999 7	27.356
荭草素	$Y=16\ 663x-13\ 184$	0.999 1	29.271
芦丁	$Y=10\ 940x-46\ 689$	0.999 2	34.318
白藜芦醇	$Y=56\ 809x-138\ 222.3$	0.999 5	46.848

9种李子果皮、果肉游离酚组分和含量见表4, 结合酚组分和含量见表5。9种李子果皮、果肉游离酚主要由

原儿茶酸、绿原酸、咖啡酸、香草醛、荭草素、白藜芦醇6种单体酚组成; 结合酚主要由原儿茶酸、绿原酸、咖啡酸、荭草素、芦丁5种单体酚组成, 李子果皮、果肉多酚组分主要为酚酸类。

表4 9种李子游离酚组分和含量

Table 4 Contents of free polyphenols in nine plum varieties

部位	品种	原儿茶酸	绿原酸	咖啡酸	香草醛	荭草素	白藜芦醇
果皮	芙蓉李	25.35 $\pm$ 2.41 <sup>d</sup>	80.08 $\pm$ 3.87 <sup>d</sup>	8.74 $\pm$ 1.30 <sup>d</sup>	15.70 $\pm$ 0.21 <sup>d</sup>	103.05 $\pm$ 5.34 <sup>b</sup>	22.73 $\pm$ 2.46 <sup>d</sup>
	巫山李	33.12 $\pm$ 17.81 <sup>d</sup>	69.47 $\pm$ 1.12 <sup>d</sup>	12.92 $\pm$ 9.60 <sup>d</sup>	14.08 $\pm$ 0.30 <sup>d</sup>	47.40 $\pm$ 5.69 <sup>bc</sup>	5.97 $\pm$ 0.06 <sup>bc</sup>
	玫瑰李	133.12 $\pm$ 9.23 <sup>b</sup>	195.47 $\pm$ 3.14 <sup>b</sup>	66.85 $\pm$ 4.98 <sup>b</sup>	88.53 $\pm$ 1.01 <sup>b</sup>	202.18 $\pm$ 23.42 <sup>a</sup>	9.73 $\pm$ 1.92 <sup>b</sup>
	红布李	155.45 $\pm$ 0.18 <sup>b</sup>	392.83 $\pm$ 15.99 <sup>b</sup>	78.89 $\pm$ 0.10 <sup>b</sup>	147.22 $\pm$ 14.01 <sup>a</sup>	203.09 $\pm$ 21.94 <sup>a</sup>	19.86 $\pm$ 0.72 <sup>a</sup>
	黑布李	19.05 $\pm$ 0.74 <sup>d</sup>	16.82 $\pm$ 0.58 <sup>d</sup>	5.34 $\pm$ 0.40 <sup>d</sup>	17.55 $\pm$ 2.04 <sup>d</sup>	59.11 $\pm$ 3.75 <sup>bc</sup>	5.66 $\pm$ 0.72 <sup>bc</sup>
	西梅李	18.13 $\pm$ 8.34 <sup>d</sup>	32.65 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	4.84 $\pm$ 4.50 <sup>d</sup>	8.32 $\pm$ 0.90 <sup>d</sup>	15.22 $\pm$ 6.34 <sup>c</sup>	2.55 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>
	脆红李	294.36 $\pm$ 3.21 <sup>a</sup>	131.14 $\pm$ 2.72 <sup>c</sup>	153.79 $\pm$ 1.73 <sup>a</sup>	28.69 $\pm$ 0.49 <sup>d</sup>	45.07 $\pm$ 0.27 <sup>bc</sup>	8.17 $\pm$ 0.20 <sup>bc</sup>
	江安李	5.95 $\pm$ 1.53 <sup>d</sup>	29.23 $\pm$ 0.69 <sup>d</sup>	ND	13.16 $\pm$ 1.47 <sup>d</sup>	45.27 $\pm$ 6.46 <sup>bc</sup>	11.33 $\pm$ 0.16 <sup>b</sup>
	青李	82.65 $\pm$ 4.46 <sup>c</sup>	32.05 $\pm$ 2.19 <sup>c</sup>	39.63 $\pm$ 2.40 <sup>c</sup>	36.73 $\pm$ 3.09 <sup>c</sup>	22.90 $\pm$ 1.60 <sup>c</sup>	18.36 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>
果肉	芙蓉李	8.34 $\pm$ 1.18 <sup>d</sup>	11.99 $\pm$ 1.30 <sup>d</sup>	ND	6.65 $\pm$ 0.37 <sup>d</sup>	78.94 $\pm$ 14.84 <sup>a</sup>	2.72 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>
	巫山李	5.81 $\pm$ 0.30 <sup>d</sup>	12.35 $\pm$ 1.91 <sup>c</sup>	ND	8.29 $\pm$ 1.11 <sup>d</sup>	19.00 $\pm$ 2.01 <sup>bc</sup>	3.02 $\pm$ 0.01 <sup>bc</sup>
	玫瑰李	29.41 $\pm$ 1.09 <sup>b</sup>	155.54 $\pm$ 6.78 <sup>a</sup>	10.92 $\pm$ 0.59 <sup>c</sup>	26.26 $\pm$ 1.19 <sup>bc</sup>	45.26 $\pm$ 2.18 <sup>b</sup>	4.09 $\pm$ 0.04 <sup>bc</sup>
	红布李	26.13 $\pm$ 3.90 <sup>bc</sup>	36.18 $\pm$ 3.41 <sup>c</sup>	9.15 $\pm$ 2.10 <sup>c</sup>	42.86 $\pm$ 7.05 <sup>ab</sup>	45.86 $\pm$ 0.64 <sup>b</sup>	6.16 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>
	黑布李	17.61 $\pm$ 0.78 <sup>cd</sup>	25.25 $\pm$ 0.86 <sup>c</sup>	4.56 $\pm$ 0.42 <sup>d</sup>	51.56 $\pm$ 5.24 <sup>a</sup>	36.39 $\pm$ 1.87 <sup>bc</sup>	4.31 $\pm$ 0.21 <sup>b</sup>
	西梅李	63.56 $\pm$ 1.26 <sup>c</sup>	32.22 $\pm$ 1.29 <sup>c</sup>	29.34 $\pm$ 0.68 <sup>a</sup>	10.44 $\pm$ 1.83 <sup>cd</sup>	11.59 $\pm$ 2.68 <sup>c</sup>	2.57 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>
	脆红李	54.78 $\pm$ 1.01 <sup>a</sup>	84.56 $\pm$ 17.53 <sup>b</sup>	24.60 $\pm$ 0.55 <sup>b</sup>	15.90 $\pm$ 1.11 <sup>cd</sup>	9.70 $\pm$ 2.53 <sup>c</sup>	3.77 $\pm$ 0.10 <sup>c</sup>
	江安李	5.64 $\pm$ 1.49 <sup>d</sup>	17.31 $\pm$ 1.45 <sup>c</sup>	ND	13.20 $\pm$ 0.50 <sup>d</sup>	28.63 $\pm$ 3.01 <sup>bc</sup>	3.25 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>
	青李	15.00 $\pm$ 0.48 <sup>bc</sup>	9.89 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	3.16 $\pm$ 0.26 <sup>c</sup>	2.16 $\pm$ 0.09 <sup>d</sup>	13.07 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	2.77 $\pm$ 0.09 <sup>bc</sup>

注: 同列肩标字母不同表示同一部位不同品种间差异显著 ( $P<0.05$ ); ND.未检测到。下同。

表5 9种李子结合酚组分和含量

Table 5 Contents of bound polyphenols in nine plum varieties

部位	品种	原儿茶酸	绿原酸	咖啡酸	荭草素	芦丁
果皮	芙蓉李	343.43 $\pm$ 2.21 <sup>bcd</sup>	15.46 $\pm$ 0.07 <sup>bc</sup>	4.19 $\pm$ 0.33 <sup>c</sup>	9.38 $\pm$ 0.68 <sup>d</sup>	53.74 $\pm$ 0.59 <sup>b</sup>
	巫山李	58.15 $\pm$ 13.13 <sup>d</sup>	6.32 $\pm$ 0.25 <sup>c</sup>	ND	5.05 $\pm$ 0.80 <sup>f</sup>	5.15 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>
	玫瑰李	169.28 $\pm$ 1.99 <sup>bcd</sup>	19.66 $\pm$ 0.64 <sup>ab</sup>	40.45 $\pm$ 1.17 <sup>bc</sup>	64.81 $\pm$ 0.76 <sup>c</sup>	9.50 $\pm$ 0.19 <sup>b</sup>
	红布李	988.64 $\pm$ 34.01 <sup>a</sup>	21.32 $\pm$ 2.43 <sup>a</sup>	155.78 $\pm$ 34.50 <sup>a</sup>	47.63 $\pm$ 1.35 <sup>cd</sup>	184.41 $\pm$ 32.54 <sup>a</sup>
	黑布李	488.53 $\pm$ 0.27 <sup>b</sup>	6.95 $\pm$ 0.11 <sup>c</sup>	11.82 $\pm$ 1.01 <sup>bc</sup>	139.70 $\pm$ 2.07 <sup>a</sup>	28.73 $\pm$ 1.42 <sup>b</sup>
	西梅李	944.71 $\pm$ 22.83 <sup>a</sup>	6.56 $\pm$ 0.11 <sup>c</sup>	47.91 $\pm$ 4.12 <sup>b</sup>	56.50 $\pm$ 0.63 <sup>cd</sup>	43.78 $\pm$ 4.29 <sup>b</sup>
	脆红李	406.34 $\pm$ 3.61 <sup>bc</sup>	16.54 $\pm$ 0.07 <sup>abc</sup>	48.66 $\pm$ 0.26 <sup>b</sup>	82.52 $\pm$ 0.25 <sup>b</sup>	12.11 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>
	江安李	354.37 $\pm$ 15.60 <sup>bcd</sup>	12.23 $\pm$ 0.52 <sup>cd</sup>	4.16 $\pm$ 2.66 <sup>c</sup>	43.29 $\pm$ 0.35 <sup>cd</sup>	43.65 $\pm$ 5.20 <sup>b</sup>
	青李	104.81 $\pm$ 20.37 <sup>cd</sup>	8.90 $\pm$ 0.62 <sup>bc</sup>	5.75 $\pm$ 2.18 <sup>c</sup>	32.45 $\pm$ 5.53 <sup>f</sup>	24.23 $\pm$ 3.54 <sup>b</sup>
果肉	芙蓉李	151.14 $\pm$ 2.69 <sup>de</sup>	7.68 $\pm$ 0.59 <sup>cd</sup>	ND	7.12 $\pm$ 0.27 <sup>cd</sup>	5.91 $\pm$ 0.07 <sup>f</sup>
	巫山李	379.61 $\pm$ 7.14 <sup>d</sup>	16.84 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>	ND	16.10 $\pm$ 2.40 <sup>b</sup>	10.29 $\pm$ 0.31 <sup>c</sup>
	玫瑰李	479.40 $\pm$ 12.76 <sup>c</sup>	5.42 $\pm$ 0.02 <sup>d</sup>	17.01 $\pm$ 1.55 <sup>c</sup>	2.68 $\pm$ 0.07 <sup>de</sup>	39.35 $\pm$ 1.03 <sup>b</sup>
	红布李	798.89 $\pm$ 0.58 <sup>b</sup>	6.75 $\pm$ 0.20 <sup>d</sup>	59.81 $\pm$ 0.76 <sup>a</sup>	9.11 $\pm$ 0.50 <sup>f</sup>	78.56 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>
	黑布李	403.87 $\pm$ 0.16 <sup>d</sup>	15.96 $\pm$ 0.27 <sup>b</sup>	3.18 $\pm$ 0.09 <sup>de</sup>	28.11 $\pm$ 0.83 <sup>b</sup>	12.05 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>
	西梅李	969.52 $\pm$ 23.97 <sup>a</sup>	30.38 $\pm$ 3.28 <sup>a</sup>	25.91 $\pm$ 0.55 <sup>b</sup>	28.28 $\pm$ 0.71 <sup>a</sup>	17.94 $\pm$ 0.57 <sup>d</sup>
	脆红李	263.89 $\pm$ 6.88 <sup>c</sup>	5.65 $\pm$ 0.02 <sup>d</sup>	4.74 $\pm$ 0.08 <sup>d</sup>	3.80 $\pm$ 0.43 <sup>de</sup>	5.70 $\pm$ 0.04 <sup>f</sup>
	江安李	179.26 $\pm$ 8.18 <sup>d</sup>	13.54 $\pm$ 0.41 <sup>bc</sup>	ND	16.20 $\pm$ 0.22 <sup>b</sup>	20.71 $\pm$ 0.81 <sup>c</sup>
	青李	107.54 $\pm$ 0.25 <sup>e</sup>	6.91 $\pm$ 0.06 <sup>d</sup>	ND	ND	ND

9种李子果皮、果肉游离酚组分中, 绿原酸和荭草素含量较高, 咖啡酸含量较低, 红布李因其游离酚含量较高, 所以各单体酚含量都相对较高, 江安李各单体酚含量相对较低。9种李子果皮、果肉结合酚组分中, 原儿茶酸较高, 咖啡酸含量较低, 红布李、西梅李果皮果

肉中各单体酚含量都比较高。Jaiswal等<sup>[26]</sup>还通过液相/多级质谱(LC-MS<sup>n</sup>)联用的方法从美国、中国、欧洲等33种李子多酚中鉴定出阿魏酸、儿茶素、表儿茶素、奎宁酸、七叶苷、槲皮素-3-*O*-鼠李糖苷、咖酰等物质。de Beer等<sup>[11]</sup>从一种日本李子的果皮多酚提取物中鉴定出花色苷、黄酮醇、黄烷-3-醇等。

### 2.5 李子果皮、果肉总酚含量与抗氧化活性的相关性分析

**表6 李子的游离酚、结合酚及单酚含量与抗氧化活性相关性分析**  
**Table 6 Correlations between phenolic contents and antioxidant activity of plum peel and pulp**

指标	果皮				果肉			
	游离酚		结合酚		游离酚		结合酚	
	DPPH自由 基清除力	ORAC值	DPPH自由 基清除力	ORAC值	DPPH自由 基清除力	ORAC值	DPPH自由 基清除力	ORAC值
多酚含量	0.370	0.930**	0.000	0.830**	0.283	0.022	-0.102	0.707*
DPPH自由基清除力	1.00	0.264	1.00	-0.458	1.00	-0.102	1.00	-0.381
ORAC值	0.264	1.00	-0.458	1.00	-0.102	1.00	-0.381	1.00
原儿茶酸含量	-0.026	0.304	-0.121	-0.086	0.509	-0.182	-0.100	-0.248
绿原酸含量	0.523	0.806**	-0.586	0.657	0.022	0.612	0.161	-0.201
咖啡酸含量	-0.025	0.302	-0.543	0.114	0.482	-0.197	-0.243	0.066
香草醛含量	0.477	0.822**	ND	ND	-0.124	0.486	ND	ND
荭草素含量	0.488	0.843**	0.040	0.105	0.146	0.379	0.322	-0.055
芦丁含量	ND	ND	-0.654	0.071	ND	ND	-0.380	0.369
白藜芦醇含量	0.551	0.230	ND	ND	-0.050	0.686*	ND	ND

注：\*.相关性显著( $P<0.05$ )；\*\*.相关性极显著( $P<0.01$ )。

对不同品种李子果皮、果肉各单酚含量与抗氧化活性(DPPH自由基清除力和ORAC值)之间的相关性进行研究,结果见表6。结果表明:在果皮中,多酚含量与ORAC值间有极显著相关性( $P<0.01$ );在果肉中多酚含量只与结合酚ORAC值有极显著相关性( $P<0.01$ ),游离酚含量与ORAC值没有显著相关性;DPPH自由基清除力则与多酚含量、ORAC值无相关性,这可能是因为相关的研究基于不同的评价体系,反应原理、评价的侧重点不同,结论往往会存在较大差异<sup>[27-28]</sup>。多酚含量高的李子具有较强的ORAC,这与李武等<sup>[29]</sup>研究的热带水果多酚提取物的抗氧化和抗增值活性研究中的水果提取物的总酚含量与其ORAC值( $R^2=0.783\ 9$ )有显著相关性的结果相同。相关性分析表明李子果皮、果肉多酚都具有一定的抗氧化活性,同时李子中的抗氧化活性物质可能不止多酚。大部分单体酚与抗氧化能力的相关性较低,但少数单体酚除外,这与李楠等<sup>[30]</sup>研究的14种海棠果实多酚种类及体外抗氧化活性分析的结果一致,且这少部分单体酚都只与ORAC值呈正相关,与DPPH自由基清除能力无相关性。李子果皮游离酚中的绿原酸、香草醛、荭草素与ORAC值达到极显著性相关( $P<0.01$ ),相关系数分别为0.806、0.822、0.843;李子果肉游离酚中的白藜芦醇与ORAC值呈显著性相关( $P<0.05$ ),相关系数为0.686。

### 3 结 论

植物多酚作为一种天然抗氧化剂是近几年的一个研究热点,而目前国内外学者对水果多酚的研究主要集中在葡萄、蓝莓、苹果等一些常见的水果上,对李子多酚的研究还比较少。有研究表明,在美国,李子多酚对水果多酚的贡献率为7.3%<sup>[21]</sup>,仅次于苹果、葡萄、橙子等一些多酚含量高的水果,说明李子多酚具有巨大的开发前景,值得人们进一步开发利用。

本实验以9个不同品种的李子为原料,研究了其果皮、果肉多酚含量与组成,同时通过测定DPPH自由基清除力以及ORAC值对李子果皮、果肉多酚抗氧化活性进行评价。结果表明:9种李子果皮总酚含量范围为111.52~775.88 mg GAE/100 g,果肉总酚含量范围为120.65~301.91 mg GAE/100 g,游离态是李子果皮、果肉多酚的主要存在形式。李子果皮、果肉游离酚主要由原儿茶酸、绿原酸、咖啡酸、香草醛、荭草素、白藜芦醇6种单体酚组成;结合酚主要由原儿茶酸、绿原酸、咖啡酸、荭草素、芦丁5种单体酚组成。体外抗氧化结果表明:9个不同品种的李子果皮、果肉多酚均具有一定的抗氧化活性,DPPH自由基清除IC<sub>50</sub>值范围为4.38~46.46 μg/mL,ORAC值范围为0.24~210.50 μmol TE/g,其中巫山李和黑布李DPPH自由基清除能力较强,红布李ORAC值最高,西梅李ORAC值也最小。对李子总酚含量与抗氧化活性之间的相关性进行研究发现,在不同抗氧化活性评价体系中,李子多酚的抗氧化效果有所不同,李子果皮多酚含量与ORAC值二者间有极显著相关性( $P<0.01$ ),而李子果肉中只结合酚含量与ORAC值有极显著相关性( $P<0.01$ ),与DPPH自由基清除能力没有显著相关性。

以上研究表明,李子多酚含量普遍较高且抗氧化活性强,是植物多酚的良好来源。值得注意的是,李子果皮无论是多酚含量还是抗氧化能活性均强于果肉。所以对李子进行精深加工、综合利用是未来产业发展的重要途径之一。

### 参考文献:

- [1] 张镐京,郗效.药食同源:果品篇[鲜果类(2)][J].中华养生保健,2007(1):40-41.
- [2] 富强,宁景华,李蕴兰.李品种生化分类的初探:几种李果实中糖物质的气相色谱分析[J].沈阳农业大学学报,1993,24(2):148-152.
- [3] 傅维康.“甘酸得适”说李子[J].家庭用药,2011(8):65.
- [4] 李涛.多吃桃李能防糖尿病[J].健康伴侣,2012(9):9.
- [5] LEE S H, LILLEHOJ E P, LILLEHOJ H S, et al. Immunostimulatory effects of oriental plum (*Prunus salicina* Lindl.)[J]. Comparative Immunology Microbiology and Infectious Diseases, 2009, 32(5): 407-417. DOI:10.1016/j.cimid.2007.12.001.
- [6] 凌家庭.抗氧化食品与健康[M].北京:化学工业出版社,2004:2-10;112-123;178-181.



- [7] LIU R H. Whole grain phytochemicals and health[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 46(3): 207-219. DOI:10.1016/j.jcs.2007.06.010.
- [8] WOLFE K, WU X Z, LIU R H. Antioxidant activity of apple peels[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51: 609-614. DOI:10.1021/jf020782a.
- [9] BONILLA F, MAYEN M, MERIDA J, et al. Extraction of phenolic compounds from red grape marc for use as food lipid antioxidants[J]. Food Chemistry, 1999, 66: 209-215. DOI:10.1016/S0308-8146(99)00046-1.
- [10] BOCCO A, CUVELIER M E, RICHARD H, et al. Antioxidant activity and phenolic composition of citrus peel and seed extracts[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46: 2123-2129. DOI:10.1021/jf9709562.
- [11] DE BEER D, STEYN N, JOUBERT E. Enhancing the polyphenol content of a red-fleshed Japanese plum (*Prunus salicina* Lindl.) nectar by incorporating a polyphenol-rich extract from the skins[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(13): 2741-2750. DOI:10.1002/jsfa.5704.
- [12] 陈冠林, 陈松根, 赵颖莹, 等. 33 种水果的总酚含量及其抗氧化能力研究[J]. 食品工业, 2014, 35(9): 264-268.
- [13] 刘冬, 万红霞, 孙海燕, 等. 中国主要水果抑制肝癌HepG2和结肠腺癌Caco-2细胞增殖活性评价[J]. 现代食品科技, 2015, 31(4): 23-28.
- [14] 陈丽. 李子保健果醋饮料的工艺研究[J]. 中国酿造, 2009(4): 164-166.
- [15] 罗军杰, 汪超, 张卫华, 等. 李子果酒澄清技术研究[J]. 湖北农业科学, 2012(21): 4852-4855.
- [16] ADOM K K, LIU R H. Antioxidant activity of grains[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(21): 6182-6187. DOI:10.1021/jf0205099.
- [17] HUNG P V, MORITA N. Distribution of phenolic compounds in the graded flours milled from whole buckwheat grains and their antioxidant capacities[J]. Food Chemistry, 2008, 109: 325-331. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.12.060.
- [18] ALVAREZ L, WIJNGAARD H, ARENDT E K, et al. Polyphenol composition and *in vitro* antioxidant activity of amaranth, quinoa buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking[J]. Food Chemistry, 2010, 119: 770-778. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.07.032.
- [19] VAHER M, MATSO K, LEVANDI T, et al. Phenolic compounds and the antioxidant activity of the bran, flour and whole grain of different wheat varieties[J]. Procedia Chemistry, 2010, 2(1): 76-82. DOI:10.1016/j.proche.2009.12.013.
- [20] WOLFE K L, KANG Xinmei, HE Xiangjiu, et al. Cellular antioxidant activity of common fruits[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56: 8418-8426. DOI:10.1021/jf801381y.
- [21] EKLUND P C, LÅNGVIK O K, WÄRNÄ J P, et al. Chemical studies on antioxidant mechanisms and free radical scavenging of lignans[J]. Organic and Biomolecular Chemistry, 2005, 3(18): 3336-3347. DOI:10.1039/B506739A.
- [22] SHIMADA K, FUJIKAWA K, YAHARA K, et al. Antioxidative properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1992, 40(6): 945-948. DOI:10.1021/jf00018a005.
- [23] KUMARAN A, KARUNAKARAN R J. Antioxidant and free radical scavenging activity of anaqueous extract of *Coleus aromaticus*[J]. Food Chemistry, 2006, 97(1): 109-114. DOI:10.1016/j.foodchem.2005.03.032.
- [24] 杨荣华, 田迪英. 10 种含花色苷果蔬抗氧化活性的比较[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(4): 113-116. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2004.04.027.
- [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): 4619-4626. DOI:10.1021/jf010586o.
- [26] JAISWAL R, KARAKÖSE H, RÜHMANN S, et al. Identification of phenolic compounds in plum fruits (*Prunus salicina* L. and *Prunus domestica* L.) by high-performance liquid chromatography/tandem mass spectrometry and characterization of varieties by quantitative phenolic fingerprints[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(49): 12020-12031. DOI:10.1021/jf402288j.
- [27] 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(4): 38-42.
- [28] SUN Ting, HO Chitang. Antioxidant activities of buckwheat extracts[J]. Food Chemistry, 2005, 90: 743-749. DOI:10.1016/j.foodchem.2004.04.035.
- [29] 李武, 李艳君, 杨瑞丽. 热带水果多酚提取物的抗氧化和抗增值活性研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(10): 2383-2387. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2013.10.007.
- [30] 李楠, 师俊玲, 王昆. 14 种海棠果实多酚种类及体外抗氧化活性分析[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 53-58. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201405011.